

Tym, którzy nie skorzystają z rezerw energii zgromadzonych w ciągu 2 miliardów lat

Wstęp

O czym jest ta książka?

Zależy mi na zredukowaniu brytyjskiej emisji nonsensów – częściej gadani-ny o zrównoważonej energii. Wszyscy mówią, że pozbycie się paliw kopal-nych jest ważne i wszystkich nas zachęca się, aby „zrobić różnicę”, jednak wiele z rzeczy, które mają ją zrobić, zupełnie nie składa się w sensowną całość.

Emisja nonsensów utrzymuje się na wysokim poziomie, bo ludzie dają się ponieść emocjom (na przykład w kwestii farm wiatrowych i energii jądrowej), a nikt nie mówi o liczbach. A nawet jeśli pojawiają się liczby, to są dobierane tak, aby wyglądały imponująco, robiły wrażenie i pozwalały wygrywać punkty w argumentacji, zamiast służyć rzeczowej, opartej na faktach dyskusji.

To książka otwarcie mówiąca o liczbach. Celem jest ominięcie pułapek nonsensów i poprowadzenie czytelnika do działań, które naprawdę uczynią różnicę i strategii, które złożą się w sensowną całość.

To jest darmowa książka

Nie napisałem tej książki, aby zarobić pieniądze. Napisałem ją, ponieważ zrównoważone sposoby wytwarzania energii są ważne. Jeśli chcesz mieć tę książkę za darmo na własny użytek, nie ma problemu – jest dostępna w Internecie pod adresem: www.withouthotair.com (ANG). Wersja polska książki jest dostępna na stronach eko.org.pl/energia oraz ziemianarozdrozu.pl [red.].

Ta książka jest darmowa także w szerszym sensie: możesz bezpłatnie wykorzystywać *cały* materiał z tej książki, z *wyłączeniem* komiksów i fotografii, które mają podanego autora, zgodnie z wytycznymi Creative Commons Attribution-Non-Commercial-Share-Alike 2.0 UK: England & Wales Licence. (Komiksy i fotografie są wyłączone, gdyż autorzy dali mi prawa tylko do umieszczenia ich prac w książce, a nie do dalszego udostępniania w oparciu o tę licencję). Szczególnie zachęcam do wykorzystywania materiałów dla celów edukacyjnych. Moja strona internetowa zawiera osobne pliki wysokiej rozdzielczości każdego z umieszczonych w książce rysunków.

Jak pracować z tą książką

Niektóre rozdziały rozpoczynają się cytatem. Nie zakładaj, że to, że cytuję jakąś myśl, oznacza, że zgadzam się z nią. Pomyśl o tych cytatach raczej jak o prowokacjach i hipotezach, które będą weryfikowane.

Wiele początkowych rozdziałów (numerowane 1, 2, 3, . . .) mają powiązane z nimi dłuższe rozdziały techniczne (A, B, C, . . .). Te rozdziały tech-

niczne zaczynają się na stronie 269.

Na końcu każdego rozdziału znajdują się dalsze notki i wskazania źródeł i odnośników. Uważam, że odnośniki, kiedy zaśmiecają główny tekst, tylko przeszkadzają w lekturze – nie ma więc odnośników w tekście. Jeśli uwielbiasz odnośniki, możesz je dodać – prawie każde znaczące stwierdzenie będzie miało powiązaną z nim notkę na końcu rozdziału, ze wskazaniem źródła lub informacją uzupełniającą.

Tekst zawiera również hiperłącza do zasobów internetowych. Gdy hiperłącze jest potwornie długie, używam tzw. usługi skracania linków TinyURL, i umieszczam skrótowy kod w tekście, taki jak np. [yh8xse] – oraz pełny wskaźnik na końcu książki na stronie 371. yh8xse to skrót adresu URL, w tym przypadku: <http://tinyurl.com/yh8xse>. Kompletna lista wszystkich adresów URL w książce znajduje się w <http://tinyurl.com/yh8xse>.

Liczę na informacje zwrotne i poprawki. Zdaję sobie sprawę, że mnie też mogą się przytrafić błędy, a we wczesnych wersjach książki niektóre moje liczby były chybione nawet o czynnik 2. Mam nadzieję, że pozostałe błędy są mniejsze, ale na pewno będę aktualizował dane zawsze, gdy w procesie pogłębiania swojej wiedzy o zrównoważonej energii poznam nowe fakty.

Jak cytować tę książkę:

David J.C. MacKay *Sustainable Energy – without the hot air*.

UIT Cambridge, 2008. ISBN 978-0-9544529-3-3. Dostępna nieodpłatnie w Internecie pod adresem www.withouthotair.com (ANG),

David J.C. MacKay *Zrównoważona energia – bez bicia piany*

Fundacja EkoRozwoju, 2011, 978-83-923848-1-6. Dostępna bezpłatnie w Internecie pod adresem www.ziemianarozdrozu.pl (PL).



O autorze

David MacKay – profesor na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Cambridge. Studiował nauki przyrodnicze w Cambridge, a następnie uzyskał stopień doktorski w obszarze obliczeń i systemów neuronowych w Caltech. Powrócił do Cambridge jako pracownik naukowy Royal Society w Darwin College. Jest znany w środowisku międzynarodowym z badań dotyczących systemów uczących się, teorii informacji i komunikacji systemów. Opracował interfejs programowy Dasher. Wykłada fizykę w Cambridge od 1995 roku. Od 2005 roku znaczną część swojego czasu poświęca nauczaniu na temat energii. Jest członkiem Royal Society.

Niecały rok po opublikowaniu tej książki David MacKay został mianowany na stanowisko Głównego Doradcy Naukowego Departamentu Energii i Zmian Klimatu.

O tłumaczu

Marcin Popkiewicz – redaktor naczelny i główny autor materiałów portalu www.ziemianarozdrozu.pl.

Autor i tłumacz publikacji dotyczących zmian klimatu, energii i zrównoważonego rozwoju.

Autor osobistego kalkulatora emisji dwutlenku węgla, będącego oficjalnym narzędziem konferencji ONZ COP 14.

Koordynator Zespołu ds. Zmian Klimatu w Fundacji Nasza Ziemia.

Współpraca

Marta Śmigrowska – prowadzi autorski program telewizyjny „Eko Reporter”, pisze artykuły prasowe o energetyce oraz zmianach klimatu.

Obserwatorka negocjacji klimatycznych ONZ, komentatorka polityki energetyczno-klimatycznej Unii Europejskiej.

O fundacji

Fundacja EkoRozwoju od 1991 roku działa na rzecz rozwoju w zgodzie z naturą. FER koncentruje się na tematyce efektywnego wykorzystania zasobów (kwestie związane z energią, wodą i odpadami), ochronie przyrody i krajobrazu, edukacji ekologicznej oraz wspiera rynek usług i produktów przyjaznych środowisku. FER działa w partnerstwie z samorządami, organizacjami pozarządowymi i biznesem oraz współpracuje na arenie międzynarodowej.

www.fer.org.pl



Autor, lipiec 2008

Fot. David Stern

1 Motywacje

Żyjemy w czasach, w których emocje i uczucia liczą się bardziej od prawdy, nauka zaś jest nagnimnie ignorowana.

James Lovelock

Ostatnio przeczytałem dwie książki. Pierwsza napisana była przez fizyka, druga przez ekonomistę. W *Out of gas. The End of the Age of Oil* (Skończyła się benzyna. Koniec Ery Ropy) David Goodstein, fizyk pracujący dla Caltech, opisuje zbliżający się kryzys energetyczny spowodowany końcem Ery Ropy. Autor przewiduje, że nadejdzie on już wkrótce i wbrew przeważającej opinii da o sobie znać wcale nie wówczas, gdy wypompowana zostanie ostatnia kropla ropy, ale kiedy wielkość jej wydobycia przestanie nadążać za popytem – być może już w roku 2015 lub 2025. Co więcej, nawet gdyby jakimś cudownym sposobem udało nam się całkowicie zrezygnować z paliw kopalnych (powiedzmy poprzez wykorzystanie energii nuklearnej), to według Goodsteina, już w ciągu około 20 lat zwyczajnie zastąpilibyśmy jeden kryzys drugim – tym razem atomowym, gdyż zasoby uranu również są surowcem nieodnawialnym.

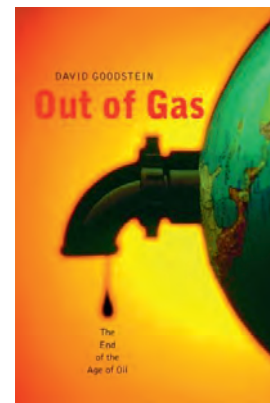
Natomiast w *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World* (Sceptyczny ekolog: Mierzenie prawdziwego stanu świata) Bjørn Lomborg kreśli zupełnie inny obraz rzeczywistości. Według Lomborga „wszystko jest w porządku”, ba! nawet lepiej niż w porządku, ponieważ „sytuacja zmierza ku lepszemu”; co więcej „wcale nie zmierzamy w kierunku wielkiego kryzysu energetycznego” i „wciąż posiadamy mnóstwo zasobów energetycznych”.

Zastanówmy się, jak dwóch bystrych ludzi mogło dojść do tak krańcowo różnych wniosków? Aby to zrozumieć, postanowiłem zbadać sprawę u samych źródeł.

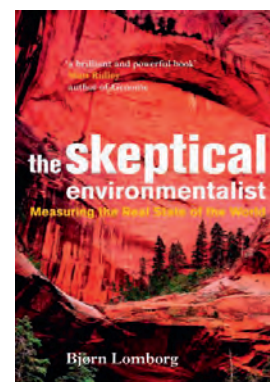
Brytyjskie media zaczęły żywiej interesować się problemem energii w 2006 roku. Globalne zmiany klimatu oraz rosnące ceny gazu ziemnego, które – bagatela! – potroiły się na przestrzeni zaledwie sześciu lat, wciąż podsycaly dyskusję na tym polu i prowokowały kolejne pytania. W jaki sposób Brytyjczycy powinni zaspokoić swoje potrzeby energetyczne? A reszta świata?

„Energetyka wiatrowa czy nuklearna?” dla przykładu. Większego zróżnicowania poglądów wśród skądinąd bystrych ludzi trudno chyba sobie wyobrazić. Podczas dyskusji na temat dalszego rozwoju energetyki atomowej Michael Meacher, były minister środowiska Wielkiej Brytanii, powiedział, że „jeśli zamierzamy zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych o 60% [...] do roku 2050, to nie ma innego sposobu na osiągnięcie tego celu, jak poprzez wykorzystanie energii odnawialnej”. Z kolei Sir Bernard Ingham, były urzędnik państwowy, opowiadający się za rozwojem energetyki jądrowej, stwierdził: „Każdy, kto uważa, że dzięki odnawialnym źródłom energii uda się zapełnić lukę [energetyczną], żyje w zupełnie nierealnym świecie i jest, według mnie, wrogiem społeczeństwa”.

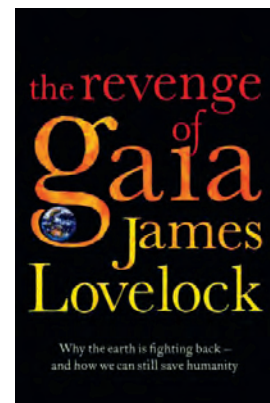
Podobne rozbieżności poglądów można usłyszeć także wśród samych organizacji ekologicznych. Zapewne każdy z nas zgadza się co do tego, że *coś* trzeba natychmiast zrobić. Tylko co? Jonathon Porritt, przewodniczący Komisji ds. Zrównoważonego Rozwoju, pisze: „Nie ma dziś żadnego uzasadnienia dla poświęcania czasu planom na rzecz rozwoju nowego programu energetyki nuklearnej, zaś [...] każda taka propozycja jest niezgodna z [rządową] strate-



Out of gas
Davida Goodsteina (2004)



The Skeptical Environmentalist
Bjorna Lomborga (2001)



The revenge of Gaia
Jamesa Lovelocka (2006)
©Allen Lane

gią zrównoważonego rozwoju” oraz „niejądrowa strategia może i powinna być wystarczająca do osiągnięcia redukcji emisji CO₂ oraz do zapewnienia bezpiecznego dostępu do niezawodnych źródeł energii”. Dla odmiany, ekolog James Lovelock pisze w książce *The Revenge of Gaia* (Zemsta Gai): „Obecnie jest już zbyt późno na zrównoważony rozwój”; z jego punktu widzenia energia pochodząca z rozszczepienia atomu – choć nie zalecana jako długoterminowe panaceum dla naszej zagrożonej planety – jest *de facto* „jedynym skutecznym lekarstwem, jakim obecnie dysponujemy”. Łądowe turbiny wiatrowe są „jedynie... gestem, który ma pokazywać zieloną politykę” [rządzących].

U podstaw tej polemiki leżą liczby. Jaką ilość energii może dostarczyć dane źródło i przy jakich kosztach ekonomicznych i społecznych oraz przy jakich zagrożeniach? Jednak w dyskusjach rzadko przytacza się liczby. Podczas debat publicznych ludzie zazwyczaj mówią: „Inwestowanie w energetykę atomową to wyrzucanie pieniędzy do kosza” albo: „Dysponujemy ogromnymi zasobami wiatru i fal morskich”. Problem z tego rodzaju językiem polega na tym, że nie daje on nam wystarczającej wiedzy na temat tego, co właściwie znaczy owo ogromne. My zaś potrzebujemy wiedzieć, jak porównać jedno „ogromne” z innym „ogromnym”, a zwłaszcza z *naszym ogromnym zużyciem energii*. Aby móc to porównywać, potrzebujemy liczb, a nie przymiotników.

Gdy używamy liczb, ich prawdziwe znaczenie często ginie, gdy skala jest zbyt wielka. Dobiera się liczby tak, by zadziwić lub zdobyć punkty w dyskusji, a nie po to, aby informować. „Mieszkańcy Los Angeles pokonują codziennie 227 milionów kilometrów, czyli odległość z Ziemi do Marsa”; „Każdego roku 11 milionów hektarów puszczy tropikalnej znika bezpowrotnie z powierzchni Ziemi”; „Każdego roku wyrzucamy do morza ponad 6 milionów ton śmieci”; „Brytyjczycy wyrzucają 2,6 miliarda kromek chleba rocznie”; „Makulatura składowana każdego roku na wysypiskach w Wielkiej Brytanii mogłaby zapełnić 103 448 piętrowych autobusów”.

Gdyby zebrać wszystkie nieskuteczne pomysły na rozwiązanie kryzysu energetycznego i ułożyć je jeden na drugim, to sięgnęłyby one do Księżyca i z powrotem... To taka dygresja.

Jaki jest skutek braku znaczących liczb i faktów? Toniemy w powodzi niepoliczalnego nonsensu. BBC serwuje porady, w jaki sposób każdy może dołożyć swą skromną cegiełkę do zbawienia naszej planety, na przykład poprzez „odłączenie ładowarki od sieci, gdy komórka już się naładuje”. Kiedy jednak uświadomimy sobie, że w rzeczywistości ładowarki do telefonów wcale nie zajmują pierwszego miejsca na liście najbardziej energochłonnych urządzeń, to mantra „Każda mała rzecz się liczy” przestaje mieć sens. Każda mała rzecz się liczy? Bardziej realistyczną mantrą byłoby raczej:

Jeśli każdy zrobi odrobinę, to zyskamy tylko odrobinę.

Ten codzienny zestaw nonsensów powiększają wielkie koncerty. Wciąż słyszymy, jakie są wspaniałe, gdy na każdym kroku pomagają nam dokładać naszą małą cegiełkę. Na swojej stronie internetowej BP świętuje redukcję dwutlenku węgla, którą ma nadzieję osiągnąć poprzez zmianę farby do malowania swoich tankowców. Czy ktokolwiek daje się na to nabrać? Oczywiście, każdy wpadnie na to, że to nie kwestia malowania statków, ale jego ładunku jest tym, co wymaga uwagi, jeśli emisje CO₂ mają zostać znacząco zmniejszone. BP oferuje ponadto internetową usługę rozgrzeszającą z emisji CO₂: www.targetneutral.com.

Dzięki niej każdy może ponoć zneutralizować emisję dwutlenku węgla i to za całkiem znośną kwotę 40 funtów rocznie od osoby. Jak to możliwe? Gdyby rzeczywisty koszt powstrzymania zmian klimatycznych wynosił 40 funtów rocznie na obywatela, to rząd brytyjski mógłby załatwić sprawę za pomocą nic nieznaczących w skali budżetu drobnych!

Jeszcze bardziej naganne wydają się praktyki firm wykorzystujących troskę ludzi o środowisko poprzez oferowanie produktów takich, jak: „baterie zasilane wodą”, „biodegradowalne telefony komórkowe”, „przenośne turbiny wiatrowe przyczepiane do ramienia” czy temu podobny kit.

Osoby promujące energetykę odnawialną również wprowadzają w błąd, używając na przykład takich argumentów: „przybrzeżne elektrownie wiatrowe mogą zaopatrzyć w energię wszystkie domy w Wielkiej Brytanii”, zaś później dodają, że „nowe elektrownie jądrowe mogą jedynie w niewielkim stopniu pomóc w walce ze zmianami klimatu”, ponieważ 10 takich elektrowni „zredukuje emisję CO₂ zaledwie o 4%”. Taka argumentacja wprowadza ludzi w błąd, gdyż obydwie przykłady odnoszą się do innych danych – raz jest to liczba zasilanych prądem domów, za drugim zaś razem redukcja emisji. Prawda jest taka, że ilość prądu generowana przez wspaniałe wiatraki, zdolne zaopatrzyć w energię wszystkie domy w Wielkiej Brytanii, jest dokładnie taka sama, jak ta generowana przez 10 elektrowni atomowych! Zasilanie wszystkich domów w Wielkiej Brytanii jest bowiem źródłem dokładnie 4% jej emisji.

Być może najbardziej winni dezinformacji są ci, którzy w rzeczywistości powinni wiedzieć lepiej – media, które czasem wręcz promują nonsens – na przykład „New Scientist” ze swoim artykułem o „napędzanym wodą samochodzie”^{*}.

W sytuacji, gdy ludzie nie rozumieją danych liczbowych, gazetom, aktywistom, koncernom oraz politykom zabiegają takie uchodzą na sucho.

Potrzebujemy liczb podanych w sposób prosty i zrozumiały, a także łatwych do porównania i zapamiętania. Dopiero mając w rękę rzetelną informację liczbową, będziemy w stanie odpowiedzieć na pytania:

1. Czy kraj taki jak Wielka Brytania może normalnie funkcjonować, korzystając jedynie ze swoich własnych odnawialnych źródeł energii?
2. Czy udałoby się powstrzymać kryzys energetyczny, gdyby każdy przykręcił ogrzewanie w swoim domu o 1 °C, jeździł mniejszym samochodem i wyjmował z gniazdka ładowarkę do telefonu, gdy tylko ten się naładuje?
3. Czy podatek nałożony na paliwa powinien znacząco wzrosnąć? Czy dopuszczalna prędkość na drogach powinna być o połowę mniejsza?
4. Czy ktoś, kto broni energetyki wiatrowej i wypowiada się przeciwko elektrowniom atomowym, staje się automatycznie „wrogiem publicznym nr 1”?
5. Czy jeśli zmiany klimatu są „zagrożeniem większym niż terroryzm”, to rząd nie powinny wpisać do kodeksów karnych „gloryfikowania podróży” i wprowadzić praw przeciwko „promowaniu konsumpcji”?
6. Czy przerzucenie się na „bardziej zaawansowane technologie” pozwoli nam wyeliminować emisje dwutlenku węgla bez zmiany naszego stylu życia?
7. Czy powinno się zachęcać ludzi, by jedli więcej posiłków wegetariańskich?
8. Czy na Ziemi jest sześć razy więcej ludzi niż być powinno?

^{*} Więcej informacji na ten temat w przypisach na końcu I rozdziału. (Na końcu każdego rozdziału znajdują się odnośniki do źródła cytatów, literatury, dzięki której można poszerzyć swoją wiedzę na dany temat oraz szczegółów argumentacji. By zapobiec rozpraszaniu Czytelnika, nie będę już więcej zamieszczał gwizdek w tekście).



Fot. 1.1. Ulotka Greenpeace, która dotarła do mnie, w stercie spamu, w maju 2006 roku. Czy osławione wiatraki mogą produkować tyle prądu, by zastąpić znieawidzone elektrownie atomowe?

Dlaczego rozmawiamy o polityce energetycznej?

Dyskusje wokół polityki energetycznej napędzane są przez trzy kluczowe kwestie.

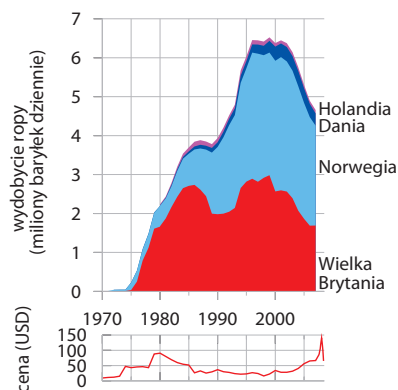
Po pierwsze, zasoby paliw kopalnych są ograniczone. Wydaje się prawdopodobne, że tania ropa (na której jeżdżą nasze samochody i ciężarówki) oraz tani gaz (dzięki któremu ogrzewamy wiele z naszych budynków) skończą się jeszcze za naszego życia. Dlatego właśnie poszukujemy alternatywnych źródeł energii. Skoro paliwa kopalne są cennym surowcem, przydatnym przy produkcji plastiku oraz wszelkich rodzajów innych zmyślnych materiałów, być może powinniśmy zachować je do lepszych celów niż zwykłe puszczanie ich z dymem?

Po drugie, zależy nam na bezpieczeństwie dostaw energii. Nawet jeśli paliwa kopalne nadal są dostępne gdzieś na świecie, może powinniśmy się od nich uniezależnić, by nie wystawiać bezpieczeństwa naszej gospodarki na kaprysy innych krajów, nie zawsze godnych zaufania (mam nadzieję, że wyczuliście ironię w moich słowach). Na rysunku 1.2 wyraźnie widać, że mamy już z sobą szczyt wydobycia „naszych” zasobów paliw kopalnych. Problem bezpieczeństwa dostaw dotyczy Wielkiej Brytanii szczególnie mocno ze względu na jej rosnącą „dziurę energetyczną”. Znacząca liczba starych elektrowni węglowych oraz atomowych zostanie zamknięta w przyszłym dziesięcioleciu (rys. 1.3). Istnieje zatem realne zagrożenie, że zapotrzebowanie na prąd będzie czasem przekraczać możliwości elektrowni, o ile nie zostaną na czas wprowadzone odpowiednie środki zaradcze.

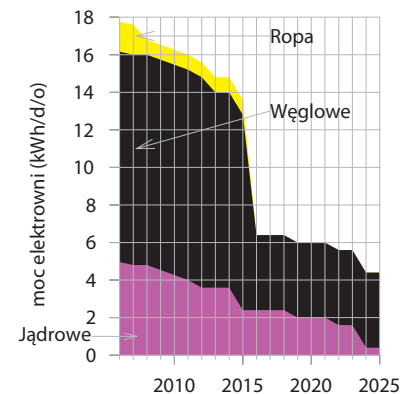
Po trzecie, jest bardzo prawdopodobne, że spalanie paliw kopalnych powoduje zmiany klimatu. Zmiany klimatu składa się na karb różnych ludzkich działań, jednak największy udział ma tu nasilenie się efektu cieplarnianego, wywoływane przez wzrost koncentracji dwutlenku węgla (CO_2) w atmosferze. Większość antropogenicznego CO_2 pochodzi ze spalania paliw kopalnych, a głównym powodem, dla którego spalamy paliwa kopalne, jest właśnie produkcja energii. Tak więc, aby rozwiązać problem zmian klimatycznych, musimy znaleźć nowe sposoby pozyskiwania energii. Problem klimatyczny jest przede wszystkim problemem energetycznym.

Niezależnie od tego, które z tych problemów uważasz za istotne, potrzebne są liczby oraz zestaw działań, który pozwoli na ich rozwiązanie.

Dwie pierwsze kwestie są jak najbardziej egoistycznymi powodami, dla których powinniśmy drastycznie ograniczyć zużycie paliw kopalnych. Powód trzeci – zmiany klimatu – jest bardziej altruistyczny, gdyż ciężar zmian klimatycznych nie będzie ponoszony przez nas, lecz przez przyszłe pokolenia i to przez setki lat. Niektórzy uważają, że zmiany klimatu to nie ich problem, mówią: „I co to da, że coś tam zrobię? Emisje Chin są przecież poza kontrolą!”. Zamierzam więc teraz przedyskutować kwestię zmian klimatu trochę głębiej, gdyż podczas pisania tej książki dowiedziałem się wielu interesujących faktów, które rzuciły światło również na pytania dotyczące zagadnień etycznych. Jeśli nie interesują Cię zmiany klimatu, możesz przerzucić kilka stron i od razu przejść do następnego rozdziału na stronie 30.



Rys. 1.2. Czy „nasze” zasoby paliw kopalnych się kończą? Całkowite wydobycie ropy naftowej z Morza Północnego oraz skorygowane o inflację ceny ropy w dolarach za baryłek.

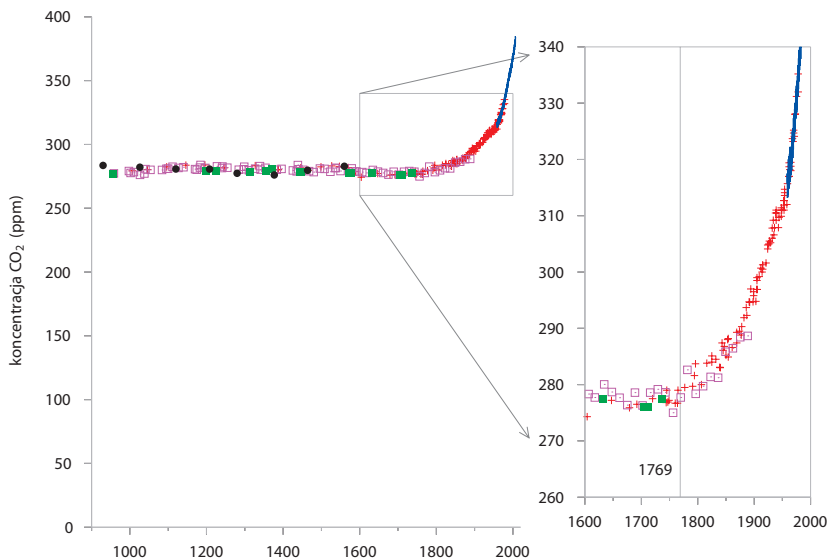


Rys. 1.3. „Dziura energetyczna” spowodowana zamykaniem starych brytyjskich elektrowni, prognozowana przez concern energetyczny EdF. Wykres przedstawia przewidywaną całkowitą moc elektrowni atomowych, węglowych oraz naftowych w kilowatogodzinach na osobę na dzień. Całkowita moc oznacza maksymalną energię możliwą do dostarczenia z danego źródła.

Motywacja związana ze zmianami klimatu

Argumentacja związana ze zmianami klimatu opiera się o trzy podstawowe stwierdzenia:

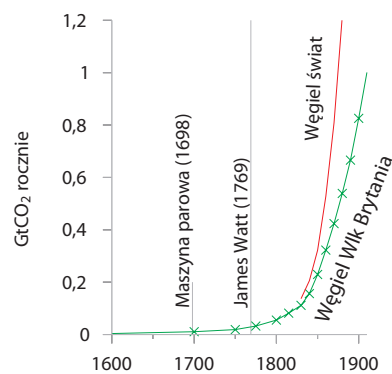
1. Spalanie paliw kopalnych powoduje wzrost koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze.
2. Dwutlenek węgla jest gazem cieplarnianym.
3. Nasilenie efektu cieplarnianego powoduje wzrost średniej temperatury na Ziemi (oraz ma szereg innych następstw).



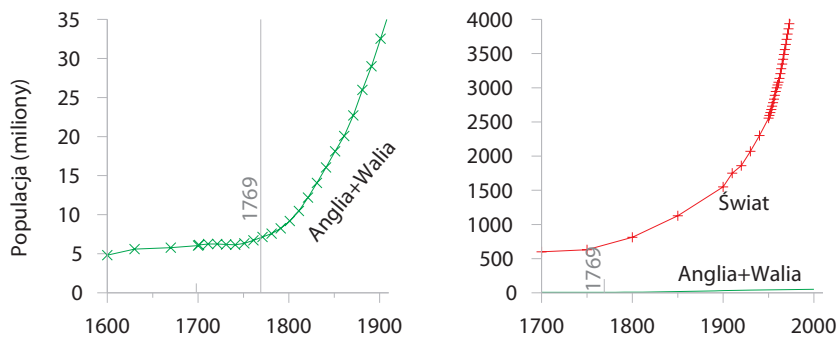
Zacznijmy od tego, że stężenie dwutlenku węgla stale rośnie. Rys. 1.4 przedstawia pomiary stężenia CO_2 w powietrzu od roku 1000 do chwili obecnej. Niektórzy „sceptycy” twierdzą, że obecne zmiany są zjawiskiem naturalnym. Czy za „sceptyka” powinniśmy zatem uznać osobę, która nawet nie spojrzała na dane? Czy nie uważasz, że prawdopodobnie *coś* wydarzyło się między rokiem 1800 a 2000? Coś, co nie było procesem naturalnym, obecnym w poprzednim tysiącleciu?

Coś rzeczywiście miało miejsce. Nazywamy to dzisiaj rewolucją przemysłową. Zaznaczyłem na wykresie rok 1769, w którym James Watt opatentował maszynę parową. Owszem, pierwszy działający silnik parowy został wynaleziony w 1698 roku, znacznie wydajniejszy silnik Watta na dobre rozpoczął rewolucję przemysłową. Jednym z pierwszych zastosowań maszyny parowej było wypompowywanie wody z kopalni węgla kamiennego. Rys. 1.5 ukazuje wydobycie węgla w Wielkiej Brytanii od roku 1769; wykres przedstawia produkcję węgla wyrażoną w miliardach ton CO_2 uwolnionych do atmosfery podczas spalania węgla. W roku 1800 węgiel był używany do produkcji żelaza, łodzi, ogrzewania budynków, napędzania lokomotyw oraz innych maszyn i oczywiście do zasilania pomp, które umożliwiały coraz większe wydobycie węgla z wnętrza wzgórz Anglii i Walii. Można powiedzieć, że Brytyjczycy zostali szczególnie hojnie obdarzeni „czarnym złotem” – na samym początku rewolucji przemysłowej zawartość węgla w złożach zalegających pod Wielką Brytanią była mniej więcej taka sama, jak obecna zawartość węgla w ropie naftowej pod Arabią Saudyjską.

Rys. 1.4. Koncentracja dwutlenku węgla (CO_2) w cząsteczkach na milion [ang. ppm – *parts per million* – red.] dla ostatnich 1100 lat, mierzona na podstawie bąbelków powietrza uwięzionego w rdzeniach lodowych (do roku 1977) i bezpośrednio (po roku 1958). Wygląda na to, że pomiędzy rokiem 1800 a 2000 „coś” się zmieniło. Zaznaczyłem rok 1769, w którym James Watt opatentował maszynę parową (pierwsza działająca maszyna parowa została wynaleziona 70 lat wcześniej, w roku 1698, silnik Watta był jednak znacznie wydajniejszy).

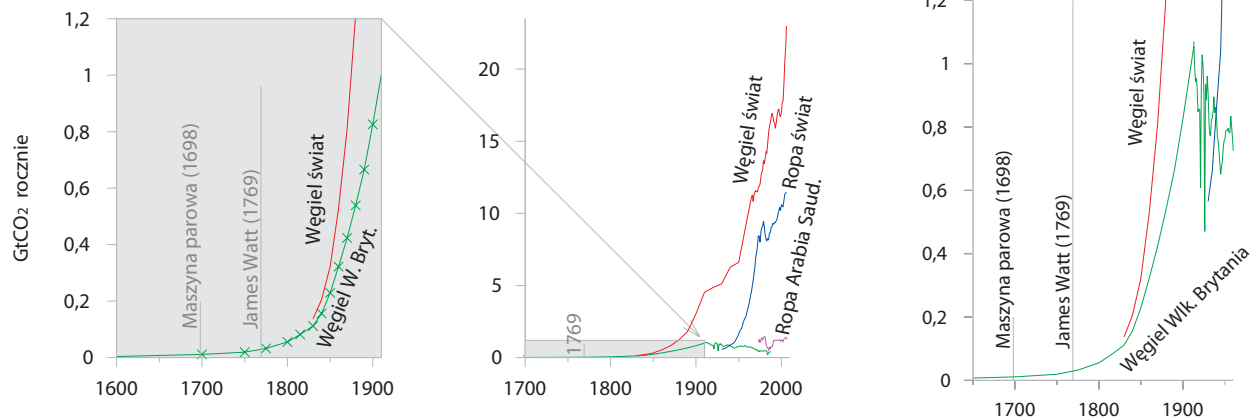


Rys. 1.5. Historia wydobycia węgla w Wielkiej Brytanii i na świecie w latach 1600–1910. Skala produkcji jest przedstawiona w miliardach ton CO_2 rocznie – niezrozumiała jednostka, przyznaję, ale już niedługo ją spersonalizujemy. W miarę jak rewolucja przemysłowa rozprzestrzeniła się, reszta świata poszła w ślady Wielkiej Brytanii. Rys. 1.6 pokazuje brytyjską oraz światową produkcję węgla w skali takiej samej jak na rysunku 1.5, ale przesuniętej o 50 lat.



W ciągu trzydziestu lat (1769–1800) roczne wydobywanie węgla w Wielkiej Brytanii wzrosło dwukrotnie; kolejny trzydziestoletni okres (do roku 1830) znów „zaowocował” podwojeniem; następne zdublowanie miało już miejsce w ciągu dwudziestu lat (do roku 1850), a dalsze znów dwadzieścia lat później (do 1870 roku). Dzięki tak ogromnym zasobom węgla kolory Wielkiej Brytanii zdominowały znaczną część mapy świata. Dobrobyt, który panował wtedy w Anglii oraz Walii, zaowocował stuleciem bezprecedensowego wzrostu populacji.

Brytyjskie wydobywanie węgla osiągnęło szczyt w roku 1910, ale wydobywanie światowe rosło nadal, podwajając się co 20 lat. Trudno jest przedstawić historię światowej produkcji węgla na jednym wykresie. By w tej samej skali pokazać, co stało się w ciągu następnych 50 lat, potrzebowałbym strony długiej na metr. Aby poradzić sobie z tym problemem, możemy przeskalować pionową oś wykresu:



albo możemy niejednolicie ścisnąć oś pionową, dzięki czemu zarówno małe, jak i duże ilości będą widoczne jednocześnie na tym samym wykresie. Dobrym sposobem na osiągnięcie takiego efektu jest użycie skali logarytmicznej i ten właśnie sposób wykorzystałem w dwóch wykresach (rys. 1.7) na dole strony 17. W skali logarytmicznej każdy kolejny punkt na osi pionowej ma wartość o rząd wielkości większą (od 1 do 10, od 10 do 100, od 100 do 1000), ale odległość pomiędzy kolejnymi punktami jest równa. W tej skali wielkości, która z każdym rokiem rośnie o stałą liczbę procentów (nazywamy to „wzrostem wykładniczym”), wygląda jak linia prosta. Wykresy logarytmiczne świetnie obrazują, czym jest wzrost.

Rys. 1.6. Co wydarzyło się później? Historia wydobywania węgla w Wielkiej Brytanii i na świecie od roku 1650 do 1960, w tej samej skali co na rysunku 1.5.

O ile zwykle wykresy na rysunkach na stronie 14 i 15 przekazują wiadomość, że brytyjska oraz światowa produkcja węgla znacząco wzrosły oraz że znacząco wzrosła też wielkość populacji, to jednak trudno z nich odczytać względne stopy wzrostu. Skala logarytmiczna umożliwia wygodne porównywanie stóp wzrostu. Patrząc na nachylenie krzywej populacji, możemy zobaczyć na przykład, że stopa wzrostu światowej populacji była w ciągu ostatnich 50 lat trochę wyższa niż w Anglii i Walii w roku 1800.

Między rokiem 1769 a 2006 światowe roczne wydobycie węgla wzrosło 800-krotnie i nadal rośnie. Inne paliwa kopalne również są wydobywane na dużą skalę – środkowy wykres na rysunku 1.7 przedstawia wydobycie ropy, jednakże pod względem emisji CO₂, nadal króluje węgiel.

Spalanie paliw kopalnych jest podstawową przyczyną wzrostu stężenia CO₂ w atmosferze. To fakt, ale... zaraz, zaraz, coś słyszę... Tak, to nieustające szeptki grupy sceptyków klimatycznych. Jakie jest ich zdanie na ten temat? Oto wypowiedź Dominica Lawsona, autora kolumny w „The Independent”:

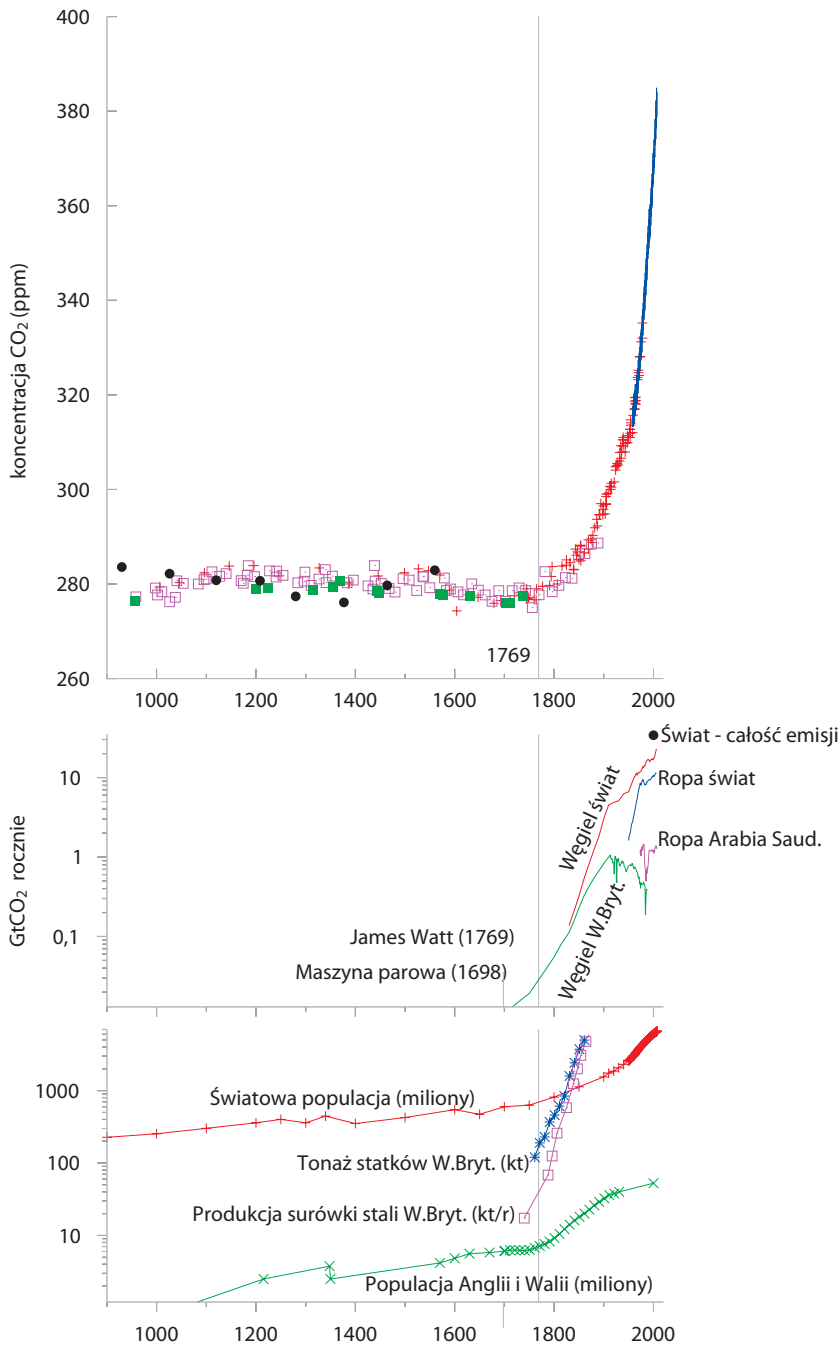
Spalanie paliw kopalnych powoduje emisję około **siedmiu miliardów ton** CO₂ do atmosfery rocznie, co wygląda na całkiem sporo. Pamiętajmy jednak, że biosfera i oceany emitują odpowiednio około 1900 miliardów ton i **36 000 miliardów ton** CO₂ do atmosfery rocznie – [...] to dlatego niektórzy z nas są sceptycznie nastawieni do nacisku, jaki kładzie się na wpływ spalania paliw kopalnych przez człowieka na efekt cieplarniany. Redukowanie antropogenicznych emisji CO₂ jest objawem megalomanii, wyolbrzymianiem znaczenia ludzkich działań. Politycy nie mają wpływu na pogodę.

Mógłbym poświęcić wiele miejsca sceptykom klimatycznym, przy czym nie wszystko, co mówią, jest stekiem bzdur, ale tego nie zrobię. Niemniej jednak nieodpowiedzialne dziennikarstwo Dominica Lawsona i jemu podobnych zasługuje na komentarz.

Pierwszym błędem Lawsona jest to, że wszystkie liczby, które podał (7, 1900 i 36 000), są nieprawdziwe. Poprawne liczby to odpowiednio: 26, 440 i 330. Mając w pamięci te dane, zajmijmy się głównym zarzutem Lawsona, względnie małym udziałem emisji wywołanych przez człowieka.

To prawda, że strumień emisji CO₂ pochodzenia naturalnego jest większy niż strumień emisji, który dokładaliśmy od siebie przez ostatnie 200 lat, gorliwie spalając paliwa kopalne. Natomiast to, co budzi zastrzeżenia to absolutnie mylne obliczanie ogromnych naturalnych przepływów CO₂ do atmosfery bez wspomnienia o tym, iż praktycznie taka sama ilość powraca z atmosfery do biosfery i oceanów. Chodzi o to, że te naturalne przepływy do i z atmosfery były w prawie całkowitej równowadze przez tysiące lat. Argument, że naturalne emisje są znacznie większe od antropogenicznych, jest zupełnie bez znaczenia głównie z tego powodu, iż naturalne przepływy same się równoważyły. To właśnie dzięki temu stężenie CO₂ w atmosferze i oceanie pozostawało *na stałym poziomie* przez tysiące lat. Spalanie przez nas paliwa kopalnego stanowi *nowy* strumień emisji CO₂. To prawda, że w porównaniu z emisjami naturalnymi nie jest on wielki, jednak nie jest *on przez nic równoważony*.

Oto prosta analogia do odprawy celnej na lotnisku, gdzie przybywa około **tysiąca podróżnych na godzinę**, a celników wystarcza dokładnie do obsługi tej liczby osób.



Rys. 1.7. Górny wykres przedstawia koncentrację CO₂ w częściach na milion (ppm) dla ostatnich 1100 lat – te same dane, które zostały przedstawione na rysunku 1.4.

James Watt i jego maszyna parowa z 1769 roku



Wykres środkowy pokazuje (w skali logarytmicznej) historię brytyjskiego wydobycia węgla, wydobycie ropy w Arabii Saudyjskiej, światowe wydobycie ropy i węgla oraz całkowity poziom emisji gazów cieplarnianych w roku 2000 (kropka w prawym górnym rogu wykresu). Wszystkie wartości wyrażone są za pomocą jednostek związanej z nimi emisji CO₂.

Wykres na dole przedstawia (w skali logarytmicznej) niektóre konsekwencje rewolucji przemysłowej: gwałtowny wzrost populacji Anglii oraz całego świata; zauważalny wzrost produkcji brytyjskiej surówki hutniczej (w tysiącach ton żelaza rocznie) oraz wzrost tonażu brytyjskich statków (w tysiącach ton).

W przeciwieństwie do wykresów w zwykłej skali, znajdujących się na poprzedniej stronie, skala logarytmiczna umożliwia nam pokazanie obydwu populacji – brytyjskiej i światowej – na jednym wykresie oraz dostrzeżenie ciekawych cech obydwu.

Dzięki dokładnemu dostosowaniu liczby pracowników obsługi do liczby podróży kolejka nie wydłuża się. A teraz wyobraź sobie, że z powodu mgły na nasze lotnisko zostają skierowane dodatkowe loty z innego, mniejszego lotniska i co godzinę przybywa **dotatkowe 50 osób**. To niewiele w porównaniu z normalną liczbą obsługiwanych pasażerów, dlatego zarząd portu lotniczego bagatelizuje sprawę i nie przydziela dodatkowych pracowników. Tym sposobem personel wciąż obsługuje dokładnie **tysiąc osób na godzinę**, ale kolejka podróży nieuchronnie zaczyna się wydłużać – *w sali przylotów gromadzi się coraz więcej osób*. Dokładnie tak samo spalanie paliw kopalnych zwiększa koncentrację CO₂ w atmosferze i powierzchniowej warstwie oceanu. Żaden klimatolog nie podważa tego faktu. Zatem jeśli chodzi o stężenie CO₂, nasze emisje jak najbardziej mają znaczenie.

No dobrze. Spalanie paliw kopalnych znacząco wpływa na zwiększenie się stężenia CO₂. I co w tym złego? „Dwutlenek węgla jest przecież zupełnie naturalnym gazem!” – przypominają nam naftowi *spin* doktorzy – „Bez niego nie byłoby życia!”. Faktycznie, gdyby CO₂ nie powodował szkodliwych efektów, moglibyśmy w ogóle nie przejmować się jego emisją do atmosfery. Niestety, jest to również gaz cieplarniany. Może nie o najsilniejszym działaniu, ale mimo to znaczącym. Wprowadźmy go więcej do atmosfery, a zrobi to, co robią wszystkie gazy cieplarniane: zaczną pochłaniać promieniowanie podczerwone (ciepło) pochodzące z Ziemi i emitować je z powrotem w różnych kierunkach. Rezultatem jest zakłócenie odpływu ciepła z planety i zatrzymywanie go przy niej – podobny efekt uzyskalibyśmy, przykrywając Ziemię olbrzymią kołdrą. Dlatego dwutlenek węgla ma jak najbardziej szkodliwy efekt i fakt ten jest potwierdzony nie tylko przez kompleksowe historyczne pomiary temperatury na Ziemi, ale również przez elementarne fizyczne własności cząsteczki CO₂. Reasumując, gazy cieplarniane działają jak kołdra, a CO₂ tworzy jedną z jej warstw.

Co zatem się stanie, jeśli ludzie podwoją lub nawet potroją stężenie CO₂ (a do tego celu skutecznie zmierzamy, podążając obecną drogą), to co wtedy? Z odpowiedzią na to pytanie wiąże się duża doza niepewności. Klimatologia jest skomplikowaną nauką. Sprawy związane z klimatem są bardzo złożone i trudne do przewidzenia. Dokładne obliczenie, jak bardzo ociepli się Ziemia, gdy podwoimy ilość CO₂ jest niemożliwe z wielu powodów, jednak najbardziej wiarygodne modele klimatyczne są zgodne co do tego, że podwojenie stężenia CO₂ będzie miało skutek zbliżony do zwiększenia aktywności Słońca o 2% i podniesie średnią temperaturę na Ziemi o około 3 °C. Przyszli historycy raczej nie pochwalą naszych działań. Nie będę tu recytował całej litanii prawdopodobnych skutków – jestem pewien, że już nie raz je słyszałeś. Litanie zaczyna się od słów „Pokrywa lodowa Grenlandii zacznie stopniowo topnieć i w przeciągu kilkuset lat poziom morza podniesie się o około 7 metrów”. Wszystkie nieszczęścia wymieniane w owej litanii dotkną przyszłe pokolenia. Podobne temperatury nie były spotykane na Ziemi od co najmniej 100 000 lat (a najprawdopodobniej nawet od dziesiątek milionów lat).

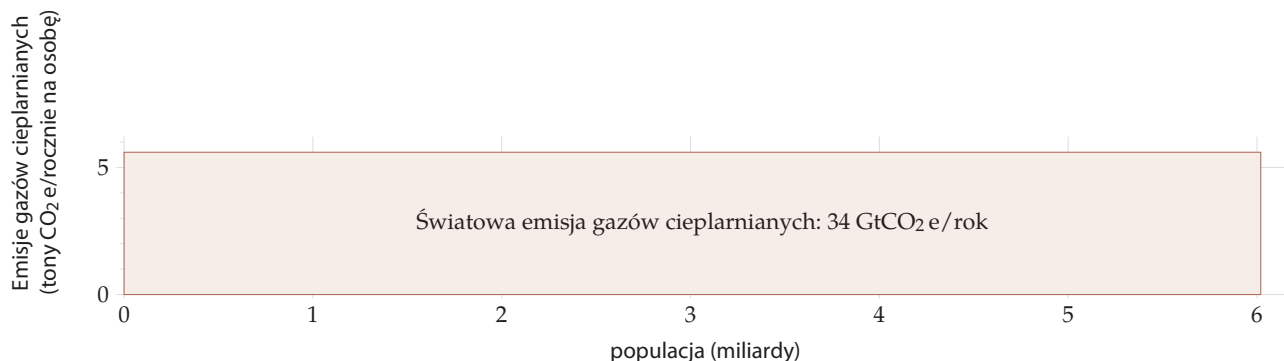
Niewykluczone, że ekosystemy ziemskie ulegną tak znacznym zmianom, że nasza planeta nie będzie w stanie dłużej dostarczać nam tych wszystkich dóbr i usług, których dostępność wydaje się nam dzisiaj najzupełniej oczywista.

Modelowanie zmian klimatu jest niezwykle trudne, gdyż wiąże się z wieloma niepewnościami. Ale niepewność tego, jak klimat zareaguje na dodatkowe gazy cieplarniane w atmosferze, nie usprawiedliwia bierności. Czy gdybyś

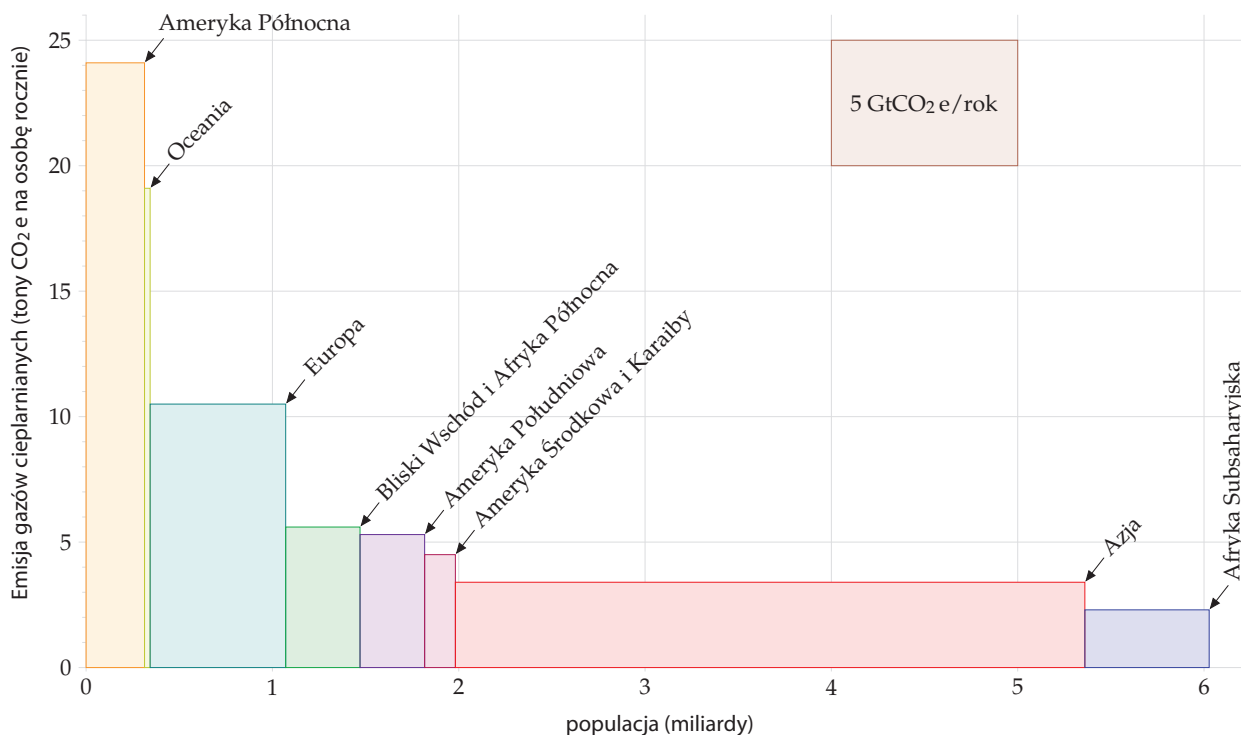
pędził motocyklem we mgle tuż nad krawędzią stromego klifu, a na dodatek nie miałbyś dokładnej mapy okolicy, to czy brak mapy usprawiedliwiłoby to, że *nie zwolniłeś*?

Kto zatem powinien zdjąć nogę z gazu? Kto powinien posprzątać po nadmiernych emisjach CO₂? Kto jest odpowiedzialny za zmiany klimatu? To oczywiście pytania natury etycznej, nie czysto naukowej, ale nawet dyskusja o charakterze etycznym powinna opierać się na faktach. Przyjrzyjmy się więc bliżej faktom dotyczącym emisji gazów cieplarnianych. Na początek słów kilka o jednostkach, w których emisje te są mierzone. Gazy cieplarniane to między innymi dwutlenek węgla, metan oraz podtlenek azotu. Każdy z nich ma inne właściwości fizyczne. Zgodnie z przyjętą konwencją, wszystkie emisje gazów cieplarnianych wyraża się za pomocą „ekwiwalentu dwutlenku węgla”, gdzie słowo „ekwiwalent” oznacza „wywoływanie takiego samego efektu cieplarnianego przez okres 100 lat”. Jedną tonę ekwiwalentu dwutlenku węgla zapisujemy w następujący sposób: 1t CO₂e, zaś jeden miliard ton to 1Gt CO₂e, czyli jedna gigatona.

W roku 2000 światowa emisja gazów cieplarnianych wynosiła 34 miliardy ton ekwiwalentu dwutlenku węgla rocznie. Niewyobrażalna liczba. Ale możemy wyrazić ją w bardziej przystępny sposób – poprzez podzielenie jej przez liczbę wszystkich ludzi na Ziemi (dla wygody obliczeń zaokrągloną do 6 miliardów). Uzyskany wynik – 5,5t CO₂e – to przybliżona wielkość emisji gazów cieplarnianych na jedną osobę na rok. Możemy także przedstawić światowe emisje za pomocą prostokąta, którego szerokością będzie wielkość populacji ludzkiej na Ziemi (dla wygody obliczeń zaokrąglimy tę liczbę do 6 miliardów), zaś wysokością – emisje przypadające na jedną osobę.



Pomimo tego, że w dzisiejszych czasach uważa się, że wszyscy ludzie są sobie równi, to jednak nie wszyscy emitują równo po 5,5 tony CO₂ rocznie. Jeśli odpowiednio pogrupujemy emisje z 2000 roku, możemy pokazać, jak 34 miliardy ton CO₂ z naszego prostokąta są dzielone pomiędzy różne regiony Ziemi.

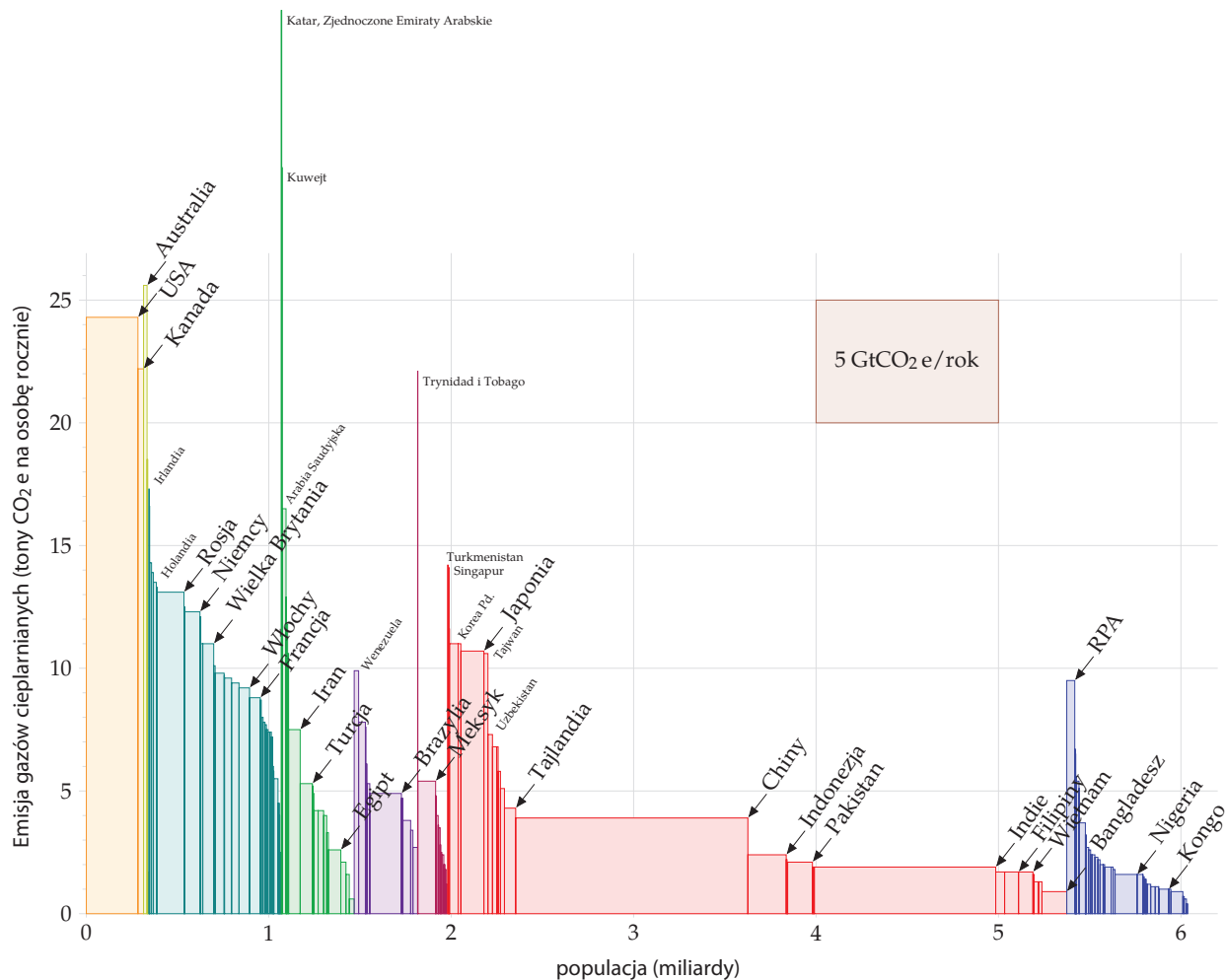


Powyższy diagram, zachowujący tę samą skalę co prostokąt ze strony poprzedniej, dzieli Świat na 8 regionów. Pole każdego prostokąta reprezentuje emisję gazów cieplarnianych z poszczególnych regionów.

Szerokość każdego prostokąta odpowiada wielkości populacji danego regionu, zaś wysokość obrazuje średni poziom emisji na osobę w tym regionie. W roku 2000 poziom emisji gazów cieplarnianych na osobę w Europie był dwa razy wyższy od średniej światowej, zaś w Ameryce Północnej był wyższy aż cztery razy.

Kiedy będziemy kontynuować dzielenie prostokątów, tak by każdy symbolizował jeden kraj, zrobi się naprawdę interesująco: kraje o najwyższym poziomie emisji dwutlenku węgla na osobę to Australia, USA i Kanada; kraje europejskie, Japonia oraz RPA dzielnie gonią czołówkę. Wśród krajów europejskich emisje Wielkiej Brytanii plasują się na średnim poziomie. A co z Chinami, tym niegrzecznym krajem, „wymykającym się spod kontroli”? Trzeba przyznać, że powierzchnia prostokąta należącego do Chin jest nawet większa niż dla USA, jednak wielkość emisji przypadająca na jedną osobę w Chinach jest, uwaga! *poniżej* średniej światowej. Natomiast w Indiach emisje na osobę są *poniżej połowy* średniej światowej. Warto przypomnieć w tym momencie, że duża część emisji pochodzących z przemysłu w Chinach czy w Indiach jest związana z wytwarzaniem dóbr eksportowanych do krajów bogatych. *Innymi słowy, są to emisje obciążające nasze konto.*

Tak więc, zakładając, że „coś musi zostać zrobione” w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, pojawia się pytanie, kto właściwie powinien wziąć na siebie odpowiedzialność za zrobienie tego czegoś? Jak już wcześniej wspominałem, jest to pytanie natury etycznej. Trudno jednak wyobrazić sobie jakikolwiek system etyczny, który zanegowałby oczywistą odpowiedzialność

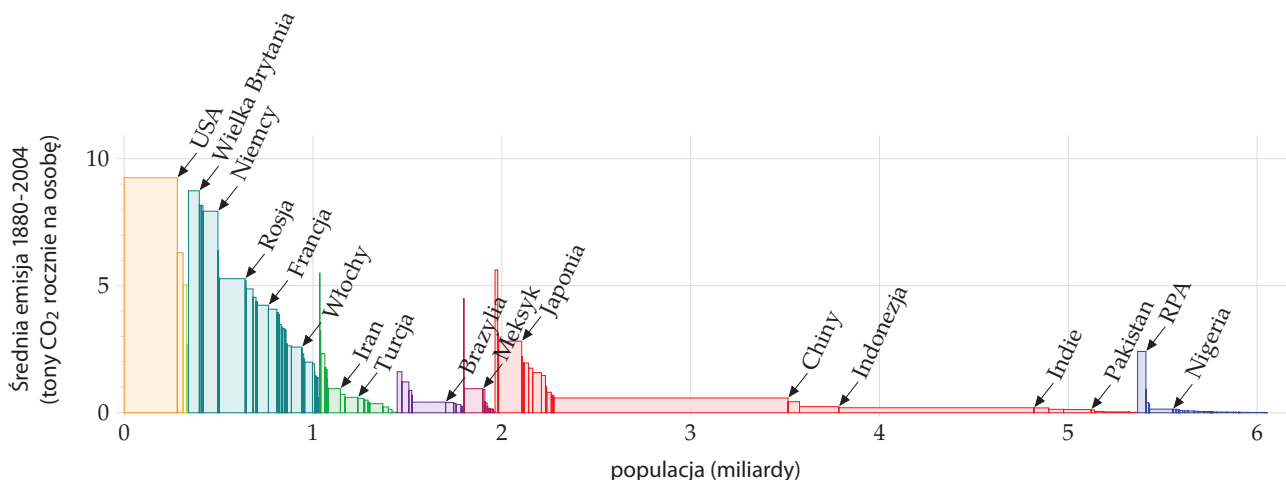


krajów po lewej stronie diagramu. Są to przecież kraje, które przekraczają średnią światową dwu-, trzy-, a nawet czterokrotnie i które jednocześnie stać byliby na poniesienie ewentualnych kosztów. Kraje, które mają możliwość przeznaczenia pieniędzy na odpowiednie zmiany. Kraje Unii Europejskiej czy USA, w szczególności.

Historyczna odpowiedzialność za zmiany klimatu

Jeśli przyjmijemy założenie, że klimat jest niszczone przez działalność człowieka i że ktoś powinien to naprawić, to kto powinien zapłacić? Niektórzy powiedzą: „Niech płaci zanieczyszczający”. Poprzednie diagramy pokazują, kto jak bardzo przykłada się do zmian klimatu *dzisiaj*. Jednakże to nie *obecny poziom* emisji CO₂ jest tym, co ma znaczenie przy określaniu odpowiedzialności, lecz *całkowita* skumulowana emisja historyczna. Duża część wyemitowanego przez nas dwutlenku węgla (około jedna trzecia) pozostanie w atmosferze na co najmniej 50 do 100 lat, a jeśli spalimy wszystkie paliwa kopalne, to nawet na kilka (dziesiąt) tysięcy lat. Jeśli zgodzimy się na słuszny z etycznego punktu widzenia

pomysł: „Niech płacą truciele”, to konsekwentnie powinniśmy dowiedzieć się, jak duże były historyczne emisje poszczególnych państw. Poniższy diagram pokazuje całkowite emisje CO₂ dla poszczególnych krajów, wyrażone jako średni poziom emisji z okresu między rokiem 1880 a 2004.



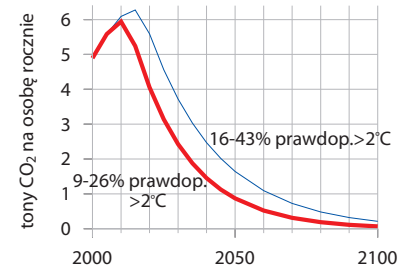
Brawa dla Brytyjczyków! Jesteśmy na podium! Być może nasze emisje są dzisiaj na poziomie średniej europejskiej, ale jeśli uwzględnimy emisje z przeszłości, to ustępujemy jedynie mieszkańcom USA.

No dobrze, dajmy na razie odetchnąć etyce i oddajmy głos naukowcom: co według naukowców powinniśmy zrobić, by zapobiec podniesieniu się temperatury na Ziemi o 2 °C (klimatolodzy uważają, że zmiany powyżej 2 °C wiązać się będą z wieloma bardzo nieprzyjemnymi konsekwencjami)? Tutaj odpowiedź jest oczywista: musimy i to jak najszybciej! zerwać ze szkodliwym nałogiem spalania paliw kopalnych. Niektóre kraje, w tym Wielka Brytania, zobowiązały się do co najmniej 60-procentowej redukcji emisji gazów cieplarnianych do roku 2050. Trzeba jednak podkreślić, że owe 60-procentowe cięcia – jakkolwiek wydają się radykalne – mogą nie wystarczyć. Zdaniem klimatologów przekroczymy wspomniany próg 2 °C, nawet jeśli w roku 2050 stopniowe ograniczenia światowej emisji CO₂ sięgną 60 procent.

Skalę cięć, do których dążymy, ukazuje diagram 1.8. Oto rysunek ten przedstawia dwa być-może-bezpieczne scenariusze dotyczące emisji, zaprezentowane w 2006 roku przez doktorów: Paula Baera i Michaela Mastrandrea w raporcie *High Stakes* Brytyjskiego Instytutu Badań Społecznych. Niżej położona krzywa zakłada całkowity spadek światowych emisji o 5 procent rocznie od roku 2007; krzywa położona wyżej zakłada krótkotrwałą zwłokę, a następnie 4-procentowy spadek globalnych emisji rocznie. Uważa się, że obydwie scenariusze dają jedynie niewielką szansę na zapobieżenie wzrostowi temperatury o 2 °C w stosunku do poziomu sprzed rewolucji przemysłowej. W pierwszym scenariuszu szansa na to, że wzrost temperatury przekroczy 2 °C jest szacowana na 9–26 procent; w drugim zaś prawdopodobieństwo przekroczenia 2 °C wynosi już 16–43 procent. Te być-może-bezpieczne scenariusze przewidują ponadto znacznie ostrzejsze redukcje emisji niż w którymkolwiek ze scenariuszy zaprezentowanych przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC), czy też w raporcie Sterna z 2006 roku.

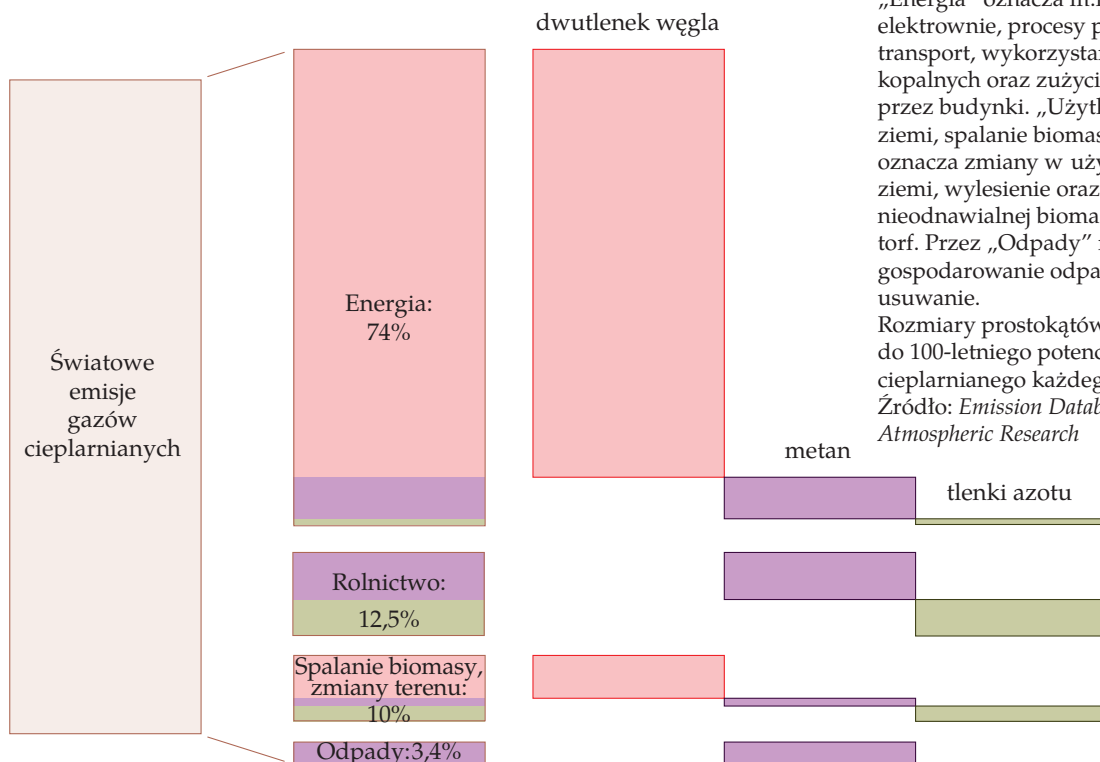
Te być-może-bezpieczne scenariusze wymagają zredukowania światowych emisji o 70, czy nawet 85 procent do roku 2050. Co to oznacza dla kraju takiego, jak Wielka Brytania? Jeżeli podpiszemy się pod pomysłem „ograniczenia i konwergencji” – ten zaś zakłada, że w przyszłości wszystkie kraje będą miały taki sam poziom emisji na osobę – to Brytyjczycy będą musieli dokonać cięć większych niż 85 procent, by go osiągnąć: emisje powinny zmaleć z obecnych 11 ton CO₂e na osobę do zaledwie **1 tony CO₂e na osobę na rok** do 2050 roku. Jest to tak ogromna zmiana, że jedynym sposobem, aby ją osiągnąć, jest przyjęcie dewizy: *żadnych paliw kopalnych więcej*.

I ostatnia już kwestia związana ze zmianami klimatu: emisje gazów cieplarnianych to wynik wielu naszych poczynań, jednak największym ich źródłem jest zużycie energii. Niektórzy ludzie usprawiedliwiają swoją bierność w ograniczaniu zużycia energii tym, że i tak „metan z krowich bąków powoduje większe ocieplenie niż podróż odrzutowcem”. Rzeczywiście, uboczne produkty rolnictwa w roku 2000 stanowiły 1/8 emisji gazów cieplarnianych, ale zużycie energii to aż 3/4 emisji (rys. 1.9). Problem zmian klimatu jest zatem przede wszystkim problemem energetycznym.



Rys. 1.8. Światowe emisje przedstawione dla obydwu scenariuszy rozważanych przez Baera i Mastrandrea, wyrażone w tonach CO₂ na osobę na rok, przy założeniu, że wielkość populacji ludzkiej na świecie wynosi 6 miliardów ludzi. Uważa się, że obydwie scenariusze dają jedynie niewielką szansę na zapobieżenie wzrostowi średniej temperatury na świecie o 2 °C w porównaniu do stanu sprzed rewolucji przemysłowej.

Rys. 1.9. Rozbicie światowych emisji gazów cieplarnianych (2000) z podziałem na przyczynę i rodzaj emitowanego gazu. „Energia” oznacza m.in. elektrownie, procesy przemysłowe, transport, wykorzystanie paliw kopalnych oraz zużycie energii przez budynki. „Użytkowanie ziemi, spalanie biomasy” oznacza zmiany w użytkowaniu ziemi, wylesienie oraz spalanie nieodnawialnej biomasy, takiej jak torf. Przez „Odpady” rozumiemy gospodarowanie odpadami oraz ich usuwanie. Rozmiary prostokątów są adekwatne do 100-letniego potencjału cieplarnianego każdego ze źródeł. Źródło: *Emission Database for Global Atmospheric Research*



Wskazówki dla Czytelnika

No dobrze, wystarczy już o zmianach klimatu. Przyjmuję założenie, że jesteśmy zmotywowani, by pozbyć się paliw kopalnych. Niezależnie od Twojej osobistej motywacji celem tej książki jest ułatwienie Ci ogarnięcia danych liczbowych, i związanej z nimi prostej arytmetyki. Na tej podstawie będziesz mógł sam ocenić, co jest możliwe, a które rozwiązania po prostu „nie trzymają się kupy”. Nie twierdzę przy tym, że zawarte tu liczby i obliczenia są czymś nowym. Książki Goodsteina, Lomborga i Lovelocka, o których wspomniałem na początku, są pełne interesujących liczb i prostych obliczeń. Istnieje też wiele pomocnych źródeł dostępnych w Internecie (patrz odnośniki na końcu każdego rozdziału).

Tym, co starałem się osiągnąć w mojej książce, jest sprawienie, by dane liczbowe były proste i łatwe do zapamiętania. Dzięki temu sam będziesz umiał się w nich odnaleźć, zaś cała sytuacja stanie się na tyle jasna, by każdy myślący czytelnik mógł wyciągnąć własne wnioski. Nie chcę dawać nikomu gotowych jedynie słusznych rozwiązań – wnioski, do których dochodzimy sami, są bowiem o wiele silniejsze od tych wpojonych przez kogoś. Rozumienie jest procesem twórczym. Liczę na to, że po przeczytaniu tej książki będziesz na tyle pewny siebie, by samodzielnie wyciągać wnioski.

Chciałbym zwrócić uwagę, że obliczenia, przez które razem będziemy przechodzić, będą czasem celowo upraszczane. Zaokrąglone liczby stanowią klucz do zrozumienia problemu. Po pierwsze, obliczenia na zaokrąglonych liczbach są znacznie łatwiejsze do zapamiętania. Po drugie, obliczenia na zaokrąglonych liczbach są znacznie szybsze. Weźmy prosty przykład: w tej książce populacja Wielkiej Brytanii liczy 60 milionów ludzi, zaś populacja świata 6 miliardów. Mógłbym użyć bardziej precyzyjnych liczb, ale zbytnia szczegółowość mogłaby zakłócić płynność myślenia. Dzięki temu, jeśli dowiadujemy się, że światowa emisja gazów cieplarnianych wynosi 34 miliardy ton ekwiwalentu CO₂ rocznie, to na bieżąco możemy obliczyć, i to bez kalkulatora, że średnia emisja na osobę wynosi 5 lub 6 ton ekwiwalentu CO₂ rocznie. Ten wynik może i nie jest superdokładny, ale w zupełności wystarcza do prowadzenia rzeczowej rozmowy. Jeśli więc dowiesz się, że podróż samolotem na inny kontynent i z powrotem powoduje emisję około dwóch ton CO₂ w przeliczeniu na każdego pasażera, to znajomość średniej emisji rocznej (ponad 5 ton „z haczykiem” na osobę rocznie) pozwoli Ci uświadomić sobie, że nawet jedna taka podróż rocznie zwiększa Twoje emisje o ponad jedną trzecią.

W obliczeniach w większym stopniu wolę opierać się na mojej codziennej wiedzy niż przedzierać się przez bezosobowe statystyki. Jeśli, na przykład, chcę oszacować średnią prędkość wiatru w Cambridge, to najpierw zadaję sobie pytanie: „Czy zazwyczaj, kiedy jadę na rowerze, jestem szybszy od wiatru?”. Kiedy odpowiedź jest twierdząca, mogę wydedukować, że rzadko kiedy prędkość wiatru w Cambridge wynosi więcej niż prędkość mojej jazdy na rowerze, czyli 20 km/h. Dopiero później porównuję te proste szacunki z obliczeniami innych osób oraz oficjalnymi statystykami (możesz je znaleźć w odnośnikach na końcu każdego rozdziału). Ta książka nie ma być bowiem rozstrzygającym zbiorem superdokładnych danych – jej celem jest zilustrowanie, jak używać przybliżonych liczb w konstruktywnej dyskusji.

Do obliczeń używam głównie danych z Wielkiej Brytanii, rzadziej z reszty Europy, USA czy Świata. Nie powinien jednak sprawić Ci trudności przeprowadzenie podobnych kalkulacji dla każdego innego kraju czy regionu świata, którym jesteś zainteresowany.



„Patrz! To Niskoemisyjny Człowiek!”

Rys. 1.10. Zamieszczony dzięki uprzejmości Petera z PRIVATE EYE. Więcej na: www.private-eye.co.uk

W polskim tłumaczeniu książki, na końcu każdego rozdziału, w którym otrzymane wartości są odmienne od tych dla Wielkiej Brytanii lub wskazany jest komentarz, znajdziesz je wyróżnione w takiej jak ta ramce.

Jeszcze kilka uwag tytułem zakończenia rozdziału. W naszych obliczeniach nie tylko zaokrągliśmy większość liczb, ale też pominiemy wszystkie te szczegóły, nad którymi zazwyczaj łamie sobie głowę cała armia inwestorów, menadżerów i ekonomistów. Jeśli, dajmy na to, chciałbyś wypromować technologię opartą na odnawialnych źródłach energii, zaledwie pięcioprocentowa różnica kosztów mogłaby zadecydować o sukcesie lub porażce przedsięwzięcia. W biznesie liczą się najdrobniejsze szczegóły, ale w tej książce 5 procent nie stanowi różnicy. To książka, w której interesuje nas, czy coś jest dwa razy mniejsze lub większe. Dotyczy ona fizycznych ograniczeń zrównoważonej energii, a nie szacowania aktualnej opłacalności ekonomicznej. Podczas gdy ekonomia stale się zmienia, podstawowe ograniczenia pozostają niezmiennie. Naszym zadaniem jest zrozumienie ich.

Debaty dotyczące polityki energetycznej niejednokrotnie wywołują wiele emocji i wprawiają jej uczestników w zakłopotanie, gdyż ludzie często mieszają ze sobą twierdzenia *rzeczowe* z twierdzeniami *etycznymi*.

Przykładami **twierdzeń rzeczowych** mogą być następujące zdania:

- Światowe spalanie paliw kopalnych jest przyczyną emisji 34 miliardów ton (34 gigaton) ekwiwalentu dwutlenku węgla rocznie.
- Jeśli koncentracja CO₂ w atmosferze ulegnie podwojeniu, to średnie temperatury do końca tego stulecia wzrosną o 1,5–5,8 °C.
- Wzrost temperatury o 2 °C spowoduje roztopienie się pokrywy lodowej Grenlandii w ciągu 500 lat.
- Całkowite stopienie się pokrywy lodowej na Grenlandii spowoduje 7-metrowy wzrost poziomu oceanów.

Twierdzenia rzeczowe mogą być albo prawdziwe, albo fałszywe. Często dojście do tego, jakie są w rzeczywistości, może być problematyczne, gdyż wymaga to wiedzy naukowej. Dla przykładu, twierdzenia, które właśnie podałem, mogą być albo prawdziwe, albo fałszywe. Tak naprawdę nie wiemy, czy wszystkie są prawdziwe. Niektóre z nich są obecnie oceniane jako „bardzo prawdopodobne”. Trudności w określeniu, co jest prawdziwe, a co nie, skutkują zazwyczaj debatą w środowisku naukowym. Jednakże za pomocą odpowiednich badań naukowych i po ich analizie problem prawdziwości lub fałszywości poszczególnych twierdzeń może zostać rozwiązany, przynajmniej „poza uzasadnioną wątpliwość”.

Przykładami **twierdzeń etycznych** są zdania:

- To nie w porządku wydobywać światowe zasoby w sposób, który obciąża kosztami przyszłe pokolenia.
- Zanieczyszczanie nie powinno być bezpłatne.
- Powinniśmy podjąć kroki, aby zabezpieczyć się przed podwojeniem koncentracji CO₂.
- Politycy powinni ustalić limity emisji CO₂.
- Kraje o najwyższych uśrednionych poziomach emisji z zeszłego stulecia mają obowiązek, by przewodzić działaniom dotyczącym zmian klimatu.

- Sprawiedliwe jest równe dzielenie praw do emisji CO₂ pomiędzy wszystkich ludzi na świecie.

Powyższe twierdzenia nie są ani prawdziwe, ani fałszywe. To, czy zgodzimy się z nimi, zależy od naszego etycznego osądu lub wartości, którymi się kierujemy. Twierdzenia etyczne mogą sobie wzajemnie przeczyć. Na przykład, podczas gdy rząd Tony’ego Blaira zadeklarował radykalną politykę dotyczącą emisji CO₂, stwierdzając, że „Wielka Brytania powinna zredukować swoje emisje CO₂ o 60 procent do roku 2050”, to w tym samym czasie Gordon Brown, będący Kanclerzem Skarbu w tym samym rządzie, wielokrotnie ponaglał eksporterów ropy do *zwiększenia* jej wydobycia.

Podkreślam zatem, że celem tej książki jest dyskusja na temat faktów, nie zaś etyki. Chcę, aby fakty stały się na tyle jasne, by ludzie mogli zacząć prowadzić sensowne debaty na temat etycznych decyzji. Chcę, by każdy zrozumiał, jak bardzo fakty ograniczają możliwości, które wchodzi w grę. Jako szanujący się naukowiec, dołożę wszelkich starań, by zachować swoje etyczne poglądy dla siebie. Jeśli jednak dadzą one o sobie czasem znać, z góry proszę o wybaczenie.

Pytanie, czy *sprawiedliwe* jest zagarnianie tak dużych ilości zasobów energetycznych przez Europę i Amerykę Północną, to już kwestia etyki. Moim zadaniem jest przypomnienie Ci o *fakcie*, że nie możemy jednocześnie zjeść ciastka i wciąż go mieć, a także wskazanie, jak identyfikować i eliminować bezsensowne i nieskuteczne propozycje działań oraz zidentyfikować polityki energetyczne, które są zgodne z wartościami, którymi się kierujesz.

Potrzebujemy planu, który będzie skuteczny!

Przypisy i zalecana literatura:

Na końcu każdego rozdziału podaję szczegóły dotyczące argumentów pojawiających się w danym rozdziale, źródła danych i cytatów oraz odnośniki do literatury, dzięki której można poszerzyć swoją wiedzę. Liczby przed przypisem oznaczają numer strony. Numer strony:

- 10 „Nie ma innego sposobu na osiągnięcie tego celu, jak poprzez wykorzystanie energii odnawialnej”; „Každy, kto uważa, że dzięki odnawialnym źródłom energii uda się załatać lukę [energetyczną – red.], żyje w zupełnie nierealnym świecie i jest, według mnie, wrogiem społeczeństwa”. Cytaty pochodzą z audycji *Any Questions?*, BBC Radio 4, 27 stycznia 2006 [ydoobr]. *Michael Meacher* pełnił funkcję ministra środowiska Wielkiej Brytanii w latach 1997–2003. *Sir Bernard Ingham* był doradcą Margaret Thatcher, gdy pełniła funkcję premiera, oraz szefem Rządowych Służb Informacyjnych (Government Information Services), a także sekretarzem organizacji Zwolennicy Energetyki Jądrowej (Supporters of Nuclear Energy).
- Jonathon Porritt, *Is nuclear the answer?*, rozdział 3, (marzec 2006). Sugestie dla ministrów: www.sd-commission.org.uk
- 11 „Inwestowanie w energetykę atomową to wyrzucanie pieniędzy w błoto”; „Dysponujemy ogromnymi zasobami wiatru i fal morskich” – Ann Leslie, dziennikarka. Wypowiedź z audycji *Any Questions?*, Radio 4, 10 lutego 2006.
- „Mieszkańcy Los Angeles pokonują codziennie 227 milionów kilometrów, czyli odległość z Ziemi do Marsa” – *The Earthworks Group*, 1989, strona 40.
- www.targetneutral.com liczy sobie 4 funty za „neutralizację” jednej tony CO₂ (to znacznie mniej niż w jakiegokolwiek innej znanej mi organizacji redukującej emisję). Przy takiej stawce przeciętny Brytyjczyk mógłby „zneutralizować” swoje 11 ton rocznie za jedyne 44 funty! Dowodem na to, że „neutralizacyjne” plany BP nie mają najmniejszego sensu, jest fakt, że ich projekty nie uzyskały Złotego Standardu www.cdmgoldstandard.org (z wypowiedzi Michaela Schlupa). Wiele projektów związanych z „kompensacją dwutlenku węgla” zostało zweryfikowanych przez Fionę Harvey z „Financial Times” [2]hve6] jako zupełnie bez wartości.
- 12 Osoby promujące energetykę odnawialną również wprowadzają w błąd, używając na przykład takich argumentów: „przybrzeżne elektrownie wiatrowe mogą zaopatrzyć w energię wszystkie domy w Wielkiej Brytanii”. Pod koniec 2007 roku rząd brytyjski ogłosił, że zezwoli na wybudowanie przybrzeżnych elektrowni wiatrowych „zdolnych zaopatrzyć w prąd wszystkie domy w Wielkiej Brytanii”. Nick Rau, prowadzący kampanię na rzecz energetyki odnawialnej z ramienia organizacji Friends of the Earth, przyklasnął planom rządu: „Ten rodzaj energetyki może generować ogromną moc”. [25e59w]. Informacja z „The Guardian” [507mxk]: John Sauven, dyrektor wykonawczy Greenpeace, powiedział, że plany te doprowadzą do „rewolucji w energetyce wiatrowej”, a „Partia Pracy powinna wyleczyć się z obsesji na punkcie energetyki jądrowej, która



„No dobrze – postanowione. Ogłaszamy: Siedzenie z założonymi rękami nie jest rozwiązaniem!

A teraz poczekajmy i zobaczymy, jak potoczą się sprawy...”

Rys. 1.11. Zamieszczony

za uprzejmą zgodą

Paula Lowe z PRIVATE EYE.

Więcej na: www.private-eye.co.uk

pozwole zredukować zaledwie 4 procent emisji, w dodatku w nieokreślonej przyszłości”. Nick Rau dodał: „Cieszymy się, że rząd zaczyna dostrzegać potencjał drzemący w wiatrowych elektrowniach przybrzeżnych, które mogą zaspokoić 25 procent zapotrzebowania Wielkiej Brytanii na prąd do roku 2020”. Kilka tygodni później rząd ogłosił, że zezwala także na wybudowanie nowych elektrowni atomowych. „Dzisiejsza decyzja dopuszczająca inwestycje w nową generację elektrowni atomowych [...] jedynie w niewielkim stopniu przyczyni się do zatrzymania zmian klimatu” – ostrzegła Friends of the Earth [5c40lc].

W rzeczywistości obydwie propozycje rozbudowy źródeł energii – przybrzeżnych elektrowni wiatrowych oraz energetyki atomowej – dostarczyłyby taką samą ilość energii rocznie. Całkowita planowana moc z energetyki wiatrowej, wynosząca 33 GW, średnio dostarczyłaby 10 GW, co daje 4 kWh na osobę dziennie; zastąpienie wszystkich starych elektrowni wiatrowych jądrowymi dałoby natomiast również 10 GW, czyli 4 kWh na osobę dziennie. W tej samej wypowiedzi przeciwnicy energetyki jądrowej mówią, że opcja jądrowa „działa niewiele”, zaś opcja wiatrowa „zaopatrzy w energię wszystkie domy w Wielkiej Brytanii”. Tymczasem „zaopatrzenie w energię wszystkich domów w Wielkiej Brytanii” i „zredukowanie emisji zaledwie o 4 procent” to dokładnie to samo.

- 12 **Napędzany wodą samochód**, „New Scientist”, 29 lipca 2006, str. 35. Artykuł z nagłówkiem: *Napędzany wodą samochód może być dostępny już w 2009 roku*, zaczyna się słowami: „Zapomnij o samochodach napędzanych alkoholem i olejem roślinnym. Już niedługo będziesz mógł jeździć samochodem tylko i wyłącznie na wodę. Byłby to naprawdę zeroemisyjny pojazd”; „Chociaż na pierwszy rzut oka woda nie jest oczywistym źródłem energii, posiada kluczową zaletę: jest obfitym źródłem wodoru, pierwiastka powszechnie uznawanego za zielone paliwo przyszłości”.

Projekt opisywany w „New Scientist” istnieje naprawdę, ale chodzi tu o samochód używający boru jako paliwa, a ściślej – wykorzystanie reakcji boru z wodą jako pierwszego stopnia reakcji chemicznej. Dlaczego zatem „New Scientist” sugerował, że paliwem jest woda? Otóż woda nie jest paliwem. Nigdy nim nie była i nigdy nie będzie. Woda już jest wynikiem spalania!

Pierwsza zasada termodynamiki mówi, że nie można wydobyć energii z niczego. Można jedynie zamieniać jeden rodzaj energii na inny. Energia w każdym rodzaju silnika musi mieć swoje źródło. Jeszcze bardziej absurdalną historię o tankowanym wodą aucie rozpowszechniało też Fox News. [2ftd3].

- „Zmiany klimatu są zagrożeniem znacznie większym niż terroryzm” – Sir David King, Główny Doradca Naukowy brytyjskiego rządu, styczeń 2004. [26e8z].
- „gloryfikowanie podróży” – aluzja do przestępstwa „gloryfikacji”, zdefiniowanego w brytyjskim Akcie Terrorystycznym, który nabrał mocy prawnej 13 kwietnia 2006. [ykhay].

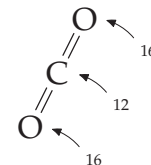
- 13 **Rys. 1.2.** Wykres przedstawia produkcję ropy naftowej z uwzględnieniem kondensatu, frakcji ciekłych gazu ziemnego i innych frakcji ciekłych, a także zyski z procesu rafinacji.

– Źródło: EIA, Przegląd statystyczny zasobów i zużycia energii British Petroleum (BP).

- 14 ... **Pierwszy działający silnik parowy został wynaleziony w 1698 roku.** W rzeczywistości pierwszy silnik parowy opisał Heron z Aleksandrii. Zważywszy jednak na fakt, że przez następne 1600 lat jego pomysł pozostał w zasadzie nieznanym, uznajmy wynalazek Savery’ego za pierwszy praktyczny silnik parowy.

- **Rys. 1.4 oraz 1.7. Koncentracja dwutlenku węgla.** Dane pochodzą z następujących źródeł: Keeling i Whorf, 2005 (okres pomiarów 1958 – 2004); Neftel i in., 1994 (1734 – 1983); Etheridge i in., 1998 (1000 – 1978); Siegenthaler i in., 2005 (950 – 1888); Indermuhle i in., 1999 (od 11 000 do 450 r. p.n.e.) Wykres ten nie powinien być mylony z tzw. *hockey stick graph* (wykres w kształcie kija hokejowego), który pokazuje historię średniej temperatury na świecie. Spostrzegawczy Czytelnicy zauważają, że moja argumentacja dotycząca zmian klimatu nie opiera się o *historyczne* przebiegi temperatur na świecie.

- **Rys. 1.5 – 1.7. Wydobywanie węgla.** Wykorzystane dane pochodzą z następujących opracowań: Jevons (1866), Malanima (2006), Netherlands Environmental Assessment Agency (2006), National Bureau of Economic Research (2001), Hatcher (1993), Flinn i Stoker (1984), Church i in. (1986), Supple (1987), Ashworth i Pegg (1986). William Stanley Jevons, angielski logik i ekonomista, już w XIX wieku ostrzegał przed zjawiskiem zwanym *Oil Peak*. W roku 1865 oszacował łatwo dostępne rezerwy węgla Wielkiej Brytanii, zanalizował historię wykładniczego wzrostu jego zużycia i przewidział koniec tego wzrostu wykładniczego oraz brytyjskiej dominacji w światowym przemyśle. „Nie jesteśmy w stanie dłużej utrzymać naszej obecnej stopy wzrostu zużycia... powściągnięcie naszego obecnego rozwoju musi stać się widoczne w okresie 100 lat od chwili obecnej... Nieuchronny wniosek brzmi: *nasz obecny radosny postęp nie będzie trwał w nieskończoność*”. Jevons miał rację – w przeciągu stulecia brytyjskie wydobywanie węgla osiągnęło szczyt, a przez świat przetoczyły się dwie wojny światowe.



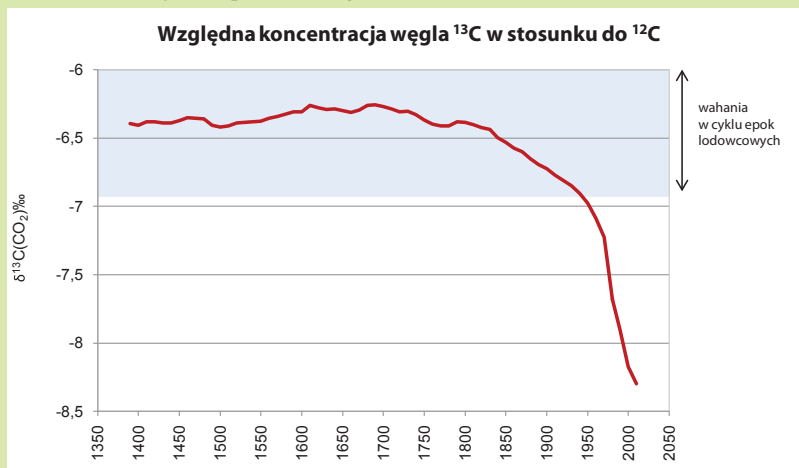
Masy atomu węgla i cząsteczki CO₂ pozostają w proporcji 12 do 44, ponieważ atom węgla ma masę 12 jednostek, zaś atomy tlenu po 16 każdy. 12 + 16 + 16 = 44

- 16 **Dominic Lawson, felietonista „The Independent”.** Cytat, którego użyłem, pochodzi z kolumny Dominica Lawsons w „The Independent” z dnia 8 czerwca 2007 roku. Nie jest to cytaty dosłowny – zreagowałem jego słowa w celu skrócenia wypowiedzi, ale celowo nie poprawiałem żadnego z błędów. Oto, co się nie zgadza: po pierwsze, napisano „dwutlenek węgla”, ale dane odnoszą się do węgla: spalanie paliw kopalnych powoduje emisję do atmosfery 26 gigaton (miliardów ton) CO₂ rocznie (a nie 7 gigaton) – to częsty błąd. Po drugie, Lawson twierdzi, że oceany emitują do atmosfery 36 000 gigaton węgla rocznie. I tutaj popełnia znacznie gorszy

błąd: 36 000 gigaton to całkowita zawartość węgla w oceanach! Roczny przepływ jest znacznie mniejszy – około 90 gigaton węgla rocznie (330 GtCO₂/r), biorąc pod uwagę standardowe modele cyklu węglowego. Tak samo błędne jest „1900 gigaton” przepływu z biosfery do atmosfery. Poprawna liczba to około 120 gigaton węgla rocznie (440 GtCO₂/r). Tak składa się, że zaobserwowany wzrost koncentracji CO₂ jest zgodny z oczekiwaniami, przy założeniu, że większość wyemitowanego przez człowieka węgla pozostaje w atmosferze. Od roku 1715 do 2004 około 1 160 GtCO₂ zostało uwolnionych do atmosfery w wyniku spalania paliw kopalnych oraz produkcji cementu (Marland i in., 2007). Gdyby cały ten dwutlenek węgla pozostał w atmosferze, jego koncentracja wzrosłaby o 160 ppm (z 280 do 440 ppm). Rzeczywisty wzrost wyniósł około 100 ppm (z 275 do 377 ppm). Tak więc 60% tego, co zostało wyemitowane, pozostało w atmosferze.

Uzup. red.: Dobrym sposobem upewnienia się co do źródła pochodzenia dodatkowych ilości CO₂ w atmosferze jest przeanalizowanie historycznych koncentracji różnych izotopów węgla w atmosferze. Są w niej obecne jego 3 izotopy:

- ¹²C – stabilny, preferowany przez rośliny
- ¹³C – stabilny
- ¹⁴C – niestabilny, czas połowicznego zaniku 5700 lat



Rośliny preferują lekki izotop węgla ¹²C. Paliwa kopalne (węgiel, ropa, gaz) powstały z roślin, jest więc w nich przewaga ¹²C względem ¹³C. Węgla ¹⁴C w ogóle w nich nie ma, gdyż zdążył się już rozpaść. Spalając paliwa kopalne, wyrzucamy uwieczniony w nich węgiel do atmosfery, skąd pobierają go rosnące rośliny i wbudowują w siebie. Co więc widzimy? Widzimy, że (znowu!) w połowie XVIII wieku coś się stało i względna zawartość węgla ¹³C w atmosferze zaczęła coraz szybciej spadać (przy okazji pozostając w pełnej zgodności ilościowej z naszymi emisjami i działaniem cyklu węglowego).

Rys. Względna koncentracja węgla ¹³C względem ¹²C. Na podstawie Scripps CO₂ Program, Böhm, F. (2002): *Evidence for Preindustrial Variations in the Marine Surface Water Carbonate System from Coralline Sponges*.

W ciągu zaledwie 200 lat, jakie upłynęły od początku epoki przemysłowej, koncentracja ¹³C spadła o 2 promile. Może wydawać się, że to niewiele, ale nawet od szczytu epoki lodowcowej do XIX wieku wahania te były znacznie mniejsze.

18 „Dwutlenek węgla ma wpływ ocieplający”. „Przeładowana emocjami dyskusja na ten temat staje się nużąca, nieprawdą?” „Ten problem został już naukowo rozstrzygnięty”. „Wcale nie został!” „Został!”. Najlepiej zrobię, kierując każdego, kto chce sobie zrobić przerwę od niekonstruktywnych kłótni, do krótkiego raportu, napisanego przez Charneya i in. (1979). Konkluzje zawarte w tym raporcie są szczególnie cenne ze względu na to, że Akademia Nauk USA (National Academy of Sciences) sprawowała nadzór nad raportem oraz dobrała jego autorów na podstawie ich doświadczenia oraz „z uwzględnieniem stosownej równowagi”. Grupa badawcza została zwołana „pod patronatem Rady Badań nad Klimatem (Climate Research Board) Państwowego Komitetu Badań Naukowych, by zbadać naukowe podstawy prawdopodobnych zmian klimatu w przyszłości, spowodowanych antropogenicznymi emisjami dwutlenku węgla do atmosfery”. W szczególności autorzy raportu poproszeni zostali o „zidentyfikowanie podstawowych założeń, na których opiera się nasze obecne rozumienie problemu, o ilościowe oszacowanie adekwatności oraz niepewności naszej wiedzy o tych czynnikach i procesach oraz o zwięzłe i obiektywne podsumowanie naszego obecnego stanu wiedzy nt. dwutlenku węgla/klimatu, dla potrzeb decydentów”. Raport ma tylko 33 strony, można go bezpłatnie pobrać z Internetu (http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181), do czego [5qfkaw], gorąco namawiam. Dzięki jego lekturze jasne staje się, które elementy były naukowo dowiedzione już w 1979 roku, a które wciąż były niepewne.

Poniżej przedstawiam kluczowe stwierdzenia, które wybrałem z raportu. Po pierwsze, podwojenie stężenia CO₂ w atmosferze spowodowałoby dodatkowe ogrzanie troposfery, oceanów oraz lądów ze średnią jednostką mocy na powierzchnię wynoszącą około 4 W/m², o ile inne właściwości atmosfery nie ulegną zmianie. Ten efekt ogrzewania można porównać ze średnią mocą absorbowaną przez atmosferę, lądy i oceany, która wynosi 238 W/m². Tak więc podwojenie stężenia CO₂ będzie miało efekt grzewczy równoważny ze wzrostem intensywności promieniowania Słońca o 4/238 = 1,7%. Po drugie, konsekwencje tego, spowodowanego przez CO₂, ocieplenia, ze względu na złożoność systemu atmosferyczno-oceanicznego, są trudne do przewidzenia, jednak autorzy raportu przewidują globalne ocieplenie się powierzchni Ziemi w przedziale od 2 °C do 3,5 °C,

z większymi zmianami na wyższych szerokościach geograficznych. Ostatecznie, autorzy podsumowali: „Próbowaliśmy, ale nie byliśmy w stanie znaleźć żadnych przeoczonych lub niedocenionych fizycznych efektów, które mogłyby zredukować obecnie oszacowane globalne ocieplenie, wywołane podwojeniem się stężenia dwutlenku węgla w atmosferze, do mało istotnych wielkości lub całkowicie mu przeciwdziałać”. Ostrzegają także, że dzięki oceanowi, „wielkiemu i ociężałemu kołu zamachowemu światowego systemu klimatycznego”, jest całkiem możliwe, że efekty ocieplenia zaczną pojawiać się z takim opóźnieniem, że trudno będzie wykrzyć je w nadchodzących dekadach. Niemniej jednak „ocieplenie w końcu się pojawi, a związane z nim regionalne zmiany klimatu [...] mogą być znaczące”.

Przedmowa pióra przewodniczącego Rady Badań nad Klimatem (Climate Research Board), Vernera E. Suomi, podsumowuje wnioski słynną sekwencją podwójnych zaprzeczeń: „Jeśli stężenie dwutlenku węgla nadal będzie rosło, to grupa badawcza nie znajduje żadnego powodu, by wątpić, że zmiany klimatu nastąpią oraz żadnego powodu, by wierzyć, że zmiany te będą nieistotne”.

- 18 „Nie będę tu recytował całej litanii prawdopodobnych skutków – jestem pewien, że już nie raz je słyszałeś”. Jeśli nie, sprawdź. [2z2xg7].
- 22 „Brawa dla Brytyjczyków! Jesteśmy na podium! Być może nasze emisje są dzisiaj na poziomie średniej europejskiej, ale jeśli uwzględnimy emisje z przeszłości, to ustępujemy jedynie mieszkańcom USA”. Szczere wyrazy współczucia dla Luksemburga, którego historyczne emisje, w przeliczeniu na mieszkańca, w rzeczywistości były większe od amerykańskich i brytyjskich; jednakże zwycięskie podium powinno być zarezerwowane dla krajów posiadających jednocześnie wysokie emisje na osobę i wysoki całkowity poziom emisji. Biorąc pod uwagę te dwa kryteria, największymi historycznymi emitentami są, w kolejności: USA (322 GtCO₂), Rosja (90 GtCO₂), Chiny (89 GtCO₂), Niemcy (78 GtCO₂), Wielka Brytania (62 GtCO₂), Japonia (43 GtCO₂), Francja (30 GtCO₂), Indie (25 GtCO₂) i Kanada (24 GtCO₂). W przeliczeniu na mieszkańca kolejność jest następująca: Luksemburg, USA, Wielka Brytania, Czechy, Belgia, Niemcy, Estonia, Katar i Kanada.
- „Niekóre kraje, w tym Wielka Brytania, zobowiązały się do co najmniej 60-procentowej redukcji emisji gazów cieplarnianych do roku 2050”. W rzeczywistości zobowiązanie Wielkiej Brytanii zostało zwiększone do 80 procent redukcji w porównaniu z poziomami emisji z roku 1990.
- 23 „Rozbicie światowych emisji gazów cieplarnianych (2000) z podziałem na regiony i kraje” – Źródło danych: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT), wersja 4.0. (Waszyngton: Światowy Instytut Zasobów, 2007). Trzy pierwsze wykresy pokazują całkowitą narodową emisję sześciu głównych gazów cieplarnianych łącznie (CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC, SF₆), z wyłączeniem wpływu zmian w użytkowaniu ziemi oraz leśnictwa. Wykres na stronie 22 przedstawia całkowite emisje, ale tylko dla CO₂.
- Rys. 1.8. W scenariuszu niższych emisji prawdopodobieństwo, że wzrost temperatury przekroczy 2 °C, jest szacowane na 9 – 26%. Całkowite emisje węgla od roku 2007 wynoszą 309 GtC; stężenie CO₂ osiąga szczyt na poziomie 410 ppm, zaś stężenie CO₂e – na poziomie 421 ppm. W roku 2100 stężenie CO₂ spada do poziomu 355 ppm. W scenariuszu wyższych emisji szansa przekroczenia 2 °C szacowana jest na 16–43%; całkowite emisje węgla od roku 2007 wynoszą 415 GtC; stężenie CO₂ osiąga szczyt na poziomie 425 ppm, zaś stężenie CO₂e – na poziomie 435 ppm. W roku 2100 stężenie CO₂ w atmosferze spada do poziomu 380 ppm. Więcej informacji pod adresem: hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2007-2008/.
- 24 „Istnieje też wiele pomocnych źródeł w Internecie”. Polecam m.in.:
- Przegląd statystyczny zasobów i zużycia energii British Petroleum (BP Statistical Review of World Energy) [yxxq2m]
 - Komisja ds. Zrównoważonego Rozwoju (The Sustainable Development Commission), www.sd-commission.org.uk
 - Duńskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej (The Danish Wind Industry association) www.windpower.org,
 - Ekolodzy dla Energetyki Jądrowej (Environmentalists For Nuclear Energy), www.ecolo.org
 - Wydział Energetyki Wiatrowej Uniwersytetu Risø (Wind Energy Department, Risø University), www.risoe.dk/vea
 - DEFRA www.defra.gov.uk/environment/statistics; zwłaszcza książka *Unikając niebezpiecznych zmian klimatu (Avoiding Dangerous Climate Change)*. [dzcqj].
 - Instytut Pembina www.pembina.org/publications.asp oraz DTI (obecnie znane jako BERR), www.dti.gov.uk/publications
- 25 „Debaty dotyczące polityki energetycznej często wywołują wiele emocji i wprawiają jej uczestników w zakłopotanie, gdyż ludzie często mieszają ze sobą twierdzenia rzeczowe z twierdzeniami etycznymi”. – Twierdzenia etyczne są znane również jako „stwierdzenia normatywne” bądź „osądy wartościujące”, zaś twierdzenia rzeczowe jako „stwierdzenia faktyczne”. Twierdzenia etyczne zawierają zazwyczaj czasowniki typu „powinien” czy „musi” oraz przymiotniki: „sprawiedliwy”, „dobry”, „zły”. Więcej na ten temat w pracy Desslera i Parsona (2006).
- 26 Gordon Brown – w dniu 10 września 2005 roku Gordon Brown powiedział, że wysoka cena paliw stanowi znaczące ryzyko dla europejskiej gospodarki oraz dla światowego wzrostu i zachęcał kraje OPEC do zwiększenia wydobycia ropy. Podobnie, sześć miesięcy później, powiedział: „Potrzebujemy [...] większej produkcji ropy, większego wydobycia, większej ilości inwestycji, więcej inwestycji petrochemicznych” (22 kwietnia 2006). [y98ys5]. Złagodzę nieco krytykę wobec Gordona Browna i pochwałę jedną z jego późniejszych inicjatyw, czyli promocję samochodów elektrycznych oraz ładowanych z sieci pojazdów hybrydowych (PHEV). Jak zobaczycie, jednym z wniosków płynących z tej książki jest to, że elektryfikacja większości transportu jest istotnym elementem planu pozbycia się paliw kopalnych.

2 Bilans

Natury nie da się oszukać.

Richard Feynman

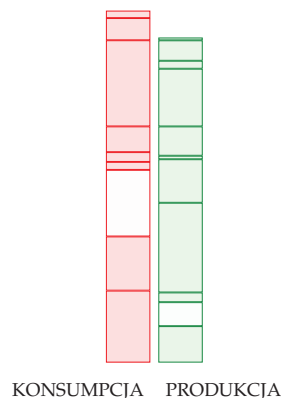
Porozmawiajmy o wytwarzaniu i zużyciu energii. Obecnie większość energii zużywanej przez kraje rozwinięte pochodzi z paliw kopalnych – to nie jest zrównoważone postępowanie. Pytanie, jak długo my i nasza gospodarka moglibyśmy żyć w oparciu o energię z paliw kopalnych, zanim zaczną ich brakować, jest bardzo zajmujące, jednak to nie ono stanowi meritum niniejszej książki. Chcę skupić się na zaplanowaniu *życia bez paliw kopalnych*.

Zróbmy zestawienie w dwóch słupkach. W czerwonym słupku, po lewej, będziemy dorzucać nasze zużycie energii w różnych sferach życia, zaś do zielonego, po prawej – zrównoważone sposoby produkcji energii. Te dwa słupki powstaną stopniowo, w miarę omawiania kolejnych dodawanych pozycji.

Zasadnicze pytanie, na które stara się odpowiedzieć ta książka, jest następujące: „Czy *realnie* jesteśmy w stanie żyć w sposób zrównoważony pod względem produkcji i zużycia energii?”. Będziemy zatem dodawać wszystkie *realne* i zrównoważone źródła energii, a następnie zbierzemy je wszystkie w zielonym słupku.

W czerwonym słupku będziemy szacować poziom konsumpcji dla „typowej średniozamożnej osoby”. Zachęcam także do oszacowania i podliczenia *własnej* konsumpcji i do stworzenia spersonalizowanej lewej strony. Można to szybko wykonać na przykład za pomocą kalkulatora dostępnego na stronie <http://ziemianarozdrozu.pl/kalkulator>

Później zastanowimy się nad obecnym *średnim* zużyciem energii Europejczyków i Amerykanów.



Oto niektóre z wiodących sposobów zużycia energii (czerwony słupek):

- transport:
samochody, samoloty, transport towarów,
- ogrzewanie i wentylacja,
- oświetlenie,
- systemy informacyjne i inne gadżety,
- jedzenie,
- przemysł wytwórczy.

W słupku zrównoważonego wytwarzania energii (zielony słupek) główne punkty to:

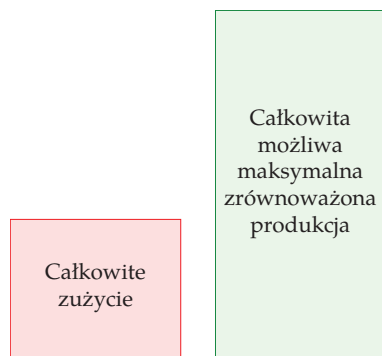
- energia wiatrowa,
- energia słoneczna:
fotowoltaiczna, fototermiczna, biomasa,
- energia wodna,
- energia fal,
- energia pływów,
- geotermia,
- energetyka jądrowa? (ze znakiem zapytania, gdyż nie jest do końca jasne, czy ten rodzaj energii można zaliczyć do „zrównoważonych”).

Kiedy oszacujemy, ile energii zużywamy na ogrzewanie, transport, produkcję itp., naszym celem będzie nie tylko podsumowanie wyniku dla lewego słupka bilansu, lecz także zrozumienie, od czego zależy każda z liczb oraz jak bardzo jest podatna na modyfikacje.

Polak zużywa średnio 30–40% energii mniej niż Brytyjczyk. Niezależnie od tego, czy rozpatrujemy jazdę samochodem, liczbę podróży lotniczych, gąźetów czy ogólny poziom konsumpcji, to przeciętny Polak aspiruje do ich zwiększania (a więc i idącego za tym wzrostu zużycia energii). Podobny jest klimat naszych krajów, nawyki żywieniowe i kąpielowe. Z tego powodu w rozdziałach dotyczących zużycia energii nie będziemy wprowadzać różnic. Do kwestii mniejszego zapotrzebowania Polaka na energię wrócimy w rozdz. 18.

W zielonym słupku będziemy dodawać szacunkowe liczby dotyczące zrównoważonego wytwarzania energii w Wielkiej Brytanii. To pozwoli nam odpowiedzieć na pytanie: „Czy faktycznie Wielka Brytania jest w stanie funkcjonować w oparciu o własne źródła energii odnawialnej?”.

Oczywiście odpowiedź na pytanie, czy zrównoważone źródła energii, które będziemy umieszczać w prawej kolumnie, są opłacalne z ekonomicznego punktu widzenia, jest niezwykle istotna. Jednak zostawmy je na razie na boku i przystąpmy do uzupełniania obydwu kolumn. Czasami ludzie za bardzo skupiają się na ekonomicznej opłacalności różnych przedsięwzięć i tracą z oczu całościowy obraz problemu. Na przykład ludzie, dyskutując o tym, czy energia wiatrowa jest tańsza od atomowej, zapominają zadać sobie pytania o to, „Jakie zasoby energii wiatru są dostępne na danym obszarze?”, czy też „Jak dużo zostało nam jeszcze uranu?”.



Po dodaniu wszystkich czynników wynik powinien wyglądać mniej więcej tak: Jeśli okaże się, że wielkość zużycia energii jest mniejsza niż wielkość jej realnego zrównoważonego wytwarzania, to będziemy mogli powiedzieć: „Dobrze, może mamy więc szansę na życie w zrównoważony sposób”. Przyjrzyjmy się teraz ekonomicznym, społecznym oraz środowiskowym kosztom zrównoważonych alternatyw i rozważmy, które z nich zasługują na dogłębne badania i rozwój. Jeśli wykonamy to zadanie dobrze, może okazać się, że wcale nie grozi nam kryzys energetyczny.

Z drugiej strony wynik naszych obliczeń może wyglądać tak:



To znacznie bardziej ponura wizja. Takie zestawienie oznacza: „Niestety, nieważne, jakie są aspekty ekonomiczne zrównoważonej energii – i tak *nie mamy jej wystarczająco dużo*, by mogła zaspokoić potrzeby naszego obecnego stylu życia. Nadchodzą ogromne zmiany”.

Energia i moc

Większość dyskusji dotyczących wytwarzania oraz zużycia energii gmatwa się w pewnym momencie ze względu na pokaźną liczbę typów *jednostek*, w których mierzone są energia i moc. Jednostki te zaczynają się od ton ekwiwalentu ropy przez terawatogodziny (TWh), na „eksadżulach” (EJ) kończąc. Mało kto poza specjalistami ma pojęcie o tym, jaką rzeczywistą ilość energii przedstawia baryłka ropy, czy też milion jednostek BTU. W tej książce przedstawimy, wszystkie używane miary wielkości w spójnym i prostym zbiorze jednostek, do którego każdy może odwołać się w codziennym życiu.

Jednostką *energii*, którą wybrałem jest kilowatogodzina (kWh). Ilość ta jest określana mianem jednej jednostki na rachunkach za elektryczność i kosztowała ona zwykłego użytkownika w Wielkiej Brytanii około 10 pensów w roku 2008 [w Polsce rachunek za 1 kWh energii w roku 2008 wynosił: 25 groszy za prąd oraz mniej więcej drugie tyle za przesył energii, w sumie około 50 groszy – red.] Jak zobaczymy dalej, większość codziennych sytuacji wiąże się ze zużyciem jednostek energii równych małym liczbom kilowatogodzin.

Ilekróć mowa w tej książce o *mocy* (poziomie produkcji lub zużycia energii), naszą główną jednostką będzie kilowatogodzina na dobę (kWh/d). Czasami będziemy także używać watów ($40\text{W} \approx 1 \text{ kWh/d}$) oraz kilowatów ($1\text{kW} = 1000\text{W} = 24 \text{ kWh/d}$), co wytłumaczę poniżej. Kilowatogodzina na dobę jest przyjętą jednostką używaną dla potrzeb jednego człowieka, bo większość osobistych czynności energochłonnych pochłania energię na poziomie niewielkiej liczby kilowatogodzin dziennie. Na przykład jedna żarówka o mocy 40 W, świecąca bez przerwy, zużywa *jedną* kilowatogodzinę dziennie. Niektóre koncerny energetyczne w Wielkiej Brytanii dołączają do wydawanych przez siebie rachunków wykresy przedstawiające zużycie energii w kilowatogodzinach na dobę. Ja będę używał tej samej jednostki dla wszystkich form mocy, nie tylko elektryczności. Zużycie benzyny, zużycie gazu, zużycie węgla będą mierzyć w kilowatogodzinach na dobę. Wyjaśnijmy to: dla niektórych słowo *moc* oznacza jedynie zużycie energii elektrycznej. Jednakże w książce tej skupiamy się na



Fot. 2.1. Odróżnianie energii od mocy. Każda z tych 60 W zapalonych żarówek pobiera moc 60 W. Nie oznacza to jednak energii 60 W. Żarówka zużywa 60 W mocy elektrycznej, gdy jest włączona oraz emituje 60 W mocy w formie światła i ciepła (głównie tego drugiego).

objętość
mierzona jest
w **litrach**

przepływ
mierzony jest
w **litrach na minutę**

energia
mierzona jest
w **kWh**

moc
mierzona jest
w **kWh na dobę**

wszystkich rodzajach produkowanej i zużywanej energii – będę zatem używał słowa moc w odniesieniu do każdego z nich.

Jedna kilowatogodzina na dobę to w przybliżeniu moc, którą w przybliżeniu mógłbyś uzyskać z jednego służącego, człowieka pracującego fizycznie. Zatem liczba kilowatogodzin, które zużywasz każdego dnia, jest równa liczbie służących, którzy pracowaliby za Ciebie.

Potocznie ludzie używają słów: *energia* i *moc* zamiennie, jednakże w tej książce będziemy rygorystycznie trzymali się ich naukowych definicji. *Moc określa tempo, w którym coś zużywa energię.*

Być może dobrym sposobem na wytłumaczenie znaczenia **energii** i **mocy** jest zastosowanie analogii do **wody** i **strumienia wody** w kranie. Jeśli chcesz napić się wody, myślisz o **objętości** – na przykład **jednym litrze** (jeśli jesteś bardzo spragniony). Kiedy odkręcisz kurek w kranie, stworzysz **przepływ** wody – **jeden litr na minutę**, jeśli woda leci słabym strumieniem, lub 10 litrów na minutę – jeśli mamy do czynienia z wydajniejszym kranem. Możesz otrzymać tę samą **objętość** wody (jeden litr) zarówno dzięki pobieraniu wolno ciekącej przez minutę wody z pierwszego kranu, jak i poprzez pobieranie wody z drugiego kranu przez 6 sekund. **Objętość** dostarczona w określonym czasie jest równa wielkości przepływu pomnożonemu przez **czas**:

$$\text{objętość} = \text{przepływ} \times \text{czas}$$

Mówimy zatem, że *przepływ* to *tempo*, w którym dostarczana jest *objętość*. Jeśli znasz objętość dostarczoną w określonym czasie, możesz otrzymać wielkość przepływu poprzez podzielenie objętości przez czas:

$$\text{przepływ} = \text{objętość} / \text{czas}$$

Oto zależność pomiędzy energią a mocą: **energia** jest jak **objętość** wody, zaś **moc** jak wielkość jej **przepływu**. Na przykład, niezależnie od tego, kiedy toster został włączony, zaczyna on zużywać **moc** na poziomie jednego kilowata i potem na tym samym poziomie poboru mocy pracuje on dopóty, dopóki nie wyłączy się go. Innymi słowy, toster (jeśli jest stale włączony), który zużywa jedną kilowatogodzinę (kWh) energii w czasie godziny, w czasie doby zużywa 24 kilowatogodziny.

Im dłużej toster jest włączony, tym więcej **energii** zużywa. Możesz obliczyć wielkość energii zużytej na daną czynność, jeśli pomnożysz moc przez czas trwania czynności:

$$\text{energia} = \text{moc} \times \text{czas}$$

Standardową, międzynarodową jednostką energii jest *dżul*, ale niestety to zbyt mała miara, by można było na niej swobodnie pracować. Jedna kilowatogodzina jest równa 3,6 milionom dżuli (3,6 megadżulom albo 3,6 MJ).

Moc jest tak przydatna i ważna, że ma coś, czego nie posiada przepływ wody – swoje specjalne jednostki. Gdy mówimy o przepływie, możemy wyrazić go w litrach na minutę, galonach na godzinę czy metrach sześciennych na sekundę. Te nazwy jednostek jasno pokazują, że przepływ jest objętością w jednostce czasu. Moc *jednego dżula na sekundę* nazywana jest *jednym watem*. Tysiąc dżuli na sekundę to jeden kilowat. Wyjaśnijmy teraz prawidłową terminologię: toster zużywa jeden kilowat. Nie zużywa on „jednego kilowata na sekundę”. Część „na sekundę” jest już wbudowana w definicję kilowata – jeden kilowat to „jeden kilodżul na sekundę”. Podobnie mówimy: „Elektrownia jądrowa generuje jeden gigawat”. Przy okazji, jeden gigawat to miliard watów, milion kilowatów lub

energia	moc
jest mierzona	jest mierzona
w kWh	w kWh na dobę
lub	lub
MJ	kW
	lub
	W (watach)
	lub
	MW (megawatach)
	lub
	GW (gigawatach)
	lub
	TW (terawatach)

1000 megawatów. Zatem jeden gigawat to milion naszych tosterów. Zapisując słowo gigawat w skrócie, używamy wielkich liter GW.

Proszę, nie mówcie nigdy: „Jeden kilowat na sekundę”, „Jeden kilowat na godzinę” czy „Jeden kilowat na dobę”. Żadne z tych określeń nie jest właściwą miarą mocy. Pragnienie ludzi, by mówić „na coś”, gdy rozmawiają o swoich tosterach, jest jednym z powodów, dla których zdecydowałem się użyć jako jednostki „kilowatogodziny na dobę”. Przykro mi, że ta jednostka jest trochę niewygodna w mowie i piśmie, ale to drobiazg w porównaniu z wygodą i klarownością jej stosowania.

I jeszcze ostatnia sprawa do wyjaśnienia. Gdy mówię, że „ktoś zużył gigawatogodzinę energii”, to po prostu określam, *jak wiele* energii zużył, nie zaś *jak szybko* ją zużył. Mówienie o gigawatogodzinach wcale *nie* oznacza ilości energii zużytej w czasie *jednej godziny*. Możesz zużyć jedną gigawatogodzinę energii przez włączenie miliona tosterów na czas jednej godziny lub przez włączenie 1000 tosterów na czas 1000 godzin.

Tak jak mówiłem, będę zwykle podawał moc w jednostce kWh/d *na osobę*. Jednym z powodów, dla których lubię *te osobiste* jednostki, jest fakt, że znacznie ułatwiają one przejście z rozmowy o Wielkiej Brytanii do rozmowy o każdym innym kraju lub regionie. Wyobraź sobie, że rozmawiamy, na przykład, o spalaniu odpadów i dowiadujemy się, że w Wielkiej Brytanii otrzymuje się w ten sposób moc 7 TWh rocznie, zaś w Danii 10 TWh rocznie. Czy mówi nam to cokolwiek o tym, czy w Danii spala się więcej śmieci niż w Wielkiej Brytanii? O ile wiedza na temat całkowitej mocy, wygenerowanej ze spalania odpadów może być interesująca, to jednak tym, co zazwyczaj interesuje nas najbardziej, jest ilość spalanych odpadów w przeliczeniu na *jedną osobę*. (Odnotujmy: dla Danii jest to 5 kWh/d na osobę, zaś dla Wielkiej Brytanii 0,3 kWh/d na osobę, z czego wynika, że Duńczycy spalają proporcjonalnie 13 razy więcej odpadów niż Brytyjczycy). By zaoszczędzić na tuszu, będę skracał wyrażenie „na osobę” i zapisywał je tak: „/o”. Poprzez konsekwentne wyrażanie wszystkiego, o czym będziemy mówili, w przeliczeniu na osobę, mam nadzieję otrzymać na koniec książkę, której treść będzie przystępna dla każdego. Książkę, która – mam nadzieję – stanie się przydatna przy prowadzeniu rozmów o zrównoważonej energetyce na całym świecie.

Męczące szczegóły

Czy energia nie jest zachowywana? Mówimy o „zużywaniu” energii, ale czy jedno z praw natury nie mówi, że energia nie może być stworzona ani zniszczona?

Tak, wyrażam się nieprecyzyjnie. Ta książka jest tak naprawdę o *entropii* – dość problematycznym do wyjaśnienia zjawisku. Kiedy „zużywamy” jeden kilodżul energii, tym, co tak naprawdę robimy, jest wzięcie jednego kilodżula energii ze stanu o *niskim poziomie entropii* (np.: elektryczności) oraz *zamiana* go w dokładnie tę samą ilość energii, ale w innej formie, która zazwyczaj ma znacznie wyższy poziom entropii (np.: gorące powietrze lub gorąca woda). Mimo to, że „zużywamy” energię, ona tak naprawdę nadal istnieje. Nie możemy jednak „zużywać” energii bez końca. Tylko energia o *niskim poziomie entropii* jest dla nas przydatna.

Czasami rodzącej energii odróżnia się od siebie poprzez dodanie znaku do jednostki: jedna kWh(e) oznacza jedną kilowatogodzinę energii elektrycznej – energii najwyższego stopnia. Jedna kWh(c) to jedna kilowatogodzina energii

1 TWh (jedna terawatogodzina) jest równa jednemu miliardowi kWh.

cieplej – np. energii zawartej w dziesięciu litrach wrzącej wody. Energia drżiąca w przedmiotach o wysokiej temperaturze jest bardziej przydatna (niższa entropia) niż energia przedmiotów chłodnych. Trzecim rodzajem energii jest energia chemiczna. Jest ona ceniona równie wysoko jak energia elektryczna.

Mówienie o energii zamiast o entropii jest, co prawda, dość niechlujne, ale stanowi duże ułatwienie. Dlatego będziemy używać tego skrótowego myślowego także w tej książce. Czasem jednak będziemy musieli przywołać się do porządku, na przykład kiedy będziemy omawiać tematy chłodzenia, elektrowni, pomp ciepła czy energii geotermalnej.

Czy nie porównujemy przypadkiem jabłek i pomarańczy? Czy ma sens porównywanie różnych rodzajów energii – na przykład energii chemicznej, zawartej w napędzanych benzyną samochodach z energią elektryczną, pochodzącą z turbin wiatrowych?

Porównując zużywaną energię z energią realnie możliwą do wyprodukowania, nie twierdzę wcale, że wszystkie rodzaje energii są sobie równe i można je sobą zastępować. Energia elektryczna, wygenerowana przez turbinę wiatrową, na nic nie przyda się w silniku benzynowym. Tak samo benzyna będzie bezużyteczna do zasilania telewizora. W zasadzie energia może być transformowana z jednej formy w inną, jednak każda taka konwersja niesie ze sobą straty energii. Elektrownie spalające paliwa kopalne przetwarzają *energię chemiczną* w *elektryczność* (z wydajnością 30–45%), zaś huty aluminium zużywają energię elektryczną, by stworzyć produkt o wysokim poziomie *energii chemicznej* – aluminium (z wydajnością ok. 30%).

W niektórych bilansach energii wyprodukowanej i zużytej wszystkie różniane formy energii wyrażane są w tych samych jednostkach, jednak wcześniej podaje się konkretne przeliczniki – energia elektryczna pochodząca z elektrowni wodnych jest warta 2,5 razy więcej niż energia chemiczna pochodząca z ropy naftowej. To podbijanie wartości efektywnej energetycznie elektryczności może być uzasadnione w następujący sposób: 1 kWh prądu elektrycznego odpowiada 2,5 kWh ropy, ponieważ jeśli spalimy tyle ropy w tradycyjnej elektrowni, to uzyskamy zaledwie 40% z 2,5 kWh energii ropy, czyli 1 kWh prądu elektrycznego. W tej książce będę jednak zwykle używał konwersji „jeden do jednego” przy porównywaniu różnych form energii. *Nie* chodzi bowiem o to, że 2,5 kWh ropy jest zawsze nieodwołalnie równe 1 kWh elektryczności – taki jest akurat postrzegany przez nas współczynnik konwersji w naszym świecie, w którym energię ropy zamienia się w elektryczność. Owszem, konwersja energii chemicznej w elektryczną przeprowadzana jest z niską wydajnością. Można jednak również zamieniać energię elektryczną w chemiczną. W alternatywnym świecie (być może wcale nie tak odległym), gdzie istnieją relatywnie obfite zasoby energii elektrycznej, brakuje zaś energii chemicznej, moglibyśmy używać elektryczności do produkcji paliw płynnych. Rzecz jasna w takim świecie używalibyśmy zupełnie innych przeliczników – każda kWh benzyny kosztowałaby nas wtedy ok. 3 kWh energii elektrycznej! Myślę, że naukowym i ponadczasowym sposobem przeliczania oraz sumowania różnych rodzajów energii jest traktowanie 1 kWh energii chemicznej identycznie, jak 1 kWh energii elektrycznej. Wybrany przeze mnie sposób porównywania różnych rodzajów energii „jeden do jednego” oznacza, że niektóre z wyników moich obliczeń mogą się nieco różnić od wyników innych osób. Przykładowo, *Przegląd statystyczny zasobów i zużycia energii British Petroleum* traktuje 1 kWh energii elektrycznej jako ekwiwalent $100/38 \approx 2,6$ kWh ropy. Z drugiej strony, rządowy *Przegląd*

Statystyk Energetycznych Wielkiej Brytanii używa – tak jak ja – konwersji „jeden do jednego”. Jednak – podkreślę to raz jeszcze – wcale nie oznacza to, że można zamieniać jeden rodzaj energii bezpośrednio w inny. Zamiana energii chemicznej w elektryczną zawsze wiąże się ze stratą energii, podobnie jak zamiana energii elektrycznej w chemiczną.

Fizyka i równania

W niniejszej książce moim celem jest nie tylko określenie liczb, które oddawałyby nasz obecny poziom zużycia energii oraz możliwości jej zrównoważonego wytwarzania, ale także wyjaśnienie *od czego te liczby zależą*. Zrozumienie tego jest konieczne, jeśli chcemy wybierać rozsądne strategie, mające na celu zmianę niektórych tych liczb. Tylko wówczas, gdy zrozumiemy fizyczne mechanizmy stojące za wytwarzaniem i zużyciem energii, będziemy mogli właściwie ocenić twierdzenia takie, jak: „Samochody tracą 99% energii do nich dostarczonej, a moglibyśmy tak je przerobić, by zużywały 100 razy mniej energii”. Czy to twierdzenie jest prawdziwe? By wytłumaczyć odpowiedź na nie, będę musiał posłużyć się równaniami, jak np.

$$\text{energia kinetyczna} = \frac{1}{2} mv^2$$

Oczywiście zdaję sobie sprawę z tego, że dla wielu Czytelników podobny zapis jest równie niezrozumiały, jak zdanie w jakimś obcym języku. Obiecuję jednak, że *wszystkie te obcojęzyczne zapisy umieszczę w technicznych rozdziałach na końcu książki*. Rozdziały te powinny być zrozumiałe i interesujące dla każdego Czytelnika z wykształceniem średnim z matematyki, fizyki czy chemii. Główna część książki (od strony 10 do 265) napisana została tak, by mógł ją zrozumieć każdy, kto potrafi dodawać, mnożyć i dzielić. Jest ona specjalnie dedykowana naszym droгим reprezentantom – parlamentarzystom.

I jeszcze jedna sprawa zanim przejdziemy dalej. Nie wiem wszystkiego na temat energii. Nie znam wszystkich odpowiedzi, zaś liczby, które podaję, mogą być weryfikowane i korygowane. (W rzeczy samej, oczekuję poprawek i z chęcią opublikuję je na stronie internetowej dotyczącej mojej książki). Jedyną kwestią, której *jestem* pewien, jest to, że odpowiedzi na pytania o zrównoważoną energię będą zawierały *liczby*. Każda rozsądna dyskusja na temat zrównoważonej energii wymaga liczb. Ta książka jej zawiera i pokazuje, jak z nich korzystać. Mam nadzieję, że Wam się spodoba!

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 33 Część „na sekundę” jest już wbudowana w definicję kilowata. Inne przykłady jednostek, które jak wata mają wbudowaną w siebie część „na czas”, to m.in. węzeł: „Nasz jacht rozwinął prędkość dziesięciu węzłów” (jeden węzeł to jedna mila morska na godzinę); herc: „Mogłem usłyszeć buczenie na poziomie 50 herców” (jeden herc to częstotliwość jednego cyklu na sekundę); amper: „Bezpieczniki wysiadają, gdy natężenie jest większe niż 13 amperów” (*nie*: 13 amperów na sekundę); konie mechaniczne: „Ten śmierzący silnik dostarcza 50 koni mechanicznych” (*nie*: 50 koni mechanicznych na sekundę ani 50 koni mechanicznych na godzinę, ani 50 koni mechanicznych dziennie, po prostu 50 koni mechanicznych).
- Proszę, nie mówcie nigdy: „Jeden kilowat na sekundę”. Istnieją pewne rzadkie i ściśle określone odstępstwa od tej reguły. Jeśli rozmawiamy o wzroście zapotrzebowania na moc, możemy powiedzieć: „Brytyjskie zapotrzebowanie na prąd rośnie w skali jednego gigawata rocznie”. W rozdziale 26, gdy będę omawiał wahania w energetyce wiatrowej, powiem: „Pewnego ranka moc dostarczana przez irlandzkie wiatraki spadała w tempie 84 MW na godzinę”. Proszę, bądźcie uważni! Nawet jedna przypadkowa sylaba może doprowadzić do nieporozumienia. Na przykład Twój licznik elektryczny używa jako jednostki kilowatogodzin (kWh), nie zaś „kilowatów-na-godzinę”.

Na stronie 368 umieściłem diagram, który powinien ułatwić Ci zamianę kWh na osobę na dobę na inne jednostki, w których wyraża się moc.

3 Samochody

W pierwszym rozdziale dotyczącym konsumpcji przyjrzymy się bliżej ikonie współczesnej cywilizacji: samochodowi z jedną osobą w środku.

Jak dużo energii zużywa przeciętny użytkownik samochodu? Gdy zna się przeliczniki, obliczenie tego to tylko prosta arytmetyka:

$$\text{zużycie energii} = \frac{\text{dziennie pokonywany dystans}}{\text{dystans na jednostkę paliwa}} \times \text{energia na jedn. paliwa}$$

Za *dystans pokonywany dziennie* przyjmijmy 50 km.

Za *dystans na jednostkę paliwa* – nazywany też *efektywnością paliwową* – przyjmijmy 12 km na litr (wielkość zaczerpnięta z reklamy rodzinnego samochodu, spalającego 8,6 litra/100 km).

A co z **energią na jednostkę paliwa** (zwaną również *wartością kaloryczną* lub *gęstością energetyczną*)? Znacznie więcej przyjemności niż sprawdzanie dokładnej liczby w tablicach, sprawi nam – przy odrobinie twórczego myślenia – oszacowanie rzędu wielkości. Wszystkie paliwa samochodowe (czy to olej napędowy, czy benzyna) są węglowodorami. Węglowodory znajdują się także w naszym pożywieniu, z wartością kaloryczną wypisaną dla naszej wygody na boku opakowania: około 8 kWh na kg (rys. 3.2). Kiedy już oszacujemy efektywność paliwową naszego samochodu w kilometrach na jednostkę *objętości* paliwa, musimy następnie wyrazić wartość opałową jako energię na jednostkę *objętości*. By zamienić „8 kWh na kg” naszego paliwa (energia na jednostkę masy) na energię na jednostkę objętości, musimy znać gęstość paliwa. Jaka jest zatem gęstość masła? No cóż, masło unosi się na wodzie, tak samo jak wyciekające paliwo, tak więc ich gęstość musi być trochę mniejsza niż gęstość wody, która wynosi 1 kg na litr. Jeśli założymy gęstość 0,8 kg na litr, otrzymamy następującą wartość opałową:

$$8 \text{ kWh na kg} \times 0,8 \text{ kg na litr} \approx 7 \text{ kWh na litr}$$

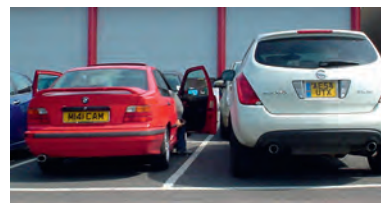
Zamiast jednak zdawać się na niedokładne obliczenia, zastosujmy rzeczywistą wartość, która dla benzyny wynosi 10 kWh na litr.

$$\begin{aligned} \text{zużycie energii} &= \frac{\text{dziennie pokonywany dystans}}{\text{dystans na jednostkę paliwa}} \times \text{energia na jedn. paliwa} \\ &= \frac{50 \text{ km/dobę}}{12 \text{ km/litr}} \times 10 \text{ kWh/litr} \\ &\approx \mathbf{40 \text{ kWh/dobę}} \end{aligned}$$

Gratulacje! Właśnie dokonaliśmy naszego pierwszego oszacowania wielkości zużycia energii. Umieściłem to oszacowanie w lewej kolumnie na rys. 3.3. Wysokość czerwonego słupka odpowiada 40 kWh na osobę dziennie.

Nasze obliczenia dotyczą współczesnego statystycznego kierowcy, jeżdżącego przeciętnym samochodem. W następnych rozdziałach oszacujemy *średnią* konsumpcję wszystkich ludzi w Wielkiej Brytanii, biorąc pod uwagę, że nie każdy jeździ samochodem. W Części II omówimy także, jak *mogłoby* wyglądać zużycie energii, gdybyśmy wykorzystywali inne technologie, takie jak samochody elektryczne lub na wodór.

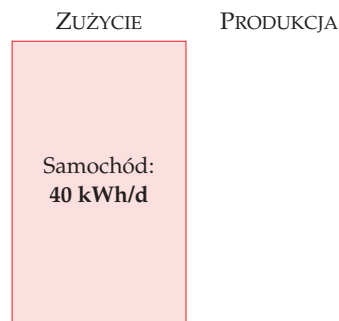
Dlaczego samochód przejeżdża 12 kilometrów na litrze paliwa? Co dzieje się z tą energią? Czy moglibyśmy wyprodukować samochody, które przejeżdżałyby



Fot. 3.1. Samochody Czerwone BMW przytłoczone przez statek kosmiczny z planety Dorkon



Fot. 3.2. Chcesz wiedzieć, ile energii znajduje się w paliwie samochodowym? Spójrz na etykietę na opakowaniu masła lub margaryny. Wartość opałowa wynosi 3000 kJ na 100 g, czyli około 8 kWh na kg.



Rys. 3.3. Wnioski z rozdziału 3: przeciętny kierowca samochodu zużywa 40 kWh dziennie.

1200 kilometrów na litrze? Jeśli jesteśmy zainteresowani próbą ograniczenia zużycia energii przez samochody, powinniśmy najpierw zrozumieć stojące za tym prawa fizyki. Odpowiedzi na te pytania znajdują się w technicznym rozdziale A (str. 270), który zawiera prosty model zużycia energii przez samochody. Jeżeli równanie $\frac{1}{2}mv^2$ nie przyprawia Was o ból głowy, to gorąco zachęcam do czytania rozdziałów technicznych.

Wniosek z rozdziału 3: *Typowy kierowca samochodu zużywa 40 kWh dziennie.* Teraz powinniśmy zająć się słupkiem zrównoważonego wytwarzania energii. Musimy więc znaleźć coś, do czego moglibyśmy porównać zużycie energii związane z jazdą samochodem.

Pytania

A co z kosztami energetycznymi związanymi z produkcją paliwa samochodowego?

Dobre pytanie. Gdy szacuję wielkość energii zużywanej na poszczególne czynności, mam skłonność do wyznaczania raczej wąskich „granic” dotyczących danej czynności. Taki wybór zdecydowanie ułatwia dokonywanie obliczeń, aczkolwiek zgadzam się, że dobrze byłoby spróbować oszacować całkowity wpływ danej działalności. Obliczono, że wytworzenie każdej jednostki benzyny wymaga zużycia 1,4 jednostki ropy oraz innych podstawowych paliw (Treloar i in., 2004).

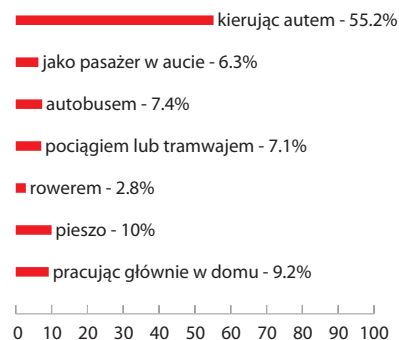
A co z kosztami energetycznymi wyprodukowania samochodu?

Przyznaję, że również ten koszt znalazł się poza granicami mojej kalkulacji. O produkcji samochodów porozmawiamy w rozdziale 15.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 37 **Za dystans pokonywany dziennie przyjmijmy 50 km.** Odpowiada to 18 000 km rocznie. Prawie połowa brytyjskiej populacji jeździ do pracy samochodem. Całkowita liczba podróży samochodowych w Wielkiej Brytanii wynosi 686 miliardów pasażerokilometrów rocznie, co odpowiada średniej odległości przejeżdżanej samochodem przez Brytyjczyka, wynoszącej 30 km dziennie. – Źródło: Ministerstwo Transportu [5647rh]. Jak już wspomniałem na stronie 30. moim celem jest oszacowanie wielkości konsumpcji energii „typowej średniozamożnej osoby” – poziomu konsumpcji, do którego aspiruje wielu ludzi. Niektórzy jeżdżą niewiele. W tym rozdziale chciałem raczej oszacować energię zużywaną przez kogoś, kto wybiera jeżdżenie samochodem niż przywoływać bezosobową średnią dla Wielkiej Brytanii, która miesza ze sobą kierowców i osoby nie jeżdżące samochodem. Założę się, że gdybym powiedział: „Średnie zużycie energii na jeżdżenie samochodem w Wielkiej Brytanii wynosi 13 kWh na osobę dziennie”, to niektórzy nie zrozumieliby mnie i odpowiedzieli: „Jestem kierowcą samochodu, więc powinienem zużywać 13 kWh/dobę”. Jeśli wziąć pod uwagę cały transport drogowy, a nie tylko samochody osobowe i motocykle, to zużycie energii na osobę wyniosłoby 24 kWh/dobę.
- ... **przyjmijmy 12 km na litr.** To średnia dla brytyjskich samochodów w roku 2005 [27]dc5]. Samochody benzynowe cechuje średnie zużycie paliwa rzędu 9,1 litra/100 km; samochody z silnikiem Diesla – 7,2 litra/100 km; nowe samochody benzynowe (nie starsze niż 2 lata) – 8,8 litra/100 km (Ministerstwo Transportu, 2007). Honda – „najbardziej wydajny paliwowo concern samochodowy w Ameryce” – odnotowała, że ich wszystkie nowe samochody sprzedane w roku 2005, miały średnie zużycie paliwa na poziomie 8,1 litra/100 km. [28abpm].



Rys. 3.4. W jaki sposób Brytyjczycy docierają do pracy. Dane pochodzą ze spisu ludności z 2001 roku.

- Jeśli założymy gęstość 0,8 kg na litr. Gęstość benzyny wynosi 0,737 kg/l. Gęstość oleju napędowego 0,820–0,950 kg/l. [nmn4l].
- ... zastosujmy rzeczywistą wartość, która dla benzyny wynosi 10 kWh na litr. ORNL [2hcgdh] dostarcza następujących wartości opałowych: diesel 10,7 kWh/l; paliwo do odrzutowców 10,4 kWh/l; benzyna 9,7 kWh/l. Gdy sprawdza się wartości opałowe, pojawiają się takie terminy, jak: *wartość opałowa brutto* oraz *wartość opałowa netto*. Różnica między nimi wynosi zaledwie 6% dla paliw silnikowych, nie ma więc potrzeby, by rozróżniać je w tej książce. Pozwólcie jednak, że mimo wszystko to wyjaśnię. *Wartość opałowa brutto* jest to rzeczywista energia chemiczna uwolniona podczas spalania paliwa. Jednym z produktów spalania jest woda i w większości silników oraz elektrowni część energii paliwa jest zużywana na odparowanie tej wody. *Wartość opałowa netto* określa, jak dużo energii pozostaje, przy założeniu, że energia zużyta na odparowanie wody jest bezużyteczna i stanowi odpad.

Gdy pytamy: „Jak dużo energii pochłania mój styl życia?“, powinniśmy użyć właśnie wartości opałowej brutto. Z drugiej strony, wartość opałowa netto stanowi przedmiot zainteresowania inżyniera w elektrowni, gdy ma zdecydować, który rodzaj paliwa powinien być w niej spalany. *W tej książce starałem się używać wartości opałowej brutto.*

Ostatnia uwaga, specjalnie dla czepialskich pedantów, którzy powiedzą: „Masło nie jest węglowodorem“. Przyznaję, masło nie jest *czystym* węglowodorem. Jednakże stwierdzenie, że główny komponent masła stanowią długie łańcuchy węglowodorowe – zupełnie jak w benzynie – jest dobrym przybliżeniem. I jak okazuje się w praktyce, daje ono wynik odległy jedynie o 30% od dokładnej odpowiedzi. Witajcie w partyzanckiej fizyce.

wartości opałowe	
benzyna	10 kWh na litr
olej napędowy	11 kWh na litr



4 Wiatr

Wielka Brytania dysponuje najlepszymi zasobami wiatru w Europie.

Komisja ds. Zrównoważonego Rozwoju

Farmy wiatrowe zniszczą wiejski krajobraz, do tego zupełnie bezsensownie.

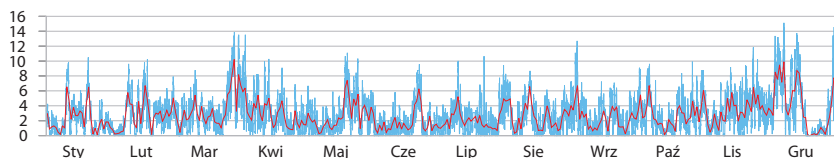
James Lovelock

Jak wiele energii wiatrowej moglibyśmy potencjalnie wytworzyć?

Możemy oszacować potencjał wiatru wiejącego na lądzie w Wielkiej Brytanii poprzez pomnożenie średniej mocy farm wiatrowych na jednostkę powierzchni przez powierzchnię przypadającą na osobę w Wielkiej Brytanii:

moc na osobę = moc wiatru na jedn. pow. x jedn. pow. na osobę.

Rozdział B (str. 279) wyjaśnia, jak oszacować moc na jednostkę powierzchni, dostarczaną przez farmę wiatrową w Wielkiej Brytanii. Jeśli typowa prędkość wiatru wynosi 6 m/s (22 km/h), to moc farmy wiatrowej na jednostkę powierzchni jest równa $2 \text{ W} / \text{m}^2$.

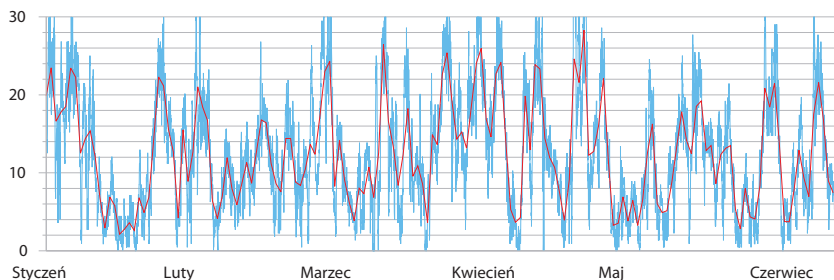


Prawdopodobnie prędkość wiatru równa 6 m/s dla wielu miejsc w Wielkiej Brytanii jest przeszacowana. Na przykład rys. 4.1 przedstawia średnie dzienne prędkości wiatru w Cambridge w roku 2006. Osiągają one tam 6 m/s zaledwie przez 30 dni w roku – histogram znajduje się na rys. 4.6. Jednakże w niektórych miejscach średnie prędkości wiatru przekraczają 6 m/s – na przykład, na szczycie góry Cairngorm w Szkocji (rys. 4.2).

Włączając do obliczeń gęstość zaludnienia w Wielkiej Brytanii, czyli 250 osób na kilometr kwadratowy – lub inaczej mówiąc 4000 m² na osobę, stwierdzimy, że farmy wiatrowe mogą wygenerować:

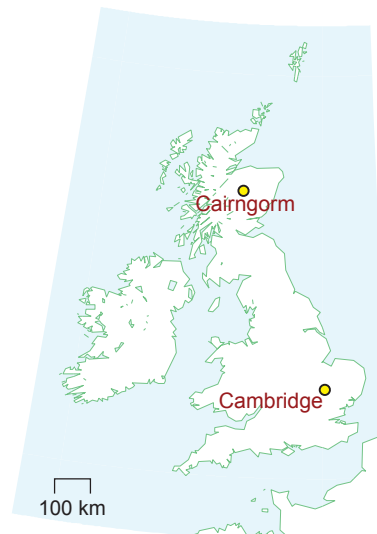
$$2 \text{ W} / \text{m}^2 \times 4000 \text{ m}^2 / \text{osobę} = 8000 \text{ W na osobę}$$

To wartość uzyskana przy założeniu, że farmy wiatrowe byłyby upakowane na powierzchni całego kraju oraz zakładając, że 2 W/m² jest poprawną wielkością mocy na jednostkę powierzchni. Zamieniając ten wynik na naszą ulubioną jednostkę mocy, otrzymamy 200 kWh/dobę na osobę.



Fot. 4.1. Średnia prędkość wiatru w metrach na sekundę w Cambridge dziennie (czerwona linia) oraz co pół godziny (błękitna linia) w roku 2006.

Spójrz także na rys. 4.6



Rys. 4.2. Średnia prędkość wiatru w Cairngorm, przez sześć miesięcy w 2006 roku (w metrach na sekundę)

Bądźmy jednak realistami. Jaką część kraju możemy wyobrazić sobie rzeczywistość pokrytą wiatrakami? Może 10%? Wniosek z tego taki, że jeśli pokryjemy wiatrakami (dostarczającymi 2 W/m^2) najbardziej wietrzne 10% powierzchni kraju, to będziemy w stanie wygenerować **20 kWh/dobę na osobę**, co stanowi połowę mocy zużywanej na przejeżdżanie 50 km dziennie przeciętnym samochodem napędzanym paliwami kopalnymi.

Może i lądowe zasoby wiatrowe Wielkiej Brytanii są *ogromne*, jednakże ewidentnie nie są wystarczające, by zaspokoić nasze *ogromne* zużycie energii. Do farm wiatrowych położonych na morzu przejdziemy później.

Prędkość wiatru w Polsce, średnio rzecz biorąc, jest trochę niższa niż w Wielkiej Brytanii, jednak są to niewielkie różnice, którą w dużym stopniu możemy skompensować, budując trochę wyższe wiatraki. Średnią prędkość wiatru wynoszącą 6 m/s w miejscach o bardzo dobrych warunkach wiatrowych mamy na wysokości około 60–80 m, co dość dobrze odpowiada wysokości budowanych wiatraków. Jednak raczej nie znajdziemy 30 000 km^2 dopuszczonych do zabudowy miejsc o tak dobrych warunkach wiatrowych. Załóżmy więc, że nasze wiatraki będą stać w miejscach ze średnią prędkością wiatru na poziomie $5,5 \text{ m/s}$. Oznacza to moc na jednostkę powierzchni równą $1,5 \text{ W/m}^2$.

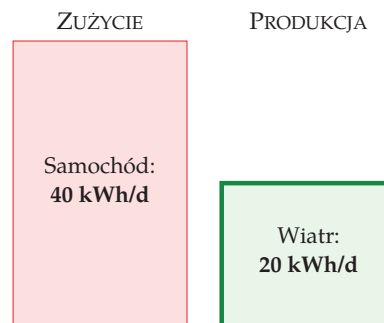
W Polsce na 1 osobę przypada 8000 m^2 , czyli dwa razy więcej niż w Wielkiej Brytanii, co daje nam moc całkowitą rzędu 30 kWh na osobę dziennie. Czyniąc za Davidem założenie, że zabudowujemy farmami wiatrowymi, wiatrak przy wiatraku, 10 procent powierzchni Polski, dostajemy ostatecznie wynik 30 kWh/dobę na osobę, czyli znacząco lepiej niż w Wielkiej Brytanii.

Powinienem szczególnie podkreślić, jak szczodre są poczynione przeze mnie założenia. Porównajmy nasze oszacowanie brytyjskiego potencjału wiatrowego z obecnie istniejącą infrastrukturą wiatrową na świecie. Liczba wiatraków, które byłyby potrzebne do zaopatrzenia Wielkiej Brytanii w 20 kWh/dobę na osobę, jest 50 razy większa od całej infrastruktury wiatrowej Danii, 7 razy większa niż na wszystkich farmach wiatrowych Niemiec i dwa razy większa od liczby wszystkich istniejących turbin wiatrowych na świecie.

Proszę, nie zrozumcie mnie źle. Czy mówię, że nie powinniśmy zwracać sobie głowy budowaniem farm wiatrowych? Wcale nie. Po prostu staram się przekazać pomocny w rozważaniach fakt, że gdybyśmy chcieli, aby energetyka wiatrowa rzeczywistość miała znaczenie, to farmy wiatrowe muszą pokrywać naprawdę *ogromne* powierzchnie.

Wniosek ten – że maksymalny udział wiatru na lądzie, choć *ogromny*, nie pokrywa naszego zapotrzebowania – jest istotny. Zweryfikujmy zatem kluczową wielkość – założoną przez nas moc farmy wiatrowej na jednostkę powierzchni (2 W/m^2) i porównamy ją z wartością odpowiadającą rzeczywistej brytyjskiej farmie wiatrowej.

Farma wiatrowa Whitelee, położona niedaleko Glasgow w Szkocji, posiada 140 turbin o łącznej mocy *szczytowej* wynoszącej 322 MW; całość przypada na powierzchnię 55 km^2 , co oznacza *maksymalnie* 6 W/m^2 . Średnia generowana moc jest mniejsza, ponieważ turbiny nie pracują z maksymalną mocą przez cały czas. Stosunek średniej mocy do mocy szczytowej nazywany jest *współczynnikiem obciążenia* lub *współczynnikiem wykorzystania mocy*. Jego wielkość może być bardzo zróżnicowana w zależności od miejsca, do którego się odnosi. Zazwyczaj współczynnik ten dla dobrze umiejscowionej farmy wiatrowej z nowoczesnymi



Rys. 4.3. Wnioski z rozdziału 4: Maksymalna rzeczywista moc wyprodukowana przez lądowe elektrownie wiatrowe w Wielkiej Brytanii, zajmujące 10% powierzchni kraju, wynosi 20 kWh/dobę na osobę.

MOC NA JEDNOSTKĘ POWIERZCHNI

farma wiatrowa	2 W/m^2 (prędkość 6 m/s)
----------------	--

Tabela 4.4. Fakty godne zapamiętania: farmy wiatrowe

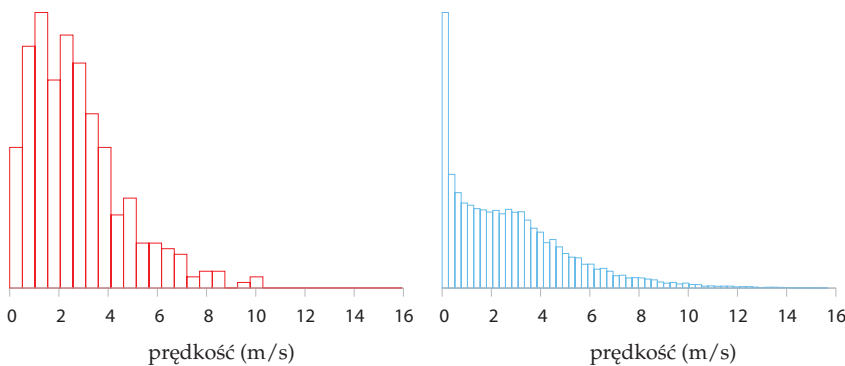
GĘSTOŚĆ ZALUDNIENIA W WIELKIEJ BRYTANII

250 na km^2 ↔ 4000 m^2 na osobę

Tabela 4.5. Fakty godne zapamiętania: gęstość populacji. Na stronie 351 znajduje się więcej danych dotyczących zagęszczenia ludności.

turbinami wynosi 30%. Jeśli założymy, że Whitelee ma współczynnik obciążenia równy 33%, to średnia produkcja mocy na jednostkę powierzchni wynosi 2 W/m^2 , a więc dokładnie tyle samo, ile obliczyliśmy wcześniej.

Farma wiatrowa Karcino, zlokalizowana niedaleko Kołobrzegu, posiada 17 turbin Vestas typu V90-3 o średnicy wirników 90 m, zamontowanych na wieżach o wysokości 105 m. W tym miejscu o bardzo dobrych warunkach wiatrowych i na tak dużej wysokości średnia prędkość wiatru wynosi 7 m/s . Łączna moc szczytowa wynosi 51 MW i przypada na powierzchnię 6 km^2 , czyli moc maksymalna farmy wynosi $8,5 \text{ W/m}^2$. Uruchomiona w 2010 roku farma ma wytwarzać 120 GWh rocznie, co oznacza średnią produkcję mocy na jednostkę powierzchni równą $2,3 \text{ W/m}^2$. Trochę więcej niż w obliczeniach, jest to jednak przykład elektrowni położonej w szczególnie sprzyjającym miejscu i wyposażonej w bardzo wysokie wiatraki.



Rys. 4.6. Histogram przedstawiający średnią prędkość wiatru w Cambridge w metrach na sekundę: średnie dobowe (po lewej) oraz średnie półgodzinne (po prawej)

Pytania

Buduje się coraz większe turbiny wiatrowe. Czy większy rozmiar turbin może wpłynąć na wnioski płynące z tego rozdziału?

Odpowiedź na to pytanie znajduje się w rozdziale B. Większe turbiny wiatrowe pozwalają osiągnąć większą opłacalność ekonomiczną, jednak nie zwiększają znacząco całkowitej mocy na jednostkę powierzchni, ponieważ większe wiatraki muszą się znajdować w większych odległościach od siebie. Farma wiatrowa o dwa razy większej wysokości dostarczy około 30% więcej mocy.

Energia wiatru stale ulega zmianom. Na pewno czyni to energetykę wiatrową mniej użyteczną.

Możliwe. Wrócimy do tej sprawy w rozdziale 26, gdzie bliżej przyjrzymy się sporadyczności wiatru oraz rozważymy kilka możliwych rozwiązań tego problemu, w tym magazynowanie energii oraz zarządzanie zapotrzebowaniem.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 40 Rys. 4.1 i rys. 4.6. Dane dotyczące wiatru w Cambridge pochodzą z Digital Technology Group, Computer Laboratory, Cambridge [vxhhj]. Stacja meteorologiczna znajduje się na dachu budynku Gates, o wysokości około 10 m. Prędkości wiatru na wysokości 50 m są zazwyczaj o 25% większe. Dane dotyczące Cairngorm (rys. 4.2) pochodzą z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Heriot-Watt. [tdvml].
- 41 Liczba wiatraków, które byłyby potrzebne do zaopatrzenia Wielkiej Brytanii w 20 kWh/dobę na osobę wynosi 50 razy więcej niż całkowita infrastruktura wiatrowa Danii. Zakładając, że współczynnik obciążenia wynosi 33%, to średnia moc 20 kWh/dobę na osobę wymaga zainstalowania urządzeń o mocy 150 GW. Pod koniec roku 2006 Dania posiadała zainstalowane urządzenia o mocy 3,1 GW, zaś Niemcy 20,6 GW. Całkowita moc generowana przez elektrownie wiatrowe świata wynosiła 74 GW (wwindea.org). Dodatkowo współczynnik obciążenia duńskich wiatraków wynosił 22% w 2006 roku, zaś średnia moc przez nie dostarczana była równa 3 kWh/dobę na osobę.
- Załóżmy więc, że nasze wiatraki będą stać w miejscach ze średnią prędkością wiatru na poziomie 5,5 m/s. Oznacza to moc na jednostkę powierzchni równą $1,5 \text{ W/m}^2$. Energia wiatru wzrasta z sześcianiem jego prędkości. Skoro przy prędkości wiatru równej 6 m/s dostępna moc na jednostkę powierzchni wynosi 2 W/m^2 , to dla prędkości 5,5 m/s moc ta będzie wynosić $(5,5/6)^3 * 2 \text{ W/m}^2 = 1,5 \text{ W/m}^2$.

5 Samoloty

Wyobraź sobie, że raz w roku odbywasz podróż samolotem na inny kontynent. Jak dużo energii przez to zużywasz?

Boeing 747-400 zatankowany 240 000 litrami paliwa może przetransportować 416 pasażerów na odległość 14 200 km. Wartość opałowa paliwa wynosi 10 kWh na litr (co wiemy już z rozdziału 3). Zatem wydatek energetyczny na pokonanie pełnego możliwego dystansu tego samolotu w tę i z powrotem, jeśli podzielimy go równo pomiędzy pasażerów, wynosi:

$$\frac{2 \times 240\,000 \text{ litrów}}{416 \text{ pasażerów}} \times 10 \text{ kWh/litr} \approx 12\,000 \text{ kWh na pasażera}$$

Jeśli odbywasz jedną taką podróż rocznie, to Twoje średnie zużycie dzienne wynosi:

$$\frac{12\,000 \text{ kWh}}{365 \text{ dni}} \approx 33 \text{ kWh/dzień}$$

14 200 km to odległość nieco większa niż z Londynu do Kapsztadu (10 000 km) czy z Londynu do Los Angeles (9 000 km). Zatem wydaje mi się, że trochę przesadziliśmy z dystansem typowej międzykontynentalnej podróży o dalekim zasięgu. Przesadziliśmy jednak również z tym, że samolot jest pełen pasażerów, a przecież wydatek energetyczny na osobę zwiększa się, gdy pasażerów jest mniej. Jeśli pomnożymy wynik przez 10 000 km/14 200 km, by uzyskać oszacowanie dla podróży z Londynu do Kapsztadu, a następnie znowu pomnożymy przez 100/80, by uwzględnić to, że samolot był tylko w 80% pełny, to obliczenia zakończymy z wynikiem 29 kWh na dzień. By ułatwić zapamiętanie tego wyniku, zaokrąglę go do **30 kWh na dzień**.

Wyjaśnijmy, co to oznacza. Jedna w roku daleka podróż samolotem zużywa więcej energii niż pozostawienie piecyka elektrycznego o mocy 1 kW włączonego 24 godziny na dobę przez cały rok.

Rozdział 3, w którym oszacowaliśmy zużycie energii przez jazdę samochodem, był uzupełniony przez rozdział A, który zawierał model pokazujący, na co zużywana jest energia w samochodzie. Ten rozdział również posiada swoje techniczne uzupełnienie (rozdział C, str. 285), omawiające, na co zużywana jest energia w samolocie. Rozdział C pozwala nam odpowiedzieć na pytanie, czy podróż powietrzna zużyje znacząco mniej energii, jeśli wybierzemy samolot latający z mniejszą prędkością. Odpowiedź brzmi: „Nie”. W odróżnieniu od samochodów, które *mogą* być bardziej wydajne, jeśli będziemy jeździć nimi wolniej, samoloty są już prawie tak efektywne energetycznie, jak tylko mogą być. Nie da się zmienić tego, że samoloty muszą zużywać energię z dwóch powodów: muszą wyrzucać powietrze w dół, by same mogły pozostać w górze oraz potrzebują energii, by pokonać opór powietrza. Żadne przeprojektowanie samolotu nie zwiększy radykalnie jego wydajności. Zmiana 10-procentowa? Tak, to możliwe. Podwojenie wydajności? Prędzej zjem własne skarpetki.



Podróż
samolotem:
30 kWh/dzień

Samochód:
40 kWh/dzień

Wiatr:
20 kWh/dzień

Rys. 5.1. Międzykontynentalna podróż samolotem raz do roku to zużycie około 30 kWh dziennie.



Fot. 5.2. Bombardier Q400 NextGen. www.q400.com

Pytania

Czy podróż samolotem turbośmigłowym nie jest znacznie bardziej efektywna energetycznie?

Nie jest. „Komfortowo bardziej zielony” Bombardier Q400 NextGen, „najbardziej zaawansowany technologicznie samolot turbośmigłowy na świecie”, jak twierdzą jego producenci [www.q400.com] zużywa 3,81 litra na 100 pasażerokilometrów (przy prędkości lotu wynoszącej 667 km/h), co stanowi wydatek energetyczny 38 kWh na 100 pkm (pasażerokilometrów). Wypełniony Boeing 747 zużywa 42 kWh na 100 pasażerokilometrów (pkm). Tak więc obydwie przywołane samoloty są dwa razy wydajniejsze paliwowo niż samochód z jedną osobą w środku (mam na myśli przeciętny europejski samochód, o którym była mowa w rozdziale 3).

Czy latanie samolotem ma szczególnie negatywny wpływ na zmiany klimatu?

Eksperti uważają, że tak, choć pozostają tu wciąż pewne niepewności [3fbufz]. Samoloty powodują również powstawanie innych gazów cieplarnianych takich, jak: para wodna, ozon czy tlenki azotu. Jeśli chcesz oszacować swój ślad ekologiczny w tonach ekwiwalentu CO₂ powinieneś wziąć pod uwagę obecne emisje dwutlenku węgla, spowodowane Twoimi lotami i zwiększyć je dwu- lub nawet trzykrotnie. Diagramy w tej książce nie zawierają takiego przelicznika, gdyż skupiamy się w niej głównie na *bilansie energetycznym*.

Najlepszą rzeczą, jaką możemy zrobić z ekologami, jest zastrzelenie ich.

Michael O’Leary, dyrektor generalny Ryanair [3asmgy]

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

44 Boeing 747–400 – dane pochodzą z: [9ehws].

Samoloty nie latają dzisiaj z kompletem pasażerów. Linie lotnicze są szczęśliwe, jeśli średnie zapełnienie ich samolotów wynosi 80%. Samoloty linii Easyjet są wypełnione średnio w 85% (źródło: „Thelondonpaper”, wtorek 16 stycznia 2007). Wypełniony w 80% Boeing 747 zużywa około 53 kWh na 100 pasażerokilometrów. A co z lotami na krótkich dystansach? W roku 2007 Ryanair – „najbardziej zielone linie lotnicze w Europie” – umożliwiły transport z wydatkiem energetycznym 37 kWh na 100 pkm [3exmgv]. Oznacza to, że latanie po Europie z Ryanair to taki sam wydatek energetyczny, jak w sytuacji, kiedy wszyscy pasażerowie podróżowaliby do miejsca przeznaczenia samochodem, przy założeniu, że w każdym aucie jechałyby dwie osoby (dla lepszego zrozumienia, co mogą oferować inne linie lotnicze, warto wiedzieć, że poziom spalania paliwa przez samoloty należące do Ryanair w 2000 roku, zanim wprowadzono przyjazne środowisku inwestycje, wynosił około 73 kWh na 100 pkm). Odległość z Londynu do Rzymu wynosi 1430 km, a z Londynu do Malagi – 1735 km, więc energetyczny podróży do Rzymu i z powrotem z „najbardziej zielonymi liniami lotniczymi” wynosi 1050 kWh, zaś takiej samej podróży do Malagi – 1270 kWh. Jeśli raz do roku skoczysz na chwilę do Rzymu i do Malagi, to Twoje średnie zużycie energii wyniesie 6,3 kWh dziennie z „najbardziej zielonymi liniami lotniczymi” i być może 12 kWh dziennie z liniami mniej zielonymi.

A co z osobami, które latają bardzo często? Aby otrzymać od międzykontynentalnych linii lotniczych srebrną kartę pasażera, należy przelecieć około 40 000 km rocznie w klasie ekonomicznej. To około 60 kWh dziennie, jeśli przeliczymy dane z początku tego rozdziału i założymy, że samoloty latają w 80% pełne.

energia na odległość (kWh na 100 p-km)	
Samochód (4 pasażerów)	20
Samolot Ryanair rok 2007	37
Bombardier Q400, pełny	38
747, pełny	42
747, w 80% wypełniony	53
Samolot Ryanair rok 2000	73
Samochód (1 pasażer)	80



Fot. 5.4. Boeing 737–800 należący do linii lotniczych Ryanair
Fot. Adrian Pingstone

Oto kilka dodatkowych liczb od Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC) [ymmm]: pełny Boeing 747–400 przemierzający 10 000 km z dość luźno rozmieszczonymi fotelami (262 miejsca) zużywa **50 kWh na 100 pkm**. W modelu z ciasno upakowanymi fotelami (568 miejsc), pokonującym dystans 4 000 km, ten sam samolot zużywa **22 kWh na 100 pkm**. Krótkodystansowy Tupolew Tu-154 lecący na odległość 2235 km z 70% zajętych miejsc (ze wszystkich 164) zużywa **80 kWh na 100 pkm**.

- **Żadne przeprojektowanie samolotu nie zwiększy radykalnie jego wydajności.** W rzeczywistości celem Europejskiej Platformy Lotnictwa ACARE jest ogólna redukcja o 50% paliwa spalane go na pasażerokilometr do roku 2020 (w odniesieniu do roku 2000), ze spodziewanym 15–20 procentowym wzrostem wydajności silników. W 2006 roku Rolls Royce znajdował się w połowie drogi do osiągnięcia tego celu dla swoich silników [36w5gz]. Dennis Bushnell, czołowy naukowiec Ośrodka Badawczego im. Langleya, należącego do NASA, wydaje się zgadzać z moją ogólną oceną perspektyw zwiększania wydajności energetycznej w lotnictwie. Przemysł lotniczy jest już w pełni dojrzały. „Nie pozostało już zbyt wiele do osiągnięcia, poza postępowaniem w tempie pełzającego lodowca o jakiś procent tu czy tam w ciągu wielu długich lat” („New Scientist”, 24 lutego 2007, str. 33).

Mocno przeprojektowany Silent Aircraft [www.silentaircraft.org/sax40], o ile zostanie zbudowany, może być o 16% wydajniejszy niż samolot o konwencjonalnym kształcie (Nickol, 2008).

Jeśli ACARE uda się osiągnąć swój cel, to najprawdopodobniej będzie to zasługą większego wypełnienia samolotów pasażerami oraz lepszego zarządzania ruchem lotniczym.

Krótkie przeloty: **6 kWh/d**



Rys. 5.5. Dwie krótkodystansowe podróże z „najbardziej zielonymi krótkodystansowymi liniami lotniczymi”: 6,3 kWh/dobę. Latanie w sposób umożliwiający otrzymanie statusu często latającego pasażera zasługującego na srebrną kartę: 60 kWh/dobę.

6 Energia słoneczna i biopaliwa

Szacujemy, jak nasze zużycie energii ma się do realnej wielkości zrównoważonej produkcji. W tym celu porównujemy obydwie wielkości przedstawione za pomocą słupków. W ostatnich trzech rozdziałach okazało się, że jeżdżenie samochodem oraz podróżowanie samolotami zużywa więcej energii niż, realnie rzecz biorąc, może jej dostarczyć energetyka wiatrowa na lądzie w Wielkiej Brytanii. Czy energia słoneczna jest w stanie tak wpłynąć na wysokość słupka produkcji, by stał się on większy od słupka zużycia?

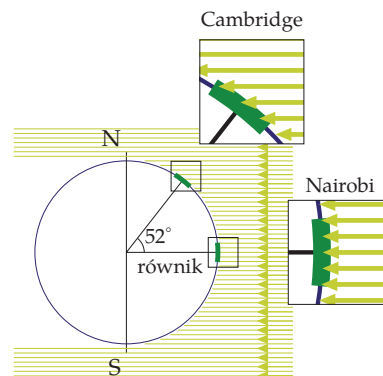
Moc promieniowania słonecznego w południe bezchmurnego dnia wynosi 1000 W/m^2 . Oznacza to 1000 W/m^2 powierzchni skierowanej w stronę słońca, nie zaś m^2 powierzchni ziemi. By otrzymać moc na jeden m^2 powierzchni ziemi w Wielkiej Brytanii, musimy wprowadzić kilka poprawek. Musimy bowiem uwzględnić kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię ziemi, który to kąt wpływa na zmniejszenie intensywności promieniowania słońca w południe do około 60% jego wartości na równiku (rys. 6.1). Tracimy również dlatego, że południe nie trwa wiecznie. W czasie bezchmurnego dnia w marcu lub wrześniu stosunek *średniej* intensywności promieniowania w porównaniu do intensywności w południe wynosi około 32%. Na koniec zaś dodajmy zachmurzenie – przez nie również tracimy moc; w typowym dla Wielkiej Brytanii miejscu jedynie przez 34% czasu słońce nie jest przesłonięte chmurami.

Całkowity efekt działania tych trzech czynników oraz dodatkowe komplikacje związane ze zmianami pór roku powodują, że średnia moc promieniowania słonecznego na metr kwadratowy skierowanego na południe dachu w Wielkiej Brytanii wynosi zaledwie 110 W/m^2 , zaś średnia moc promieniowania słonecznego na płaskiej powierzchni ziemi to 100 W/m^2 .

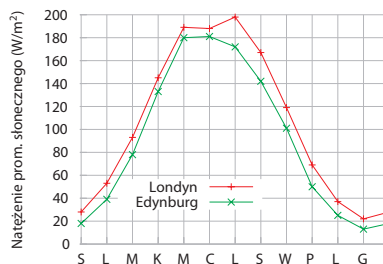
Możemy przekształcić tę moc promieniowania słonecznego w moc użytkową na cztery sposoby:

1. Panele fototermiczne (tzw. solary): używając promieni słonecznych do bezpośredniego ogrzewania budynków lub wody.
2. Panele fotowoltaiczne: wytwarzając prąd elektryczny.
3. Biomasa: wykorzystując drzewa, bakterie, algi, kukurydzę, soję lub oleje roślinne do wytwarzania paliw, związków chemicznych lub jako materiałów budowlanych.
4. Pożywienie: to samo co w przypadku biomasy, za wyjątkiem tego, że rośliny są wykorzystywane jako jedzenie dla ludzi i zwierząt.

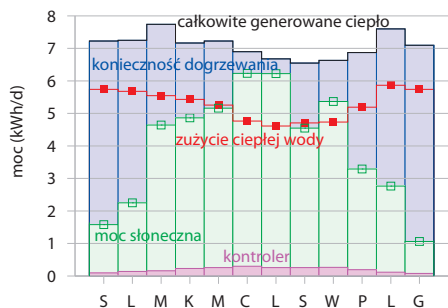
(W jednym z następných rozdziałów przyjrzymy się bliżej kilku innym technologiom wykorzystującym energię słoneczną i nadającym się do użycia w warunkach pustynnych). Wykonajmy na wstępie kilka szybkich oszacowań maksymalnych rzeczywistych mocy, których każde z tych rozwiązań mogłoby dostarczyć. Pominiemy ich koszty finansowe oraz wydatek energetyczny związany z ich wytwarzaniem oraz utrzymaniem instalacji energetycznych.



Rys. 6.1. Promieniowanie słoneczne ogrzewające ziemię w południe wiosennego lub jesiennego dnia. Natężenie promieniowania na jednostkę powierzchni w Cambridge (52°N) wynosi 60% natężenia promieniowania na równiku.



Rys. 6.2. Średnie natężenie promieniowania słonecznego w Londynie i Edynburgu jako funkcja czasu w kolejnych miesiącach roku. Średnie natężenie na jednostkę powierzchni ziemi wynosi 100 W/m^2 .



Panele fototermiczne

Najprostszą technologią wykorzystującą energię słoneczną jest panel ogrzewający wodę. Wyobraźmy sobie, że pokrywamy wszystkie powierzchnie dachów, skierowane na południe, takimi panelami fototermicznymi. Oznaczałoby to około 10 m² paneli na osobę przy założeniu, że panele te zamieniają moc promieniowania słonecznego (110 W/m²) w gorącą wodę z efektywnością 50% (rys. 6.3).

Jeśli zatem pomnożymy

$$50\% \times 10 \text{ m}^2 \times 110 \text{ W/m}^2$$

to okaże się, że ogrzewanie za pomocą słońca może dostarczyć **13 kWh dziennie na osobę**.

Polska leży na tej samej szerokości geograficznej co Wielka Brytania, więc pod tym względem intensywność promieniowania słonecznego jest identyczna. Jednak warunki pogodowe są u nas lepsze – o ile w typowym dla Wielkiej Brytanii miejscu jedynie przez 34% czasu słońce nie jest przesłonięte przez chmury, to dla Polski jest to 41%, co daje o 20% większe nasłonecznienie.

Obliczona wartość mocy możliwej do pozyskania za pomocą umieszczonych na dachach paneli fototermicznych wyniesie dla Polski 16 kWh dziennie na osobę.

Na rysunku 6.4 zakolorowałem obszar produkcji energii przez panele fototermiczne na biało, by zaznaczyć, że dotyczy on produkcji energii o niskiej jakości – gorąca woda nie jest tak cenna, jak wysokiej jakości energia elektryczna, którą mogą produkować turbiny wiatrowe. Ciepła nie można oddać do sieci energetycznej – jeśli go nie wykorzystasz, po prostu zmarnuje się. Powinniśmy mieć na uwadze, że duża część tego zaabsorbowanego ciepła będzie się znajdowała w nieodpowiednim miejscu. W miastach, gdzie żyje wiele ludzi, na jedną osobę przypada znacznie mniejsza powierzchnia dachu niż wynikałoby to ze średniej krajowej. Co więcej, energia ta byłaby dostarczana nierównomiernie w ciągu roku.

Panele fotowoltaiczne

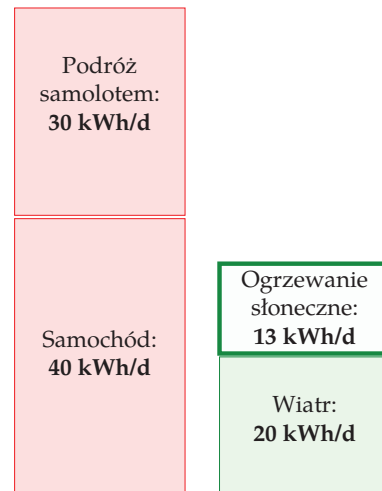
Panele fotowoltaiczne (PV) zamieniają światło słoneczne w energię elektryczną. Wydajność przeciętnego panelu wynosi około 10%, zaś bardziej kosztownego – 20%. (Podstawowe prawa fizyki ograniczają wydajność systemów fotowoltaicznych, w najlepszym wypadku do 60%, przy idealnie koncentru-

Rys. 6.3. Moc generowana przez 3 m² panelu ogrzewającego wodę (kolor zielony) oraz dodatkowe ciepło (kolor niebieski) potrzebne do ogrzania wody w eksperymentalnym domu należącym do Viridian Solar (na zdjęciu widać dom z tym samym modelem paneli na dachu). Średnia moc dostarczana przez 3 m² panelu wynosiła 3,8 kWh/dobę.

W eksperymencie prowadzono przeciętne zużycie gorącej wody przez europejskie gospodarstwo domowe – 100 litrów gorącej (60 °C) wody dziennie.

Sięgająca 1,5–2 kWh/dobę luka pomiędzy całkowitym wygenerowanym ciepłem (czarna linia na górze) oraz użytą gorącą wodą (czerwona linia), jest spowodowana stratami ciepła. Linia fioletowa pokazuje moc elektryczną niezbędną do zasilania systemu paneli.

Średnia moc na jednostkę powierzchni wynosi dla tych paneli słonecznych 52 W/m².



Rys. 6.4. Panele słoneczne: rząd paneli grzewczych o powierzchni 10 m² może dostarczyć (średnio) około 13 kWh energii cieplnej dziennie.

jących energię lustrach i soczewkach oraz do 45% bez koncentracji. Masowa produkcja paneli o efektywności większej niż 30% byłaby wybitnym osiągnięciem). Średnia moc dostarczana przez skierowane na południe panele fotowoltaiczne o 20-procentowej efektywności w Wielkiej Brytanii wynosiłaby:

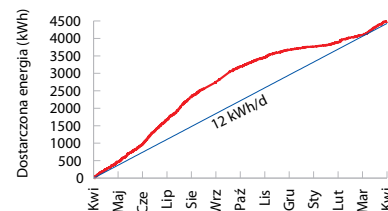
$$20\% \times 110 \text{ W/m}^2 = 22 \text{ W/m}^2$$

Rys. 6.5. przedstawia dane uzupełniające otrzymane przez nas wynik. Dajmy każdej osobie po 10 m² drogich paneli fotowoltaicznych (o 20-procentowej efektywności) i pokryjmy całą dostępną powierzchnię dachów skierowanych na południe. To dostarczyłoby

5 kWh dziennie na osobę

Ponieważ nasłonecznienie w Polsce jest o 20% większe, więc u nas możliwa do pozyskania z ogniw słonecznych moc wyniesie 6 kWh dziennie na osobę.

Ponieważ powierzchnia wszystkich skierowanych na południe dachów wynosi 10 m² na osobę, jasne jest, że nie mamy wystarczająco dużo powierzchni na zainstalowanie zarówno paneli fotowoltaicznych, jak i paneli fototermicznych. Musimy więc wybrać, co wolimy – prąd z paneli fotowoltaicznych czy gorącą wodę z paneli fototermicznych? Tak czy inaczej, dorzucę obydwu do słupka produkcji. Co więcej, obecny koszt zainstalowania paneli fotowoltaicznych wynosi cztery razy tyle, ile zainstalowanie paneli fototermicznych, chociaż dostarczają one zaledwie połowę energii, aczkolwiek o wysokiej jakości (energia elektryczna). Doradzam więc rodzinom myślącym o korzystaniu z energii słonecznej zainwestowanie najpierw w panele fototermiczne. Najmądrzejszym rozwiązaniem, przynajmniej w słonecznych krajach, jest stworzenie powiązanych ze sobą obydwu systemów, które z jednej instalacji dostarczają zarówno elektryczność, jak i gorącą wodę. Pionierem takiego podejścia jest firma Heliodynamics, która zredukowała całkowity koszt produkowanych przez siebie



Fot. 6.5. Panele fotowoltaiczne. Dane pochodzą z roku 2006 dla systemu o powierzchni 25 m², znajdującego się w Cambridgeshire. Moc szczytowa dostarczana przez system wynosi około 4 kW. Średnia roczna moc wynosi 12 kWh dziennie, czyli 20 W na metr kwadratowy panelu.



Fot. 6.6. Dwóch słonecznych wojowników cieszących się swoim systemem fotowoltaicznym, który zasila ich samochody elektryczne oraz dom. Układ 120 paneli (moc 300 W, każdy o rozmiarze, 2,2 m²) ma powierzchnię 268 m²; moc szczytowa (pokrywająca straty przy konwersji prądu stałego na zmienny) wynosi 30,5 kW, zaś średnia moc – w Kalifornii, niedaleko Santa Cruz – wynosi 5 kW (19 W/m²).

Zdjęcie udostępnione dzięki uprzejmości Kennetha Adelmana
www.solarwarrior.com

systemów poprzez otoczenie wysokiej jakości małych elementów fotowoltaicznych, złożonych z arsenku galu, rzędami wolno poruszających się płaskich luster. Lustra te skupiają światło słoneczne na elementach fotowoltaicznych, które dostarczają zarówno gorącą wodę, jak i elektryczność. Ciepła woda jest wytwarzana przez pompowanie wody pod spodem elementów fotowoltaicznych.

Dotychczasowe wnioski: pokrycie skierowanej na południe części dachu panelami fotowoltaicznymi może dostarczyć Ci sporej części zużywanej przez Ciebie elektryczności. Jednakże dachy nie są na tyle duże, by zaspokoić nasze całkowite zużycie energii. By wyciągnąć więcej z fotowoltaiki, musimy zejść na ziemię. Słoneczni wojownicy z rysunku 6.6 wskazują nam drogę.

Fantastyka: farmy słoneczne

Jeśli nastąpi przełom w technologii słonecznej i koszty paneli fotowoltaicznych zmaleją na tyle wystarczająco, byśmy mogli umieścić je we wszystkich wsiach, to jaka mogłaby być ich maksymalna rzeczywista produkcja energii? Cóż, gdybyśmy pokryli 5% Wielkiej Brytanii panelami o 10-procentowej wydajności, otrzymalibyśmy:

$$10\% \times 100 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ na osobę} \approx 50 \text{ kWh/dzień/osobę.}$$

Na każdego Polaka przypada, co prawda, dwa razy więcej powierzchni niż na Brytyjczyka, jednak ponieważ głównym czynnikiem ograniczającym jest tu koszt, przyjmijmy, że również wyłożymy panelami słonecznymi 200 m² na osobę. Pamiętając, że nasłonecznienie w Polsce jest o 20% większe niż w Wielkiej Brytanii, uzyskamy w ten sposób:

$$10\% \times 120 \text{ W/m}^2 \times 200 \text{ m}^2 \text{ na osobę} \approx 60 \text{ kWh/dzień/osobę.}$$

Przy okazji założyłem, że panele słoneczne będą miały zaledwie 10-procentową wydajność. Wydaje mi się bowiem, że będą one mogły być produkowane na masową skalę jedynie wtedy, gdy staną się bardzo tanie. I to właśnie panele o niskiej wydajności stanowią pierwsze. Gęstość mocy (moc na jednostkę powierzchni) takiej farmy słonecznej wynosiłaby:

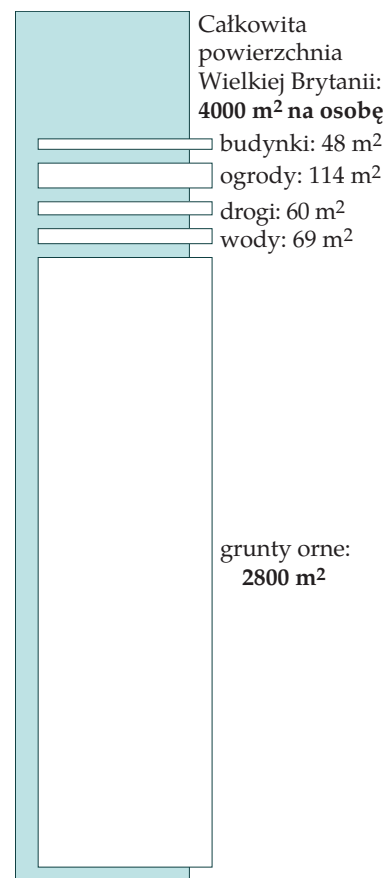
$$10\% \times 120 \text{ W/m}^2 = 12 \text{ W/m}^2$$

Otrzymana gęstość mocy jest dwa razy większa od otrzymywanej w Parku Słonecznym w Bawarii (rys. 6.7).

Czy taki zalew paneli słonecznych mógłby współistnieć z armią wiatraków, które wyobraziliśmy sobie w rozdziale 4? Tak, bez problemu. Wiatraki rzucają niewiele cienia, zaś panele słoneczne, zainstalowane na poziomie gruntu, nie wywierają większego wpływu na wiatr. Na ile zuchwały jest ten plan? Moc z elektrowni słonecznych potrzebna do dostarczenia tych 50 kWh dziennie na osobę w Wielkiej Brytanii to więcej niż 100-krotna moc dostarczana przez wszystkie panele słoneczne zainstalowane obecnie na świecie. Czy powinienem więc umieścić farmę PV w moim słupku zrównoważonej produkcji? Wciąż się waham. Na początku tej książki wspominałem, że chcę zbadać, co prawa fizyki mówią o granicach dotyczących zrównoważonej energii, zakładając, że pieniądze nie mają znaczenia. Na tej podstawie powinienem przeć naprzód, industrializując wieś i wrzucając farmy PV na słupek. Z drugiej strony, chciałbym



Fot. 6.7. Farma słoneczna z ogniwami fotowoltaicznymi: Park Słoneczny w Mühlhausen w Bawarii o mocy szczytowej wynoszącej 6,3 MW. Średnia moc na jednostkę powierzchni jest szacowana na około 5W/m².
Fot. SunPower



Rys. 6.8. Powierzchnie różnych rodzajów terenu na osobę w Wielkiej Brytanii

pomóc ludziom zrozumieć, co powinniśmy robić pomiędzy dniem dzisiejszym a rokiem 2050. A dzisiaj cena elektryczności z farm słonecznych byłaby cztery razy wyższa od rynkowej. Z tego powodu czuję się trochę nieodpowiedzialnie, umieszczając to oszacowanie w słupku zrównoważonej produkcji na rysunku 6.9. Wyłożenie 5% powierzchni Wielkiej Brytanii panelami słonecznymi wydaje się z wielu względów nierealne. Jeżeli na poważnie przyjrzymy się realizacji takiego celu, to znacznie lepiej byłoby zainwestować w panele w dwa razy bardziej słonecznym kraju i przesłać część energii z powrotem za pomocą linii energetycznych. Powrócimy do tego pomysłu w rozdziale 25.

Mity

Wyprodukowanie panelu słonecznego wymaga zużycia większej ilości energii niż jest on w stanie dostarczyć w trakcie swojego późniejszego działania.

Falsz. Współczynnik zwrotu energii określa stosunek energii dostarczonej przez system w ciągu cyklu jego życia do energii zużytej na wytworzenie systemu. W naszym przypadku stosunek energii pozyskanej do energii zainwestowanej – (ang. *Energy Returned On Energy Invested*, skrótowo EROEI) – dotyczący montowanego na dachu i podłączonego do sieci systemu słonecznego w Europie Północnej, dla systemu o długości życia 20 lat, wynosi 4 (Richards i Watt, 2007), zaś dla miejsc bardziej słonecznych (takich jak na przykład Australia) – nawet ponad 7. Współczynnik zwrotu energii większy niż jeden oznacza, że taki system to Dobra Rzecz, korzystna energetycznie. Turbiny wiatrowe o długości życia równej 20 lat posiadają współczynnik zwrotu energii równy nawet 80.

Czy panele fotowoltaiczne nie powinny stawać się coraz bardziej wydajne wraz z rozwojem technologii?

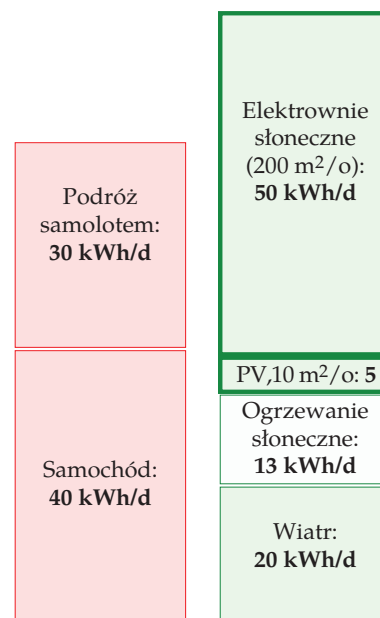
Jestem pewien, że panele fotowoltaiczne będą stawały się *coraz tańsze*. Jestem także pewien, że ich *wytwarzanie* będzie wymagało zużycia coraz mniejszej ilości energii, tak więc ich współczynnik zwrotu energii również się zwiększy. Jednakże oszacowania zawarte w tym rozdziale nie biorą pod uwagę kosztu paneli ani wydatku energetycznego związanego z ich wytworzeniem. Rozdział ten dotyczy przede wszystkim maksymalnej możliwej do dostarczenia mocy. Już teraz panele fotowoltaiczne, ze swoją 20-procentową wydajnością, są bliskie limitu teoretycznego ich wydajności (patrz: przypisy na końcu rozdziału). Byłbym zaskoczony, gdyby konieczna stała się znacząca aktualizacja w górę zawartych w tym rozdziale oszacowań efektywności montowanych na dachach paneli fotowoltaicznych.

Biomasa z energii słonecznej

I nagle, no wiesz, możesz znaleźć się w biznesie energetycznym tylko dlatego, że jesteś w stanie uprawiać trawę na ranczu! A potem zbierać ją i zamieniać w energię. Oto, co może niedługo nastąpić.

George W. Bush, luty 2006

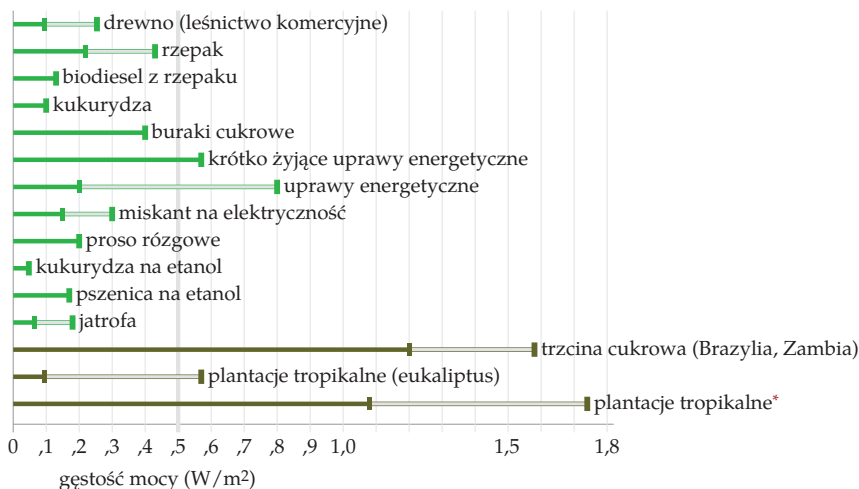
Wszystkie dostępne rozwiązania bioenergetyczne opierają się na koncepcji uprawiania roślin, a następnie robienia z nimi czegoś. Jak wiele energii można w ten sposób potencjalnie uzyskać? Istnieją cztery główne sposoby pozyskiwania energii z zasilanych słońcem systemów biologicznych:



Rys. 6.9. Panele fotowoltaiczne: układ paneli słonecznych o powierzchni 10 m², zamontowany na południowej stronie dachu, którego efektywność wynosi 20%, może dostarczyć około 5 kWh energii elektrycznej dziennie. Gdyby 5% kraju było pokryte panelami słonecznymi o 10-procentowej efektywności (200 m² paneli na osobę), to dostarczyłyby one 50 kWh/dziennie na osobę.

1. Możemy uprawiać wyselekcjonowane rośliny i spalać je w elektrowni, która produkuje prąd elektryczny lub ciepło, lub jedno i drugie. Można to określić jako *substytucję węgla*.
2. Możemy uprawiać specjalnie dobrane rośliny (na przykład rzepak, trzcinę cukrową lub kukurydzę), zamienić je w etanol lub biodiesel i pompować do samochodów, pociągów, samolotów lub wszędzie tam, gdzie okażą się przydatne. Możemy również hodować genetycznie modyfikowane bakterie, cyjanobakterie lub algi, które w sposób bezpośredni produkują wodór, etanol, butanol czy nawet prąd elektryczny. Takie rozwiązania nazwalibyśmy *substytucją ropy*.
3. Możemy wykorzystać produkty uboczne pochodzące z innych rodzajów działalności rolnej i spalać je w elektrowni. Produktami ubocznymi mogą być zarówno słoma (odpad z produkcji chrupek kukurydzianych), jak i kurze odchody (odpad z produkcji McNuggets). Spalanie produktów ubocznych jest również *substytucją węgla*, jednak przy użyciu zwykłych roślin, a nie roślin wysokoenergetycznych. Elektrownia spalająca odpady z produkcji rolnej nie dostarczy tak dużej mocy na jednostkę powierzchni uprawnej, jak zoptymalizowana uprawa biomasy, ale jej zaletą będzie to, że nie wymusi przejmowania terenów uprawnych przez uprawy energetyczne. Spalanie metanu z wysypiska śmieci to podobny sposób pozyskiwania energii, jednak jest on zrównoważony jedynie wtedy, gdy mamy zrównoważone źródło odpadów dla wysypiska (większość metanu z tego źródła pochodzi z odpadów spożywczych; przeciętny Brytyjczyk wyrzuca ok. 300 g jedzenia dziennie). Spalanie odpadów z gospodarstw domowych jest kolejną, odrobinę mniej okrężną, drogą pozyskiwania energii z biomasy.
4. Możemy uprawiać rośliny i karmić nimi bezpośrednio ludzi i zwierzęta, także potrzebujących energii.

We wszystkich tych procesach pierwszym „krokiem energetycznym” jest cząsteczka chemiczna, czyli węglowodan w roślinie zielonej. Możemy więc



Fot. 6.10. Trawa z rodzaju *Miscanthus* zaszczycona towarzystwem dr Emily Heaton, która ma 163 cm wzrostu. W Wielkiej Brytanii *Miscanthus* osiąga moc na jednostkę powierzchni 0,75 W/m². Zdjęcie dostarczone przez Uniwersytet w Illinois.

Rys. 6.11. Produkcja mocy na jednostkę powierzchni osiągnięta przy użyciu różnych roślin. Aby poznać źródła danych, zwróć uwagę na końcu rozdziału. Przedstawione gęstości mocy różnią się od siebie w zależności od stopnia nawadniania oraz nawożenia. Przedziały są zaznaczone dla niektórych upraw – na przykład drewno ma przedział 0,095–0,254 W/m². Trzy ostatnie gęstości mocy dotyczą upraw w warunkach tropikalnych. Ostatnia gęstość mocy (uprawy tropikalne*) zakłada modyfikacje genetyczne, nawożenie oraz nawadnianie. W tekście użyłem 0,5 W/m² jako wartości podsumowującej najbardziej wydajnie energetycznie uprawy w północno-zachodniej Europie.

oszacować moc możliwą do uzyskania w każdym z procesów lub we wszystkich razem poprzez oszacowanie, jak wiele mocy można pozyskać na tym etapie. Wszystkie następne kroki, obejmujące traktory, zwierzęta, środki chemiczne, składowiska odpadów czy też elektrownie, mogą powodować jedynie utratę energii. A zatem na pierwszym etapie moc jest większa od mocy pochodzącej ze wszystkich opartych na roślinach rozwiązań energetycznych.

Oszacujemy zatem wielkość mocy na tym pierwszym etapie (w rozdziale D zagłębimy się w szczegóły, szacując maksymalny wynik każdego procesu). Średnia moc słońca dostępna w Wielkiej Brytanii wynosi 100 W/m^2 . Najbardziej wydajne rośliny w Europie mają zaledwie 2-procentową efektywność w procesie zamiany energii słonecznej w węglowodany, co wskazuje, że uprawy roślin mogą dostarczyć 2 W/m^2 . Jednak ich efektywność spada przy większym natężeniu światła i najlepsze rzeczywiste rezultaty z upraw energetycznych w Europie są raczej bliższe $0,5 \text{ W/m}^2$. Pokryjmy teraz 75% kraju roślinami wysokiej jakości energetycznej. Oznacza to 3000 m^2 na osobę przeznaczone na bioenergię. Tyle zajmują dzisiaj tereny rolnicze w Wielkiej Brytanii.

Uzup. red.: W przypadku etanolu uzyskiwanego z kukurydzy (będącego np. głównym biopaliwem w USA) zysk energetyczny wynosi $0,2 \text{ W/m}^2$. Niestety produkcja etanolu wymaga znaczącego wkładu energetycznego z paliw kopalnych, wynoszącego... również $0,2 \text{ W/m}^2$, co czyni całe przedsięwzięcie energetycznie nieopłacalnym. Jedynym sposobem na wyciągnięcie korzyści energetycznych z takiego procesu jest wykorzystanie wszystkich produktów ubocznych. Shapouri et al. szacują, że produkcja etanolu z kukurydzy ma współczynnik energetyczny równy 1,24, co oznacza, że produkcja mocy netto wynosi $0,048 \text{ W/m}^2$.

Dlatego też maksymalna dostępna moc, z pominięciem wszystkich dodatkowych kosztów sadzenia, zbierania i przetwarzania roślin, wynosi:

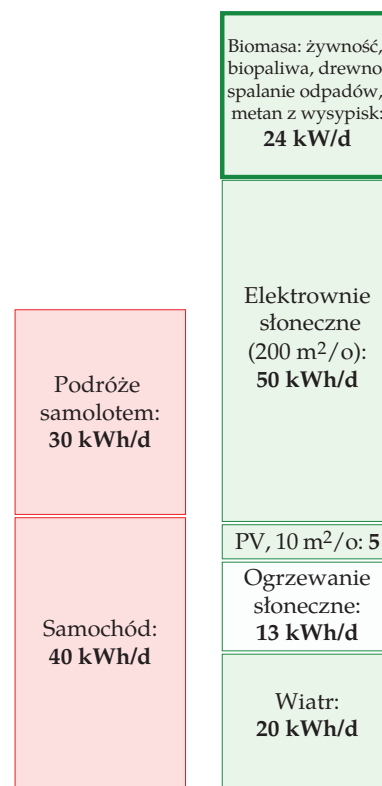
$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 3000 \text{ m}^2 \text{ na osobę} = 36 \text{ kWh/d na osobę}$$

To nie za wiele, jeśli weźmiemy pod uwagę niesłychanie szczodre założenia, które przyjęliśmy, by osiągnąć wysoki wynik. Jeśli chcielibyście otrzymać biopaliwa do samochodów lub samolotów z roślin, to pozostałe ogniwa łańcucha – od pola uprawnego przez stację paliwową do świecy zapłonowej – wiążą się ze stratą energii. Optymizmem byłoby zakładać, że całkowite straty związane z procesem przetwarzania mogłyby wynieść zaledwie 33%. Nawet w dobrym kotle podczas spalania suchego drewna przez komin ucieka 20% ciepła. Rzeczywisty potencjał biomasy i biopaliw z pewnością nie może być większy niż **24 kWh/d na osobę**. I nie zapominajmy o tym, że część roślin chcemy przecież przeznaczyć na pożywienie dla nas i naszych zwierząt.

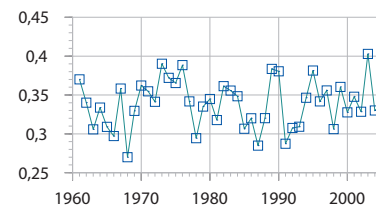
W Polsce użytki rolne zajmują blisko 60% powierzchni kraju, co daje 4500 m^2 na osobę. Z jednej strony nasz klimat jest trochę bardziej słoneczny, lecz z drugiej mamy ostrzejsze zimy, mniejsze opady i gleby słabszej jakości. W naszych szacunkach założymy, że podobnie jak w Wielkiej Brytanii możemy uzyskać $0,5 \text{ W/m}^2$. Otrzymujemy więc:

$$0,5 \text{ W/m}^2 \times 4500 \text{ m}^2 \text{ na osobę} = 54 \text{ kWh/d na osobę.}$$

Przyjmując za Davidem MacKayem straty energii równe 33%, otrzymujemy wynik **36 kWh/d na osobę**, czyli trochę lepszy niż w Wielkiej Brytanii.



Rys. 6.12. Biomasa z uwzględnieniem wszystkich rodzajów biopaliw, spalania odpadów oraz żywności: 24 kWh/d na osobę

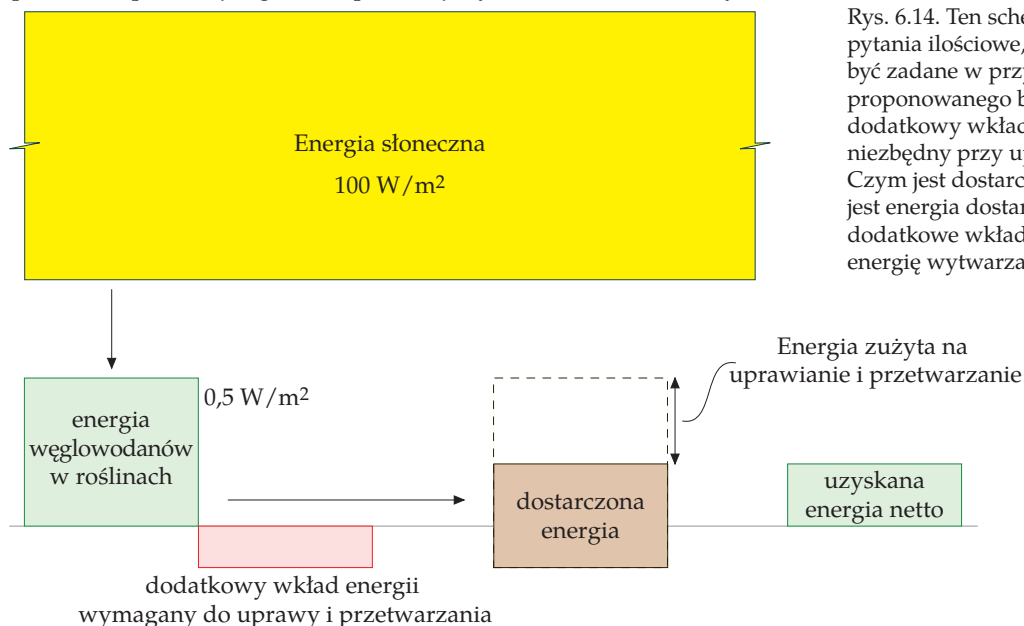


Rys. 6.13. Nasłonecznienie w Cambridge: liczba godzin w roku, w czasie których świeci słońce, wyrażona jako część całkowitej liczby godzin dziennych.

Czy inżynieria genetyczna mogłaby wyprodukować rośliny, które zamieniają energię słoneczną w chemiczną z większą wydajnością? Niewykluczone. Nie znalazłem jednak żadnej publikacji naukowej przewidującej, że rośliny w Europie mogłyby osiągnąć moc produkcyjną, która na czysto wyniosłaby więcej niż 1 W/m^2 .

Dorzucę 24 kWh/d na osobę do zielonego słupka, z zastrzeżeniem, że według mnie liczba ta jest zawyżona. Wydaje mi się, że rzeczywista maksymalna moc, którą możemy uzyskać z biomasy, byłaby mniejsza ze względu na straty w procesie uprawiania i przetwarzania.

Według mnie wniosek jest prosty: *biopaliwa nie mają sensu*, a przynajmniej nie w krajach takich jak Wielka Brytania i nie jako zamiennik dla całości paliw używanych w transporcie. Nawet jeśli na chwilę zapomnimy o głównych wadach biopaliw – ich produkcja ogranicza produkcję żywności, zaś dodatkowy wkład



Rys. 6.14. Ten schemat pokazuje pytania ilościowe, które powinny być zadane w przypadku każdego proponowanego biopaliwa. Jaki jest dodatkowy wkład energetyczny, niezbędny przy uprawie i obróbce? Czym jest dostarczona energia? Jaka jest energia dostarczona netto? Często dodatkowe wkłady i straty niwelują energię wytwarzaną przez rośliny.

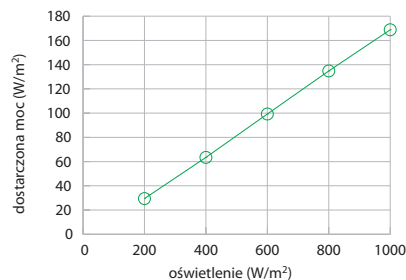
energetyczny niezbędny do ich uprawy i przetwarzania często niweluje większość wyprodukowanej energii (rys. 6.14) – to biopaliwa produkowane z roślin w europejskim kraju, takim jak Wielka Brytania, mogą dostarczyć tak niewiele mocy, że według mnie właściwie nie warto o nich mówić.

Polska ma wysoki potencjał rozwoju energii z biomasy, chociaż pomysł, żeby pod uprawy energetyczne zająć całość dostępnych obszarów uprawnych, zapominając o produkcji żywności i eliminując istniejące ekosystemy pól, łąk i pastwisk, wydaje się mało realistyczny.

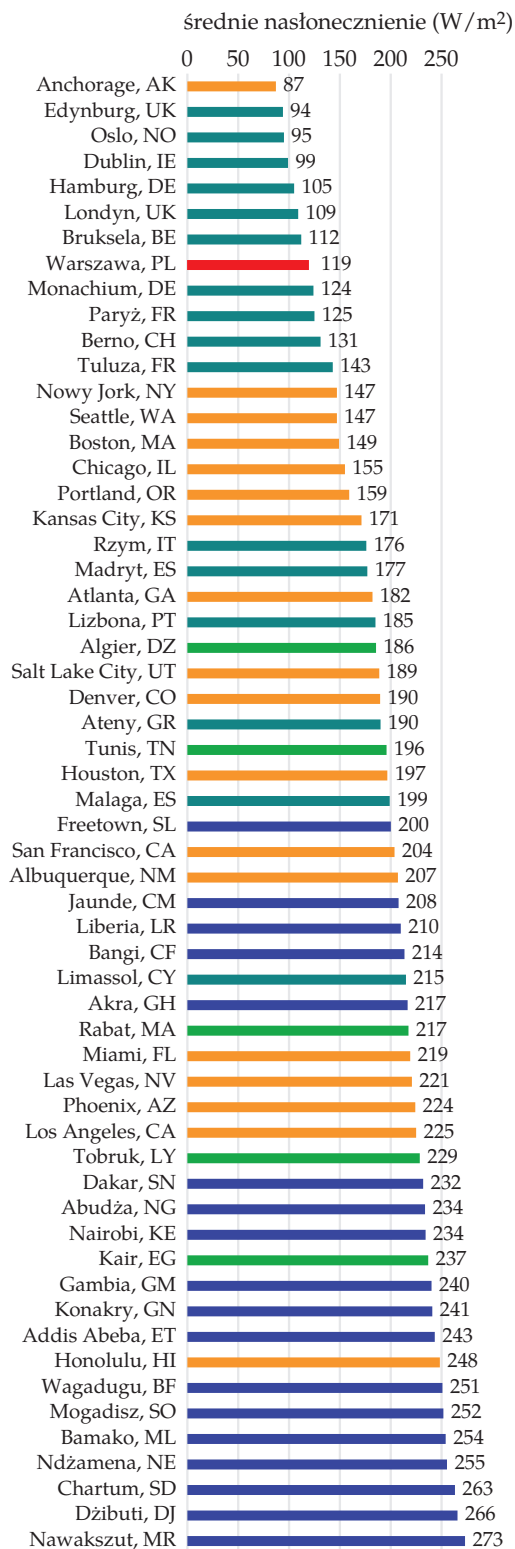
Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

47 **Musimy bowiem uwzględnić kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię ziemi...** – Szerokość geograficzna Cambridge to $\theta = 52^\circ$; intensywność światła słonecznego w południe jest pomnożona przez $\cos \theta \approx 0,6$. Dokładny współczynnik zależy od pory roku i waha się pomiędzy $\cos(\theta + 23^\circ) = 0,26$ i $\cos(\theta - 23^\circ) = 0,87$.

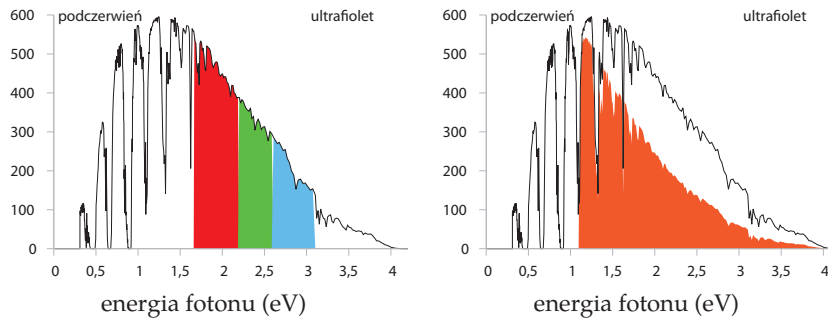


Rys. 6.15. Moc wyprodukowana przez moduł Sanyo HIP-210NKHE1 jako funkcja intensywności oświetlenia (w temperaturze 25°C przy założeniu, że dostarczane napięcie wynosi 40 V). Źródło: www.sanyo-solar.eu



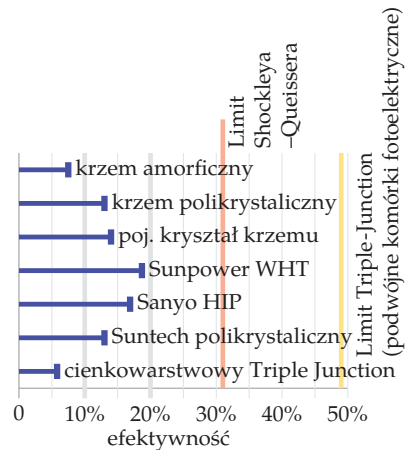
Rys. 6.16. Średnia moc światła słonecznego padającego na płaską powierzchnię w wybranych miejscach w Europie, Ameryce Północnej i Afryce





Rys. 6.17. Część objaśnienia Shockleya i Queissera dotyczącego limitu 31% sprawności prostych paneli fotowoltaicznych. Po lewej: widmo światła słonecznego w południe. Oś pionowa pokazuje gęstość energetyczną w W/m^2 na elektronowolt (eV) przedziału widmowego. Widmo widzialne oznaczono kolorami. Po prawej: energia wychwycona przez moduł fotowoltaiczny z jednym pasmem wzbronionym na poziomie 1,1 eV jest oznaczona w czerwonym obszarze. Fotony o energii niższej od energia pasma wzbronionego zostają utracone; tracona jest również część energii fotonów o energii wyższej od poziomu pasma wzbronionego, na przykład tracona jest połowa energii każdego fotonu o energii 2,2 eV. Przyczyną kolejnych strat jest nieuniknione promieniowanie z rekombinacji ładunków w materiale fotowoltaicznym.

- 47 W typowym dla Wielkiej Brytanii miejscu jedynie przez 1/3 czasu słońce nie jest przesłonięte przez chmury. – Szkocki górzysty region Highlands cechuje 1100 godzin światła słonecznego rocznie – nasłonecznienie równe 25%. Najlepsze obszary w Szkocji otrzymują 1 400 godzin rocznie – 32%. Cambridge: 1 500 ± 130 godzin rocznie – 34%. Południowe wybrzeże Anglii (najbardziej słoneczna część Wielkiej Brytanii): 1 700 godzin rocznie – 39%. [2rql0c]. Dane dla Cambridge pochodzą z [2szckw]. Spójrz także na rys. 6.16.
- ... średnia moc promieniowania słonecznego na metr kwadratowy skierowanego na południe dachu w Wielkiej Brytanii wynosi zaledwie $110 W/m^2$, zaś średnia moc promieniowania słonecznego na płaskiej powierzchni ziemi to $100 W/m^2$ – Źródło: NASA „Surface meteorology and Solar Energy” [5hrx1s]. Jesteście zaskoczeni tym, że pomiędzy pochylonym dachem zwróconym na południe a płaskim dachem jest tak niewielka różnica? Mnie to zdziwiło. Realnie różnica wynosi zaledwie 10%. [6z9epq].
- 48 ... oznaczałoby to około 10 m² paneli na osobę. – Oszacowałem powierzchnię dachów skierowanych na południe na osobę, używając do tego powierzchni ziemi pokrytej budynkami na osobę (48 m² w Anglii – tabela I.6), pomnożonej przez 1/4, by otrzymać część dachów skierowaną na południe i zwiększając powierzchnię o 40%, uwzględniając nachylenie dachu. To daje nam 16 m² na osobę. Panele mają zazwyczaj kształt niestawnych prostokątów, przez co nie da się nimi przykryć całej powierzchni dachu i zazwyczaj jego część pozostanie niezabudowana; stąd 10 m² paneli.
- Średnia moc dostarczana przez panele fotowoltaiczne... – Istnieje szeroko rozpowszechniony mit, zgodnie z którym panele słoneczne produkują prawie tyle samo energii w dni pochmurne, jak i w dni słoneczne. To oczywiście nie jest prawdą. W jasny, acz pochmurny dzień panele fotowoltaiczne oraz rośliny nadal produkują energię, ale w znacznie mniejszej ilości – produkcja fotowoltaiczna spada prawie 10-krotnie, gdy słońce schowa się za chmurą (ponieważ natężenie padającego światła spada 10-krotnie). Jak pokazuje rys. 6.15, moc dostarczona przez panele fotowoltaiczne jest niemal wprost proporcjonalna do intensywności światła słonecznego, przynajmniej w temperaturze 25 °C. By jeszcze bardziej skomplikować sprawę dodam, że dostarczana moc zależy również od temperatury – bardziej rozgrzane panele dostarczają mniej mocy (zazwyczaj jest to strata 0,38% na każdy 1°C). Kiedy jednak sprawdzisz dane pochodzące z istniejących paneli (na przykład na stronie www.solarwarrior.com), możesz potwierdzić główną myśl: moc dostarczana przez panele w dni pochmurne jest znacznie mniejsza niż w dni słoneczne. Ta sprawa jest często tuszowana przez osoby promujące panele słoneczne, gdy omawiają zależność paneli od światła słonecznego. Mówią, że „panele są bardziej wydajne w dni pochmurne”, co może i jest prawdą, jednak nie ma nic wspólnego z wytwarzaną mocą, która w dni pochmurne jest znacznie mniejsza.
- Wydajność przeciętnego panelu wynosi około 10%, zaś bardziej kosztownego – 20% – patrz: rys. 6.18; źródła: Turkenburg (2000), Sunpower, www.sunpowercorp.com, Sanyo, www.sanyo-solar.eu, Suntech.
- Masowa produkcja paneli o efektywności większej niż 30% byłaby wybitnym osiągnięciem... – To cytat z pracy Hopfielda i Golluba (1978), którzy odnosili się do



Rys. 6.18. Sprawność modułów fotowoltaicznych dostępnych obecnie na rynku. W książce zakładam, że dachowe moduły mają sprawność rzędu 20%, a moduły naziemne – 10%. W miejscach o średniej gęstości energetycznej światła słonecznego rzędu $100 W/m^2$, panele o sprawności 20% dostarczają $20 W/m^2$.

paneli niewyposażonych w lustra lub soczewki koncentrujące promieniowanie. Maksymalna teoretyczna sprawność, zwana *limitem Shockleya-Queissera*, dla standardowego ogniwa z jednym złączem P-N (ang. *single-junction*) bez koncentratora wynosi 31% – najwyżej tyle energii słonecznej może zostać przekształcone w elektryczność (Shockley i Queisser, 1961). Przyczyna? Wydajność zależy od energii, tzw. przerwy energetycznej (pasma wzbronionego) w materiale, z którego zrobione jest ogniwo. Światło słoneczne zawiera fotony o różnej energii, fotony o energii *poniżej* pasma wzbronionego w ogóle nie zostają wykorzystane, fotony o energii powyżej tego pasma zostają wychwycone, ale nadmiar energii (w stosunku do energii pasma wzbronionego) zostaje utracony. Koncentratory (lustra lub soczewki) ograniczają koszt w przeliczeniu na wat mocy z systemów fotowoltaicznych i jednocześnie zwiększają ich wydajność. Limit Shockleya-Queissera dla paneli słonecznych z koncentratorem wynosi 41%. Jedynym sposobem, by przeskoczyć limit Shockleya-Queissera, jest produkcja wyrafinowanych systemów fotowoltaicznych, które dzielą światło na różne długości fali i przetwarzają każdy zakres fal przy użyciu oddzielnych pasm wzbronionych. To ogniwo o wielu złączach P-N (ang.: *multiple-junction*). Najnowsze ogniwa o wielu złączach P-N z koncentracją optyczną mają mieć sprawność rzędu 40%. [21f716], www.spectrolab.com. W lipcu 2007 Uniwersytet Delaware ogłosił, że uzyskał sprawność rzędu 42,8% przy 20-krotnej koncentracji [6hobq2], [2lsx6t]. W sierpniu 2008 NREL ogłosiło uzyskanie 40,8% sprawności przy 326-krotnej koncentracji [62ccou]. Co ciekawe, oba te wyniki okrzyknięto rekordem świata w sprawności. Jakie ogniwa o wielu złączach P-N są dostępne na rynku? Uni-solar sprzedaje cienkowarstwowe panele o wielu złączach P-N, o mocy szczytowej 58 W i powierzchni 1 m². Oznacza to sprawność przy pełnym nasłonecznieniu rzędu zaledwie 5,8%.

49 **Rys. 6.5. Dane dotyczące paneli fotowoltaicznych.** – Dane oraz zdjęcie zamieszczone dzięki uprzejmości Jonathan Kimmitta.

– **Heliodynamics** – www.hdsolar.com; patrz fot. 6.19. Podobny system jest produkowany przez Arontis www.arontis.se.

50 **Park Słoneczny w Mühlhausen w Bawarii.** – Szacuje się, że ta 25-hektarowa farma będzie produkować średnio 0,7 MW energii (17 000 kWh dziennie). Nowojorska stacja metra Stillwell Avenue ma wbudowane w sklepienie cienkowarstwowe ogniwa fotowoltaiczne z silikonu amorficznego, dostarczające 4 W/m² (Fies i inni, 2007).

Elektrownia słoneczna Nellis w Nevadzie została oddana do użytku w grudniu 2007, zajmuje 56 hektarów i ma produkować 30 GWh energii rocznie. To 6 W/m² [5hzs5y].

Elektrownia słoneczna Serpa w Portugalii, „najpotężniejsza elektrownia słoneczna na świecie” [39z5m5] [2uk8q8], dysponuje panelami śledzącymi słońce, zajmującymi 60 ha (czyli 600 000 m² lub 0,6 km²), które mają generować 20 GWh energii rocznie, średnio 2,3 MW. Daje to moc na jednostkę powierzchni rzędu 3,8 W/m².

– **Moc z elektrowni słonecznych, potrzebna do dostarczenia tych 50 kWh dziennie na osobę w Wielkiej Brytanii, to więcej niż 100-krotna moc dostarczana przez wszystkie panele słoneczne zainstalowane obecnie na świecie.** Dostarczenie 50 kWh dziennie każdemu Brytyjczykowi wymagałoby średniej mocy na poziomie 125 GW, do czego potrzeba 1 250 GW mocy zainstalowanej. Do końca roku 2007 moc zainstalowana w fotowoltaice na całym świecie osiągnęła 10 GW; przyrost mocy zainstalowanej wynosi około 2 GW rocznie.

51 **Wyłożenie 5% powierzchni Wielkiej Brytanii panelami słonecznymi wydaje się z wielu względów nierealne.** Wydaje się mi to nieprawdopodobne, gdyż Brytyjczycy wolą na swojej wsi prowadzić farmy lub wypoczywać, a nie „uprawiać” panele słoneczne. Odstręcza również cena. To nie jest książka o ekonomii, jednak podam kilka liczb. W oparciu o koszty bawarskiej farmy słonecznej można obliczyć, iż dostarczenie 50 kWh energii dziennie na osobę kosztowałoby 91 000 euro na osobę. O ile elektrownia ta działałaby kolejne 20 lat bez dodatkowych inwestycji, hurtowa cena energii wyniosłaby 0,25 euro za 1 kWh. Więcej w: David Carlson, *BP solar* [2ahecp].



Fot. 6.19. Kogeneracyjny moduł fotowoltaiczny firmy Heliodynamics. Powierzchnia modułu wielkości 32 m² (to nieco więcej niż bok autobusu piętrowego) dostarcza do 10 kW ciepła i 1,5 kW prądu. W słonecznym kraju to ważące tonę urządzenie mogłoby dostarczyć dziennie jakieś 60 kWh ciepła oraz 9 kWh prądu. Te wartości odpowiadają średnim przepływowi rzędu 80 W/m² ciepła i 12 W/m² prądu (na m² powierzchni modułu); przepływy te są zbliżone do przepływów generowanych przez standardowe kolektory słoneczne oraz panele fotowoltaiczne, ale koncentrujący moduł Heliodynamics generuje energię taniej, ponieważ zbudowany jest głównie ze zwykłego płaskiego szkła. Dla porównania przeciętny Europejczyk zużywa 125 kWh energii dziennie.

- 52 przeciętny Brytyjczyk wyrzuca ok. 300 g jedzenia dziennie. – Źródło: Ventour (2008).
- Fot. 6.10. Miskant uprawiany bez nawozów azotowych daje w USA plon ok. 24 t suchej masy z hektara rocznie. W Wielkiej Brytanii plony wynoszą 12–16 t/ha rocznie. Suchy miskant ma wartość kaloryczną netto rzędu 17 MJ/kg, zatem brytyjskie plony odpowiadają gęstości energetycznej rzędu 0,75 W/m². Źródła: Heaton i inni (2004) oraz [6kq77]. Takie plony osiągnięte są dopiero po trzech latach niezakłóconego wzrostu.
 - Rys. 6.11. Przytoczone tu liczby pochodzą z następujących prac: Rogner (2000) energia netto pozyskana z drewna, rzepaku, trzciny cukrowej i plantacji tropikalnych; Bayer Crop Science (2003) rzepak na biodiesel; Francis i inni (2005) oraz Asselbergs i inni (2006) jatrofa; Mabee i inni (2006) brazylijska trzcina cukrowa; Schmer i inni (2008) proso różgowe, gleby gorszej jakości w USA; Shapouri i inni (1995) kukurydza na etanol; Królewska Komisja ds. Zanieczyszczenia Środowiska (2004); Grupa robocza Towarzystwa Królewskiego ds. biopaliw (2008); Energy for Sustainable Development Ltd (2003); Archer i Barber (2004); Boyer (1982); Monteith (1977).
- 53 Najbardziej wydajne rośliny w Europie mają zaledwie 2-procentową efektywność w procesie zamiany energii słonecznej w węglowodany, rzeczywista moc dostarczona na jednostkę powierzchni wynosi jakieś 0,5 W/m². Przy niskim nasłonecznieniu najbardziej wydajne rośliny, solidnie nawożone, mają efektywność rzędu 2,4% (Monteith, 1977). Przy wyższym nasłonecznieniu efektywność konwersji spada. Wg Turkenburga (2000) i Schiermeiera i in. (2008), efektywność konwersji energii słonecznej na energię biomasy wynosi mniej niż 1%.
- Oto kilka źródeł na potwierdzenie mojego oszacowania 0,5 W/m² dla energii z roślin w Wielkiej Brytanii. Królewska Komisja ds. Zanieczyszczenia Środowiska szacuje potencjalną gęstość energetyczną upraw energetycznych w Wielkiej Brytanii na 0,2 W/m² (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). Na stronie 43 analizy Towarzystwa Królewskiego nt. biopaliw (Grupa robocza Towarzystwa Królewskiego ds. biopaliw – Royal Society working group on biofuels, 2008) miskant zajmuje pierwsze miejsce, dostarczając jakieś 0,8 W/m² energii chemicznej.
- W *Ocenie sytuacji energetycznej na świecie ONZ* (World Energy Assessment) Rogner (2000) pisze: „Zakładając efektywność konwersji na prąd rzędu 45% oraz plony rzędu 15 ton suchej masy z hektara na rok, wytworzenie 1 megawata prądu z instalacji na biomasę pracującej przez 4 tys. godzin rocznie wymagałoby 2 km² plantacji”. Daje to energię na jednostkę powierzchni rzędu 0,23 W(e)/m² (1 W(e) oznacza 1 wat mocy elektrycznej).
- Energy for Sustainable Development Ltd (2003) szacuje, że rośliny krzewiaste (np. wierzba, topola) mogą dostarczyć ponad 10 ton suchej masy z hektara na rok, co odpowiada gęstości energetycznej rzędu 0,57 W/m² (suche drewno ma wartość kaloryczną 5 kWh na kg).
- Wg Archera i Barbera (2004), chwilowa sprawność zdrowego liścia w warunkach optymalnych zbliża się do 5%, ale długo-okresowa efektywność gromadzenia energii dzisiejszych upraw wynosi 0,5–1%. Archer i Barber sugerują, że modyfikacje genetyczne mogą podnieść sprawność gromadzenia energii roślin, a szczególnie *roślin o fotosyntezie C₄*, które same z siebie ewoluowały w kierunku bardziej efektywnej fotosyntezy. Rośliny C₄ rosną głównie w tropikach i lubią wysokie temperatury; nie rosną w temperaturach niższych niż 10 °C. Roślinami C₄ są: trzcina cukrowa, kukurydza, sorgo, proso afrykańskie czy proso różgowe. Zhu i inni (2008) szacują teoretyczny limit efektywności konwersji energii słonecznej na energię biomasy na poziomie 4,6% dla typu fotosyntezy C₃ (przy 30 °C i obecnym stężeniu CO₂ w atmosferze rzędu 380 ppm) oraz 6% dla fotosyntezy typu C₄. Twierdzą, że najwyższe rzeczywiście uzyskane wartości efektywności konwersji dla roślin C₃ i C₄ wyniosły odpowiednio 2,4% oraz 3,7%, a także (cytując Boyera, 1982), że średnia efektywność konwersji najpopularniejszych upraw w USA jest 3–4 razy niższa niż te rekordowe wyniki (i wynosi 1%). Jednym z powodów, dla których rośliny nie osiągają teoretycznego limitu, jest fakt, że nie potrafią wykorzystać całego promieniowania jasnego światła słonecznego. Oba opracowania (Zhu i inni, 2008; Boyer, 1982) omawiają możliwości modyfikacji genetycznych w celu uzyskania bardziej wydajnych roślin.
- Nawet w dobrym kotle, podczas spalania suchego drewna, przez komin ucieka 20% ciepła. Źródła: Grupa robocza Towarzystwa Królewskiego ds. biopaliw (2008); Królewska Komisja ds. Zanieczyszczenia Środowiska (2004).

7 Ogrzewanie i chłodzenie

W tym rozdziale zbadamy, jak wiele energii wykorzystujemy, regulując temperaturę naszego otoczenia – w domu i pracy – oraz na ogrzewanie lub chłodzenie naszej żywności, napojów, pranie i zmywanie naczyń.

Ogrzewanie wody w domach

Najwięcej ciepłej wody w domu możemy zużyć na kąpiele w wannie, „branie prysznica”, zmywanie naczyń bądź pranie – zależy to od naszego stylu życia. Oszacujmy najpierw energię potrzebną do zrobienia sobie ciepłej kąpieli w wannie.

Objętość ciepłej wody w wannie to: $50\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 150\text{ cm} \approx 110$ litrów (oczywiście dochodzi do tego zimna woda, ale nie musimy jej podgrzewać). Powiedzmy, że temperatura ciepłej wody wynosi $50\text{ }^\circ\text{C}$, a wpływając do domu woda ma temperaturę $10\text{ }^\circ\text{C}$. Pojemność cieplna wody określająca, ile energii trzeba włożyć w podgrzanie jednego litra wody o $1\text{ }^\circ\text{C}$, wynosi 4 200 J . Zatem energia potrzebna do podgrzania 110 litrów wody o $40\text{ }^\circ\text{C}$ wynosi:

$$4200\text{ J} \times 110\text{ litrów} \times 40\text{ }^\circ\text{C} \approx 18\text{ MJ} \approx 5\text{ kWh}$$

Ciepła kąpiel wiąże się więc ze zużyciem około **5 kWh** energii. Dla porównania, prysznic (30 litrów ciepłej wody) wymaga około **1,4 kWh**.

Czajniki i kuchenki

Kraj cywilizowany taki jak Wielka Brytania ma sieć energetyczną dostarczającą do domów prąd o napięciu 230 V . Mając prąd w gniazdku, możemy skorzystać z czajnika elektrycznego, aby podgrzać sobie kilka litrów wody w dwie minuty.

Takie czajniki elektryczne mają moc do 3 kW . Dlaczego właśnie tyle? Ponieważ jest to największa moc, jaką może dostarczyć gniazdko 230 V bez przekroczenia maksymalnego dopuszczalnego natężenia prądu, wynoszącego 13 A . W krajach, w których napięcie wynosi 110 V , przygotowanie dzbanka herbaty potrwa dwa razy dłużej.

Jeśli taki czajnik elektryczny będzie włączony przez 20 minut dziennie, średnie zużycie energii wyniesie **1 kWh na dzień**. (Dalsze obliczenia przeprowadzam dla gospodarstwa domowego, w którym mieszkają 2 osoby).

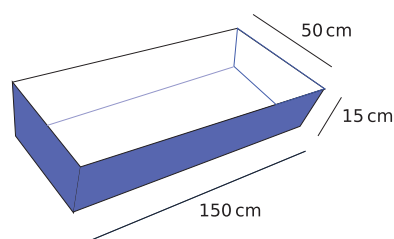
Jeden mały pierścień na kuchenke elektrycznej ma taką samą moc jak toster – 1 kW . Płyty grzewcze o większej mocy dostarczają $2,3\text{ kW}$. Jeśli używasz dwóch palników kuchenki przez pół godziny dziennie, odpowiada to **1,6 kWh dziennie**.

Moc znamionowa kuchenki mikrofalowej jest zwykle umieszczona na panelu frontowym; moja mikrofała ma wypisaną moc 900 W , ale faktycznie zużywa około $1,4\text{ kW}$. Jeśli używasz kuchenki mikrofalowej przez 20 minut dziennie, odpowiada to wykorzystaniu **0,5 kWh** energii.

Standardowy piekarnik ustawiony na pełną moc zużywa już więcej, bo około 3 kW . Jeśli używasz piekarnika przez godzinę dziennie, z czego na pełnej mocy przez 30 minut, daje to **1,5 kWh dziennie**.



Fot. 7.1. Szereg nowych domów



Rys. 7.2. Woda w wannie

$$230\text{V} \times 13\text{A} = 3000\text{ W}$$

Mikrofalówka:
1400 W



Fot. 7.3. Zużycie energii przez urządzenia grzewcze i chłodzące

Urządzenie	Moc	Czas dziennie	Energia dziennie
Gotowanie:			
– czajnik	3 kW	1/3 h	1 kWh/d
– mikrofala	1,4 kW	1/3 h	0,5 kWh/d
– elektryczna kuchenka (płyta)	3,3 kW	½ h	1,6 kWh/d
– elektryczny piekarnik	3 kW	½ h	1,5 kWh/d
Pranie/zmywanie:			
– pralka	2,5 kW	0,4 h	1 kWh/d
– suszarka elektryczna	2,5 kW	0,8 h	2 kWh/d
– suszenie w domu „na sznurkach”			0,5 kWh/d
– suszenie na zewnątrz „na sznurkach”			0 kWh/d
– zmywarka	2,5 kW	0,6 h	1,5 kWh/d
Chłodzenie:			
– lodówka	0,02 kW	24 h	0,5 kWh/d
– zamrażarka	0,09 kW	24 h	2,3 kWh/d
– klimatyzator	0,6 kW	1 h	0,6 kWh/d

Tabela 7.4. Zużycie energii przez urządzenia grzewcze i chłodzące w przeliczeniu na gospodarstwo domowe

Pranie i suszenie ubrań oraz zmywanie naczyń

Pralka, zmywarka i suszarka do ubrań zużywają po około 2,5 kW. Pralka zużywa około 80 litrów wody i około 1 kWh na jedno pranie, przy ustawieniu temperatury na 40 °C. Jeśli suszymy ubranie w domu, np. na sznurkach zamiast w suszarce, to i tak potrzebujemy ciepła na odparowanie wody – około 1,5 kWh (zamiast 3 kWh) na wysuszenie jednego prania.

Gdy dodamy szacunkowe wielkości energii zużywanej na podgrzewanie wody, myślę, że lekką ręką zużywamy około **12 kWh na osobę dziennie**.

Ciepłe powietrze w domu i w pracy

Ciekawe, czy więcej energii zużywamy na podgrzewanie wody i jedzenia, czy też na ogrzewanie powietrza w budynkach za pomocą grzejników?

Jednym ze sposobów szacowania dziennego zużycia energii na podgrzanie powietrza jest wyobrażenie sobie budynku ogrzewanego grzejnikami elektrycznymi, których moc jest nam znana. Moc niewielkiego grzejnika elektrycznego (lub termowentylatora) wynosi 1 kW, czyli 24 kWh energii dziennie. W zimie, aby mieć w domu miłe ciepło, będziesz potrzebował po jednym urządzeniu dla każdej osoby; w lecie nie będą potrzebne w ogóle. Przyjmijmy zatem, że współczesny Brytyjczyk *potrzebuje* dziennie średnio 12 kWh energii na ogrzewanie powietrza. Jednak większość ludzi zużywa więcej niż faktycznie potrzebuje, ogrzewając równocześnie kilka pomieszczeń (kuchnia, pokój gościnny, korytarz, łazienka itp.), z tego zaś wynika, że wiarygodny poziom zużycia energii na ogrzanie powietrza będzie dwa razy większy: **24 kWh dziennie na osobę**.

Uzupełniający tę część książki rozdział E zawiera bardziej szczegółowy model ucieczki ciepła z budynku; pozwala także przewidzieć oszczędności energii dzięki zredukowaniu temperatury, podwójnym szybowi w budynku etc.

Ciepła woda:
12 kW/d

Rys. 7.5. Całkowita energia na ogrzewanie wody w domu i pracy – w tym kąpiele, prysznic, pranie, kuchenki, czajniki, mikrofalówki i zmywarki – wynosi około 12 kWh na osobę dziennie. Zaznaczyłem ten prostokąt jasnym kolorem, żeby wskazać, że energia może zostać dostarczona w postaci o niskiej jakości energii termicznej.



Fot. 7.6. Duży grzejnik elektryczny o mocy 2 kW

Ogrzewanie otoczenia i inne luksusy

Widoczna jest moda na ogrzewanie otoczenia domu za pomocą promienników ogrodowych. Typowy promiennik ogrodowy ma moc 15 kW. Tak więc, jeśli używasz jednego z tych urządzeń co wieczór przez dwie godziny, zużywasz dodatkowo **30 kWh dziennie**.

Nieco skromniejszym luksusem jest koc elektryczny. Moc takiego koca na podwójne łóżko wynosi 140 W; włączenie go na godzinę dziennie to **0,14 kWh**.

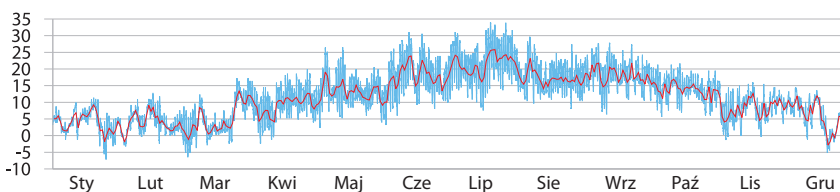
Chłodzenie

Lodówka i zamrażarka

Regulujemy temperaturę, nie tylko podgrzewając wodę i powietrze, lecz także chłodząc żywność, którą przynosimy do naszych rozgrzanych domów. Moja lodówka-zamrażarka, pokazana na rys. 7.3 zużywa średnio 18 W – co odpowiada mniej więcej **0,5 kWh**.

Klimatyzacja

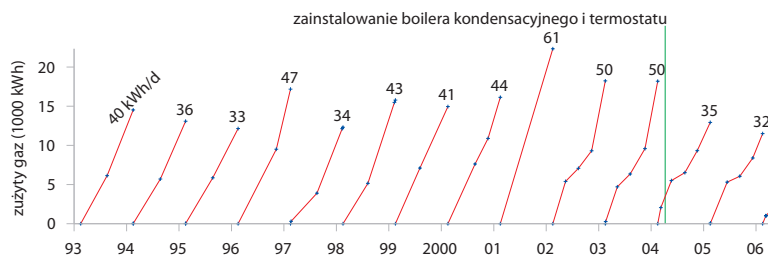
W krajach, w których temperatura przekracza 30 °C, klimatyzacja postrzegana jest jako konieczność. Koszt energetyczny obniżania temperatury może być wysoki. Ta część książki dotyczy jednak zużycia energii w Wielkiej Brytanii, gdzie temperatury nie są na tyle wysokie, by potrzebna była klimatyzacja (rys. 7.8).



Rys. 7.7. Całkowita energia na ogrzewanie powietrza w domu i pracy – około 24 kWh na osobę dziennie.

Rys. 7.8. Temperatury w Cambridge w stopniach Celsjusza, dzienne (linia czerwona), i półgodzinne (linia niebieska) w roku 2006.

Ekonomicznym sposobem na klimatyzację jest powietrzna pompa ciepła. Zamontowany na oknie klimatyzator zużywa dla pojedynczego pomieszczenia 0,6 kW elektryczności i (z pomocą wymiennika ciepła) dostarcza 2,6 kW chłodzenia. Aby oszacować, jak wiele energii może potrzebować do tego mieszkaniec Wielkiej Brytanii, założyłem, że włącza on klimatyzator na 12 godzin dziennie przez 30 dni w roku. W dniach, w których jest włączony, zużywa on 7,2 kWh energii, a średnia dla całego roku wynosi **0,6 kWh/d**.



Klimatyzacja: **1 kWh/d**

Rys. 7.9. Chłodzenie sumaryczne – uwzględnia lodówkę/zamrażarkę i trochę klimatyzacji latem – 1 kWh/d

Rys. 7.10. Moje domowe skumulowane zużycie gazu w kWh, w latach 1993–2005. Liczba na górze każdej linii rocznej pokazuje średnie zużycie energii w danym roku w kWh na dzień.

Aby dowiedzieć się, co stało się w 2007 roku, czytaj dalej!

W tym rozdziale oszacuję koszt energetyczny chłodzenia na 1 kWh na osobę dziennie – włączając w to klimatyzację i domowe lodówki. Energię zużywaną na chłodzenie żywności podczas drogi z pola do wózka sklepowego oszacuję później jako część kosztu energetycznego łańcucha żywnościowego w rozdziale 15.

Całkowite ogrzewanie i chłodzenie

Nasze obliczenia całkowitej energii, którą jedna osoba może zużyć na ogrzewanie i chłodzenie w domu, pracy i podczas przygotowywania żywności, dają liczbę **37 kWh na osobę dziennie** (12 na ciepłą wodę, 24 na ciepłe powietrze i 1 na chłodzenie).

Dowodem na to, że przedstawione oszacowania są z grubsza właściwe, a być może lekko zaniżone, jest zużycie gazu w moim domu, które już od 12 lat wynosi średnio 40 kWh dziennie (rys. 7.10). W swoim czasie myślałem, że oszczędnie gospodaruję ciepłem, jednak w rzeczywistości nie zwracałem szczególnej uwagi na faktyczne zużycie energii. Rozdział 21 pokaże, jak wiele energii zaoszczędziłem, od kiedy zacząłem na to uważać.

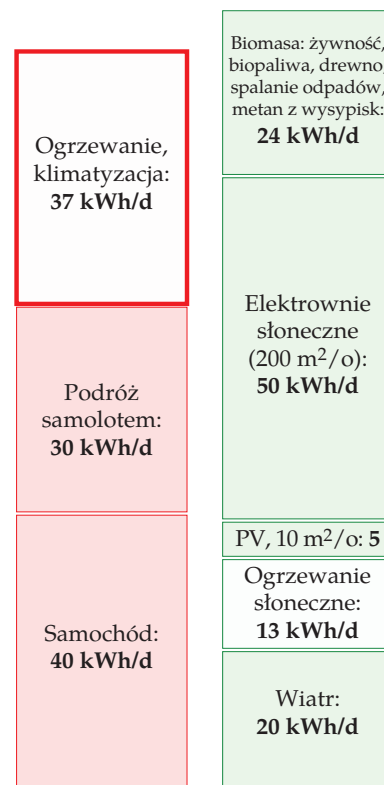
Ponieważ ogrzewanie stanowi znaczącą pozycję w naszym słupku zużycia energii, porównajmy jeszcze moje szacunki z oficjalnymi statystykami. Na poziomie krajowym średnie *domowe* zużycie energii na ogrzewanie mieszkań, wody i gotowanie w roku 2000 wyniosło 21 kWh na osobę dziennie, a zużycie w *sektorze usług* na ogrzewanie, chłodzenie, catering i ciepłą wodę wyniosło 8,5 kWh/d na osobę. Dla oszacowania zużycia energii na ogrzewanie w miejscu pracy przyjmijmy zużycie gazu na Uniwersytecie Cambridge w roku akademickim 2006–2007, wynoszące 16 kWh/d na pracownika.

Sumując te trzy liczby, otrzymujemy wydatek energetyczny na ogrzewanie $21 + 8,5 + 16 \approx 45$ kWh/d na osobę, zakładając, że Uniwersytet Cambridge jest przeciętnym miejscem pracy. W porządku, to całkiem blisko naszych szacunków na poziomie **37 kWh/d na osobę**.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 59 **Standardowy piekarnik ustawiony na pełną moc zużywa już więcej, bo około 3 kW.** – Rzecz jasna, mamy do czynienia z przedziałem mocy. Wiele piekarników ma moc maksymalną 1,8 kW lub 2,2 kW, a najmocniejsze dysponują mocą 6 kW. Na przykład kuchenka elektryczna Whirlpool AGB 487/WP 4 ma piekarnik o mocy 5,9 kW oraz cztery płyty grzewcze o mocy 2,3 kW. Zobacz też: www.kcmiltd.com/electric_oven_ranges.shtml; www.1stforkitchens.co.uk/kitchenovens.html
- 60 **Jeśli suszymy ubranie w domu, np. na sznurkach zamiast w suszarce, to i tak potrzebujemy ciepła na odparowanie wody – około 1,5 kWh (zamiast 3 kWh) na wysuszenie jednego prania.** – Ustaliłem to, ważąc moje pranie: ładunek ubrań ważący 4 kg wyszedł z mojej pralki, ważąc 2,2 kg więcej (nawet po odwirowaniu). Ukryte ciepło potrzebne do odparowania wody w temperaturze 15°C wynosi około 2 500 kJ/kg. Aby uzyskać wartość zaprezentowaną w tabeli 7,4 założyłem, że jedna osoba zbiera pełen ładunek dla pralki co trzy dni oraz że ciepło do suszenia ubrań jest pobierane z powietrza w domu, co w chłodnej połowie roku wymaga skompensowania intensywniejszym dogrzewaniem. W lecie suszenie ubrań w domu zapewnia wręcz lekką klimatyzację, gdyż parowanie wody studzi powietrze w domu.
- 62 **Na poziomie krajowym średnie domowe zużycie energii na ogrzewanie mieszkań, wody i gotowanie w roku 2000 wyniosło 21 kWh na osobę dziennie, a zużycie w sektorze usług na ogrzewanie, chłodzenie, catering i ciepłą wodę wyniosło 8,5 kWh/d na osobę.** – Źródło: Departament Handlu i Przemysłu (2002a).
- **Dla oszacowania ogrzewania w miejscu pracy przyjmijmy zużycie gazu na Uniwersytecie Cambridge w roku akademickim 2006–2007, wynoszące 16 kWh/d na pracownika.** – Według raportów uniwersytetu, zużycie gazu i ropy przez Uniwersytet Cambridge (bez koledżów) w okresie 2006–07 wyniosło 76 GWh. Na uniwersytecie pracuje 13 300 osób. Zużycie elektryczności w tym okresie wyniosło 99,5 GWh.



Rys. 7.11. Ogrzewanie i chłodzenie – około 37 jednostek na osobę dziennie. Usunąłem cieniowanie z tego słupka, aby wskazać, że reprezentuje on energię, która może zostać dostarczona w formie o niskiej jakości termicznej.

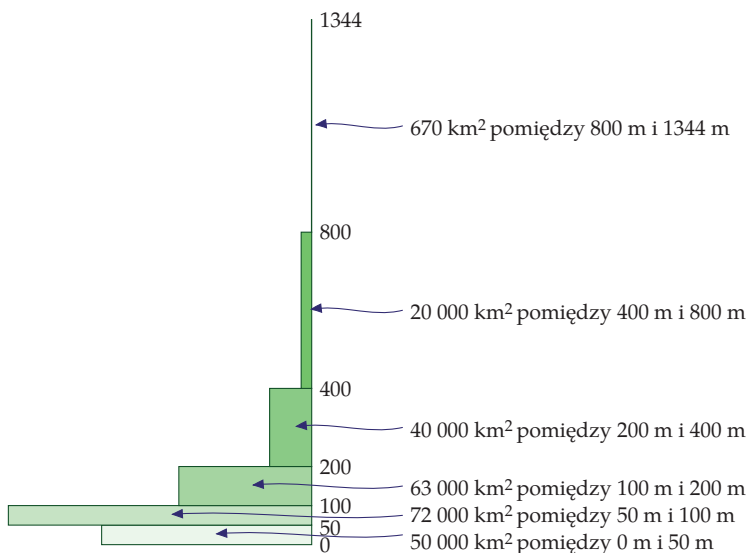
8 Hydroenergetyka

By wytworzyć energię hydroelektryczną wody, potrzebna jest różnica wysokości terenu oraz deszcz. Oszacujmy całkowitą energię pochodzącą ze wszystkich opadów, gdy deszcz spływa do poziomu morza.

Dla tej hydroenergetycznej prognozy podzielię Wielką Brytanię na dwie części: niżej położone i bardziej suche obszary (które umownie będę tu nazywał „nizinami”) oraz wyżej położone obszary z częstszymi opadami deszczu (te będę nazywał „wyżynami”). Jako miejsca reprezentatywne dla tych dwóch regionów wybrałem Bedford i Kinlochewe.

Najpierw zajmijmy się nizinami. By oszacować moc grawitacyjnie opadającego tutaj deszczu, pomnożymy ilość opadów deszczu w Bedford (584 mm rocznie) przez gęstość wody ($1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$), przyspieszenie ziemskie ($10\ \text{m}/\text{s}^2$) oraz typową dla nizin wysokość nad poziomem morza (przyjmijmy 100 m). Z tego wynika, że moc na jednostkę powierzchni wynosi $0,02\ \text{W}/\text{m}^2$. Jest to moc na jednostkę powierzchni terenu, na którą spadł deszcz.

Następnie pomnożymy ten wynik przez powierzchnię na osobę ($2\ 700\ \text{m}^2$ przy założeniu, że niziny są równo podzielone pomiędzy 60 milionów Brytyjczyków) i otrzymujemy średnią moc wielkości 1 kWh na osobę dziennie. Wynik ten jest absolutnym maksimum, które można osiągnąć dla hydroenergetyki na nizinach. Oznacza to przegrodzenie tamami wszystkich rzek i perfekcyjne wykorzystanie każdej kropli wody. W rzeczywistości budujemy tamy jedynie na rzekach o znaczącym spadku, których zlewnie są przecież znacznie mniejsze niż całkowita powierzchnia kraju. Duża część wody zanim dotrze do turbin, wyparowuje lub wsiąka w ziemię, dlatego żaden system hydroenergetyczny nie jest w stanie wykorzystać w pełni potencjału energetycznego wody. Tak oto dochodzimy do twardego wniosku dotyczącego wodnego potencjału energetycznego na nizinach: ludziom mogą podobać się małe elektrownie wodne, jednakże na obszarach nizinnych nigdy nie dostarczą one mocy większej niż 1 kWh na osobę dziennie.



Fot. 8.1. Tama Nant-y-Moch, część systemu hydroenergetycznego o mocy 55 MW, w Walii. Fot. Dave Newbould, www.origins-photography.co.uk



Rys. 8.2. Wysokości nad poziomem morza dla terenów Wielkiej Brytanii. Prostokąty ilustrują, ile powierzchni znajduje się na określonej wysokości.

Przejdźmy teraz do wyżyn. Kinlochewe to bardziej deszczowe miejsce. W ciągu roku spada tu 2278 mm deszczu, czyli cztery razy więcej niż w Bedford. Również różnice poziomów są tu znacznie większe – duże powierzchnie ziemi znajdują się ponad 300 m n.p.m. W regionach górskich możliwe jest więc uzyskanie 12-krotnie większej mocy na metr kwadratowy. Czysta moc na jednostkę powierzchni wynosi tu około $0,24 \text{ W/m}^2$. Gdyby wyżyny hojnie dzieliły się swoją energią wodną z resztą Wielkiej Brytanii (przy $1\ 300 \text{ m}^2$ powierzchni na osobę), to górny limit mocy wynosiłby około 7 kWh na osobę dziennie. Tak jak w przypadku nizin maksymalny limit oznacza wyeliminowanie strat wody przy parowaniu oraz wykorzystanie każdej jej kropli.

Na ile jednak powinniśmy oszacować wiarygodny rzeczywisty limit? Przyjmijmy, że na 20% tej wartości, a więc 1,4 kWh dziennie. Po niewielkim zaokrągleniu, przyjmującym możliwość produkcji na nizinach, otrzymujemy **1,5 kWh na osobę dziennie**.

Rzeczywista moc czerpana z hydroenergetyki w Wielkiej Brytanii wynosi obecnie 0,2 kWh na osobę dziennie, czyli nasze 1,5 kWh wymagałoby siedmiokrotnego wzrostu mocy hydroelektrowni.

My również podzielimy Polskę na niziny i wyżyny. Tereny nizinne (poniżej 200 m n.p.m.) zajmują ok. 75% powierzchni kraju – przyjmijmy średnią wysokość nad poziomem morza równą 100 m. Przeciętne wysokości opadów na tym obszarze kształtują się od 450 (Kujawy, Wielkopolska) do 700 mm rocznie (Pojezierze Pomorskie i Mazurskie). Przyjmijmy podobnie jak dla Bedford średnią 584 mm.

Identycznie jak w przypadku nizin w Wielkiej Brytanii otrzymujemy moc na jednostkę powierzchni równą $0,02 \text{ W/m}^2$. Na każdego Polaka przypada średnio 6000 m^2 nizin, a więc otrzymujemy średnią moc wielkości niecałych 3 kWh na osobę dziennie.

Pozostałe 25% powierzchni kraju zajmują tereny wyżynne i górskie. Przyjmijmy, że ich średnia wysokość to 400 m n.p.m. Sumy opadów wynoszą tu od 600 mm na Wyżynach Małopolskiej i Lubelskiej przez 700 mm na Wyżynie Krakowsko-Częstochowskiej i w Bieszczadach aż po 1100 mm w Zakopanem i 1700 mm na Kasprowym Wierchu. Terenów wyżynnych położonych poniżej 400 m n.p.m. jest znacznie więcej niż tych położonych powyżej tej granicy. Ponieważ jednak istnieje silny związek pomiędzy wysokością a ilością opadów, musimy zawiązać średni poziom opadów, przyjmując 800 mm rocznie. Daje to moc na jednostkę powierzchni równą $0,11 \text{ W/m}^2$. Cóż, nawet na Kasprowym Wierchu nie pada tyle, co w Kinlochewe... Gdyby nasze wyżyny i góry hojnie dzieliły się swoją energią wodną z resztą Polski (przy 2000 m^2 powierzchni na osobę), to górny limit mocy wynosiłby około 5 kWh na osobę dziennie.

Łącznie niziny i wyżyny dają 8 kWh. Przyjmując, że w praktyce moglibyśmy wykorzystać tę energię w 20 procentach, sumując energię z wyżyn i nizin, otrzymujemy – podobnie jak w Wielkiej Brytanii – **1,6 kWh na osobę dziennie**.

Rzeczywista moc czerpana z energii wodnej w Polsce wynosi obecnie 0,2 kWh na osobę dziennie, czyli nasze 1,5 kWh na osobę dziennie wymagałoby ośmiokrotnego zwiększenia mocy elektrowni wodnych.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 63 **Opady deszczu.** – Statystyki pochodzą z centrum pogodowego BBC.
- 64 **Czysta moc na jednostkę powierzchni wynosi tu [deszczu na wyżynach] około 0,24 W/m².** – Możemy skonfrontować ten wynik z rzeczywistymi danymi dla elektrowni wodnej Loch Sloy, wybudowanej w 1950 roku (Ross, 2008). Powierzchnia zlewni Loch Sloy wynosi około 83 km²; opady deszczu wynoszą tu około 2900 mm rocznie (to trochę więcej niż 2278 mm rocznie w Kinlochewe). Efektem pracy elektrowni w 2006 roku były 142 GWh rocznie, co odpowiada gęstości mocy równej 0,2 W/m² powierzchni zlewni. Powierzchnia Loch Sloy wynosi około 1,5 km², więc moc elektrowni na jednostkę powierzchni jeziora wynosi 11 W/m². Zbocza, wodociągi i tunele doprowadzające wodę do Loch Sloy działają zatem jak urządzenie 55-krotnie zwiększające moc.
- **Rzeczywista moc czerpana z hydroenergetyki w Wielkiej Brytanii wynosi obecnie 0,2 kWh na osobę dziennie...** – Źródło: MacLeay i in. (2007); w roku 2006 duże elektrownie wodne generowały 3515 GWh (z instalacji o mocy 1,37 GW), zaś małe elektrownie wodne – 212 GWh (0,01 kWh na osobę dziennie, z instalacji o mocy 153 MW).

W 1943 roku, gdy hydroenergetyka była w fazie rozkwitu, inżynierowie z North of Scotland Hydroelectricity Board oszacowali, że Szkockie Highlands może wygenerować 6,3 TWh rocznie za pomocą 102 instalacji – odpowiadałoby to 0,3 kWh/d na osobę w Wielkiej Brytanii (Ross, 2008).

Glendoe, pierwszy nowy projekt na dużą skalę w Wielkiej Brytanii od 1957 roku, będzie generował dodatkową moc 100 MW i oczekuje się, że będzie dostarczał 180 GWh rocznie. Powierzchnia zlewni Glendoe wynosi 75 km², więc jego gęstość mocy równa jest 0,27 W/m². Projekt Glendoe był reklamowany jako „wystarczająco duży, by zasilić Glasgow”. Kiedy jednak podzielimy 180 GWh rocznej produkcji pomiędzy wszystkich mieszkańców Glasgow (616 000 osób), to otrzymamy zaledwie 0,8 kWh na osobę dziennie. Wystarczy to na pokrycie zaledwie 5% średniego zużycia energii elektrycznej, które wynosi 17 kWh na osobę dziennie. To 20-krotne wyolbrzymienie mocy elektrowni może być spowodowane przez skupienie się na jej *szczytowych* osiągnięciach zamiast na wynikach uśrednionych, które są 5 razy mniejsze; kolejnym powodem może być też uwzględnienie mocy potrzebnej do zasilenia „domów”, nie zaś całego Glasgow (patrz: str. 347).

El. wodne: 1,5 kWh/d

Ogrzewanie, klimatyzacja: 37 kWh/d	Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 24 kWh/d
Podróż samolotem: 30 kWh/d	Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 50 kWh/d
Samochód: 40 kWh/d	PV, 10 m ² /o: 5
	Ogrzewanie słoneczne: 13 kWh/d
	Wiatr: 20 kWh/d

Rys. 8.3. Hydroenergetyka



Fot. 8.4. Koło wodne o mocy 60 kW

9 Oświetlenie

Oświetlenie w domu i pracy

Najjaśniejsze domowe żarówki zużywają 250 W, a lampki nocne – 40 W; w staromodnej żarówce żarowej większość energii zostaje zamieniona w ciepło, a nie w światło; świetlówka może wytworzyć taką samą ilość światła, wykorzystując zaledwie ¼ energii zużywanej przez żarówkę żarową.

Jak wiele energii zużywa na oświetlenie osoba żyjąca umiarkowanie dostаточно? Według moich swobodnych szacunków bazujących na tabeli 9.2, typowe dwuosobowe gospodarstwo domowe wyposażone częściowo w żarówki żarowe, a częściowo w energooszczędne, zużywa 5,5 kWh dziennie, co daje 2,7 kWh dziennie na osobę. Zakładam również, że każda osoba ma także swoje miejsce pracy, w którym dzieli oświetlenie z kolegami. Szacując zużycie energii na oświetlenie miejsca pracy na poziomie 1,3 kWh na osobę dziennie, otrzymujemy łączną wartość 4 kWh na osobę dziennie.

Oświetlenie ulic i sygnalizacja świetlna

Czy powinniśmy uwzględnić oświetlenie ulic, aby uzyskać właściwe oszacowanie zużycia energii na oświetlenie, czy też zużycie energii w domu i miejscu pracy jest dominującym elementem? Oświetlenie uliczne zużywa 0,1 kWh energii na osobę dziennie, a sygnalizacja świetlna zaledwie 0,005 kWh na osobę dziennie – obie wielkości są nieistotne w porównaniu ze zużyciem energii na oświetlenie domu i miejsca pracy.

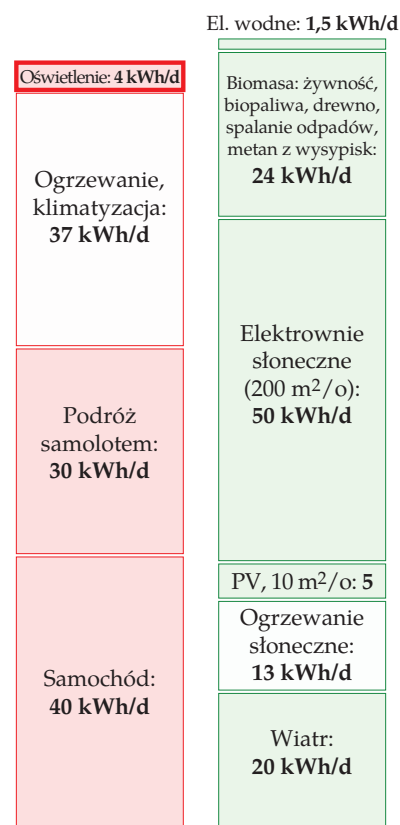
A co z innymi rodzajami oświetlenia przestrzeni publicznych – na przykład podświetlaniem znaków i pachołków na drogach? Jest ich mniej niż latarni, a te już uwzględniliśmy, więc nie będziemy modyfikować naszych oszacowań i pozostawiamy je na poziomie 4 kWh na osobę dziennie.

Światła w ruchu drogowym

W niektórych krajach kierowcy muszą włączać światła drogowe zawsze, gdy ich pojazd jest w ruchu. Jak zużywana przez to dodatkowa energia ma się do energii potrzebnej do przemieszczania samochodu? Powiedzmy, że auto ma cztery żarówki żarowe o łącznej mocy 100 W. Prąd dla tych żarówek jest dostarczany przez silnik o efektywności 25% i generator o efektywności 55%, w związku z czym silnik zużywa dodatkowo 730 W. Dla porównania, typowy samochód jadący z prędkością 50 km/h, zużywający litr paliwa na 12 km, ma średnie zużycie energii na poziomie 42 000 W. Zatem oświetlenie włączone podczas jazdy podnosi zużycie energii mniej więcej o 2%.

Urządzenie na dom	Moc	Czas na dzień	Energia dziennie
10 żarówek żarowych	1 kW	5 h	5 kWh
10 żarówek energooszczędnych	0,1 kW	5 h	0,5 kWh

A co z samochodami elektrycznymi w przyszłości? Zużycie energii przez przeciętny samochód elektryczny wynosi około 5000 W. Tak więc dorzucenie dodatkowych 100 W zwiększyłoby zużycie energii o 2%. Można je zmniejszyć, zmieniając oświetlenie na diodowe, jednak koncentrując się na tym, przestali byśmy skupiać się na meritum i skończylibyśmy jako kliniczny przypadek mikroptymalizatora.



Rys. 9.1. Oświetlenie – 4 kWh na osobę dziennie

Tabela 9.2. Zużycie elektryczności do oświetlenia domu.

Wiarygodne szacunki to 5,5 kWh na gospodarstwo domowe dziennie; zużycie energii w pracy jest porównywalne; w sumie około 4 kWh na osobę dziennie.

Oplącalność żarówek energooszczędnych

Z zasady zazwyczaj unikam dyskusji na temat oplącalności różnych rozwiązań, ale zrobię wyjątek dla żarówek energooszczędnych. Energooszczędna żarówka firmy Osram pobierająca 20 W daje tyle samo światła, ile żarówka żarowa o mocy 100 W. Co więcej, jej żywotność to 15 000 godzin (lub 12 lat przy użyciu przez 3 godziny dziennie). Dla porównania, typowa żarówka żarowa wytrzyma 1000 godzin. Podczas 12-letniego okresu używania masz zatem wybór (rys. 9.3): kupić 15 żarówek żarowych i zużyć 1500 kWh elektryczności (co będzie w sumie kosztować 150 £) lub kupić jedną żarówkę energooszczędną i zużyć 300 kWh (co będzie w sumie kosztować 30 £).

W Polsce cena zakupu 15 żarówek żarowych ($15 \times 1,2 \text{ PLN} = 18 \text{ PLN}$) oraz zużycia 1 500 kWh energii elektrycznej ($1 500 \text{ kWh} \times 0,5 \text{ PLN/kWh} = 750 \text{ PLN}$) wyniesie łącznie 768 PLN (przy czym cena żarówek w porównaniu z ceną prądu jest naprawdę mikroskopijna).

Z kolei łączny koszt zakupu jednej żarówki energooszczędnej (20 PLN) oraz zużycia 300 kWh energii elektrycznej ($300 \text{ kWh} \times 0,5 \text{ PLN/kWh} = 150 \text{ PLN}$) wyniesie 170 PLN.

Czy powinienem poczekać z wymianą, aż zużyje się stara żarówka żarowa?

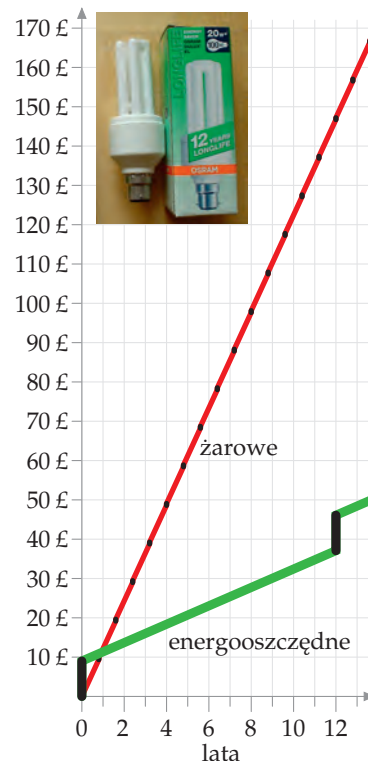
Na pierwszy rzut oka wygląda to na marnotrawstwo, czyż nie? Ktoś zużył zasoby, żeby wytworzyć tę starą żarówkę żarową. Czyż nie powinniśmy czekać na zwrot zainwestowanych nakładów, dopóki żarówka świeci? Jednak od strony ekonomicznej odpowiedź jest jasna: *dalsze używanie starej żarówki to wyrzucanie dużych pieniędzy, aby zaoszczędzić małe*. Jeśli możesz mieć niskoenergetyczny zamiennik, wymień starą żarówkę *od razu*.

A co z rtęcią w energooszczędnych żarówkach fluorescencyjnych?

Owszem, w żarówce energooszczędnej znajduje się rtęć w ilości 3–12 mg. Ale w termometrze lekarskim jest 500–3000 mg rtęci – to więcej niż we wszystkich żarówkach energooszczędnych w niejednym bloku. No i żarówek nie wyrzucamy do śmietnika, ale oddajemy do utylizacji (mam nadzieję, że Ty też). A zresztą, nawet gdyby rozbijać je w lesie, to i tak już po wyprodukowaniu kilkudziesięciu kWh elektryczności polska elektrownia wyrzuci z siebie więcej rtęci z węgla niż jest jej w naszej żarówce – tak więc teoretycznie wolna od rtęci żarówka żarowa odpowiada za emisję większej ilości rtęci niż zawierająca rtęć żarówka energooszczędna [red.]

Czy żarówki LED są lepsze od fluorescencyjnych?

Naukowcy mówią, że żarówki LED (diodowe) wkrótce staną się bardziej energooszczędne niż żarówki fluorescencyjne. Efektywność świetlną mierzy się w *lumenach na wat*. Sprawdziłem liczby na opakowaniach nabytych ostatnio żarówek: kompaktowa żarówka fluorescencyjna Philips Genie 11 W (rys. 9.4) ma jasność 600 lumenów, co daje efektywność 55 lumenów na wat. Standardowa żarówka żarowa daje 10 lumenów na wat, a żarówka Omicron 1,3 W, posiadająca 20 białych diod LED ma jasność 46 lumenów, co oznacza efektywność 35 lumenów



Rys. 9.3. Całkowity skumulowany koszt używania tradycyjnej żarówki o mocy 100 W przez 3 godziny dziennie porównany z zastąpieniem jej już dziś przez żarówkę energooszczędną (na zdjęciu). Założenia: koszt elektryczności 10 pensów za 1 kWh [w Polsce 50 gr. – red.]; koszt zastąpienia żarówki tradycyjnej 45 p za sztukę [w Polsce 1,2 PLN – red.]; koszt żarówki energooszczędnej 9 £ [w Polsce 20 PLN – red.]
Wiem, że można je kupić taniej, ten wykres pokazuje jednak, że nawet przy tej cenie są one znacznie bardziej oplącalne.

na wat. Oznacza to, że żarówka LED jest prawie tak wydajna jak fluorescencyjna, zaś przemysł LED wciąż ma jeszcze trochę do nadrobienia. Na korzyść żarówek LED przemawia długi czas życia – 50 000 godzin, czyli 8 razy więcej niż dla żarówki fluorescencyjnej i 50 razy więcej niż dla żarowej. Teraz, kiedy piszę te słowa, widzę, że firma Cree (www.cree.com) sprzedaje żarówki LED o efektywności 100 lumenów na wat. Przewiduje się, że w przyszłości białe żarówki LED będą miały efektywność ponad 150 lumenów na wat [ynijzej]. Spodziewam się, że stanie się to w przeciągu najbliższych dwóch lat, a najlepszym, co można będzie zrobić z punktu widzenia zarówno efektywności energetycznej, jak i unikania zanieczyszczeń rtęcią, będzie używanie żarówek LED.

Mity i nieporozumienia

Nie ma sensu, żebym zmieniał żarówki na energooszczędne. Rzekomo „zmarnowana” energia ogrzewa mój dom, więc wcale nie marnuje się.

Przeanalizujemy ten mit w rozdziale 1, na str. 79.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 66 Oświetlenie uliczne zużywa 0,1 kWh energii na osobę dziennie... – Mniej więcej jedna lampa sodowa przypada na 10 osób, każda z nich ma moc 100W i jest włączona średnio przez 10 godzin dziennie. Daje to 0,1 kWh na osobę dziennie.
- ... sygnalizacja świetlna [zużywa] zaledwie 0,005 kWh na osobę dziennie...
 - W Wielkiej Brytanii znajduje się 420 000 żarówek sygnalizacji świetlnej, zużywających 100 milionów kWh elektryczności rocznie. Ta energia rozdzielona pomiędzy 60 milionów ludzi daje 0,005 kWh na osobę dziennie.
 - A co z innymi rodzajami oświetlenia przestrzeni publicznych – na przykład podświetlaniem znaków i pachołków na drogach? Jest ich mniej niż latarni...
 - www.highwayelectrical.org.uk; w Wielkiej Brytanii jest mniej więcej 7 mln elementów świecących (latarni, podświetlanych znaków i pachołków), a liczba podświetlanych znaków drogowych wynosi około 1 miliona. Według DUKES 2005 całkowita moc oświetlenia publicznego wynosi 2095 GWh/rok, co stanowi 0,1 kWh na osobę dziennie.
 - generator o efektywności 55% – Źródło: en.wikipedia.org/wiki/Alternator; generatory w elektrowniach przetwarzają energię mechaniczną w elektryczność znacznie efektywniej.



Fot. 9.4. Philips Genie 11 W a obok Omicron 1,3 W LED

Typ żarówki	efektywność (lumeny/W)
żarowa	10
halogen	16–24
białe diody LED	35
mała fluorescencyjna	55
duża fluorescencyjna	94
sodowa lampa uliczna	150

Tabela 9.5. Efektywność świetlna żarówek dostępnych na rynku. Oczekuje się, że w przyszłości białe diody LED będą dostarczać 150 lumenów na wat.

10 Przybrzeżne elektrownie wiatrowe

Przybrzeżna farma wiatrowa London Array znacząco przyczyni się do osiągnięcia przez Wielką Brytanię jej celów dotyczących energetyki odnawialnej.

James Smith, prezes koncernu Shell w Wielkiej Brytanii

Energia elektryczna jest zbyt istotnym towarem, by traktować ją jako program tworzenia nowych miejsc pracy w przemyśle turbin wiatrowych.

David J. White

Wiatry wiejące nad morzem są silniejsze i stabilniejsze niż te nad lądem. Dzięki temu przybrzeżne farmy wiatrowe dostarczają więcej mocy na jednostkę powierzchni niż farmy lądowe. Farma wiatrowa Kentish Flats, położona na Morzu Północnym, u ujścia Tamizy, około 8,5 km od miejscowości Whitstable i Herne Bay, rozpoczęła pracę pod koniec 2005 roku. Oczekiwano, że jej średnia moc na jednostkę powierzchni wyniesie 3,2 W/m². W roku 2006 średnia moc elektrowni wyniosła 2,6 W/m².

Zakładam, że moc na jednostkę powierzchni równa 3 W/m² (o 50% większa niż nasze oszacowanie dla elektrowni wiatrowych na lądzie – 2 W/m²) jest odpowiednią liczbą dla przybrzeżnych farm wiatrowych w Wielkiej Brytanii.

Warunki wiatrowe na Bałtyku są nieco gorsze niż na Morzu Północnym, jednak zostawiamy te oszacowania Davida bez zmian.

Potrzebujemy teraz oszacowania, jak duża powierzchnia morza w rzeczywistości mogłaby zostać pokryta turbinami wiatrowymi. Zgodnie z przyjętą konwencją powinniśmy podzielić przybrzeżne elektrownie wiatrowe na znajdujące się na płytkich wodach i te, które usytuowane są na głębokich akwenach, co ilustruje rys. 10.2. Według powszechnej opinii płytko posadzone elektrownie wiatrowe (budowane na dnie o głębokości do 25–30 m), chociaż są prawie dwa razy droższe od elektrowni lądowych, to przy niewielkich dopłatach są ekonomicznie opłacalne. Z kolei budowa elektrowni osadzonych głęboko na dnie morza nie jest obecnie opłacalna. Do roku 2008 powstała zaledwie jedna taka farma wiatrowa na wodach brytyjskich jako próbny prototyp, przesyłający wyprodukowaną przez siebie energię do położonej niedaleko platformy wiertniczej Beatrice.

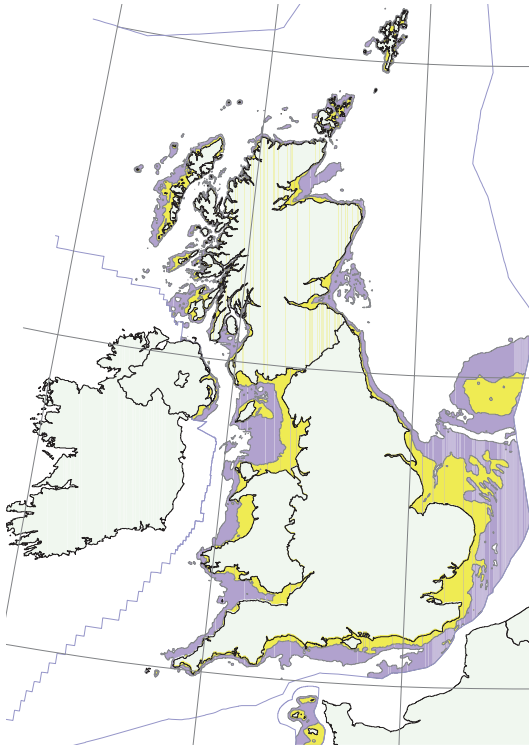
Płytko położone przybrzeżne elektrownie wiatrowe

W granicach brytyjskich wód terytorialnych obszary płytkie to około 40 000 km², z czego większość znajduje się u wybrzeży Anglii i Walii. To dwukrotność powierzchni Walii.

Średnia moc możliwa do uzyskania z farm wiatrowych, pokrywających cały ten teren, wynosiłaby 120 GW lub 48 kWh na osobę dziennie. Jednakże trudno wyobrazić sobie pogodzenie tych planów z żeglugą. Jestem pewien, że na znaczących obszarach zakazano by budowy farm wiatrowych. Musimy więc zredukować dostępną powierzchnię o tereny stanowiące korytarze żeglugowe oraz wykorzystywane przez rybołówstwo. Proponuję, byśmy oszacowali dostępną część na jedną trzecią całości tych akwenów (sugeruję jednak, żebyś zapoznał się z przypisami do tego rozdziału, aby poznać bardziej pesymistyczny

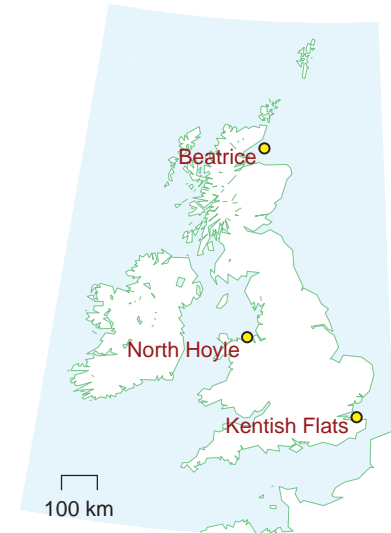


Fot. 10.1. Kentish Flats – farma wiatrowa w płytkich wodach przybrzeżnych. Każdy wirnik ma średnicę 90 m, a jego środek znajduje się w głowicy na wysokości 70 m. Każda turbina o mocy maksymalnej 3 MW waży 500 ton, połowa to waga fundamentów. Fot. © Elsam (elsam.com). Użyte za pozwoleniem



Rys. 10.2. Brytyjskie wody terytorialne płytsze niż 25 m (kolor żółty) i o głębokości pomiędzy 25 m a 50 m (kolor fioletowy). Dane pochodzą z DTI Atlas of Renewable Marine Resources.

© Prawa autorskie do publikacji rządowych



punkt widzenia!). A zatem oszacowana przez nas maksymalna rzeczywista moc dostępna z płytko posadowionych przybrzeżnych farm wiatrowych wynosi 16 kWh na osobę dziennie.

Zanim przejdziemy dalej, chciałbym zaznaczyć, jak wielka powierzchnia morza – dwie trzecie Walii – jest potrzebna, by dostarczyć 16 kWh na osobę dziennie. Jeśli wzdłuż całej linii brzegowej Wielkiej Brytanii (długość: 3000 km) wybudujemy pas turbin o stałej szerokości 4 km, to będzie on miał powierzchnię 13 000 km². To powierzchnia, którą musimy zapęłnić turbinami, żeby dostarczyć moc 16 kWh na osobę dziennie. By pokazać to w inny sposób, rozważmy liczbę turbin, które musiałyby być użyte. Moc 16 kWh na osobę dziennie byłaby dostarczana przez 44 000 „3 MW” turbin, co oznacza 15 elektrowni na kilometr linii brzegowej, gdyby rozmieścić je wszystkie w równych odstępach na 3000 km wybrzeża.

Przybrzeżna energetyka sprawia wiele problemów ze względu na korozyjne działanie morskiej wody. Na terenie dużej duńskiej farmy wiatrowej Horns Reef wszystkie 80 turbin trzeba było rozmontować i naprawić zaledwie po 18 miesiącach wystawienia na działanie morskiego wiatru. Wszystko wskazuje na to, że turbiny z Kentish Flats mają podobne problemy ze skrzyniami biegów, a jedna trzecia z nich musiała zostać wymieniona w ciągu pierwszych 18 miesięcy użytkowania.

Polskie wody terytorialne to około 8000 km², przy czym przybrzeżne wody Bałtyku Południowego mają niewielkie głębokości, nieprzekraczające 20 m. Średnia moc możliwa do uzyskania z farm wiatrowych, pokrywających cały ten teren, wynosiłaby 24 GW lub 10 kWh na osobę dziennie. Przy założeniu wykorzystania 40% tego obszaru (więcej niż dla Wielkiej Brytanii) na potrzeby energetyki wiatrowej uzyskujemy 4 kWh na osobę dziennie.

Głęboko posadowione przybrzeżne elektrownie wiatrowe

Obszary o głębokości pomiędzy 25 m a 50 m zajmują około 80 000 km² – taką powierzchnię ma Szkocja. Zakładając ponownie, że moc na jednostkę powierzchni wynosi 3 W/m², głęboko posadowione przybrzeżne farmy wiatrowe mogłyby dostarczyć kolejne 240 GW, czyli 96 kWh na osobę dziennie, gdyby obszar ten całkowicie pokryć wiatrakami. Ponownie musimy wziąć pod uwagę korytarze żeglugowe. Proponuję, tak jak poprzednio, przyjąć jedną trzecią powierzchni jako możliwą do zabudowania farmami wiatrowymi. Obszar ten będzie więc o około 30% większy niż Walia i duża jego część będzie znajdowała się w odległości większej niż 50 km od wybrzeża.

Rezultat: jeśli powierzchnia równa pasowi o szerokości 9 km, położonemu wzdłuż wybrzeża, została by wypełniona turbinami, to mogłyby one dostarczyć moc 32 kWh na osobę dziennie. To faktycznie wielka ilość energii, lecz wciąż niewystarczająca, by zaspokoić nasze ogromne zużycie. I wciąż jeszcze nie wspomnieliśmy o problemie sporadyczności wiatru. Powrócimy do tego tematu w rozdziale 26.

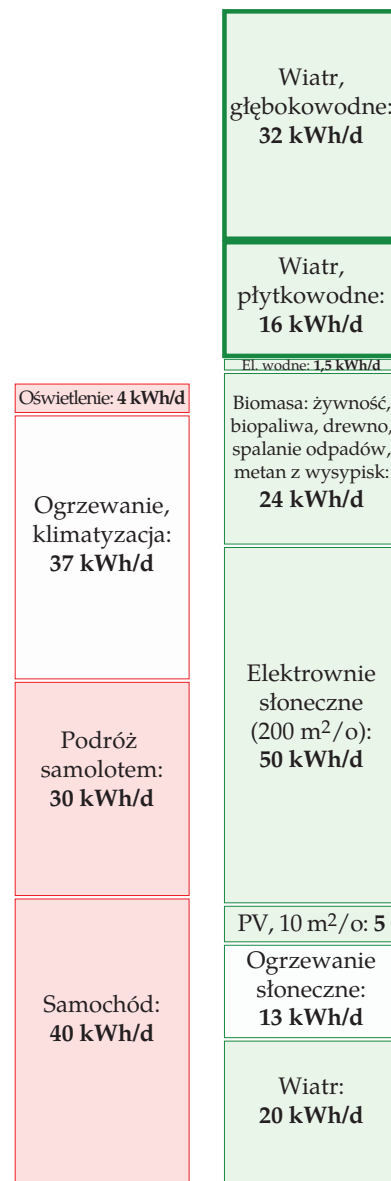
Umieszcze ten potencjalny udział „głębokich” przybrzeżnych elektrowni wiatrowych w słupku produkcji z zastrzeżeniem, że – jak już wcześniej wspominałem – eksperci od energetyki wiatrowej obliczyli, że ten rodzaj energetyki jest niezmiernie kosztowny.

W przypadku Polski jedyne głęboko położone wody terytorialne to rejon Zatoki Gdańskiej, gdzie dno opada w stronę Głębi Gdańskiej. Względnie mała powierzchnia tego obszaru w stosunku do całości wód terytorialnych, jak i intensywna żegluga nie czynią z niego atrakcyjnego miejsca do budowy elektrowni wiatrowych.

Można za to rozważyć budowę głęboko posadowionych elektrowni wiatrowych POZA wodami terytorialnymi. Na razie jednak, do momentu znaczącego wykorzystania wód terytorialnych, pominiemy tę możliwość i przyjmijmy, że dla Polski energia pochodząca z głęboko posadowionych elektrowni wiatrowych wyniesie **0 kWh na osobę dziennie**.

Trochę porównań i kosztów

Jak więc ma się nasz wyścig pomiędzy zużyciem energii a jej produkcją? Po dodaniu przybrzeżnych elektrowni wiatrowych zarówno płytko-, jak i głębokowodnych do słupka produkcji, zielony słupek wyszedł na prowadzenie. Tym, co chciałbym, abyś dostrzegł w wyścigu, jest kontrast: jak *łatwo* jest dorzucić większy klocek do słupka zużycia i jak *trudne* jest podwyższanie słupka produkcji. Podczas pisania tego akapitu poczułem, że jest mi trochę zimno, więc



Rys. 10.3. Przybrzeżne elektrownie wiatrowe

podkręciłem odrobinę ogrzewanie. Łatwo jest zużywać dodatkowe 30 kWh dziennie. Jednakże wyciśnięcie kolejnych 30 kWh na osobę dziennie z odnawialnych źródeł energii wymaga tak dużej industrializacji środowiska, że aż trudno to sobie wyobrazić.

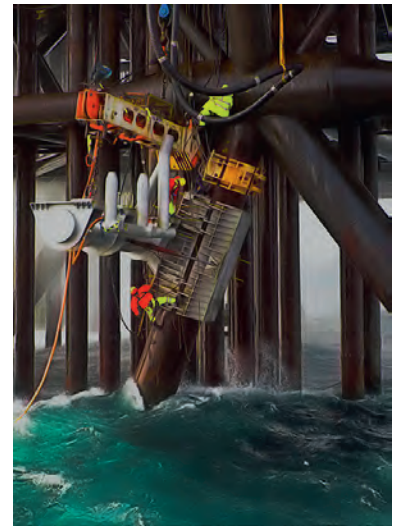
By wytworzyć 48 kWh dziennie na osobę z przybrzeżnych elektrowni wiatrowych w Wielkiej Brytanii, potrzebne jest **60 milionów ton betonu i stali** – jedna tona na osobę. Roczna światowa produkcja stali wynosi około 1200 milionów ton, co oznacza 0,2 tony na osobę na świecie. Podczas drugiej wojny światowej amerykańskie stocznie zbudowały 2751 statków klasy Liberty, każdy zawierający 7 000 ton stali, co w sumie daje 19 milionów ton stali lub 0,1 tony na Amerykanina. Tak więc wybudowanie 60 milionów ton turbin nie jest poza zasięgiem naszych możliwości, jednakże nie oszukujemy się, myśląc, że jest to łatwe. Wytworzenie tak wielu wiatraków jest wyczynem porównywalnym z budową statków Liberty.

Dla porównania, aby w Wielkiej Brytanii wytworzyć 48 kWh mocy na dobę na osobę z energetyki jądrowej, potrzeba **8 milionów ton stali i 140 milionów ton betonu**. Możemy także porównać 60 milionów ton elementów konstrukcyjnych potrzebnych do wybudowania rozważanych przybrzeżnych elektrowni wiatrowych, z istniejącą infrastrukturą eksploatacji paliw kopalnych znajdującą się pod wodami i wokół Morza Północnego (rys. 10.4). W 1997 roku 200 instalacji oraz 7000 km rurociągów w wodach Morza Północnego, należących do Wielkiej Brytanii, zawierało w sobie 8 milionów ton stali i betonu. Nowo wybudowany gazociąg Langeled, biegnący z Norwegii do Wielkiej Brytanii, dostarczający gaz w ilości odpowiadającej mocy 25 GW (10 kWh na dobę na osobę), pochłonął kolejny **milion ton stali i milion ton betonu** (rys. 10.5).

Rząd brytyjski ogłosił 10 grudnia 2007 roku, że mógłby zezwolić na utworzenie 33 GW mocy z przybrzeżnych elektrowni wiatrowych (co pozwoliłoby na dostarczenie Wielkiej Brytanii średnio 10 GW, czyli 4,4 kWh na osobę dziennie). Plan ten przez niektórych w branży wiatrowej nazywany jest „gruszkami na wierzbie” („*pie in the sky*”). Zaokrąglimy tę liczbę do 4 kWh na osobę dziennie [co odpowiada naszym oszacowaniom dla Polski – *red.*] To jedna czwarta mojego oszacowania dla płytko posadowionych przybrzeżnych elektrowni wiatrowych (16 kWh na osobę dziennie). By uzyskać taką średnią moc, potrzeba około 10 000 „3 MW” turbin wiatrowych – takich jak na rysunku 10.1 (mają one maksymalną moc 3 MW, jednakże średnio dostarczają 1 MW).

Ile kosztowałyby wzniesienie tych „33 GW” mocy? No cóż, „90 MW” farma wiatrowa, Kentish Flats, kosztowała 105 milionów funtów, więc „33 GW” powinny kosztować około 33 miliardów funtów. Jednym ze sposobów, by wyjaśnić, co oznacza przeznaczenie 33 miliardów funtów na przybrzeżne elektrownie wiatrowe, dostarczające 4 kWh na dobę na osobę, jest rozdzielenie tej kwoty pomiędzy mieszkańców Wielkiej Brytanii, co daje 550 funtów na osobę. Nawiąsem mówiąc, jest to znacznie lepszy interes niż w przypadku mikroturbin. Montowane na dachach mikroturbiny kosztują obecnie około 1500 funtów i, nawet przy dość optymistycznie założonej prędkości wiatru równej 6 m/s, dostarczają zaledwie 1,6 kWh/dobę. W rzeczywistości, w typowej miejskiej lokalizacji w Anglii, takie turbiny dostarczają jedynie 0,2 kWh dziennie.

Kolejnym wąskim gardłem, ograniczającym instalowanie turbin wiatrowych, jest potrzeba użycia do tego celu specjalnych statków. By postawić 10 000 turbin wiatrowych („33 GW”) w ciągu 10 lat, potrzeba około 50 specjalnych platform samopodnoszących. Ponieważ każda kosztuje 60 milionów funtów, to



Fot. 10.4. Platforma Magnus, położona w brytyjskiej północnej części Morza Północnego, składa się z 71 000 ton stali.

W roku 2000 platforma ta dostarczyła 3,8 miliona ton ropy i gazu, co odpowiada mocy 5 GW. Koszt platformy to 1,1 miliarda funtów.

Fot. Terry Cavner



Fot. 10.5. Rury do budowy gazociągu Langeled.

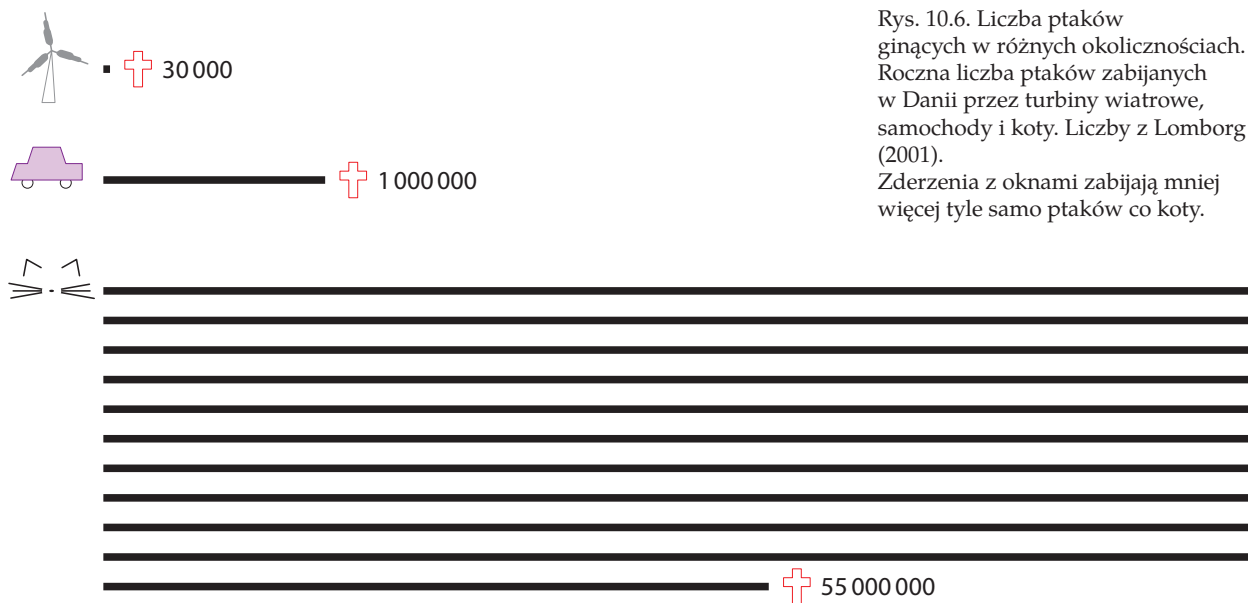
Zdjęcie pochodzi z Bredero-Shaw [brederoshaw.com]

dotatkowo trzeba w nie zainwestować 3 miliardy funtów. Nic wielkiego w porównaniu z wspomnianymi 33 miliardami funtów, ale potrzeba wykorzystania specjalnych barek jest elementem wymagającym wcześniejszego zaplanowania.

Koszty dla ptaków

Czy wiatraki zabijają „ogromne liczby” ptaków? Farmy wiatrowe okryły się ostatnio złą sławą w Norwegii, gdzie turbiny wiatrowe położone na Smola, grupce wysepek przy północno-zachodnim wybrzeżu, zabiły 9 orłów bielików w ciągu 10 miesięcy. Podzielałam troskę BirdLife International o ochronę rzadkich gatunków. Jednak, jak zawsze, wydaje mi się, że warto bliżej przyjrzeć się liczbom.

Oszacowano, że w Danii rocznie turbiny wiatrowe zabijają 30 000 ptaków. Jednocześnie wiatraki generują 19% elektryczności. Horror! Zakazać wiatraków! Jednakże wiemy również, że ruch samochodowy zabija w Danii jeden milion ptaków rocznie. Trzydzieści trzy razy większy horror! Trzydzieści trzy razy więcej powodów, żeby zakazać samochodów! Zaś w Wielkiej Brytanii 55 milionów ptaków rocznie jest zabijanych przez koty (rys. 10.6).



Rys. 10.6. Liczba ptaków ginących w różnych okolicznościach. Roczna liczba ptaków zabijanych w Danii przez turbiny wiatrowe, samochody i koty. Liczby z Lomborg (2001). Zderzenia z oknami zabijają mniej więcej tyle samo ptaków co koty.

Kierując się tylko emocjami, wolałbym żyć w kraju bez żadnych samochodów, właściwie żadnych wiatraków, ale z mnóstwem kotów i ptaków (z kotami polującymi na ptaki i jednocześnie będącymi ofiarą norweskich bielików, by wyrównać szanse). Jednakże tak naprawdę chciałbym po prostu, by decyzje dotyczące samochodów i wiatraków były podejmowane na podstawie racjonalnego, opartego na faktach myślenia, a nie tylko emocji. Może jednak potrzebujemy wiatraków!

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

69 Farma wiatrowa Kentish Flats, położona u ujścia Tamizy...

Zobacz www.kentishflats.co.uk. Jej 30 turbin wiatrowych Vestas V90 ma sumaryczną moc szczytową 90 MW, a przewidywana średnia moc wynosi 32 MW (zakładając współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej na poziomie 36%). Średnia prędkość wiatru na wysokości głowicy wynosi 8,7 m/s. Turbiny stoją w wodzie o głębokości 5m, w odległości 700 m od siebie i zajmują obszar 10km². Na tej podstawie można obliczyć średnią moc pozyskiwaną z jednostki terenu na 3,2 W/m². Rzeczywista średnia moc wynosi 26 MW, a więc średni współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej wynosi 29% [wbd80], dając średnią gęstość mocy równą 2,6 W/m². Farma wiatrowa North Hoyle w okolicy Prestatyn w Północnej Walii ma współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej równy 36% (dane z 2006 r.) Jej 30 turbin, każda o mocy 2 MW, zajmuje 8,4 km², również dając średnią moc pozyskiwaną z jednostki terenu w wysokości 2,6 W/m².

Region	głębokość 5 do 30 m		głębokość 30 do 50 m	
	obszar (km ²)	potencjalne zasoby (kWh/d/o)	obszar (km ²)	potencjalne zasoby (kWh/d/o)
Północny Zachód	3 300	6	2 000	4
Greater Wash*	7 400	14	950	2
Estuarium Tamizy	2 100	4	850	2
Inne	14 000	28	45 000	87
SUMA	27 000	52	49 000	94

Tabela 10.7. Potencjalne zasoby energii wiatrowej w proponowanych regionach strategicznych, możliwe do otrzymania, gdyby obszary te zostały całkowicie zastawione turbinami wiatrowymi. Źródło: Departament Handlu i Przemysłu (2002b)

* Greater Wash – Morze Północne w pobliżu Anglii

- ... płytko posadowione elektrownie wiatrowe, chociaż są prawie dwa razy droższe od elektrowni lądowych, to przy niewielkich dopłatach są ekonomicznie opłacalne. – Źródło: Duński Związek Wiatrowy, windpower.org
 - ... budowa elektrowni osadzonych głęboko na dnie morza nie jest obecnie opłacalna. – Źródło: dokument Brytyjskiego Związku Energii Wiatrowej (British Wind Energy Association), wrzesień 2005, www.bwea.com. Tym niemniej, w roku 2007 w pobliżu pola naftowego Beatrice, 22 km na wschód od wybrzeża Szkocji (rys. 10.8) wykonany został głębokowodny projekt demonstracyjny składający się z dwóch turbin o mocy 5 MW ustawionych w wodzie o głębokości 45 m. Wysokość głowicy turbiny 107 m; średnica 126 m. Całość wytwarzanej elektryczności będzie zużywana przez platformy naftowe. Czy to nie jest wyjątkowe? Koszt tego 10 MW projektu to 30 mln £ – co daje 3 £ na każdy wat mocy szczytowej w porównaniu z 1,2 £ za wat dla Kentish Flats (105 mln £ za 90 MW). www.beatricewind.co.uk
Możliwe, że pływające turbiny wiatrowe zmienią ekonomiczną opłacalność głębokowodnych farm wiatrowych.
 - Obszar dostępny dla przybrzeżnej energetyki wiatrowej.
Dokument Departamentu Handlu i Przemysłu z 2002 pt. *Future Offshore* przedstawia szczegółowe zestawienie obszarów, które mogą być użyteczne z punktu widzenia przybrzeżnej energetyki wiatrowej.
- 74 Tabela 10.7. pokazuje szacowane zasoby energii wiatrowej na obszarze 76 000 km² płytkich i głębokich akwenów. Szacunki energetyczne departamentu pokazują, że gdyby obszary te *całkowicie* zabudować wiatrakami, to pozwoliłoby to na wytworzenie 146 kWh/d na osobę (w tym 52 kWh/d/o z obszarów wód płytkich i 94 kWh/d/o z wód głębokich). Jednak końcowe szacunki potencjału wiatro-

wego mówią o 4,6 kWh dziennie na osobę. Przedstawienie, jak doszło do redukcji 146 kWh/d/o do poziomu 4,6 kWh/d/o, może być całkiem interesujące. Dlaczego końcowa liczba jest tak znacząco niższa od naszej? Po pierwsze, nałożono pewne ograniczenia: instalacje muszą znajdować się w odległości maksymalnie 30 km od brzegu i w wodzie nie głębszej niż 40 m; dno morza nie może być nachylone o więcej niż 5°; drogi żeglugowe, strefy wojskowe, rurociągi, łowiska i rezerwy zostały wyłączone. Po drugie, założono, że jedynie 5% potencjalnych miejsc zostanie wykorzystanych (z powodu budowy dna morskiego lub ograniczeń projektowych); ze względu na problemy z akceptacją społeczną prognozy instalowanej mocy zredukowano o 50% dla wszystkich terenów położonych mniej niż 10 mil od brzegu; dla terenów o prędkości wiatru przekraczającej 9 m/s ze względu na „bariery w rozwoju stwarzane przez wrogie środowisko” zredukowano możliwość instalacji o 95%, a dla terenów o prędkości wiatru w granicach 8–9 m/s możliwość instalacji ograniczono o 5%.

70 **Horns Reef (Horns Rev).** Trudności z tą „160 MW” duńską farmą wiatrową u brzegów Jutlandii [www.hornsrev.dk] zostały opisane przez Halkema (2006). Podczas pracy współczynnik wykorzystania mocy wynosi 43%, a średnia moc na jednostkę powierzchni 2,6 W/m².

72 Jeśli wzdłuż całej linii brzegowej Wielkiej Brytanii (długość: 3000 km) wybudujemy pas turbin o stałej szerokości 4 km, to będzie on miał powierzchnię 13 000 km². Czepialscy mogą powiedzieć, że „długość linii brzegowej Wielkiej Brytanii nie jest dobrze zdefiniowana, bo jest ona fraktałem”. – Tak, tak, jasne. – Jednak, drogi czepialski, weź, proszę mapę i nakreśl pas turbin na 4 km szeroki wokół naszej pięknej wyspy i zobacz, czy przypadkiem nie ma on jakichś 3000 km długości.

- **Statki Liberty** – www.liberty-ship.com/html/yards/introduction.html
- ...infrastruktura do eksploatacji paliw kopalnych w wodach Morza Północnego zawierała 8 milionów ton stali i betonu – Rice and Owen (1999).
- Rząd brytyjski ogłosił 10 grudnia 2007 roku, że mógłby zezwolić na utworzenie 33 GW mocy z przybrzeżnych elektrowni wiatrowych... [25e59w].
- ...gruszki na wierzbie. Source: Guardian [2t2vjq].
- Ile kosztowałyby wzniesienie turbin do uzyskania tych „33 GW” mocy? Według Departamentu Handlu i Przemysłu z listopada 2002, elektryczność z przybrzeżnych farm wiatrowych kosztuje około 50 £ za MWh (5 p za kWh) (Departament Handlu i Przemysłu, 2002b, str. 21). Dane gospodarcze jednak się zmieniają i w kwietniu 2007 szacowany koszt instalacji podskoczył do 92 £ za MWh (Departament Handlu i Przemysłu, 2007, str. 7). Do kwietnia 2008 cena poszła w górę jeszcze bardziej, a Shell wycofał się ze swojego zobowiązania budowy farmy London Array. To właśnie z powodu tak wysokich kosztów przybrzeżnej energetyki wiatrowej rząd brytyjski musiał zwiększyć liczbę certyfikatów energii odnawialnej przypadających na jednostkę wiatrowej energii przybrzeżnej (ROC). ROC są jednostką subsydiów przekazywanych różnym formom wytwarzania elektryczności ze źródeł odnawialnych. Standardowa wartość ROC dla 1 MWh to 45 £; tak więc przy cenie elektryczności na poziomie 40 £/MWh wytwarzający energię odnawialną dostają w sumie 85 £ za MWh. Jest to zbyt mało, aby pokryć koszty w wysokości 92 £ za MWh. W tym samym dokumencie szacunki dla innych źródeł odnawialnych (średnie koszty ustandaryzowane na rok 2010) przedstawiają się jak poniżej:

energia wiatrowa na lądzie 65 – 89 £/MWh;
 współspalanie biomasy: 53 £/MWh;
 wielkoskalowe hydroelektrownie: 63 £/MWh;
 gaz z wysypisk: 38 £/MWh;
 ogniwa słoneczne: 571 £/MWh;
 fale: 196 £/MWh;
 pływy: 177 £/MWh.

„Dale Vince, dyrektor wykonawczy Ecotricity – dostawcy zielonej energii, zaangażowanego w budowę lądowych farm wiatrowych – stwierdził, że popiera rządowe plany budowy farm wiatrowych na morzu, ale jedynie przy założeniu, że



Fot. 10.8. Budowa demonstracyjnej „głębokiej” farmy wiatrowej Beatrice. Fotografie udostępnione przez Talisman Energy (UK).



nie będzie się to odbywać kosztem farm wiatrowych na lądzie. «To niebezpieczne ignorować fantastyczne zasoby, jakie mamy w naszym kraju... Według naszych oszacowań, zbudowanie tych 33 GW mocy na morzu, które proponuje Huttington, będzie kosztować około 40 miliardów funtów. My, budując na lądzie, mogliśmy postawić instalacje o takiej mocy już za 20 miliardów funtów» [57984r].

- **W typowej miejskiej lokalizacji w Anglii takie turbiny dostarczają jedynie 0,2 kWh dziennie.** – Źródło: Third Interim Report, www.warwickwindtrials.org.uk/2.html

Jeden z najlepszych wyników w badaniach Warwick Wind Trials uzyskała mikroturbina Windsave WS1000 (o mocy 1 kW) zainstalowana w Daventry na wysokości 15 m nad ziemią, wytwarzając średnio 0,6 kWh/d. Jednak niektóre mikroturbiny dostarczają jedynie 0,05 kWh/d – Źródło: Donnachadh McCarthy: *Mój rok bez węgla* „The Independent”, grudzień 2007 [60c3ja]. Turbina Windsave WS1000, sprzedawana w Anglii w sklepach B&Q's, wygrała nagrodę Eko-Nonsense Marka Brinkleya, autora Biblii Budowniczego Domu: „Dajcie spokój, najwyższy czas przyznać, że montowane na dachach turbiny wiatrowe to kompletne fiasko. Wywala się pieniądze na coś, co po prostu nie działa” [5soql2]. Biuro Meteorologiczne Hadley wraz z Carbon Trust opublikowały w lipcu 2008 roku raport [6g2jm5] zawierający m.in. szacunki pokazujące, że mikroturbiny wiatrowe, gdyby zainstalować je na wszystkich domach w Wielkiej Brytanii z sensownymi warunkami wiatrowymi, mogłyby dać w sumie około 0,7 kWh/d/o. Organizacje te zauważają, że instalowanie turbin wiatrowych w domach jest zwykle gorsze niż bezużyteczne: „w wielu przypadkach mikroturbiny wiatrowe mogą nie zwrócić nakładów energetycznych włożonych w ich wyprodukowanie, instalację i działanie”.

- **Platformy samopodnoszące kosztują 60 milionów funtów za sztukę.** – Źródło: news.bbc.co.uk/1/hi/magazine/7206780.stm. Oszacowałem, że potrzebowalibyśmy około 50 platform, zakładając, że w roku byłoby 60 dni warunków pozwalających na pracę, a ustawienie turbiny zajmowałoby 3 dni.

77 **Statki Liberty** – www.liberty-ship.com/html/yards/introduction.html

- ... infrastruktura do eksploatacji paliw kopalnych w wodach Morza Północnego zawierała 8 milionów ton stali i betonu – Rice and Owen (1999).
- Rząd brytyjski ogłosił 10 grudnia 2007 roku, że mógłby zezwolić na utworzenie 33 GW mocy z przybrzeżnych elektrowni wiatrowych... [25e59w].
- ... gruszki na wierzbie. – Źródło: „The Guardian” [2t2vjq].

Dalsza lektura: baza danych energii wiatrowej Wielkiej Brytanii [www.bwea.com/ukwed/].

Fot. 10.9. Kentish Flats. Fotografie
© Elsam (elsam.com)
Użyte za pozwoleniem

11 Prądożercze gadżety

Jednym z największych zagrożeń dla współczesnego społeczeństwa są ładowarki do telefonów. BBC News ostrzega nas przed nimi już od 2005 roku: „Wszystkie elektrownie jądrowe zostaną zamknięte w ciągu kilku lat. Jak będziemy oświetlać Wielką Brytanię? [...] *koniecznie wyjmij z kontaktu swoją ładowarkę do telefonu komórkowego, gdy jej nie używasz*”. To smutne, ale rok później Wielka Brytania najwyraźniej wciąż nie reagowała na ten apel, a BBC znów biła na alarm:

Wielka Brytania na prowadzeniu w lidze marnotrawców energii.

A jak do tego doszło? BBC włącza nam do głów:

65% ludności Wielkiej Brytanii zostawia włączone ładowarki.

Ze sposobu, w jaki reporterzy mówią o tych niszczycielach planety, wynika, że są co najmniej tak złe, jak mistrz ciemnej strony mocy lord Darth Vader. Czy rzeczywiście są aż tak okropne?

W tym rozdziale poznamy całą prawdę o „złowrogich” ładowarkach. Przyjrzymy się też ich kuzynom w rodzinie gadżetów: komputerom, telefonom, telewizorom, zestawom do odbioru telewizji cyfrowej, modemom kablowym i drukarkom. Oszacujemy zużycie energii w czasie ich działania i ładowania, choć na razie pominiemy koszty energetyczne ich produkcji – tym zajmiemy się w dalszym rozdziale o rzeczach.

Cała prawda o ładowarkach

Współczesne ładowarki do telefonów komórkowych, zostawione w gniazdku bez podłączonego telefonu, zużywają około pół wata. W naszych jednostkach oznacza to dzienne zużycie energii równe **0,01 kWh**. Przy sumarycznej wysokości słupka zużycia energii na poziomie 100 kWh na dzień apel BBC, aby *zawsze wyłączać swoją ładowarkę*, może potencjalnie zredukować zużycie energii o jedną setną jednego procenta.

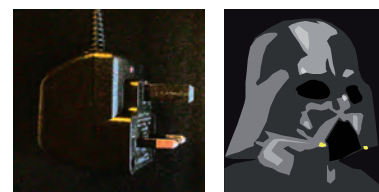
Niech żyje mikrooptimalizacja!

Uważam, że nie powinniśmy marnować naszej energii i uwagi na kwestie poboczne. Obsesja na punkcie wyciągania ładowarki z kontaktu jest jak ratowanie Titanica za pomocą łyżeczki od herbaty. Wyłącz ładowarkę, ale miej również świadomość, jak drobny jest to gest. Wyraźmy to w ten sposób:

Cała energia zaoszczędzona w wyniku wyłączenia na dobę ładowarki wystarczy na jazdę samochodem przez *jedną sekundę*.

Energia zaoszczędzona przez wyłączenie ładowarki na *cały rok* jest równa energii zużytej do podgrzania wody na jedną kąpiel.

Żeby wybrać się na wycieczkę do Australii za energią zaoszczędzoną dzięki wyjęciu ładowarki, musiałbyś wyciągnąć ją z gniazdku *w epoce neolitu*. Trzeba przyznać, że niektóre starsze modele ładowarek zużywają więcej niż pół wata – jeśli są ciepłe w dotyku, prawdopodobnie zużywają 1 lub nawet 3 waty (rys. 11.3). Trzywątowa rozrzutna ładowarka zużyje 0,07 kWh energii dziennie. Myślę, że to dobry pomysł, aby odłączyć takiego wampirka – pozwoli to na zaoszczędzenie 13 złotych rocznie. Nie oszukuj się jednak, że w sprawie



Veder

Ładowarka

Fot. 11.1. Niszczyciele planet. Poszukaj różnic



Fot. 11.2. Tych pięć ładowarek – trzy do telefonów komórkowych, jedna do kieszonkowego komputera i jedna do laptopa – pobiera poniżej 1 wata, co widać na moim mierniku zużycia prądu.

oszczędzania energii zrobiłeś już wszystko, co do Ciebie należało – te 3 W to tylko mikroskopijna część całkowitego zużycia energii.

No dobrze, wystarczy już tego ratowania Titanica za pomocą łyżeczki. Dowiedzmy się teraz, co naprawdę zużywa elektryczność.

Naprawdę paskudne gadżety

Tabela 11. pokazuje zużycie energii w watach dla różnych urządzeń w gospodarstwie domowym. *Pierwsza kolumna* to zużycie energii, kiedy urządzenie jest rzeczywiście używane, na przykład kiedy oglądasz film w telewizji. *Druga kolumna* przedstawia zużycie, kiedy urządzenie jest włączone, ale nic nie robi. Byłem naprawdę zszokowany, gdy po raz pierwszy stwierdziłem, że stojąca bezużytecznie drukarka laserowa bez przerwy pobiera z sieci 17 W – tyle samo co lodówka! *Trzecia kolumna* pokazuje zużycie energii, gdy urządzenie zostanie przełączone na tryb uśpienia (*standby*). *Czwarta kolumna* pokazuje zużycie energii przez urządzenie, kiedy jest wyłączone, lecz wciąż podłączone do gniazdka. Zużywana moc jest wyrażona w watach – aby skonwertować ją na kWh na dzień, pamiętaj, że moc 40 W odpowiada 1 kWh/d. Pomocne jest zapamiętanie, że roczny koszt poboru 1 W wynosi 5 złotych (zakładając koszt energii w przybliżeniu 50 gr/kWh).

Największymi pożeraczami prądu są: komputer, monitor i telewizor, którego zużycie energii może sięgać setek watów. Systemy służące rozrywce takie, jak wieże stereo i odtwarzacze DVD zużywają często około 10 W i bledną w obliczu zużycia energii przez komputer. Znacząca część zużycia energii może mieć miejsce wtedy, gdy urządzenie stoi niewykorzystane. Odtwarzacz DVD może kosztować w sklepie 100 złotych, ale jeśli będzie włączony nonstop, to będzie Cię kosztować dodatkowe 40–50 złotych rocznie. Niektóre urządzenia RTV i akcesoria komputerowe zużywają energię nawet wyłączone, gdyż ich transformatory w trybie *standby* nadal pracują. Aby upewnić się, że taki gadżet jest naprawdę wyłączony, musisz odłączyć go od gniazdka (np. za pomocą listwy zasilającej z wyłącznikiem).

Zasilanie ukrytych macek wieku informacji

Według Jonathana Koomeya (2007), serwery komputerowe w amerykańskich centrach obliczeniowych i urządzenia im towarzyszące (klimatyzatory, systemy backupowe itp.) zużywały **0,4 kWh** na osobę dziennie, czyli powyżej 1% całkowitego zużycia energii w USA. To wartość na rok 2005, która jest dwa razy wyższa niż była jeszcze w roku 2000, gdyż liczba serwerów w ciągu tych 5 lat wzrosła z 5,6 mln do 10 mln.

Inne gadżety

Odkurzacz, jeśli używasz go przez kilka godzin w tygodniu, zużywa około **0,2 kWh/d**. Koszenie trawnika to kolejne **0,6 kWh**. Moglibyśmy kontynuować, ale podejrzewam, że to właśnie komputer i inne urządzenia rozrywkowe plasują się na najwyższych pozycjach listy zużycia energii.

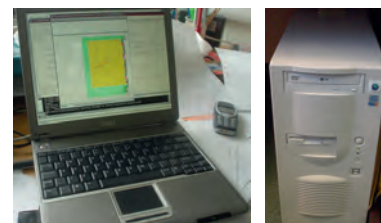
Suma zużycia energii dla tego rozdziału zależy od tego, jak wielu gadżetów używasz w domu i pracy, jednak dostatanie gospodarstwo domowe lub biuro obfitujące we włączone „na całego” gadżety, lekko licząc, będą zużywać **5 kWh/d**.



Fot. 11.3. Ten „wampirek” – telefon bezprzewodowy i jego ładowarka – podłączony do prądu zużywa 3 W. To 0,07 kWh/d. Przy cenie 1 kWh na poziomie 50 groszy, to „ciurkanie” prądu będzie rocznie kosztować 13 zł.

Gadżet	Zużycie energii (W)			
	Podłączony i działający	Podłączony, ale nie używany	Standby	Odłączony od sieci
Komputer i peryferia				
Komputer	80	55		2
Monitor CRT	110		3	0
Monitor LCD	34		2	1
Projektor	150		5	
Drukarka laserowa	500	17		
Modem kablowy i Wi-Fi	9			
Laptop	16	9		0,5
<hr/>				
Przenośny odtwarzacz CD	2			
Radiobudzik	1,1	1		
Radiobudzik 2	1,9	1,4		
Radio cyfrowe	9,1		3	
Radiomagnetofon	3	1,2		1,2
Wzmacniacz stereo	6			6
Wzmacniacz stereo 2	13			0
Nagłośnienie kina dom.	7	7	4	
Odtwarzacz DVD	7	6		
Odtwarzacz DVD 2	12	10	5	
Telewizor	100		10	
Magnetowid	13		1	
Zestaw do odbioru TV cyfr.	6		5	
Zegar w kuchence mikrofal.	2			
<hr/>				
Xbox	160		2,4	
Sony Playstation 3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
<hr/>				
Automatyczna sekretarka		2		
Automatyczna sekretarka 2		3		

Tabela 11.4. Zużycie energii przez różne gadżety. Wartości są orientacyjne. Przykładowo, komputer może pobierać 50 W, może też 200 W; laptop (netbook) może zużywać 16 W, a czasem 80 W; przelicznik: 40 W odpowiada 1 kWh/d.



Laptop: 16W Komputer: 80 W



LCD: 31 W CRT: 108 W Drukarka: 17 W (standby)



Projektor: 150 W Radio cyfrowe: 8W

Nieporozumienia

Nie ma sensu, żebym wyłączył światło, telewizor i ładowarki zimą. „Zmarnowana” jakoby energia ogrzewa mój dom, więc wcale się nie marnuje.

Ten mit może się sprawdzać u paru osób, w dodatku wyłącznie zimą, ale dla większości pozostaje mitem. Jeśli Twój dom ogrzewa zwykły grzejnik elektryczny, to jest to zbieżne z ogrzewaniem ciepłem z marnujących elektryczność urządzeń. Jednak jeśli właśnie w ten sposób zapewniasz sobie ciepło w mieszkaniu, powinieneś jak najszybciej zmienić sposób ogrzewania. Elektryczność to źródło energii wysokiej jakości. *Zamienianie elektryczności na ciepło to marnotrawstwo.* Wyrażę się precyzyjnie: jeśli przetwarzasz jednostkę energii elektrycznej

w jednostkę ciepła, to ją marnujesz. Grzejniki nazywane pompami ciepła (gruntowymi lub powietrznymi) mogą wykorzystać elektryczność znacznie wydajniej, dostarczając 3 do 4 jednostek ciepła z każdej wykorzystanej jednostki energii elektrycznej. Działają one podobnie do lodówek, tylko w drugą stronę, pompując do domu ciepło z gruntu lub z powietrza na zewnątrz (patrz: rozdział 21).

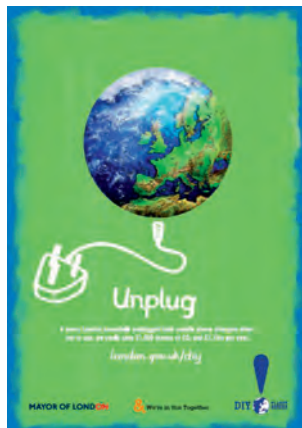
Co do całej reszty domów ogrzewanych paliwami kopalnymi czy biopaliwami to należy unikać wykorzystywania urządzeń elektrycznych w charakterze grzejników – przynajmniej dopóty, dopóki elektryczność jest wytwarzana z paliw kopalnych w elektrowniach o niskiej efektywności. Lepiej już spalać paliwa kopalne w domu. Dlaczego? Ponieważ gdy używasz elektryczności wytworzonej w elektrowni zasilanej paliwami kopalnymi, ponad połowa zawartej w nich energii jest marnowana, a jedynie mniejsza jej część jest zamieniana w energię elektryczną. Do tego kolejne 8% energii jest tracone podczas przesyłu. Jeśli spalasz paliwa kopalne w domu, bezpośrednio wykorzystując ciepło z ich spalania, wykorzystasz je znacznie efektywniej.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 77 Jednym z największych zagrożeń dla współczesnego społeczeństwa są ładowarki do telefonów. BBC News ostrzega nas przed nimi już od 2005 roku: [...] „Koniecznie wyjmij z kontaktu swoją ładowarkę do telefonu komórkowego, gdy jej nie używasz”. – Materiał BBC z 2005 roku mówi: „Wszystkie elektrownie jądrowe zostaną zamknięte w ciągu kilku lat. Jak będziemy oświetlać Wielką Brytanię? Oto trzy sposoby na oszczędzanie energii: wyłącz nieużywane wideo, nie zostawiaj telewizora w trybie *standby* i koniecznie wyjmij z kontaktu swoją ładowarkę do telefonu komórkowego, gdy jej nie używasz”.
- Współczesne ładowarki do telefonów komórkowych, pozostawione w gniazdku bez podłączonego telefonu, zużywają około pół wata. – Mój miernik zużycia elektryczności na rys. 11.2 nie jest wystarczająco czuły, aby mierzyć tak niskie zużycie energii. Jestem wdzięczny Svenowi Weierowi i Richardowi McMahon z Wydziału Inżynierii Uniwersytetu w Cambridge, którzy zmierzili zużycie energii przez standardową ładowarkę Nokii za pomocą dokładnego kalorymetru; stwierdzili, że kiedy nie jest ona połączona z telefonem, pobiera i w ten sposób marnuje moc 0,472 W. Wykonali też dodatkowe pomiary: ładowarka, podłączona do naładowanego w pełni telefonu, marnuje 0,845 W. Kiedy zaś ładowarka robi to, do czego jest przeznaczona, czyli ładuje rozładowany telefon, marnuje 4,146 W w postaci ciepła.

Dalsza lektura: Kuehr (2003).



	Wiatr, głębokowodne: 32 kWh/d
	Wiatr, płytkowodne: 16 kWh/d
	El. wodne: 1,5 kWh/d
	Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 24 kWh/d
	Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 50 kWh/d
	PV, 10 m ² /o: 5
	Ogrzewanie słoneczne: 13 kWh/d
	Wiatr: 20 kWh/d
Gadżety: 5	
Oświetlenie: 4 kWh/d	
Ogrzewanie, klimatyzacja: 37 kWh/d	
Podróż samolotem: 30 kWh/d	
Samochód: 40 kWh/d	

Rys. 11.5. Systemy przetwarzania informacji i inne gadżety

Rys. 11.6. Reklama z kampanii „DIY naprawa planety”. Tekst głosi: „Wyłącz. Jeśli w każdym gospodarstwie w Londynie wyłączone zostałyby wszystkie nieużywane ładowarki do telefonów komórkowych, moglibyśmy zaoszczędzić 31 000 ton CO² i 7,75 miliona funtów rocznie”. london.gov.uk/diy/

12 Fale

Jeśli w ogóle energia fal ma dawać nadzieję jakiemuś krajowi, to musi dawać nadzieję Wielkiej Brytanii i Irlandii, otoczonym z jednej strony wodami Oceanu Atlantyckiego, a z drugiej wodami Morza Północnego.

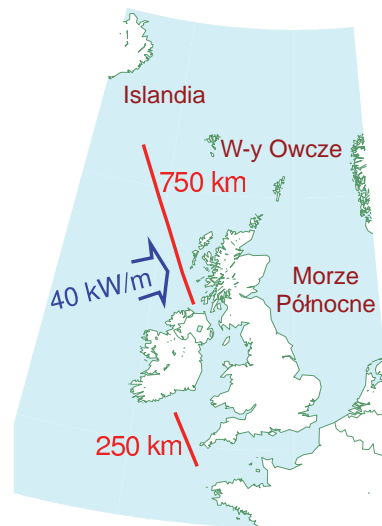
Najpierw wyjaśnijmy, skąd się biorą fale: *energia słońca wywołuje wiatr, a ten z kolei tworzy fale.*

Większość promieniowania słonecznego, które dociera do naszej planety, ogrzewa oceany. Nagrzana woda ogrzewa powietrze nad nią – w ten sposób powstaje para wodna. Ciepłe powietrze unosi się, a im wyżej dociera, tym bardziej się ochładza; para wodna w końcu ponownie kondensuje, a wówczas formują się chmury, z których pada deszcz. W górnych warstwach atmosfery temperatura znacząco spada i zimne powietrze opada ponownie ku ziemi. Ta wielka, napędzana słońcem pompa kręci powietrzem w olbrzymich pętach konwekcji. My zaś, na powierzchni Ziemi, ów ruch powietrza odbieramy jako wiatr. Gdy wiatr wieje nad wodą, powstają fale, które stanowią szczególny, przetworzony rodzaj energii słonecznej (pamiętajmy przy tym, że uderzające o brzeg fale nie mają nic wspólnego z pływami oceanicznymi).

Na otwartej przestrzeni fale tworzą się, gdy prędkość wiatru jest większa niż około 0,5 m/s. Grzbiety fal przemieszczają się mniej więcej z tą samą prędkością i w tym samym kierunku, co wywołujący je wiatr. *Długość fali* (dystans pomiędzy grzbietami) i *okres* (czas pomiędzy nadejściem grzbietów fali w danym miejscu) zależą od prędkości wiatru. Im dłużej wiatr dmie i im większa jest przestrzeń, nad którą wieje, tym większa *wysokość* wywoływanych przez niego fal. Ponieważ wiatry nad Atlantykiem wieją zwykle z zachodu na wschód, fale docierające do zachodnich wybrzeży Europy są szczególnie duże. (Fale na wschodnim wybrzeżu Wysp Brytyjskich są zwykle znacznie mniejsze, stąd moje szacunki potencjalnej energii dostępnej z fal skoncentrują się na zasobach Oceanu Atlantyckiego).

Fale mają długą pamięć i będą biec w tym samym kierunku jeszcze całymi dniami po tym, jak wiatr przestanie wiać – aż w coś uderzą. Na morzach, nad którymi kierunek wiatru często się zmienia, fale – przemieszczające się w różnych kierunkach i powstałe w różnych dniach – tworzą prawdziwy mizmasz. Jeśli fale biegnące w jakimś kierunku napotkają obiekt, który zaabsorbuje ich energię – na przykład łańcuch wysp z piaszczystymi plażami – to morze za tym obiektem jest spokojniejsze. Obiekty rzucają cień, a fale za nim mają mniejszą energię. Słońce dostarcza zatem pewnej energii na *jednostkę powierzchni*, fale zaś dostarczają energii na *jednostkę długości*. Nie da się równocześnie zjeść ciastko i dalej mieć je na talerzu. Tak jak nie można wykorzystać energii fal w odległości dwóch kilometrów od brzegu, a *następnie po raz kolejny* w odległości jednego kilometra od brzegu. A właściwie, próbować można, jednak instalacja położona dwa kilometry od brzegu zaabsorbuje energię, która w związku z tym nie dotrze już do instalacji położonej kilometr dalej.

Obszar oceanu potrzebny do uformowania się dużych fal można mierzyć w tysiącach kilometrów. Możemy obliczyć górny przedział możliwej do uzyskania energii z fal, szacując energię nadbiegających fal na jednostkę długości wybrzeża i mnożąc przez długość linii brzegowej. Zignorujemy kwestię tego, jaki mechanizm miałby zbierać tę energię, a zamiast tego skoncentrujemy się na odpowiedzi na pytanie, ile tej energii w ogóle jest.



Fot. 12.1. Kolektor energii fal Pelamis to rodzaj węża morskiego składającego się z czterech części. Jest ustawiony przodem do nadbiegających fal. Fale powodują, że wąż wygina się, co porusza generatory hydrauliczne. Maksymalna moc uzyskiwana z jednego węża wynosi 750 kW; w najlepszych lokalizacjach na wybrzeżach Atlantyku jeden wąż może dostarczać średnio 300 kW. Fot. Pelamis
www.pelamiswave.com

Moc fal Atlantyku została zmierzona – to około 40 kW na metr linii brzegowej. Brzmi naprawdę imponująco! Gdyby każdy miał dla siebie tylko metr linii brzegowej i był w stanie wykorzystać 40 kW w całości, to z nadadkiem wystarczyłoby na pokrycie zużycia energii współczesnego człowieka. *Nasza populacja jest jednak zbyt liczna.* Nie mamy wystarczająco długiej linii brzegowej, aby każdy mógł mieć swój metr.

Jak pokazuje mapa na stronie 81 Wielka Brytania ma około 1000 km linii brzegowej nad Atlantykiem (jeden milion metrów), co daje 1/60 m na osobę. Tak więc całkowita docierająca do wybrzeża moc wynosi 16 kWh na osobę dziennie. Gdybyśmy wykorzystali całą tę energię, Atlantyk u brzegów Wielkiej Brytanii stałby się płaski jak staw w parku. Rzeczywiste systemy nie będą w stanie wykorzystać 100% energii, a część z przejętej energii niewątpliwie zostanie stracona w procesie zamiany energii mechanicznej w elektryczną.

Załóżmy, że opracujemy fantastyczne konstrukcje elektrowni falowych, które będą mieć wydajność przetwarzania energii mechanicznej w elektryczną na poziomie 50% oraz że będziemy w stanie zbudować nimi 500 km wybrzeży Atlantyku. Oznacza to, że wykorzystalibyśmy 25% teoretycznie dostępnej energii. Daje to **4 kWh na osobę dziennie**. Jak zwykle, celowo czynię dość ekstremalne założenia, aby podkreślić wzrost zielonego słupka. Myślę również, że przyjęte założenia, iż *połowę atlantyckiej linii brzegowej* zbudujemy elektrowniami falowymi, dla wielu czytelników brzmią jak opowieści o gruszkach na wierzbie.

Zastanówmy się teraz, jak przyjęte przeze mnie liczby mają się do dostępnej dziś technologii? W chwili, gdy piszę te słowa, istnieją jedynie trzy godne uwagi urządzenia działające w głębokiej wodzie: są to trzy elektrownie falowe Pelamis (rys. 12.1). zbudowane w Szkocji, a zainstalowane w Portugalii. Nie opublikowano dotychczas danych o ich wydajności, jednak producenci Pelamis („zaprojektowane przede wszystkim z naciskiem na trwałość, a nie efektywność energetyczną”) przewidują, że długa na 2 kilometry farma falowa składająca się z 40 takich węży będzie wytwarzać 6 kW na każdy metr farmy falowej. Gdy wykorzystamy te obliczenia, moc dostarczana przez instalację o długości 500 kilometrów wyniesie 1,2 kWh na osobę dziennie. O ile moc fal może być użyteczna dla małych społeczności na odległych wyspach, podejrzewam, że nie odegra ona znaczącej roli w rozwiązaniu problemu zrównoważonego pozyskiwania energii w Wielkiej Brytanii.

Polska ma niecałe 400 km linii wybrzeża morskiego (pomijając zawijasy linii brzegowej, wybrzeża Zatoki Gdańskiej oraz Zalewu Szczecińskiego i Zalewu Wiślanego). Powiedzmy, że podobnie jak w Wielkiej Brytanii połowę wybrzeża zbudujemy elektrowniami falowymi. Instalacje te osiągną wówczas długość 200 km.

Niestety, fale na Bałtyku to ubodzy krewni fal Atlantyckich. Wiele energii się z nich nie wycisnie. Według szacunków Instytutu Morskiego w Gdańsku, energia fal u naszych wybrzeży wynosi średnio 4 kW na metr bieżący grzbietu fali (co mniej więcej odpowiada mocy fal na Morzu Północnym). Pomijając fakt, że fale wcale nie będą uderzać prostopadle w wybrzeże, całkowita moc możliwa do uzyskania na polskim wybrzeżu to około **0,25 kWh na osobę dziennie**. Tak mało energii z tak olbrzymiej infrastruktury? Zapomnijmy więc o tym pomysle i przyjmijmy **0 kWh na osobę dziennie**.



Rys. 12.2. Fale

Jaka jest masa Pelamis i ile stali zawiera taka instalacja? Jeden wąż o maksymalnej mocy 750 kW waży 700 ton, z czego 350 ton przypada na balast, a reszta to prawie w 100% stal. Daje to stosunek masy do mocy na poziomie 500 kg na kW (maksymalnie). Możemy to porównać z wymaganiami surowcowymi dla morskich elektrowni wiatrowych: morska turbina wiatrowa o mocy maksymalnej 3 MW waży 500 ton, z uwzględnieniem fundamentu. Daje to współczynnik masa/moc na poziomie 170 kg na kW, czyli jedna trzecia tego, co dla elektrowni falowej Pelamis. Pamiętajmy jednak, że Pelamis to prototyp i wraz z inwestycjami i dalszym rozwojem tej technologii współczynnik ten prawdopodobnie ulegnie poprawie.



Fot. Terry Cavner

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 81 **Na otwartej przestrzeni fale tworzą się, gdy prędkość wiatru jest większa niż około 0,5 m/s.** Grzbiety fal przemieszczają się mniej więcej z tą samą prędkością i w tym samym kierunku, co wywołujący je wiatr. – Najprostsza teoria powstawania fal (Faber, 1995, str. 337) sugeruje, że u małych fal grzbiecie przemieszcza się z prędkością mniej więcej równą połowie prędkości wywołującego fale wiatru. Jednak obserwacje pokazują, że im dłuższy wieje wiatr, tym większa jest długość fal i tym większa jest ich prędkość. Prędkość fal nad dużymi obszarami wodnymi o stałym wietrze jest prawie równa prędkości wiatru 20 metrów nad powierzchnią morza (Mollison, 1986).
- **Fale na wschodnim wybrzeżu Wysp Brytyjskich są zwykle znacznie mniejsze...** – Podczas gdy moc fal w Lewis (Atlantyk) wynosi 42 kW/m, moc fal na wschodnim wybrzeżu jest znacznie mniejsza: w Peterhead wynosi 4 kW/m, w Scarborough – 8 kW/m, a w Cromer – 5 kW/m; – Źródło: Sinden (2005). Sinden stwierdza, że „region Morza Północnego charakteryzuje bardzo niska energia fal”.
- 82 **Moc fal Atlantyku została zmierzona: to około 40 kW na metr linii brzegowej.** – (Rozdział F wyjaśnia, jak możemy wyznaczyć tę moc, posługując się kilkoma informacjami na temat fal). Liczba ta jest dobrze umocowana w literaturze traktującej o energii fal na Atlantyku (Mollison et al., 1976; Mollison, 1986, 1991). Cytując na przykład Mollisona (1986): „wielkoskalowe zasoby północnowschodniego Atlantyku, od Islandii do północnej Portugalii, wynoszą 40–50 MW/km, z czego 20–30 MW/km jest potencjalnie możliwe do ekonomicznego pozyskiwania”. W dowolnym punkcie otwartego oceanu można wyróżnić trzy wielkości – moc na jednostkę długości: *moc całkowitą fal* przechodzących przez dany punkt w kilku kierunkach (średnio 63 kW/m na Wyspach Scilly i 67 kW/m u brzegów wyspy Uist), *moc netto* możliwą do przejścia przez optymalnie ustawione urządzenie kierunkowe (47 kW/m i 45 kW/m odpowiednio) i *moc na jednostkę długości wybrzeża*, która uwzględnia rozbieżność między optymalnym ustawieniem urządzenia a kierunkiem linii brzegowej (na przykład w Portugalii optymalny kierunek ustawienia to północny zachód, podczas gdy linia brzegowa jest zwrócona na zachód).
- **Rzeczywiste systemy nie będą w stanie wykorzystać 100% energii, a część z przejętej energii niewątpliwie zostanie stracona w procesie zamiany energii mechanicznej w elektryczną.** – Pierwsza podłączona do sieci elektrownia falowa w Wielkiej Brytanii, Limpet na wyspie Islay w archipelagu Hebrydów Wewnętrznych, stanowi uderzający przykład tych strat. Na etapie projektowania jej sprawność konwersji od energii fal do sieci elektrycznej szacowano na 48%, a średnią dostarczaną moc na 200 kW. Jednak okazało się, że w wyniku strat energii w systemie przechwytywania energii fal, kołach zamachowych i komponentach elektrycznych rzeczywista średnia moc urządzenia wynosi 21 kW, dając tym samym wydajność końcową 10% (Wavegen, 2002).



13 Żywność i rolnictwo

Współczesne rolnictwo to sposób na zamianę energii paliw kopalnych w jedzenie.

Albert Bartlett

W rozdziale 6 przedyskutowaliśmy już, jak wiele energii można wytwarzać z roślin w zrównoważony sposób. W tym rozdziale zastanowimy się natomiast, jak wiele energii faktycznie *zużywamy*, nakładając sobie na talerz codzienną porcję jedzenia.

Aktywna osoba, ważąca 65 kg, konsumuje przeciętnie żywność o zawartości energii chemicznej na poziomie 2 600 „kalorii” dziennie. „Kaloria” w kręgach żywieniowych to 1000 kalorii chemicznych (1 kcal), a w naszych jednostkach 2600 „kalorii” dziennie to 3 kWh dziennie. Większość tej energii ostatecznie ucieka z ciała jako ciepło, zatem jedną z funkcji człowieka może być działanie w roli grzejnika o mocy nieco ponad 100 W, czyli żarówki sporej mocy. Zgromadź w małym chłodnym pomieszczeniu 10 osób, a będziesz mógł wyłączyć grzejnik o mocy 1 kW.

Jak wiele energii faktycznie pobieramy w formie jedzenia, aby dysponować energią 3 kWh? Jeśli poszerzymy nasz horyzont postrzegania o cały łańcuch dostarczania żywności, zorientujemy się, że nasz „ślad energetyczny” jest znacznie wyższy. Zależy to od tego, czy jesteś weganinem, wegetarianinem, czy mięsożercą. Weganin ma najmniejszy „ślad energetyczny”: **3 kWh na dzień** z roślin, które zjada.

Koszt energetyczny picia mleka

Uwielbiam mleko. Jeśli wypiję pół litra mleka, jak wiele jest w nim energii? Przeciętna krowa mleczna daje 16 litrów mleka dziennie, zatem moje pół litra mleka stanowi 1/32 ilości produkowanej przez krowę. Lubię też ser. Wytworzenie 1 kg cheddara wymaga zużycia około 9 kg mleka, więc spożycie 50 g sera dziennie wymaga 450 g mleka. W porządku, wynika z tego, że zaspokojenie mojego zużycia mleka i sera wymaga 1/16 krowy. A jak wiele energii potrzeba na „funkcjonowanie” krowy? Jeśli ważąca 450 kg krowa ma podobne wymagania energetyczne na kilogram, co człowiek (który przy wadze 65 kg spala codziennie 3 kWh), to musi zużywać około 21 kWh/d. Czy ta ekstrapolacja od człowieka do krowy wywołuje w Tobie niepewność? Sprawdźmy więc liczby: www.dairyaustralia.com.au podaje, że karmiąca krowa ważąca 450 kg potrzebuje 85 MJ/d, czyli 24 kWh/d. Doskonale, nasze przybliżenie nie odbiega drastycznie od tej wartości, więc moje udziały w 1/16 krowy odpowiadają zużyciu energii około **1,5 kWh** dziennie. Ta liczba ignoruje inne koszty energetyczne, związane z zachęcaniem krowy do wytwarzania mleka, przetworzeniem mleka w ser, ich opakowanie i dostarczenie do mojego sklepu. Przyjrzymy się niektórym z tych kosztów w rozdziale 15, kiedy to będziemy dyskutować kwestie transportu i sklepów.

Jajka

Kura nioska zjada około 110 g paszy dla drobiu dziennie. Przyjmując, że pasza zawiera 3,3 kWh energii na kg, oznacza to zużycie energii przez kurę o wartości 0,4 kWh dziennie. Kury nioski znoszą przeciętnie 290 jajek rocznie, a więc zje-



Fot. 13.1. Sałatka nicejska

Minimum: 3 kWh/d



Rys. 13.2. Minimalne zapotrzebowanie energetyczne człowieka

Mleko, ser: 1,5 kWh/d



Rys. 13.3. Mleko i ser

dzenie dwóch jajek w ciągu dnia wymaga 1 kWh dziennie. Każde jajko zawiera z kolei 80 kcal, co odpowiada mniej więcej 0,1 kWh. Z energetycznego punktu widzenia produkcja jajek ma więc efektywność 20%.

Koszt energetyczny jedzenia mięsa

Powiedzmy, że entuzjastyczny mięsożerca zjada codziennie ćwierć kilo mięsa (odpowiada to mniej więcej średniej ilości mięsa zjadanego przez Amerykanina). Aby obliczyć energię potrzebną do utrzymania zwierząt dla mięsożercy – kiedy dorastają w oczekiwaniu na ścięcie – musimy wiedzieć, jak długo żyją, zużywając energię. A więc drób, wieprzowina, a może wołowina?

– Drób, proszę pana? Każda kura, którą zjadasz, rosła przez 50 dni, zanim stała się mięsem drobiowym. Założona przez nas stała konsumpcja – ćwierć kilo mięsa – wymaga utrzymania około 50 razy więcej żywych kur (12,5 kg) hodowanych wyłącznie do zjedzenia. A te 12,5 kg mięsa kurczaków bez wątpienia zużywa energię.

– Wieprzowina? Świnie rosną trochę dłużej – od narodzin do momentu stania się szynką musi im upłynąć około 400 dni. Nasza codzienna konsumpcja ćwierci kilograma wymaga więc utrzymania 100 kg przyszłej wieprzowiny, która musi przecież dorosnąć, zanim doczeka się konsumpcji.

– A może krowa? Produkcja wołowiny pochłania najwięcej czasu. Potrzeba około 1000 dni hodowli, nim „łaciata” trafi na nasz talerz. Ćwierć kilo mięsa dziennie wymaga w tym przypadku wyhodowania około 250 kg mięsa żywej krowy, szykującej się do roli przyszelego steku.

Widać z tego, że najefektywniejsze energetycznie jest spożywanie drobiu, a najmniej – wołowiny.

Zbierzmy te obliczenia w jedną liczbę, zakładając przy tym, że zjadane ćwierć kilo mięsa składa się po równo z drobiu, wieprzowiny i wołowiny. Takie zwyczaje żywieniowe wymagają stałego utrzymywania 4 kg kur, 33 kg świń i 83 kg krów. W sumie 120 kg mięsa lub inaczej 180 kg zwierząt (ponieważ na mięso przerabia się około 2/3 masy zwierzęcia, kwestii pompowania „mięsa” wodą i różnymi chemicznymi wynalazkami nie będziemy zaś tutaj poruszać). Zakładając, że te 180 kg zwierząt ma podobne potrzeby energetyczne, co ludzie (których 65 kg wymaga 3 kWh/d), to energia potrzebna na zasilenie tego mięsnego nawyku wynosi:

$$180 \text{ kg} \times \frac{3 \text{ kWh/d}}{65 \text{ kg}} \approx 8 \text{ kWh/d}$$

Ponownie dokonałem pewnego uproszczenia, mówiąc, że fizjologicznie „zwierzęta są jak ludzie”; dokładniejsze szacunki energii potrzebnej na hodowanie kurczaków znajdują się w przypisach do tego rozdziału. Nie to jest jednak istotne, bo chodziło nam przede wszystkim o otrzymanie orientacyjnego wyniku. Energia potrzebna dziennie do wytworzenia żywności dla typowego konsumenta zieleniny, mleka, jajek i mięsa wynosi:

$$1,5 + 1,5 + 1 + 8 = 12 \text{ kWh/d}$$

(Dzienny bilans kalorii z takiej diety wynosi mniej więcej 1,5 kWh z roślin, 0,7 kWh z produktów mlecznych, 0,2 kWh z jajek i 0,5 kWh z mięsa – w sumie 2,9 kWh dziennie).

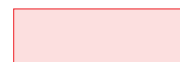
Przedstawiona wartość nie uwzględnia żadnych z kosztów energetycznych związanych z rolnictwem, nawożeniem, przetwarzaniem, pakowaniem,

Jajka: 1 kWh/d



Rys. 13.4. Dwa jajka dziennie

Mięso: 8 kWh/d



Rys. 13.5. Jedzenie mięsa wymaga dodatkowej energii, gdyż musimy przez długi czas żywić zwierzęta, które czekają na to, byśmy je zjedli.

chłodzeniem i transportowaniem żywności. Część tych kosztów energetycznych oszacujemy poniżej, a część w rozdziale 15.

Czy te obliczenia dają jakieś argumenty na korzyść wegetarianizmu bazującego na niższym zużyciu energii? To zależy od tego, gdzie hodujemy zwierzęta. Weźmy na przykład strome wzgórza Walii. Czy te tereny mogłyby być użyte do czegoś innego niż do wypasania? Te skaliste tereny albo będą wykorzystywane do hodowli owiec, albo wcale. Możesz myśleć o takich zielonych stokach jako o bezobsługowych plantacjach biopaliw, a o pasących się tam owcach jako o automatycznych i samoreplikujących się kombajnach na zielone paliwo. Straty energii pomiędzy światłem słonecznym a baraniną są znaczące, jednak jest to obecnie najlepszy sposób wykorzystywania energii słońca w takich miejscach. (Nie jestem do końca przekonany, czy ten argument za hodowlą owiec w Walii jest w pełni poprawny; podczas złej pogody owce są wszak sprowadzane na niżej położone tereny, gdzie ich dieta jest uzupełniana paszą z soi i innych produktów uprawianych za pomocą kosztownych energetycznie nawozów. Jaki jest rzeczywisty koszt energetyczny? Na to pytanie nie znam odpowiedzi).

Podobne argumenty można wysunąć na korzyść jedzenia mięsa pochodzącego np. z zakrzewionych terenów Afryki i terenów uprawnych w Australii, jak również konsumpcji produktów mlecznych w Indiach, gdzie miliony krów żywiące są produktami ubocznymi uprawy ryżu i kukurydzy.

Z drugiej strony, tam gdzie zwierzęta są hodowane w klatkach i karmione zbożem, które mogliby jeść ludzie, nie ma żadnej wątpliwości, że byłoby znacznie efektywniejsze wyeliminowanie pośredników w łańcuchu pokarmowym i wykorzystanie ziarna bezpośrednio do żywienia ludzi.

Nawozy i inne koszty energetyczne rolnictwa

Energia zawarta w europejskich nawozach wynosi około **2 kWh** na osobę dziennie. Według raportu Uniwersytetu Warwick wykonanego dla DEFRA w 2005 roku rolnictwo w Wielkiej Brytanii zużywało energię **0,9 kWh na osobę dziennie**, wykorzystując ją w pojazdach i maszynach rolniczych, do ogrzewania (szczególnie szklarni), oświetlenia, wentylacji i chłodzenia.

Koszt energetyczny Pedigree, Whiskas i jedzenia dla Gniadego

Przyjaciele zwierząt! Czy jesteście sługami swojego psa, kota lub konia?

W Wielkiej Brytanii jest około 8 milionów kotów. Załóżmy, że troszczysz się o jednego z nich. Jaki jest koszt energetyczny Whiskas? Jeśli kotek zjada 50 g mięsa dziennie (drób, wieprzowina i wołowina), to wcześniejsze obliczenia mówią, że energia wymagana do wytworzenia karmy wynosi blisko **2 kWh dziennie**. Kot wegetarianin wymagałby mniej.

Podobnie, jeśli Twój pies zjada 200 g mięsa dziennie oraz węglowodany o energii 1 kWh, to energia potrzebna na jego posiłek to **9 kWh dziennie**.

Koń Gniady waży około 400 kg i zużywa **17 kWh roślin dziennie**.

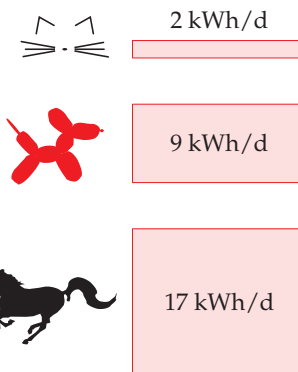
Nieporozumienia

Podobno „ślad energetyczny” żywności jest tak wielki, że „lepiej jest jeździć samochodem niż chodzić”.

Czy jest to prawdą, zależy od Twojej diety. Bez problemu można znaleźć żywność, której „ślad energetyczny” w paliwach kopalnych jest większy niż



Fot. 13.6. Zbiera uprawy energetyczne i przetwarza je na jedzenie



Rys. 13.7. Energia wymagana do codziennego karmienia towarzyszy zwierzęcych

energia dostarczona człowiekowi. Torebka chipsów na przykład ma w sobie 1,4 kWh energii paliw kopalnych na każdą kilowatogodzinę (1 kWh) ich energii chemicznej. Energia paliw kopalnych w mięsie jest znacznie większa. Według badań Uniwersytetu w Exeter przeciętna dieta ma w sobie 6 kWh energii paliw kopalnych na każdą kilowatogodzinę jedzenia.

Aby ustalić, czy jazda samochodem rzeczywiście pochłania mniej energii, musimy wiedzieć, jaka jest efektywność obu sposobów transportu. W rozdziale 3 obliczyliśmy już, że koszt energetyczny przejechania 100 km przez samochód to 80 kWh. Chodzenie zużywa energię netto 3,6 kWh na 100 km – 22 razy mniej. Tak więc, jeśli żywisz się jedzeniem, którego „ślad energetyczny” jest większy od 22 kWh na każdą kWh jedzenia, to owszem, koszt energetyczny przemieszczenia się z punktu A do punktu B w napędzanym paliwami kopalnymi pojeździe jest mniejszy niż kiedy przespacerujesz się na własnych nogach. Jednak jeśli Twoja dieta jest typowa (6 kWh na każdą kWh jedzenia), to stwierdzenie „lepiej jest jeździć samochodem niż chodzić” stanowi mit. Chodzenie zużywa cztery razy mniej energii.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 84 **Przeciętna krowa mleczna daje 16 litrów mleka dziennie...** – w Wielkiej Brytanii jest 2,3 miliona krow mlecznych, a każda z nich daje rocznie 5 900 litrów mleka. Połowa produkowanego przez krowy mleka jest sprzedawana w postaci płynnej; por.: www.ukagriculture.com, www.vegsoc.org/info/cattle.html
- 85 **Potrzeba około 1000 dni hodowli, nim „łaciata” trafi na nasz talerz.** – 33 miesiące od momentu zapłodnienia do rzeźni – 9 miesięcy ciąży i 24 miesiące hodowli; por. www.shabdenparkfarm.com/farming/cattle.htm
- **Kury** – W pełni dorosła (20-tygodniowa) nioska waży 1,5–1,6 kg. Jej pokarm ma wartość energetyczną 2850 kcal na kg lub inaczej 3,3 kWh na kg, a ilość zjedanego pokarmu rośnie z 340 g tygodniowo w wieku 6 tygodni do 500 g tygodniowo, gdy kura osiąga wiek 20 tygodni. Znosząc jajka, kura zjada 110 g karmy dziennie. Jedzenie kur mięsnych daje energię 3,7 kWh/kg. Kura hodowana na mięso potrzebuje dziennie 400–450 kcal (0,5 kWh/d), a jej waga wynosi około 2 kg. Kura ważąca 2,95 kg konsumuje 5,32 kg paszy [5h69fm]. Zatem energia „włożona” w mięso kury wynosi około 6,7 kWh na kg kury lub 10 kWh na kg zjedzonego mięsa. Gdybym użył tej wartości zamiast mojego wstępnego przybliżenia, wkład energetyczny drobiu wzrósłby nieco. Jednak biorąc pod uwagę, że mieszana dieta mięsna jest zdominowana energetycznie przez wołowinę, nie ma to wielkiego znaczenia. Źródła: Podkomitet Żywienia Drobiu, Narodowa Rada Badawcza (National Research Council) (1994), www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923, MacDonald (2008) oraz www.statistics.gov.uk/statbase/datasets2.asp
- **Zbierzmy te obliczenia w jedną liczbę, zakładając przy tym, że zjadane ćwierć kilo mięsa składa się po równo z drobiu, wieprzowiny i wołowiny.** – Jest to podział zbliżony do przeciętnej konsumpcji mięsa w Ameryce, która wynosi 251 g dziennie: 108 g drobiu, 81 g wołowiny i 62 g wieprzowiny (MacDonald, 2008).
- 86 **Energia zawarta w europejskich nawozach wynosi około 2 kWh na osobę dziennie.** – W latach 1998 – 1999 Europa Zachodnia zużyła 17,6 mln ton nawozów każdego roku: 10 mln ton nawozów azotowych, 3,5 mln ton fosforanów i 4,1 mln ton potażu. Te nawozy mają „ślad energetyczny” odpowiednio: 21, 7, 4,9 i 3,8 kWh na kg. Dzielać tę energię pomiędzy 375 milionów ludzi, uzyskujemy w sumie 1,8 kWh na osobę dziennie. Źródła: Gellings and Parmenter (2004), International Fertilizer Industry Association. [5pwojp].
- ... w 2005 roku rolnictwo w Wielkiej Brytanii zużywało energię 0,9 kWh na osobę dziennie... – Źródło: Warwick HRI (2007).

	Fale: 4 kWh/d
	Wiatr, głębokowodne: 32 kWh/d
	Wiatr, płytkowodne: 16 kWh/d
	El. wodne: 1,5 kWh/d
	Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 24 kWh/d
	Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 50 kWh/d
	PV, 10 m ² /o: 5
	Ogrzewanie słoneczne: 13 kWh/d
	Wiatr: 20 kWh/d
Żywność, rolnictwo, nawozy: 15 kWh/d	
Gadżety: 5	
Oświetlenie: 4 kWh/d	
Ogrzewanie, klimatyzacja: 37 kWh/d	
Podróż samolotem: 30 kWh/d	
Samochód: 40 kWh/d	

Rys. 13.8. Żywność i rolnictwo

- 87 Torebka chipsów na przykład ma w sobie 1,4 kWh energii paliw kopalnych na każdą kilowatogodzinę ich energii chemicznej. – Oszacowałem tę wartość na podstawie „śladu węglowego” torebki chipsów: 75 g CO₂ na standardową 35-gramową torebkę [5bj8k3]; z tego śladu 44% jest związane z rolnictwem, 30% z przetwarzaniem, 15% z opakowaniem, a 11% z transportem i utylizacją. Dostarczona konsumentowi energia chemiczna wynosi 770 kJ. Ten rodzaj żywności ma więc „ślad węglowy” 350 g na kWh. Zakładając, że większość pochodzi z paliw kopalnych emitujących 250 g CO₂ na kWh, „ślad energetyczny” chipsów wynosi 1,4 kWh energii z paliw kopalnych na 1 kWh zjadanej energii chemicznej.
- ... przeciętna dieta ma w sobie 6 kWh energii paliw kopalnych na każdą kilowatogodzinę jedzenia... – Coley (2001) szacuje tę wartość w przeciętnej diecie jako 5,75 razy większą od dostarczonej energii. Dla takiej diety czynność chodzenia ma ślad węglowy CO₂ równy 42 g/km, a jazda na rowerze 30 g/km. Dla porównania, jazda przeciętnym samochodem powoduje emisję 183 g/km.
 - Chodzenie zużywa energię netto 3,6 kWh na 100 km... – idący człowiek na przejście 100 km zużywa w sumie 6,6 kWh [3s576h]; aby obliczyć energię zużywaną na chodzenie, należy odjąć od tego zużycie energii w spoczynku (Coley, 2001).

Dalsza lektura: Weber i Matthews (2008).

14 Pływy

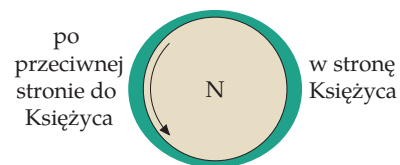
Księżyc i Ziemia krążą w wirującym piruecie wokół Słońca. W ciągu roku razem okrążają Słońce, krążąc jednocześnie wokół siebie co 28 dni. Księżyc obraca się wokół własnej osi również co 28 dni, kierując w stronę Ziemi wciąż tę samą stronę swojego oblicza. Primadonna Ziemia nie odwzajemnia jednak tej grzeczności i obraca się wokół własnej osi w ciągu 24 godzin. Cały ten taniec odbywa się dzięki siłom grawitacji, przyciągającym ku sobie każdą cząsteczkę aktorów tego przedstawienia. Wszystko jest *prawie* idealnie zrównoważone. I właśnie owo *prawie* wywołuje pływy. [Księżyc przyciąga wodę na skierowanej ku niemu stronie Ziemi nieco *mocniej* niż samą Ziemię, więc woda ta wyrzusza się w stronę Księżyca. Z kolei woda po przeciwnej do Księżyca stronie Ziemi jest przyciągana *słabiej*, przez co tam również powstaje garb. Podobnie na oceany działa Słońce – *red.*]

Zaburzenia wywołwane przez Księżyc są mniej więcej trzykrotnie większe niż te związane z oddziaływaniem Słońca, tak więc wielkość garbów wody (a więc przyływów) zależy od fazy Księżyca, czyli ustawienia Księżyca względem Słońca. W pełni i nowiu (czyli wtedy, kiedy Księżyc i Słońce są ustawione w jednej linii) następuje wzajemne wzmocnienie ich działania i wtedy pływy są największe (tzw. pływy syzygijne) – zjawisko to występuje co dwa tygodnie. Kiedy zaś Księżyc jest w kwadrze (czyli kiedy Księżyc, Ziemia i Słońce tworzą kąt prosty), pływy częściowo znoszą się i są najsłabsze (tzw. pływy kwadraturowe). Wysokość, a także prędkość przyływów i odpływów syzygijnych jest mniej więcej dwukrotnie większa niż przyływów kwadraturowych.

Dlaczego są dwa przyływy i dwa odpływy dziennie? Gdyby Ziemia była idealnie gładka, jak kula bilardowa, efekt działania Księżyca deformowałby oceany na kształt piłki do rugby (rys. 14.1). Osoba mieszkająca na równiku naszej Ziemi-bili, obracającej się co 24 godziny wewnątrz kokonu wody, zauważyłaby, że poziom wody podnosi się, po czym opada dwa razy dziennie – raz podczas przechodzenia „nosa” piłki, a drugi raz – jej „ogona”.

Ten uproszczony obrazek odbiega jednak od rzeczywistości. Ziemia wcale nie jest gładka, nie jest też jednolicie pokryta wodą. Dwa garby wody nie mogą sobie bezkarnie krążyć wokół Ziemi, bo przeszkadzają im w tym kontynenty. Rzeczywiste zachowanie się przyływów jest zatem bardziej skomplikowane. Na wielkich obszarach oceanicznych, takich jak Ocean Atlantycki, grzbieity i doliny fali przywowej – niezdolne do swobodnego obieganania Ziemi – pędzą zamiast tego wokół granic Oceanu. Na Północnym Atlantyku mamy dwa grzbieity, okrążające ocean w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara raz na dobę. W Wielkiej Brytanii nie widzimy bezpośrednio tych atlantyckich grzbieitów i dolin przywowych – jesteśmy oddzieleni od właściwego Atlantyku przez kilkaset mil brodźnika zwanego szelfem kontynentalnym. Następujące po sobie grzbieity i doliny dzieli sześć godzin, a dokładniej sześć godzin i kwadrans, bo czas pomiędzy kolejnymi wschodami Księżyca to mniej więcej 25 godzin, a nie 24 godziny.

Prędkość przemieszczania się grzbieitów i dolin przywowych zależy od głębokości wody. Im płycej, tym wolniej się one przemieszczają i tym większa jest ich wysokość. Daleko na oceanie fale przywowe mają kilkadziesiąt centymetrów wysokości, a docierając do europejskich estuariów, ujść rzecznych, mogą urosnąć nawet do 4 metrów. Na półkuli północnej siła Coriolisa (związana



Rys. 14.1. Ocean pokrywany gładką jak kula bilardowa Ziemię. Patrzymy w dół znad bieguna północnego, Księżyc znajduje się 60 cm na prawo, poza kartką. Ziemia obraca się raz dziennie wewnątrz powłoki wody o kształcie piłki do rugby. Oceany rozciągają się w stronę Księżyca i od niego, gdyż siły grawitacji działają mocniej na znajdujące się bliżej niego cząsteczki oceanu, zaś cząsteczki wody znajdujące się z drugiej strony planety przyciągane są słabiej. Osoba stojąca na równiku (obracającym się w kierunku pokazanym strzałką), zobaczy dwa przyływy i dwa odpływy dziennie.

z uchem obrotowym Ziemi, działająca jedynie na przemieszczające się obiekty), pcha grzbiety i doliny fal do prawego brzegu. Z tego powodu pływy w kanale La Manche są większe po stronie francuskiej. Podobnie, grzbiety i doliny wchodzące na Morze Północne wokół Orkadów są pchane do brzegów Anglii, podróżując do ujścia Tamizy, a potem dalej wzdłuż brzegów Holandii aż do Danii.

Energia pływów bywa też nazywana energią księżycową, gdyż to naszemu naturalnemu satelicie zawdzięczamy powstawanie fal pływowych. Tak naprawdę większość energii pływów pochodzi jednak z energii obrotowej Ziemi. W wyniku działania pływów Ziemia zwalnia. [To dlatego u zarania ery dinozaurów doba była o godzinę krótsza – red.]

W jaki sposób możemy zatem wykorzystać ową energię pływów i jak wiele energii możemy w ten sposób pozyskać?

Wstępne oszacowanie energii pływów

Kiedy myślisz o energii pływów, mógłbyś pomyśleć o sztucznym zbiorniku umiejscowionym nieopodal morza. Zbiornik ten posiada koło wodne, które obraca się, kiedy zbiornik napęlnia się lub opróżnia (rys. 14.2 i 14.3). Rozdział G pokazuje, jak oszacować moc możliwą do uzyskania z takich zbiorników pływowych. Przyjmując wysokość pływów 4 m, typową dla europejskich estuariów, maksymalna moc instalacji opartych na takich sztucznych zbiornikach pływowych – napełnianych szybko podczas szczytu przyprływu i opróżnianych kiedy poziom wody jest najniższy, przy generowaniu energii podczas przepływu wody w obu kierunkach – wynosi około 3 W/m^2 . To wynik zbliżony do osiągniętych przybrzeżnej farmy wiatrowej. Wiemy już, jak duże musiałyby być przybrzeżne farmy wiatrowe – aby posiadać moc rzeczywiście znaczącą w bilansie energetycznym, powinny mieć rozmiar kraju. Podobnie zbiorniki pływowe, by mogły dostarczyć energii na skalę porównywalną z naszym całkowitym zużyciem energii, potrzebowałibyśmy zbiorników pływowych o całkowitym obszarze porównywalnym z powierzchnią Wielkiej Brytanii.

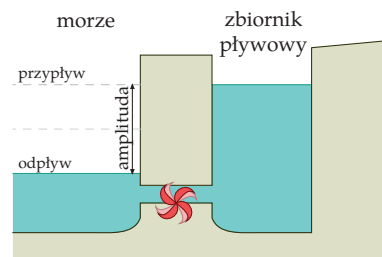
To zdumiewające, ale Wielka Brytania już posiada naturalny zbiornik pływowy właściwych rozmiarów. Jest on znany jako Morze Północne (rys. 14.5). Gdybyśmy po prostu zainstalowali generatory w odpowiednich miejscach, uzyskalibyśmy dość znaczącą moc. Generatory mogłyby wyglądać jak podwodne wiatraki. Ponieważ gęstość wody jest mniej więcej 1000 razy większa niż powietrza, energia przepływu wody również jest 1000 razy większa niż wiatru o tej samej prędkości. Wrócimy za chwilę do farm pływowych, ale najpierw przedyskutujemy, jak dużo energii przetacza się codziennie wokół Wielkiej Brytanii.

Całkowita moc pływów

Pływy wokół Brytanii są prawdziwymi falami pływowymi – w odróżnieniu na przykład od fal tsunami, które z pływami nie mają nic wspólnego. Prześledźmy drogę grzbietu fali pływowej, wpadającej z Atlantyku na wody kanału La Manche. Godzina szczytu przyprływu staje się coraz późniejsza, w miarę jak przesuwamy się na wschód od wysp Scilly przez Portsmouth w kierunku Dover. Grzbiet fali pływowej przemieszcza się przez kanał z prędkością około 70 km/h . (Grzbiet fali przemieszcza się znacznie szybciej od samej wody, tak jak zwykle fale na morzu przemieszczają się szybciej niż woda). Podobnie, grzbiet fali wpadającej z Atlantyku wokół Szkocji na Morze Północ-



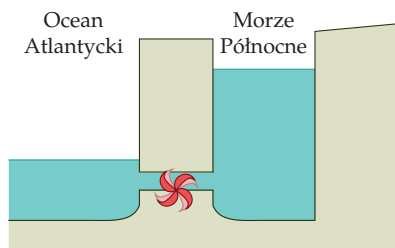
Fot. 14.2 Zbiornik pływowy Woodbridge i młyn pływowy. Fotografie dzięki uprzejmości Teda Evansa



Rys. 14.3. Sztuczny zbiornik pływowy. Zbiornik został napełniony przy wysokim stanie wody, a teraz stan jest niski. Wypuszczamy wodę przez turbiny zamieniając energię potencjalną wody w elektryczność.

Wysokość pływów	Gęstość mocy
2 m	1 W/m^2
4 m	3 W/m^2
6 m	7 W/m^2
8 m	13 W/m^2

Tabela 14.4. Gęstość mocy (moc na jednostkę powierzchni) zbiorników pływowych, przy założeniu wytwarzania prądu zarówno podczas przyprływu, jak i odprływu.



ne przemieszcza się zgodnie z ruchem wskazówek zegara przez Wick do Berwick i Hull z prędkością około 100 km/h. Te dwie fale spotykają się w ujściu Tamizy. Przez przypadek grzbiet z Morza Północnego jest opóźniony o około 12 godzin względem grzbietu z kanału La Manche, grzbiety przypływów nakładają się więc na siebie, a Londyn doświadcza typowego nadejścia dwóch pływów dziennie.

Moc, którą ewentualnie pozyskamy, nigdy nie będzie większa od całkowitej mocy fal pływowych u brzegów Wielkiej Brytanii. Moc pływów, przekraczająca linie wyróżnione na rysunku 14.6, została już obliczona i średnio wynosi 100 kWh dziennie na osobę. Jeśli wyobrazimy sobie przechwycenie 10% tej energii, a następnie wykonanie jej konwersji w elektryczność i transmisji z 50% efektywnością, to średnia dostarczana moc wyniesie **5 kWh dziennie na osobę**.

To jedynie pierwsze orientacyjne obliczenie, przeprowadzone bez precyzowania jakichkolwiek szczegółów technicznych. Teraz oszacujemy moc, która może zostać dostarczona z wykorzystaniem trzech konkretnych rozwiązań: farm strumieni pływowych, zapór i przybrzeżnych lagun pływowych.

Farmy strumieni pływowych

Jednym ze sposobów pozyskiwania energii pływów jest budowa farm pływowych, podobnych do farm wiatrowych. Pierwszym takim podwodnym „wiatrakiem” lub generatorem „strumienia pływowego”, podłączonym do sieci, był „300 kW” zainstalowany w 2003 roku obok norweskiego miasta Hammerfest. Szczegółowe dane o produkcji energii nie zostały opublikowane, nikt też nie zbudował farmy pływowej z więcej niż 1 turbiną, więc aby przewidzieć, ile energii da się w ten sposób wytworzyć, będziemy musieli polegać na prawach fizyki i domysłach.

Zakładając, że zasady budowy rozsądnie pomyślanej farmy strumieni pływowych są podobne do tych dla farm wiatrowych oraz że wydajność turbin będzie podobna do najlepszych turbin elektrowni wiatrowych, możemy wykonać tabelę pokazującą gęstość mocy farmy pływowej w funkcji prędkości przepływu wody (tabela 14.7).

Rys. 14.5. Wyspy Brytyjskie znajdują się w szczęśliwym położeniu: Morze Północne tworzy naturalny basen pływowy, do i z którego dwa razy dziennie płyną olbrzymie ilości wody.



Rys. 14.6. Średnia dopływająca moc kszycowych fal pływowych, przekraczających dwie zaznaczone linie, wynosi 250 GW. Ta moc, rozdzielona na 60 milionów osób, daje 100 kWh dziennie na osobę.

Przyjmując, że prędkość prądu wody na poziomie 2–3 węzłów jest często spotykana, to jest wiele miejsc wokół Wysp Brytyjskich, gdzie możliwe jest osiągnięcie mocy 6 W/m^2 lub większej. Ta moc na jednostkę powierzchni może być porównana z obliczeniami dla farm wiatrowych ($2\text{--}3 \text{ W/m}^2$) i dla farm paneli słonecznych ($5\text{--}10 \text{ W/m}^2$).

Jak wiele energii można uzyskać, zakładając, że nie będzie przeszkód ekonomicznych w wykorzystaniu mocy pływów we wszystkich dobrych lokalizacjach wokół Wysp Brytyjskich? W rozdziale G podajemy prędkości przepływu w najlepszych obszarach u brzegów Wielkiej Brytanii i szacujemy możliwą do pozyskania energię na **9 kWh dziennie na osobę**.

Zapory

Zapory pływowe to sprawdzona technologia. Słynna zapora w La Rance we Francji, gdzie ośmiometrowe pływy pozostawiają niezapomniane wrażenie, od roku 1966 wytwarza średnią moc 60 MW. Pływowe wahania poziomu w ujściu rzeki Severn również należą do szczególnie dużych. W Cardiff wahania poziomu wody sięgają 11,3 m podczas pływów szczytowych i 5,8 m podczas pływów kwadraturowych. Gdyby zapora została umieszczona w poprzek estuarium pomiędzy Cardiff a Weston-super-Mare, to powstałby zbiornik pływowy o powierzchni 500 km^2 (rys. 14.8). Zauważmy, o ile ten zbiornik byłby większy od ujścia w La Rance. Jaką moc mógłby on dostarczyć, gdybyśmy wpuszczali i wypuszczali wodę w idealnym momencie, wytwarzając energię zarówno podczas przyprływu, jak i cofania się wody? W oparciu o liczby z tabeli 14.4 – gdy różnica poziomów wynosi 11,3 m – średnia moc generowana na zaporze (30 W/m^2) sięgałaby 14,5 GW lub **5,8 kWh/d na osobę**. Gdy różnica poziomów wynosi 5,8 m, średnia moc generowana na zaporze (8 W/m^2) wyniosłaby 3,9 GW lub **1,6 kWh/d na osobę**. Liczby te zakładają, że woda zostałaby wypuszczona do zapory przez turbiny w jednym impulsie podczas przyprływu i szybko wypuszczona w kolejnym podczas odpływu. W praktyce, wpuszczanie i wypuszczanie wody trwałoby kilka godzin, co nieco zmniejszyłoby wytwarzaną moc.

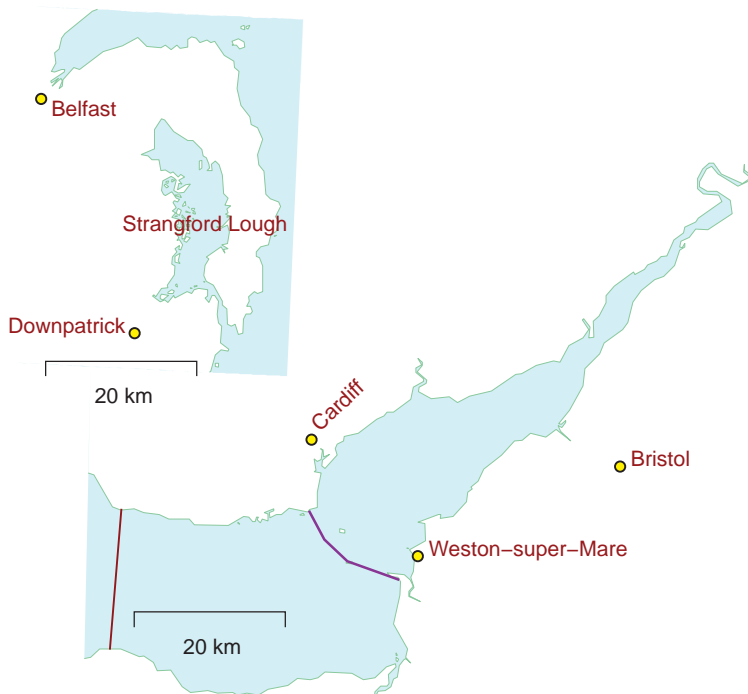
Obecne propozycje konstrukcji zapory zakładają wytwarzanie mocy tylko przy przepływie w jedną stronę. Redukuje to dostarczaną moc o kolejne 50%. Raporty inżynierskie dotyczące zapory Severn mówią, że przy generowaniu mocy jedynie podczas odpływu wytwarzana będzie energia wynosząca średnio **0,8 kWh/d na osobę**. Zapora dawałaby jednocześnie ochronę przed powodziąmi wycenianą na około 120 milionów funtów rocznie.

Laguny pływowe

Laguny pływowe można tworzyć, budując w morzu ściany. Następnie ściany te można wykorzystywać jako sztuczne estuaria. Wymagane warunki do budowy takich lagun to oczywiście płytka woda i duża wysokość pływów. Tutaj działa ekonomia skali: duże laguny pływowe pozwalają wytwarzać elektryczność taniej niż małe. Dwie najlepsze lokalizacje do budowy dużych lagun pływowych to Wash (Morze Północne w pobliżu Anglii Środkowej) i wody w okolicach Blackpool na zachodnim wybrzeżu (rys. 14.9). Mniejsze instalacje mogą być też budowane w północnej Walii, Lincolnshire, południowo-zachodniej Walii oraz wschodnim Sussex.

Prędkość		Gęstość mocy
(m/s)	(węzły)	(W/m^2)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabela 14.7. Gęstość mocy farmy pływowej (w watach na metr kwadratowy powierzchni dna morskiego) w funkcji prędkości przepływu wody. (1 węzeł = 1 mila nautyczna na godzinę = $0,514 \text{ m/s}$).

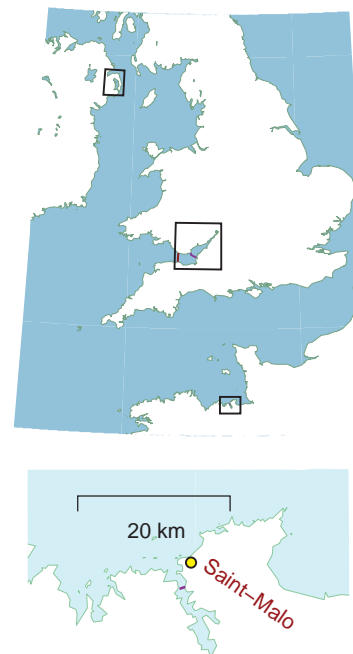


Jeśli dwie laguny zostaną zbudowane obok siebie, można zastosować zręczny trik i zwiększyć generowaną moc, a także wytwarzać ją wtedy, kiedy jest na nią zapotrzebowanie – niezależnie od stanu pływów. Jedną lagunę oznaczmy jako „górną”, a drugą jako „dolną”. W czasie odpływu część energii wytwarzanej dzięki opróżnianiu górnej laguny może być wykorzystywana do wypompowywania wody z „dolnej” laguny, przez co poziom wody w niej będzie nawet niższy niż otaczającej ją w czasie odpływu wody. Energia wymagana do tej operacji jest następnie odbierana z nawiązką podczas odpływu, gdy wytwarzamy moc wpuszczając do tej laguny wodę. Podobnie, dodatkową wodę można, w-pompować w czasie przyływu do górnej laguny, wykorzystując energię generowaną przez wodę wpadającą do dolnej laguny. W ten sposób, niezależnie od stanu wody, jeden i drugi zbiornik będą w stanie wytwarzać energię. Taka para lagun może też funkcjonować jako elektrownia szczytowo-pompowa, magazynująca niewykorzystaną energię z sieci.

Średnia moc na jednostkę powierzchni w lagunach pływowych w wodach Wielkiej Brytanii może wynosić $4,5 \text{ W/m}^2$. Gdybyśmy zatem stworzyli laguny o powierzchni całkowitej 800 km^2 (jak pokazano na rys. 14.9), wytwarzana moc wyniosłaby $1,5 \text{ kWh/d na osobę}$.

Uroki pływów

Składając wszystko razem – farmy strumieni pływowych, zapory i laguny – stwierdzamy, że mogą nam one dostarczyć w sumie $11 \text{ kWh/d na osobę}$ (rys. 14.10).



Rys. 14.8. Propozycje zapory Severn (na dole, z lewej strony) i Strangford Lough w Irlandii

Północnej (na górze, z lewej strony), pokazane zostały w tej samej skali, co zapora w La Rance (na dole z prawej). Mapa ukazuje dwie proponowane lokalizacje dla zapory Severn. Zapora w Weston-super-Mare dostarczyłaby średniej mocy 2 GW ($0,8 \text{ kWh/d}$ na osobę). Zewnętrzna alternatywa dostarczyłaby dwa razy więcej. Znaczące zasoby pływowe dostępne są też w Irlandii Północnej w Strangford Lough. Powierzchnia Strangford Lough wynosi 150 km^2 ; wysokość pływów na Morzu Irlandzkim wynosi $4,5 \text{ m}$ podczas pływów syzygijskich i $1,5 \text{ m}$ podczas pływów kwadraturowych – niestety nie tak wiele jak w La Rance lub Severn. Całkowita moc naturalnego zbiornika pływowego w Strangford Lough to około 150 MW , co po podzieleniu pomiędzy $1,7 \text{ mln}$ mieszkańców Irlandii Północnej daje 2 kWh/d na osobę . Strangford Lough to lokalizacja pierwszego podłączonego do sieci generatora zasilanego energią pływową w Wielkiej Brytanii.

Moc pływów nigdy nie była w Wielkiej Brytanii wykorzystywana na skalę przemysłową, trudno zatem powiedzieć, jakie ekonomiczne i techniczne wyzwania czekają nas, gdy ruszymy z budową i utrzymaniem turbin pływowych – korozja, akumulacja osadów, wplątujące się w turbiny resztki sieci. Dostrzegam jednak wiele zalet rozwoju energii pływowej w Wielkiej Brytanii:

1. Energia pływowa jest w pełni przewidywalna. W odróżnieniu od wiatru czy słońca jest to odnawialne źródło energii, na którym można polegać – pracuje dzień i noc o każdej porze roku, zaś dzięki lagunom pływowym energię można magazynować i kierować do sieci wtedy, kiedy jest na nią zapotrzebowanie.
2. Następujące po sobie przypływy i odpływy wędrują wzdłuż brzegów Wysp Brytyjskich przez mniej więcej 12 godzin, z czego wynika, iż najsilniejsze prądy w Anglesey, Islay, przy Orkadach i Dover występują po sobie w różnych porach. To z kolei oznacza, że elektrownie pływowe mogą przekazywać wspólnie do sieci energię dość równomiernie rozłożoną w czasie, chociaż wielkość wytwarzanej energii będzie wahać się pomiędzy pływami syzygijnymi a kwadraturowymi.
3. Moc pływów będzie dostępna przez wiele milionów lat.
4. Instalacje są relatywnie tanie w przeciwieństwie np. do farm paneli fotowoltaicznych.
5. Ponieważ gęstość mocy pływów jest większa niż typowa gęstość mocy wiatru, turbina pływowa o mocy 1 MW będzie miała mniejsze wymiary niż turbina wiatrowa o mocy 1 MW; być może pozwoli to na tańszą produkcję energii.
6. Podwodny świat jest dość spokojny – nie istnieje coś takiego jak dziki sztorm pływowy. W przeciwieństwie do turbin wiatrowych, które wymagają kosztownych dostosowań inżynierskich do sporadycznych burz, konstrukcja turbin podwodnych nie będzie wymagać uwzględniania znacznego marginesu bezpieczeństwa.
7. Ludzie bytują przeważnie na lądzie i nie widzą tego, co znajduje się pod wodą, więc zarzuty względem psucia krajobrazu nie będą tak silne, jak w przypadku farm wiatrowych.

Wysokość pływów na polskich wybrzeżach Morza Bałtyckiego wynosi kilka centymetrów. To o wiele za mało, aby na poważnie myśleć o wykorzystaniu tego typu energii w Polsce. Przyjmujemy zatem **0 kWh na osobę dziennie**.

Mity

Moc pływów, choć czysta i „zielona”, nie powinna być określana jako odnawialne źródło energii. Pobieranie energii pływów spowalnia ruch obrotowy Ziemi. Definitywnie nie da się wykorzystywać energii pływów przez dłuższy czas.

Falsz. Naturalne pływy już teraz bez przerwy spowalniają ruch obrotowy Ziemi. Straty naturalnej energii ruchu obrotowego wynoszą około 3 TW (Shepherd, 2003). W wyniku działania tego tarcia, w czasie stulecia doba wydłu-



Rys. 14.9. Dwie laguny pływowe, każda o powierzchni 400 km² – jedna u brzegów Blackpool, druga w Wash. Dla porównania pokazano estuarium rzeki Severn.

15 Wytwarzanie rzeczy

W świecie „rozwinętych” jednym z największych pochłaniaczy energii jest wytwarzanie rzeczy. Ich cykl życiowy składa się zazwyczaj z trzech faz. Najpierw świeżo wyprodukowany przedmiot jest eksponowany w błyszczącym opakowaniu na sklepowej półce. Na tym etapie rzeczy określamy jako „dobra konsumpcyjne”. Kiedy rzecz zostaje kupiona i przyniesiona do domu, przechodzi transformację z „dobra konsumpcyjnego” w „rupieć”. Rupieć towarzyszy swojemu właścicielowi przez miesiące, a nawet lata. W tym czasie jest przeważnie ignorowany przez swojego posiadacza, który całe dni spędza w sklepach na kupowaniu nowych „dóbr konsumpcyjnych”. Ostatecznie rupieć przeistacza się w swą ostateczną postać – staje się śmieciem. Dla niewprawnego oka odróżnienie „śmiecia” od pożądanego „dobra konsumpcyjnego”, którym był wcześniej, może być dość trudne. Tak czy inaczej, na tym etapie byłemu właścicielowi pozostaje już tylko wyrzucić go do śmietnika, uregulować rachunek za wywóz śmieci i o wszystkim zapomnieć.

Powiedzmy, że chcemy zrozumieć całkowity koszt energetyczny rzeczy, być może z myślą o wytwarzaniu lepszych towarów. Nazywa się to analizą cyklu życia produktu. Standardem jest tutaj podział kosztu energetycznego przedmiotu – czy to suszarki do włosów, czy też liniowca pasażerskiego – na cztery etapy:

Faza S: Przygotowanie surowców. Na tym etapie wykopujemy minerały z ziemi, przetapiamy je, oczyszczamy i modyfikujemy tak, aby przygotować „produkcyjne klocki lego”, na przykład plastik, szkło, metale i ceramikę. Koszt energetyczny tej fazy zawiera również transport surowców do miejsca ich przetwarzania.

Faza P: Produkcja. W tej fazie surowce są przetwarzane w produkty. Fabryka, w której nawijane są zwoje silnika w suszarce do włosów, formowana jest elegancka obudowa, a wszystko razem jest składane w całość, zużywa wiele ciepła i światła. W koszt energetyczny tej fazy należy wliczyć także pakowanie i dalsze transportowanie.

Faza W: Wykorzystywanie. Suszarki do włosów i liniowce pasażerskie podczas użytkowania żłowią energię.

Faza U: Utylizacja. Ten etap wiąże się nie tylko z wydatkowaniem energii na umieszczenie rzeczy w dziurze w ziemi (na wysypisku) lub przetworzeniem rzeczy z powrotem w surowce (recykling), ale również na eliminację związanych z tym zanieczyszczeń.

Aby zrozumieć, jak wiele energii związane jest z cyklem życiowym przedmiotów, oszacujemy koszt energetyczny wszystkich czterech faz i zsumujemy je. Zwykle jedna z tych faz dominuje w całkowitym koszcie energetycznym. Aby otrzymać wiarygodne oszacowanie całkowitego kosztu energetycznego, musimy dokładnie obliczyć jedynie koszt dominującej fazy. Jeśli chcemy przeprojektować rzecz tak, aby zredukować całkowity koszt energetyczny, należy skupić się przede wszystkim na najbardziej energochłonnym etapie, unikając jednocześnie przerzucenia tego kosztu na inne etapy.

Zamiast szacować szczegółowo, jak wiele energii pochłania stała produkcja i transport wszystkich rzeczy, rzućmy okiem na kilka typowych przykładów: opakowania z napojami, komputery, baterie, ulotki, samochody i domy. W tym



Fot. 15.1. Reklama rupieci Selfridges'a

	energia wewnętrzna (kWh/kg)
paliwa kopalne	10
drewno	5
papier	10
szkło	7
plastik PET	30
aluminium	40
stal	6

Tabela 15.2. Szara energia zawarta w materiałach

rozdziale skupimy się na kosztach energetycznych faz S i P. Energię użytą do wyprodukowania rzeczy określa się czasem mianem szarej energii lub energii zawartej w rzeczach.

Opakowania do napojów

Założmy, że lubisz popijać colę. Wypijasz pięć puszek, a aluminiowe opakowania wyrzucasz do kosza. W tym przypadku dominuje zużycie energii w fazie S (pozyskiwanie surowców). Wytwarzanie metali – szczególnie aluminium – jest bardzo energochłonne. Do wytworzenia aluminiowej puszki potrzeba 0,6 kWh, a wypijanie pięciu puszek coli dziennie zużywa energię w tempie **3 kWh/d**.

Dla 500 ml wody w plastikowej butelce PET (ważącej 25 g) szara energia to 0,7 kWh – równie dużo jak dla aluminiowej puszki!

Inne opakowania

Przeciętny Brytyjczyk wyrzuca dziennie 400 g opakowań, głównie po żywności. Szara energia w opakowaniach waha się w granicach 7–20 kWh za kilogram, zależnie, czy jest to szkło, papier, plastik, czy np. metalowa puszka. Przyjmując typową szarą energię na poziomie 10 kWh/d, uzyskujemy „ślad energetyczny” opakowań równy **4 kWh/d**. Część tej energii bywa odzyskiwana przy spalaniu śmieci, co przedyskutujemy w rozdziale 27.

Komputery

Wyprodukowanie komputera osobistego to koszt energetyczny rzędu 1800 kWh. Jeśli zatem kupujesz nowy komputer co dwa lata, odpowiada to zużyciu energii równemu **2,5 kWh/d**.

Baterie

Koszt energetyczny wyprodukowania niklowo-kadmowych akumulatorów AA o masie 25 g, przechowujących 0,001 kWh energii elektrycznej, wynosi 1,4 kWh (fazy S i P). Zakładając, że koszt energetyczny baterii jednorazowych jest zbliżony, to wyrzucenie dwóch baterii AA miesięcznie prowadzi do zużycia około **0,1 kWh/d**. Koszt energetyczny baterii to relatywnie niewielka pozycja na słupek zużycia energii.

Gazety, magazyny i ulotki reklamowe

Licząca 36 stron gazeta, rozdawana za darmo w metrze, waży 90 g. „Cambridge Weekly News” (56 stron) waży 150 g, „The Independent” (56 stron) waży 200 g, liczący 56 stron błyszczący magazyn reklamujący nieruchomości oraz „Cambridgeshire Pride Magazine” (32 strony) waży odpowiednio 100 i 125 g.

Strumień gazetek i ulotek reklamowych płynący do naszych skrzynek zawiera energię. Energii potrzeba zarówno na ich wytworzenie i przetransportowanie. Papier ma w sobie szarą energię równą 10 kWh/kg. Energia związana z typowym dopływem ulotek reklamowych, magazynów i gazet, obejmującym 200 g dziennie (ekwiwalent jednej grubszej gazety), wynosi około **2 kWh/d**.



Aluminium: **3 kWh/d**



Opakowania:
4 kWh/d



Fot. 15.3. Pięć puszek aluminiowych dziennie to 3 kWh/d. Szara energia we wszystkich opakowaniach Brytyjczyka to 4 kWh dziennie.



Fot. 15.4. Wytwarzanie chipów
Fot. ABB

Wyprodukowanie jednego komputera osobistego co dwa lata to koszt energetyczny 2,5 kWh/d.

Recykling papieru pozwala zaoszczędzić mniej więcej połowę energii włożonej w wytwarzanie papieru, spalanie go w spalarni lub kominku domowym również pozwala wykorzystać część zawartej w nim energii.

Większe rzeczy

Największą rzeczą, którą kupuje większość ludzi, jest dom.

W rozdziale H dokładniej szacuję koszt energetyczny wybudowania nowego domu. Zakładając, że każdy dom zastępujemy nowym co 100 lat, szacowany koszt energetyczny wynosi 2,3 kWh/d, a to koszt energetyczny stworzenia jedynie struktury budynku – fundamentów, cegieł, więźby i dachówek (bez mebli, wyposażenia itp.) Przyjmując, że w przeciętnym domu mieszka średnio 2,3 osoby, to przeciętny wydatek energetyczny z tym związany można oszacować na **1 kWh na osobę dziennie**.

A co z samochodem, no i z drogami? Niektórzy z nas posiadają ten pierwszy, jednak le drugie współdzielimy. Energia zawarta w nowym samochodzie wynosi 76 000 kWh, a gdy wymieniamy go co 15 lat, prowadzi to do średniego wydatku energetycznego około **14 kWh/d**. Okazuje się zatem, że samochód to bodaj największy energożerca ze wszystkich posiadanych przez nas rzeczy, nawet gdy w ogóle nim nie jeździmy.

Analiza cyklu życia, którą wykonali Treloar, Love i Crawford, szacuje koszt energetyczny wybudowania betonowej drogi w Australii na 7 600 kWh na metr, a z uwzględnieniem nakładów na jej utrzymanie w ciągu 40 lat koszt ten rośnie do 35 000 kWh na metr. Potraktujmy tę wartość jako punkt odniesienia dla dróg w Wielkiej Brytanii. Długość dróg krajowych (bez autostrad) wynosi tu 45 000 km. Przyjmując nakład energetyczny równy 35 000 kWh na metr drogi w ciągu 40 lat, oznacza to koszt energetyczny na osobę równy **2 Wh/d**.

Transportowanie rzeczy

Jak dotąd starałem się oszacować konsumpcję osobistą. „Jeśli wypijasz pięć puszek Coli, to jest to 3 kWh/d; jeśli kupujesz codziennie gazetę, jest to 2 kWh/d”. Jednak od tego punktu rozważania nie będą już tak związane z działaniami pojedynczej osoby. Aby oszacować energię wymaganą do transportowania rzeczy po kraju i między kontynentami, skorzystałem ze statystyk i podzieliłem łączne wartości dla krajów przez liczbę ludności.

Transport frachtowy mierzy się w tonokilometrach (tkm). Jeśli jedna tona pierogów kornwalijskich jest transportowana na odległość 580 km (rys. 15.5) to mówimy, że zrealizowaliśmy 580 tkm transportu frachtowego. Intensywność energetyczna transportu drogowego w Wielkiej Brytanii wynosi około **1 kWh na tkm**.

Kiedy kontenerowiec na rysunku 15.6 przewozi 50 000 ton ładunku na odległość 10 000 km, realizuje on 500 milionów tkm transportu frachtowego. Intensywność energetyczna transportu frachtowego, zrealizowanego za pomocą takiego kontenerowca, wynosi **0,015 kWh na tkm**. Zauważmy, o ile wydajniejszy jest transport wodny od drogowego. Intensywność energetyczna różnych środków transportu jest pokazana na rysunku 15.8.



Gazety, ulotki,
czasopisma:
2 kWh/d



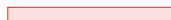
Budowa domów: **1 kWh/d**



Produkcja aut:
14 kWh/d



Budowa dróg: **2 kWh/d**





Fot. 15.5. Kilometry żywnościowe: makarony, zrobione ręcznie w Helston w Kornwalii, przetransportowane do sklepu odległego o 580 km.

Transport drogowy

W roku 2006 całkowita ilość ładunków przetransportowanych w Wielkiej Brytanii ciężarówkami wyniosła 156 miliardów tkm. Dzieliąc tę wielkość pomiędzy 60 milionów mieszkańców, otrzymujemy 7 tkm dziennie na osobę, co oznacza koszt energetyczny **7 kWh na osobę dziennie** (przyjmując intensywność energetyczną równą 1 kWh na tkm). Nawiasem mówiąc, jedna czwarta tych ładunków dotyczyła żywności, napojów i tytoniu.

Transport wodny

W roku 2002 brytyjskie porty przeładowały 560 milionów ton frachtu. Centrum Tyndalla obliczyło, że udział Wielkiej Brytanii w okrętowych przewozach międzynarodowych odpowiada **4 kWh/d na osobę**.

Transport wody i siusianie

Woda może się wydawać mało atrakcyjnym produktem, ale zużywamy jej dość dużo – około 160 litrów na osobę dziennie. Tyle też ścieków wpuszczamy codziennie do kanalizacji. Koszt energetyczny pompowania wody do mieszkań i oczyszczania ścieków to około **0,4 kWh na osobę dziennie**.

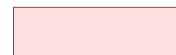
Odsalanie

Dzisiaj Wielka Brytania [tak jak i Polska – red.] nie wykorzystuje energii do odsalania wody. Coraz częściej mówi się jednak o budowie zakładów odsalających w Londynie. Jaki jest koszt energetyczny uzyskiwania wody pitnej z wody morskiej? Najefektywniejsza energetycznie jest tzw. odwrótne osmoza. Bierzymy membranę, która przepuszcza tylko wodę, umieszczamy z jednej strony wodę zasoloną i poddajmy ją działaniu ciśnienia. Woda opornie zaczyna sączyć się przez membranę, dając w rezultacie wodę słodką – opornie, bo woda oddzielona od soli ma niską entropię, a natura preferuje stan o wysokiej entropii, w którym wszystko jest wymieszane. Aby zapewnić separację, musimy zapłacić za to energią wysokiej jakości.



Fot. 15.6. Kontenerowiec Ever Uberty w terminalu kontenerowym Thamesport.
Fot. Ian Boyle: www.simplonpc.co.uk

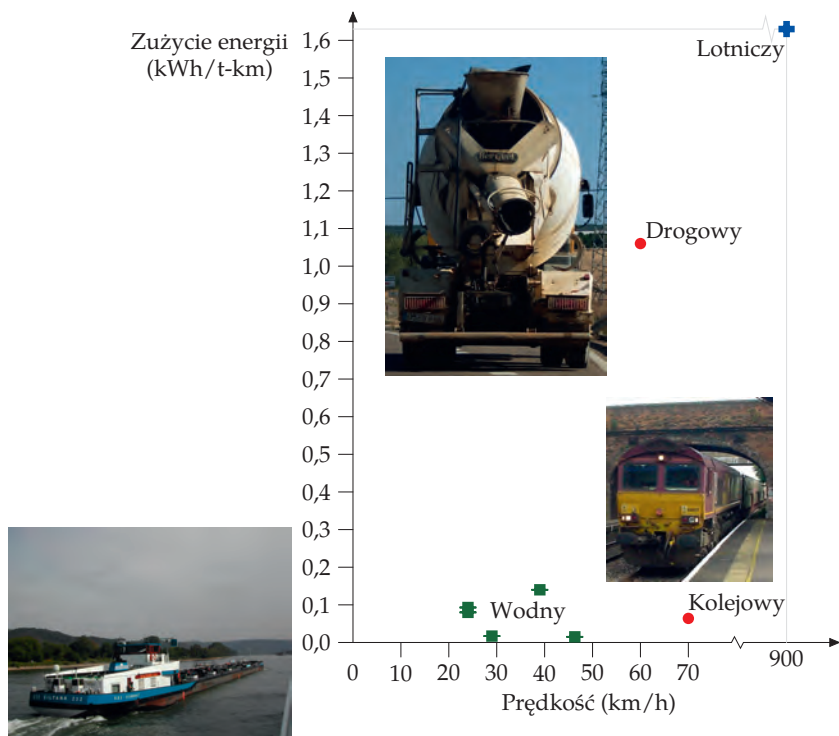
Transport drogowy: **7 kWh/d**



Rys. 15.7. Koszt energetyczny transportu drogowego w Wielkiej Brytanii: 7 kWh/d/o.

Transport morski: **4 kWh/d**





Rys. 15.8. Wymagania energetyczne różnych rodzajów transportu frachtowego. Oś pionowa pokazuje zużycie energii w kWh/tkm (a dokładniej rzecz biorąc, energię na tkm ładunku, bez uwzględnienia masy samego środka transportu). Zobacz też: 20.23. (wymagania energetyczne transportu pasażerskiego).

Transport wodny wymaga energii, gdyż statki wytwarzają fale [których opór trzeba przewyżczać – red.] Tym niemniej, transportowanie ładunków statkiem jest bardzo efektywne energetycznie.



Wyspa Jersey posiada zakład odsalania wody morskiej, który może wytwarzać 6000 m³ czystej wody dziennie (rys. 15.10). Cały proces – z uwzględnieniem pompowania wody z morza i przepuszczenia jej przez serię filtrów – wymaga mocy 2 MW. Oznacza to koszt energetyczny 8 kWh na m³ gotowej wody słodkiej. Przy dziennym zużyciu wody na poziomie 160 litrów odsalanie wody morskiej dla jednej osoby wymaga **1,3 kWh/d**.

Sprzedaż rzeczy

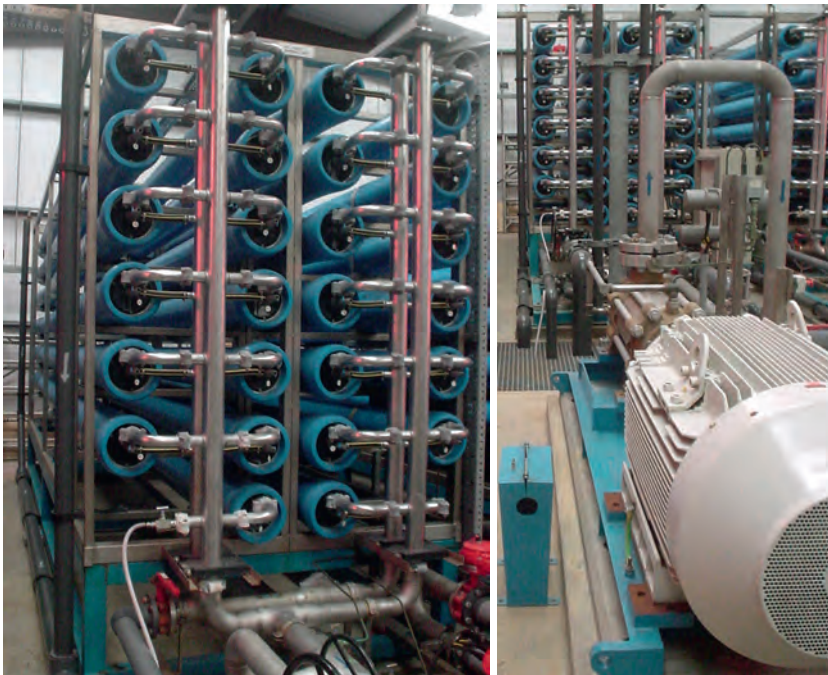
Supermarkety w Wielkiej Brytanii zużywają około 11 TWh energii rocznie. Podzielenie tego przez 60 milionów szczęśliwych konsumentów daje **0,5 kWh na osobę dziennie**.

Znaczenie rzeczy importowanych

W standardowych obliczeniach „brytyjskiego zużycia energii” czy „brytyjskiego śladu węglowego” nie są uwzględniane towary importowane. Wielka Brytania w przeszłości zwykła wytwarzać swoje własne gadżety, a nasz „ślad energetyczny” w 1910 roku był taki, jaki dzisiaj ma Ameryka. Obecnie Wielka Brytania nie wytwarza zbyt wiele (dzięki czemu nasze zużycie energii i emisje węglowe nieco spadły), ale wciąż uwielbiamy gadżety, a te wytwarzają dla nas inne kraje. Czy powinniśmy zignorować koszt energetyczny gadżetu, bo pochodzi z importu? Nie sądzę. Dieter Helm i jego koledzy z Oxfordu szacują, że według poprawnych obliczeń, uwzględniających import i eksport, Wielka Brytania ma „ślad węglowy” prawie dwa razy większy od oficjalnych „11 ton

Dostarczanie
i oczyszczanie wody:
0,4 kWh/d

Rys. 15.9. Dostarczanie wody:
0,3 kWh/d; oczyszczanie ścieków:
0,1 kWh/d



Fot. 15.10. Część instalacji odwróconej osmozy w zakładach odsalania wody na wyspie Jersey. Pompa na pierwszym planie po prawej ma moc 355 kW i pompuje wodę pod ciśnieniem 65 bar do 39 skręconych spiralnie membran w poziomych niebieskich rurach po lewej stronie, dostarczając 1500 m³ czystej wody dziennie. Czysta woda z tego zakładu ma całkowity koszt energetyczny 8 kWh na m³.

Supermarkety:
0,5 kWh/d

CO₂e na osobę” i w rzeczywistości wynosi on około 21 ton. Oznacza to, że importowane towary stanowią największy słupek w zużyciu energii przeciętnego Brytyjczyka.

W rozdziale H przyjrzymy się temu dokładniej, analizując wagę importowanych towarów przypadających na pojedynczego Brytyjczyka. Pomijając nasz import paliw, importujemy nieco ponad 2 tony rzeczy na osobę rocznie, z czego 1,3 tony to przetworzone i wyprodukowane rzeczy takie, jak: pojazdy, maszyny, urządzenia AGD i RTV. Jest to około 4 kg urządzeń na osobę dziennie! Rzeczy te są zwykle wykonane z materiałów, których wytworzenie wymaga co najmniej 10 kWh energii na kilogram. Szacuję więc, że ta sterta samochodów, lodówek, mikrofalówek, komputerów, fotokopiarek i telewizorów zawiera szarą energię równą co najmniej 40 kWh na osobę dziennie.

Aby podsumować te wszystkie rzeczy i rodzaje ich transportu, umieszczę na słupku zużycia energii **48 kWh/d/o** na produkcję przedmiotów (składających się co najmniej z 40 kWh towarów importowanych, 2 kWh na gazety, 2 kWh na budowę dróg, 1 kWh na budowę domów i 3 kWh na opakowania). Do tego dorzucę kolejne **12 kWh/d/o** na transport tego wszystkiego morzem, drogami i rurociągami oraz składowanie w supermarketach.

Pracuj, pracuj, aż pójdziesz kupować.

Tradycyjne powiedzenie

Przypisy i zalecana literatura:

Numer strony:

97 Do wytworzenia aluminiowej puszki potrzeba 0,6 kWh... – masa pojedynczej puszki to 15 gramów. Szacunki energochłonności produkcji aluminium wahają się pomiędzy 60 MJ/kg a 300 MJ/kg. [yx7zm4], [r22oz], [yhrest]. Wartość, której używam, pochodzi z The Aluminum Association [y5as53]: 150 MJ/kg (40 kWh/kg).

– Dla 500 ml wody w plastikowej butelce PET... – Źródło: Hammond i Jones (2006); szara energia PET wynosi 30 kWh/kg.

– Przeciętny Brytyjczyk wyrzuca dziennie 400 g opakowań, głównie po żywności. – W 1995 roku zużycie opakowań w Wielkiej Brytanii wyniosło 137 kg na osobę (Hird et al., 1999).

– Wyprodukowanie komputera osobistego to koszt energetyczny rzędu 1800 kWh. – Wytworzenie komputera osobistego wymaga (w energii i surowcach) 11-krotności jego masy w paliwach kopalnych. Dla lodówki i samochodu masa paliw kopalnych to 1–2 razy masa urządzenia. Williams (2004); Kuehr (2003).

– Koszt energetyczny wyprodukowania niklowo-kadmowych akumulatorów... – Źródło: Rydh i Karlström(2002).

– ... stal... – według Swedish Steel „Zużycie węgla i koks w 700 kg na tonę wyprodukowanej stali, co odpowiada mniej więcej 5 320 kWh na tonę stali. Zużycie ropy, LPG i elektryczności wynosi 710 kWh na tonę stali. Całkowite zużycie energii wynosi więc około 6 000 kWh na każdą tonę stali” (6 kWh/kg). [y2ktgg].

– Papier ma w sobie szarą energię równą 10 kWh/kg. – Produkcja papieru z drzew leśnych ma koszt energetyczny około 5 kWh/kg, a papier sam w sobie zawiera energię zbliżoną do ukrytej w drewnie, około 5 kWh/kg. [Źródło: Ucuncu (1993), Erdinler i Vesilind (1993), patrz str. 284]. Koszt energetyczny może być różny dla różnych papierni i krajów. 5 kWh/kg to wartość dla szwedzkiej papierni z Norström w roku 1973 (1980), która oszacowała, że działania oszczędnościowe mogą zredukować ten koszt do około 3,2 kWh/kg. Nowsza analiza cyklu życia (Denison, 1997) oszacowuje koszt energetyczny netto wytwarzania papieru w USA z drewna leśnego – po którym część papieru trafia na wysypisko, a część jest spalana – na 12 kWh/kg; koszt energetyczny wytwarzania papieru gazetowego z materiału z odzysku z ponownym recyklingiem to 6 kWh/kg.

98 Energia zawarta w nowym samochodzie wynosi 76 000 kWh... – Źródło: Treloar et al. (2004). Burnham et al. (2007) podaje niższą wartość: 30 500 kWh na cykl życia samochodu. Jedną z przyczyn tej różnicy może być uwzględnienie w drugiej analizie recyklingu samochodu, co obniża koszt materiałowy i energetyczny.

– Intensywność energetyczna transportu drogowego w Wielkiej Brytanii wynosi około 1 kWh na tkm.

– Źródło: www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment

– Intensywność energetyczna transportu frachtowego, zrealizowanego za pomocą takiego kontenerowca, wynosi 0,015 kWh na tkm. – Kontenerowiec Ever Uberty (długość 285 m, szerokość 40 m) ma pojemność 4948 standardowych jednostek kontenerowych TEU (20 stóp długości), ładowność 63 000 t, prędkość podróżną 25 węzłów, moc maszyn 44 MW. Większość współczesnych kontenerów ma rozmiar 2 TEU. Kontener o długości 40 stóp waży 4 tony i może pomieścić ładunek o wadze 26 ton. Zakładając, że efektywność silnika okrętowego wynosi 50%, można obliczyć, że zużycie energii wynosi 0,015 kWh energii chemicznej na tkm; por. także: www.mhi.co.jp/en/products/detail/container_ship_ever_uberty.html

99 ... udział Wielkiej Brytanii w okrętowych przewozach międzynarodowych odpowiada 4 kWh/d na osobę. – Źródło: Anderson et al. (2006).

100 Rys. 15.8. Zużycie energii przez statki. Pięć zielonych punktów na wykresie to kontenerowiec (46 km/h), masowiec (24 km/h), tankowiec (29 km/h), statek żegluga śródlądowej (24 km/h) oraz statek z napędem jądrowym NS Savannah (39 km/h).

Masowiec. 0,08 kWh/tkm. Statek o ładowności 5200 m³ ziarna i maksymalnej ma-

Transport rzeczy: 12 kWh/d	Pływy: 11 kWh/d
Rzeczy: 48+ kWh/d	Fale: 4 kWh/d
Żywność, rolnictwo, nawozy: 15 kWh/d	Wiatr, głębokowodne: 32 kWh/d
Gadżety: 5	Wiatr, płytkowodne: 16 kWh/d
Oświetlenie: 4 kWh/d	El. wodne: 1,5 kWh/d
Ogrzewanie, klimatyzacja: 37 kWh/d	Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 24 kWh/d
Podróż samolotem: 30 kWh/d	Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 50 kWh/d
Samochód: 40 kWh/d	PV, 10 m ² /o: 5
	Ogrzewanie słoneczne: 13 kWh/d
	Wiatr: 20 kWh/d

Rys. 15.11. Wytwarzanie naszych przedmiotów kosztuje co najmniej 48 kWh/d. Dostarczanie tych rzeczy to kolejne 12 kWh/d

sie ładunku 3360 ton; może płynąć z prędkością 13 węzłów (24 km/h), jego pojedynczy silnik o mocy 2 MW zużywa 186 g ropy na kWh wytworzonej energii (efektywność 42 %); por. także:

www.conoship.com/uk/vessels/detailed/page7.htm

Tankowiec. Współczesny tankowiec zużywa 0,017 kWh/tkm [6lbrab]; ładowność to 40 000 t, pojemność – 47 000 m³, główny silnik o mocy maksymalnej 11,2 MW; prędkość przy mocy 8,2 MW wynosi 15,5 w (29 km/h); energia zawarta w przewożonym ładunku ropy wynosi 520 milionów kWh, statek zużywa więc 1% energii przewożonej ropy podczas rejsu na dystansie 10 000 km.

Statek Ro-Ro (Roll On/Roll Off). Statki armatora Wilh. Wilhelmsen zapewniają transport frachtowy przy wydatku energetycznym pomiędzy 0,028 i 0,05 kWh/tkm. [5ctx4k].

- 99 **Koszt energetyczny pompowania wody do mieszkań i oczyszczania ścieków to około 0,4 kWh na osobę dziennie.** – Całkowite zużycie energii przez przemysł wodno-kanalizacyjny w Wielkiej Brytanii w latach 2005–2006 wyniosło 7 703 GWh. Dostarczenie 1 m³ wody ma koszt energetyczny 0,59 kWh. Oczyszczenie 1 m³ ścieków wiąże się z kosztem energetycznym 0,63 kWh. Dla osób zainteresowanych emisją gazów cieplarnianych dostawa wody ma „ślad węglowy” 289 g CO₂ na 1 m³ dostarczonej wody, a oczyszczanie wody 406 g CO₂ na 1 m³. Domowe zużycie wody wynosi 151 litrów na osobę dziennie (w Polsce jest podobnie – *red.*); całkowite zużycie wody wynosi 221 l/d/o; straty w wyniku przecieków wynoszą 57 litrów na osobę dziennie. Źródła: Parlamentarne Biuro Nauki i Technologii [www.parliament.uk/documents/upload/postpn282.pdf], Water UK (2006).
- 100 **Supermarkety w Wielkiej Brytanii zużywają około 11 TWh energii rocznie.** [yqbz13].
- Helm i jego koledzy z Oxfordu szacują, że według obliczeń uwzględniających import i eksport Wielka Brytania ma „ślad węglowy” prawie dwa razy większy od oficjalnych „11 ton CO₂e na osobę” i w rzeczywistości wynosi on około 21 ton. – Helm et al. (2007).



16 Geotermia

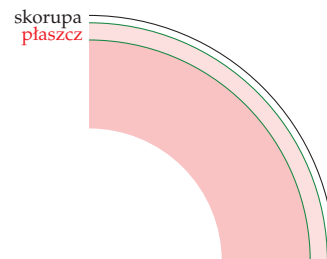
Energia geotermiczna pochodzi z dwóch źródeł: rozpadów radioaktywnych w skorupie ziemskiej oraz ciepła przesączającego się przez płaszcz z jądra Ziemi. Ciepło w jądrze jest pozostałością po powstawaniu Ziemi, która jeszcze do tej pory ochładza się i twardnieje. Ciepło wnętrza Ziemi jest też uzupełniane przez tarcie wywoływane przez siły pływowe: Ziemia odkształca się w reakcji na działanie pól grawitacyjnych Księżyca i Słońca w ten sam sposób, w jaki pomarańcza zmienia kształt, gdy ściskając, obracasz ją w dłoniach.

Geotermia jest atrakcyjnym źródłem energii odnawialnej: jest zawsze dostępna, niezależna od pogody, a wybudowane siłownie geotermiczne można bez trudności włączyć i wyłączać w zależności od zapotrzebowania.

Jaka ilość energii geotermicznej jest dziś dostępna? Możemy oszacować moc geotermiczną w dwóch przypadkach: moc dostępną w przeciętnej lokalizacji na powierzchni skorupy ziemskiej oraz w szczególnie gorących punktach, takich jak Islandia (rys. 16.3). Właściwym miejscem na budowę prototypowych siłowni są, bez wątpienia, owe szczególnie gorące punkty. Zamierzam pokazać, że większe zasoby energii geotermalnej mogą być dostępne w zwykłych lokalizacjach, gdyż są one po prostu liczniejsze.

Trudność w pozyskiwaniu tej energii w sposób *zrównoważony* polega na tym, że przewodzenie ciepła przez skały jest ograniczone. Wskutek tego nie możemy przez dłuższy czas zasysać z gorącego wnętrza ziemi dużych ilości energii. To trochę tak, jakbyśmy próbowali wyciągnąć przez słomkę płyn z pokruszonego lodu – wkładasz do szklanki słomkę, zasysasz i wciągasz do ust przyjemnie chłodny płyn, jednak po chwili ssania stwierdzasz, że teraz zasysasz już samo powietrze. Wyciągnąłeś cały płyn z okolic wlotu słomki i teraz będziesz musiał dość długo czekać, aż roztopi się więcej lodu. Twoje tempo pobierania płynu nie było zatem zrównoważone.

Jeśli zrobimy odwiert o głębokości 15 km, stwierdzimy, że jest tam bardzo ciepło, na tyle ciepło, żeby zagotować wodę. Możemy następnie wpuścić do otworu dwie rury, by do jednej z nich pompować zimną wodę, a przez drugą zasysać parę, która z kolei napędzi elektrownię. Czyżby to właśnie było źródło nieograniczonej mocy? Niezupełnie, bo po jakimś czasie odbieranie ciepła skałom spowoduje spadek ich temperatury. Nie wykorzystaliśmy energii w sposób zrównoważony i teraz będziemy musieli długo czekać, zanim skały na dnie otworu znowu się nagrzeją. Powinniśmy więc podejść do problemu wykorzystywania energii geotermalnej tak jak do paliw kopalnych i potraktować ją raczej jako zasób do krótkoterminowej eksploatacji niż jako sposób na zrównoważone pozyskiwanie energii. Oparcie się na eksploatowanych w sposób niezrównoważony zasobach geotermicznych mogłoby jednak okazać się lepsze dla planety niż niezrównoważona eksploatacja paliw kopalnych. Być może byłby to wówczas półśrodek dający nam kolejne 100 lat niezrównoważonego rozwoju. W tej książce skupiam się na zrównoważonym pozyskiwaniu energii odnawialnej, jak zresztą mówi sam tytuł. Wykonajmy pewne obliczenia.



Rys. 16.1. Ziemia w przekroju



Fot. 16.2. Granit



Fot. 16.3. Energia geotermiczna w Islandii. Średnia wytwarzana moc przez elektrownie geotermiczne w Islandii (której populacja wynosi 300 000) wynosiła w roku 2006 300 MW (24 kWh/d na osobę). Ponad połowa wytwarzanej tam elektryczności jest zużywana na produkcję aluminium.
Fot. Gretar Ívarsson

Zrównoważona na zawsze energia geotermiczna

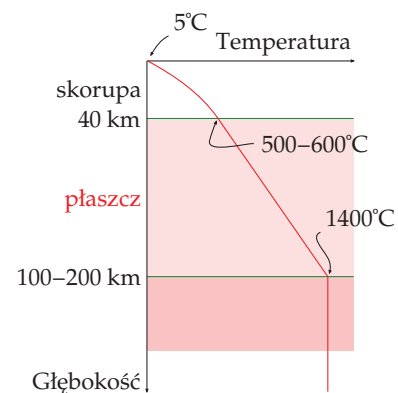
Rozważmy najpierw zrównoważone wykorzystanie energii geotermicznej, eksploatowanej poprzez wpuszczanie na odpowiednią głębokość rur i następnie powolne zasysanie. Jest ono na tyle powolne, że skały na dnie otworu nie ochładzają się, co oznacza pozyskiwanie energii na poziomie odpowiadającym naturalnemu przepływowi ciepła z wnętrza Ziemi.

Jak już wspomniałem, energia geotermiczna pochodzi z dwóch źródeł (rozpadów radioaktywnych w skorupie ziemskiej oraz ciepła przenikającego przez płaszcz z jądra Ziemi). Na typowej płycie kontynentalnej ciepło docierające przez płaszcz wynosi około $0,01 \text{ W/m}^2$. Przepływ ciepła na powierzchni wynosi $0,05 \text{ W/m}^2$, gdzie dodatkowe $0,04 \text{ W/m}^2$ pochodzi z rozpadu substancji radioaktywnych w skorupie ziemskiej.

Typowa lokalizacja dostarcza nam zatem maksymalną moc $0,05 \text{ W/m}^2$, przy czym nie jest to energia wysokiej jakości – jest to ciepło, czyli energia niższej klasy. My chcemy jednak wytwarzać elektryczność, co wiąże się z odwiertami na duże, głębokości, gdzie temperatura jest odpowiednio wysoka. Ciepło może bowiem służyć do wytwarzania prądu tylko wtedy, gdy źródło ma wyższą temperaturę od naszego otoczenia. Temperatura rośnie wraz z głębokością (jak pokazuje to rys. 16.4) i na 40 km osiąga $500\text{--}600^\circ\text{C}$. Pomiedzy głębokością 0 km, gdzie przepływ energii jest największy, lecz temperatura skał zbyt niska, a głębokością 40 km, gdzie temperatura jest wysoka, lecz przepływ energii 5 razy mniejszy (bo tracimy całe ciepło wytwarzane przez pierwiastki promieniotwórcze w skorupie ziemskiej), znajduje się nasza optymalna głębokość, z której powinniśmy pobierać energię.

Dokładna optymalna głębokość zależy od konkretnego sposobu wykorzystania energii i urządzeń, które zamierzamy zastosować w naszej elektrowni. Na razie oszacujmy możliwą do zrównoważonego pobierania moc maksymalną, dobierając głębokość przy założeniu, iż posiadamy idealną – pracującą z możliwie najwyższą termodynamicznie wydajnością – maszynę do zamiany

Jeden miliwat (1 mW) to 0,001 W



Rys. 16.4. Profil temperatur na typowym kontynencie

ciepła w elektryczność oraz że możemy mieć za darmo odwiert na dowolną głębokość.

Obliczyłem, że dla profilu temperatur pokazanego na rys. 16.4 optymalna głębokość wynosi 15 km. W tych warunkach idealna instalacja wytworzy 17 mW/m². Przy światowej gęstości zaludnienia na poziomie 43 osób na kilometr kwadratowy daje to 10 kWh na osobę dziennie, gdyby wykorzystać *wszystkie* tereny lądowe. W Wielkiej Brytanii, gdzie gęstość zaludnienia jest 5 razy wyższa, rozbudowa zrównoważonych siłowni geotermicznych na szeroką skalę pozwoliłaby pozyskać maksymalnie **2 kWh na osobę dziennie**.

Jest to wartość pozwalająca na bezterminową zrównoważoną eksploatację ciepła z wnętrza Ziemi. Pamiętajmy, że obliczenia ignorują gorące punkty, zakładają istnienie doskonałych instalacji, przyjmują wykorzystanie każdego metra kwadratowego terenu i prowadzonych za darmo odwiertów, a także, iż można wiercić dziury o głębokości 15 km.

Energia geotermiczna jako zasób nieodnawialny

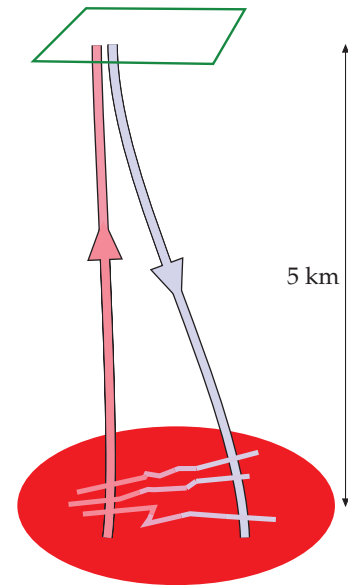
Inną strategią wykorzystania energii geotermicznej jest potraktowanie ciepła jako zasobu do eksploatacji niezrównoważonej, zalegającego w pokładach gorących suchych skał, zwanych niekiedy HDR (Hot Dry Rock). Są to położone na dużej głębokości (minimum 5 000 metrów) skały nieprzepuszczające wody (przede wszystkim granity) i przykryte skałami o słabym przewodnictwie ciepła. W „ulepszonej ekstrakcji geotermicznej” (rys. 16.5) wykonujemy najpierw odwiert o głębokości 5–10 km, a następnie, wpompowując do niego wodę, hydraulicznie kruszymy skały. Później do popękanej strefy przewiercamy się drugi raz. Teraz możemy już uruchomić proces: wpompowujemy wodę w jeden z odwiertów, a z drugiego odbieramy rozgrzaną parę wodną, którą możemy wykorzystać do produkcji elektryczności lub ogrzewania. Jak duże są zasoby HDR w Wielkiej Brytanii? Niestety, Wielka Brytania nie jest w nie szczególnie zasobna. Większość takich pokładów jest zlokalizowana w Kornwalii, gdzie w latach 80. XX wieku były prowadzone eksperymenty w zamkniętym obecnie ośrodku badawczym Rosemanowes. Konsultanci analizujący wyniki badań doszli do wniosku, że „wytworzenie energii elektrycznej z gorących suchych skał nie wydaje się być technicznie lub gospodarczo opłacalne, ani w Kornwalii, ani gdziekolwiek indziej w Wielkiej Brytanii, przynajmniej w krótkim i średnim horyzoncie czasowym”. A jakie są dokładne liczby? Najbardziej optymistyczne szacunki gorących suchych skał w Wielkiej Brytanii mówią o energii 130 000 TWh, co mogłoby dać **1,1 kWh energii elektrycznej na osobę dziennie** przez około 800 lat.

Inne miejsca na świecie mają bardziej obiecujące zasoby ciepła zgromadzonego w HDR, jednak w Wielkiej Brytanii geotermia pełnić będzie rolę co najwyżej marginalną.

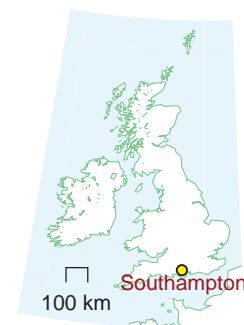
Czyż Southampton już dziś nie wykorzystuje energii geotermicznej?

Jak wiele jej jest?

System Ogrzewania Rejonowego w Southampton jest jedyną tego typu instalacją grzewczą w Wielkiej Brytanii. Dostarcza miastu ciepła grzewczego oraz ciepłej i zimnej wody, a także elektryczności do sieci. Wkład energii geotermicznej to około 15% z całości 70 GWh rozprowadzanej przez system ciepła.



Rys. 16.5. Ulepszona ekstrakcja geotermiczna ciepła z gorących suchych skał. Jeden odwiert jest wiercony i poddawany działaniu ciśnienia, które tworzy w skałe pęknięcia. Drugi odwiert jest wykonywany po drugiej stronie pokruszonej strefy. Następnie w jeden odwiert wpompowujemy zimną wodę, a z drugiego odbieramy gorącą parę.



Według ostatniego spisu Southampton ma 217 445 mieszkańców, tak więc dostarczana moc geotermiczna w tym przypadku wynosi **0,13 kWh/d na osobę**.

Polska ma dość dobre warunki geotermiczne. Problem w tym, że nie wiemy, jak dobre. Rozbieżności są zaskakujące.

Według materiałów Ministerstwa Środowiska potencjał eksploatacyjny wód geotermalnych na samym Niżu Polskim wynosi od 66 do 250 PJ/rok, czyli 1,5 – 5 kWh/d/o.

Z kolei opracowanie PAN mówi o 1 512 PJ/rok (30 kWh/o/d). To mniej więcej tyle, co w Pyrzycach, gdzie wody geotermalne dają 109 GWh/rok, czyli (przy 13 000 mieszkańców Pyrzyc) 23 kWh/d/o. W porównaniu z Southampton wychodzi rewelacyjnie.

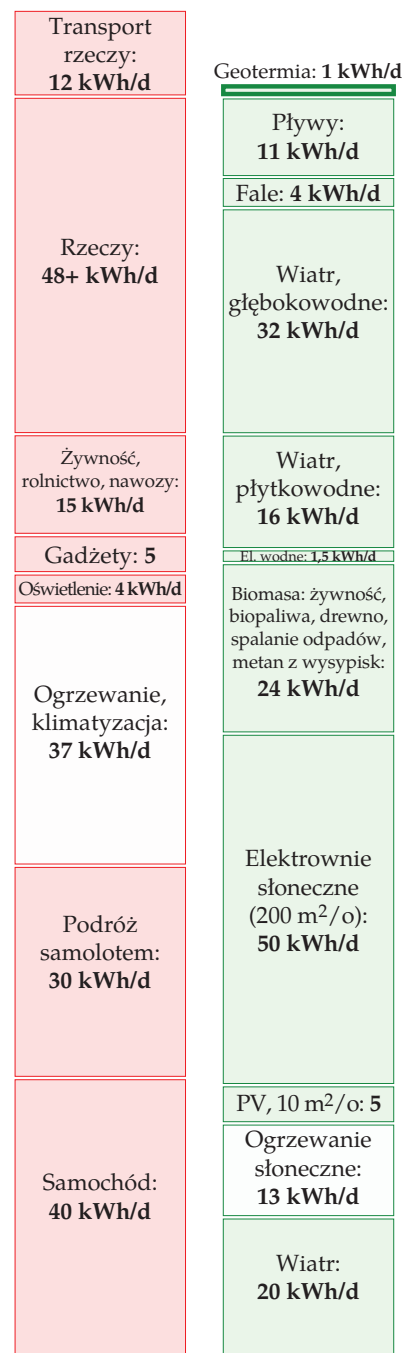
Ale to jeszcze nie wszystko. Według profesora Jacka Zimnego z AGH Kraków, Przewodniczącego Polskiej Geotermalnej Asocjacji: „Potencjał techniczny geotermii (25% szacunkowego potencjału) – wynosi 625 000 PJ/rok” [12 500 kWh/d/o – red.] Większość naukowców uważa jednak, że to zdecydowanie zawyżone, czysto teoretyczne i praktycznie nieosiągalne wartości, nieuwzględniające ograniczeń technicznych oraz braku możliwości wykorzystania ciepła o niskiej temperaturze poza rejonami dość ścisłej zabudowy, gdzie może być wykorzystane do ogrzewania za pomocą sieci ciepłowniczej.

Jaką wartość przyjąć? Przyjmijmy **20 kWh dziennie na osobę**, czyli trochę mniej niż w Pyrzycach. Ktoś powie, że powinno być 10 razy mniej, ktoś inny, że powinno być 10 razy więcej. W tym punkcie mamy największą niepewność – w zasadzie możemy tylko postulować dokładniejsze zbadanie zasobów geotermicznych Polski zarówno pod kątem wód geotermalnych, jak i możliwości eksploatacji gorących suchych skał, które według badań MIT mogą stać się czarnym koniem w wyścigu do nowych źródeł energii (patrz: przypisy).

Przypisy i zalecana literatura:

Numer strony:

- 105 Przepływ ciepła na powierzchni wynosi $0,05 \text{ W/m}^2 \dots$ – MIT (2006) mówi o $0,059 \text{ W/m}^2$ średnio, w przedziale w USA od $0,025 \text{ W}$ do $0,15 \text{ W}$. Shepherd (2003) daje oszacowanie $0,063 \text{ W/m}^2$.
- 106 ...wytwarzanie energii elektrycznej z gorących suchych skał nie wydaje się być technicznie lub gospodarczo opłacalne, ani w Kornwalii, ani gdziekolwiek indziej w Wielkiej Brytanii... – Źródło: MacDonald et al. (1992); patrz też: Richards et al. (1994).
- Najbardziej optymistyczne szacunki gorących suchych skał w Wielkiej Brytanii mówią o energii 130 000 TWh, co mogłoby dać **1,1 kWh energii elektrycznej na osobę dziennie przez około 800 lat**. – Źródło: MacDonald et al. (1992).
 - Inne miejsca na świecie mają bardziej obiecujące zasoby ciepła zgromadzonego w HDR... – pod adresem: http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf dostępny jest raport MIT z 2006 roku, przedstawiający zasoby HDR w USA. MIT szacuje całkowite zasoby energii w warstwie 3–10 km na 3,6 mld TWh (140 tysięcy razy więcej niż wynosi roczne zużycie energii w USA), z czego 50 mln TWh możliwe do pozyskania (a przy odpowiednim rozwoju technologii do 500 mln TWh). We-



Rys. 16.6. Geotermia

dług raportu, przy nakładach na badania i rozwój na poziomie 1 mld USD (co odpowiada cenie jednej elektrowni węglowej), istnieją realne możliwości zainstalowania do roku 2050 elektrowni o mocy 100 GW. W dłuższym horyzoncie czasowym dostępna dla współczesnej technologii moc to nawet 1200–12 200 GW (dla założeń odpowiednio konserwatywnych i umiarkowanych). Dla porównania, całkowita moc elektrowni w USA w roku 2005 wynosiła 1075 GW.

Inny raport dotyczy teoretycznie możliwej do zastosowania technologii pozyskiwania energii bezpośrednio z magmy o temperaturze 600–1300 °C. Magma występuje na głębokości poniżej 15 km. Raport ów, przygotowany jeszcze w latach 70. XX w przez naukowców z Sandia National Laboratories (www.magma-power.com) szacuje, że technologia „magma power” pozwoliłaby na zaspokojenie potrzeb energetycznych przez 500 do 5000 lat, przy zachowaniu opłacalności ekonomicznej przedsięwzięcia.

- System Ogrzewania Rejonowego w Southampton... – www.southampton.gov.uk
- 107 Według materiałów Ministerstwa Środowiska potencjał eksploatacyjny wód geotermalnych na samym Niżu Polskim wynosi od 66 do 250 PJ/rok, czyli 1,5–5 kWh/d/o. – Źródło:
http://www.mos.gov.pl/g2/big/2009_04/5ed3a02647511fc576ec7bbfe8efcfefeb.pdf, str. 16.
- PAN mówi o 1512 PJ/rok (30 kWh/o/d).
– Źródło: http://www.paze.pfr.pl/pliki/Wykorzystanie_energii_geotermalnej.pdf, str. 5.
- Według profesora Jacka Zimnego z AGH Kraków [...] „Potencjał techniczny geotermii (25% szacunkowego potencjału) – wynosi 625 000 PJ/rok”. [12 500 kWh/d/o – red.]. – Źródło:
http://pga.org.pl/biblioteka/artykuly/Polska_moze_byc_samowystarczalna_energetycznie.pdf

17 Usługi publiczne

Każdy zrobiony karabin, każdy zwodowany okręt wojenny, każda wystrzelona rakietą oznaczają, w ostatecznym rozrachunku, akt rabunku wobec tych, którzy głodują i nie mają co jeść, wobec tych, którzy marzną i nie mają co na siebie włożyć.

Ten świat stojący z karabinem u nogi nie wydaje na zbrojenia po prostu pieniędzy. Wydatkuje też pot swoich robotników, geniusz swoich naukowców i nadzieje swoich dzieci.

Prezydent Stanów Zjednoczonych Dwight D. Eisenhower – kwiecień, 1953



Koszt energetyczny „obrony”

Spróbujmy oszacować, jak wiele energii wydajemy na wojsko.

W roku podatkowym 2007–2008, rząd brytyjski przeznaczył na wydatki zbrojeniowe 33 miliardy funtów, czyli 5,6 procent liczącego 587 miliardów funtów budżetu. Jeśli dopiszemy do tego wydatki Wielkiej Brytanii na wywiad i przeciwdziałanie terroryzmowi (suma 2,5 miliarda i wciąż rośnie), to wydatki na obronę wyniosły 36 miliardów funtów.

W przybliżeniu możemy stwierdzić również, że 6% z kwoty 36 miliardów funtów to wydatki na energię (6 procent PKB jest wydawane na energię) po cenie 2,7 pенса za 1 kWh. Daje to 80 TWh energii zużywanej rocznie na cele zbrojeniowe: wytwarzanie kul, bomb, broni atomowej, produkcję urządzeń do ich przenoszenia oraz na przygotowania do następnej gry „dobrzy przeciw złym”. W naszych ulubionych jednostkach przekłada się to na **4 kWh/d/o**.



Koszt broni nuklearnej

W latach 1945–1996 wydatki USA na produkcję i utrzymanie broni nuklearnej wyniosły 55 000 miliardów dolarów [słownie: pięćdziesiąt pięć bilionów dolarów – red.] (w przeliczeniu na wartość dolara z roku 1996).

Wydatki te przekroczyły łączne wydatki federalne na edukację, rolnictwo, szkolenia, zatrudnienie, usługi społeczne, zasoby naturalne i środowisko, naukę i technologię, programy kosmiczne, rozwój społeczny i regionalny (w tym pomoc w katastrofach), sądownictwo, wytwarzanie energii oraz regulacje.

Jeśli ponownie przyjmujemy, że 6 procent tych wydatków poszło na energię, po cenie 5 centów za kilowatogodzinę, to obliczymy w ten sposób, iż średni koszt posiadania broni nuklearnej przypadający na Amerykanina to 26 000 kWh lub **1,4 kWh dziennie** (podzielone na 250 milionów Amerykanów w ciągu 51 lat).

Jaka energia zostałaaby dostarczona do szczęśliwych odbiorców, gdyby te wszystkie głowice nuklearne zostały nagle użyte? Energię najpotężniejszych bomb termojądrowych wykonanych w USA i byłym Związku Radzieckim mierzymy w megatonach (MT), czyli milionach ton równoważnika trotylu (TNT). Tona trotylu ma energię 1200 kWh. Bomba, która zniszczyła Hiroszimę, miała energię 15 000 ton TNT (18 milionów kWh). Bomba o mocy 1 MT „dostarcza” energii 1,2 miliarda kWh. Gdyby została zrzucona na miasto zamieszkałe przez milion ludzi, dostarczyłaby 1200 kWh na osobę, co odpowiada energii 120 litrów

benzyny na osobę. Całkowita energia arsenału jądrowego USA wynoszącego 10 000 głowic nuklearnych to 2400 MT. W starych dobrych czasach, kiedy kwestie obronności traktowano naprawdę serio, energia arsenału jądrowego wynosiła 20 000 MT. Bomby te, gdyby zostały użyte, dostarczyłyby każdemu Amerykaninowi 100 000 kWh energii. To ekwiwalent 7 kWh na osobę dziennie przez 40 lat, a więc wynik porównywalny z energią elektryczną dostarczaną przez elektrownie jądrowe.

Koszt energetyczny wytwarzania materiałów do bomb jądrowych

Głównym materiałem jądrowym jest pluton i wysoko wzbogacony uran (do dziś USA wyprodukowało 104 tony plutonu i 994 tony uranu). Oczywiście, ich wytworzenie wymagało energii.

Najbardziej efektywne zakłady jądrowe zużywają 24 000 kWh ciepła przy produkcji 1 grama plutonu. Bezpośredni koszt wytworzenia przez USA 104 ton plutonu w okresie 1945–1996 wynosi zatem co najmniej 2500 miliardów kWh energii. Po podzieleniu tej liczby pomiędzy 250 milionów Amerykanów otrzymujemy około 0,5 kWh na osobę dziennie.

Główny koszt energetyczny wytworzenia wzbogaconego uranu jest ponoszony właśnie podczas procesu wzbogacania, w którym atomy izotopu ^{235}U są oddzielane od atomów izotopu ^{238}U , znacznie liczniej występujących w uranie naturalnym. Wytworzenie przez USA w latach 1945–1996 wzbogaconego uranu o masie 994 ton wiązało się z kosztem energetycznym około 0,1 kWh na Amerykanina dziennie.

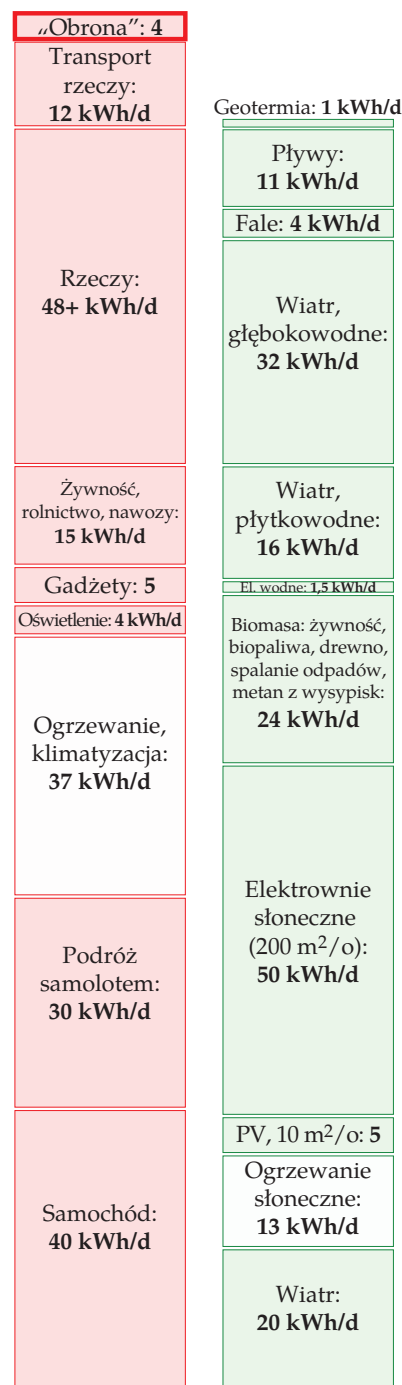
„Budowa pocisków balistycznych Trident tworzy miejsca pracy”. Tak, to prawda, podobnie jak wykładanie szkół azbestem, ale to jeszcze nie powód, żebyśmy to robili!

Marcus Brigstocke

Uniwersytety

Według *Times Higher Education Supplement* (30 marca 2007) uniwersytety w Wielkiej Brytanii zużywają 5,2 miliarda kWh rocznie. Po podzieleniu przez liczbę ludności otrzymujemy **0,24 kWh na osobę dziennie**. Kształcenie wyższe i badania wydają się zatem pochłaniać znacznie mniejszy koszt energetyczny niż wydatki na wojsko.

Mogą być też jeszcze inne energochłonne usługi publiczne, o których wypadałoby wspomnieć, jednak w tym miejscu zamierzam podsumować nasz wyścig pomiędzy czerwonymi i zielonymi słupkami.



Rys. 17.1. Energetyczny koszt wydatków na obronę w Wielkiej Brytanii oszacowany na 4 kWh na osobę dziennie

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

109 ... jak wiele energii wydajemy na wojsko. – Budżet Wielkiej Brytanii można znaleźć w [yrtg7p]; na obronę przypada 33,4 miliardy funtów [fcqfw], a na wywiad i przeciwdziałanie terroryzmowi – 2,5 miliarda rocznie [2e4fcs]. Według rządowego planu wydatków budżetowych (str. 14) na rok 2007–2008 [33x5kc] „całkowity budżet” Departamentu Obrony jest większy i wynosi 39 miliardów funtów, z czego 33,5 miliarda funtów idzie na „zapewnienie zdolności obronnej”, a 6 miliardów funtów na pensje, emerytury i renty. Rozbicie budżetu można znaleźć w [35ab2c]. Zobacz też: [yg5fsj], [yfgjna] oraz www.conscienceonline.org.uk.

Wydatki energetyczne USA na wojsko zostały opublikowane: „Departament Obrony jest największym pojedynczym konsumentem energii w USA. W roku 2006 wydał 13,6 miliarda dolarów na zakup 110 milionów baryłek ropy [w przybliżeniu 190 miliardów kWh – red.] i 3,8 miliardów kWh elektryczności” (Departament Obrony USA, 2008).

Liczba ta pokazuje bezpośrednie zużycie paliwa i elektryczności i nie uwzględnia szarej energii w sprzęcie wojskowym. Po podzieleniu przez obecną populację USA wynoszącą 300 milionów ludzi, daje to **1,7 kWh/d na osobę**.

– W latach 1945 – 1996 wydatki USA na produkcję i utrzymanie broni nuklearnej wyniosły 55 000 miliardów dolarów [słownie: pięćdziesiąt pięć tysięcy miliardów dolarów – red.] (w przeliczeniu na wartość dolara z roku 1996). – Źródło: Schwartz (1998).

110 Koszt energetyczny wytwarzania plutonu. [slbae].



18 Czy możemy żyć na energii odnawialnej?

Czerwony słupek na rys. 18.1 sumuje się do **195 kWh na osobę dziennie**. Zielony słupek sumuje się do blisko **180 kWh na osobę dziennie**.

Dla Polski otrzymaliśmy bardzo dobrą wartość. Warto zauważyć, że ten zbliżony wynik możliwości wytwarzania energii odnawialnej w Polsce i Wielkiej Brytanii został osiągnięty w dość zróżnicowany sposób.

Biorąc pod uwagę, że na Polaka przypada dwukrotnie większa powierzchnia kraju, trzeba przyznać, że Wielka Brytania rzeczywiście ma szczególnie dobre warunki dla rozwoju energetyki odnawialnej.

Bardzo wyrównany wyścig! Pamiętajcie jednak: szacując nasze możliwości wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, zignorowaliśmy kwestie opłacalności ekonomicznej, czynniki społeczne i środowiskowe. Ponadto niektóre z naszych zielonych źródeł energii wchodziłyby sobie w drogę. Wytwarzające prąd panele fotowoltaiczne i ogrzewające wodę panele fototermiczne nie zmieszczą się przecież razem na dachu, zaś farmy fotowoltaiczne zajmujące 5% [dla Polski 2,5% – red.] powierzchni kraju, mogą konkurować o tereny z uprawami energetycznymi zajmującymi 75% [dla Polski 60% – red.] powierzchni. Jeśli stracimy choć jedno ze znaczących źródeł zielonej energii – na przykład zdecydujemy, że głębokowodne elektrownie wiatrowe nie są dla nas dobrą opcją albo że zbudowanie wytwarzających elektryczność farm paneli słonecznych w cenie 200 000 funtów [milion złotych – red.] na osobę jest nieopłacalne – okaże się, że nasz słupek możliwości wytwarzania energii nie będzie w stanie dorównać słupkowi zapotrzebowania.

Co więcej, nawet jeśli nasz czerwony słupek zużycia będzie niższy od zielonego słupka produkcji energii, nie musi to koniecznie oznaczać, że wszystko jest OK i energii na pewno nam wystarczy. Nie możemy przecież zasilać telewizora jedzeniem dla kotów, ani utrzymać kota przy życiu, traktując go prądem z turbiny wiatrowej... Energia może istnieć w różnych formach – chemicznej, elektrycznej, kinetycznej lub, na przykład, cieplnej. Aby nasz plan stworzenia zrównoważonego zaopatrzenia w energię miał szanse powodzenia, konieczne jest, by z potrzebami sumowała się nie tylko ilość energii, ale i jej postać. Zamiana jednej postaci energii na inną – z chemicznej na elektryczną (jak w przypadku elektrowni na paliwa kopalne) lub z elektrycznej w chemiczną (jak np. w fabryce pozyskującej wodór z wody) prowadzi zwykle do znacznych strat energii. Do tej ważnej kwestii powrócimy jeszcze w rozdziale 27. Przedstawia on kilka planów energetycznych, które mogą zaspokoić nasze potrzeby.

Tutaj dokonamy podsumowania naszych dotychczasowych szacunków zużycia i produkcji energii, porównamy je z oficjalnymi statystykami i z oszacowaniami innych osób, zastanowimy się również, jak dużo energii odnawialnej możemy faktycznie wyprodukować w kraju takim jak Wielka Brytania.

Oto pytania, na które postaramy się odpowiedzieć:

1. Czy wysokość czerwonego słupka jest mniej więcej prawidłowa? Jakie jest średnie zużycie energii w Wielkiej Brytanii? Tutaj przyjrzymy się oficjalnym statystykom zużycia energii w Wielkiej Brytanii i w kilku innych krajach.

	WIELKA BRYTANIA	POLSKA	UWAGI
„Obrona”: 4		Pływy: 0 kWh/d	Brak pływów na polskim wybrzeżu.
Transport rzeczy: 12 kWh/d		Fale: 0 kWh/d	Słabe falowanie na Bałtyku.
Rzeczy: 48+ kWh/d	Geotermia: 1 kWh/d	Wiatr, głębokowodne: 0 kWh/d	Brak takich wód terytorialnych w Polsce.
	Pływy: 11 kWh/d	Geotermia: 20 kWh/d	Znacznie lepsze warunki w Polsce, duża niepewność.
	Fale: 4 kWh/d	Wiatr, płytkowodne: 4 kWh/d	Krótsza linia brzegowa w Polsce, słabszy wiatr. Podobnie.
	Wiatr, głębokowodne: 32 kWh/d	El. wodne: 1,6 kWh/d	
	Wiatr, płytkowodne: 16 kWh/d	Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 36 kWh/d	Lepsze warunki w Polsce, większy obszar na osobę, lepsze nasłonecznienie.
Żywność, rolnictwo, nawozy: 15 kWh/d	El. wodne: 1,5 kWh/d		
Gadżety: 5	Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 24 kWh/d		
Oświetlenie: 4 kWh/d		Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 60 kWh/d	Podobnie.
Ogrzewanie, klimatyzacja: 37 kWh/d	Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 50 kWh/d		
Podróż samolotem: 30 kWh/d		PV, 10 m ² /o: 6	Podobnie.
	PV, 10 m ² /o: 5	Ogrzewanie słoneczne: 16 kWh/d	Podobnie.
	Ogrzewanie słoneczne: 13 kWh/d		
	Wiatr: 20 kWh/d	Wiatr: 30 kWh/d	Podobnie, słabszy wiatr w Polsce, ale większy obszar na osobę.
	Samochód: 40 kWh/d		
	Łącznie: 177,5 kWh/d	Łącznie: 173,6 kWh/d	Zbliżony rezultat.

Rys. 18.1. Stan wyścigu po dodaniu wszystkich odnawialnych źródeł energii

2. Czy byłem niesprawiedliwy dla odnawialnych źródeł energii, zaniżając ich potencjał? W odpowiedzi porównamy nasze oszacowania zielonego słupka z obliczeniami opublikowanymi przez organizacje takie, jak: Komisja Rozwoju Zrównoważonego (Sustainable Development Commission), Instytut Inżynierów Elektryków (Institution of Electrical Engineers) oraz Centrum Technologii Alternatywnych (Centre for Alternative Technology).
3. Co się stanie, kiedy w składowych zielonego słupka uwzględnimy uwarunkowania społeczne i ekonomiczne?

Czerwone refleksje

Nasze oszacowania konsumpcji energii dla typowej, dostatnio żyjącej osoby dały rezultat **195 kWh dziennie**. Prawdą jest, że wiele osób zużywa tyle energii, a jeszcze więcej aspiruje do tego poziomu konsumpcji. Przeciętny Amerykanin zużywa około **250 kWh dziennie**. Gdybyśmy wszyscy podnieśli swój standard konsumpcji do poziomu amerykańskiego, to zielony słupek wręcz skarłałby w porównaniu z czerwonym.

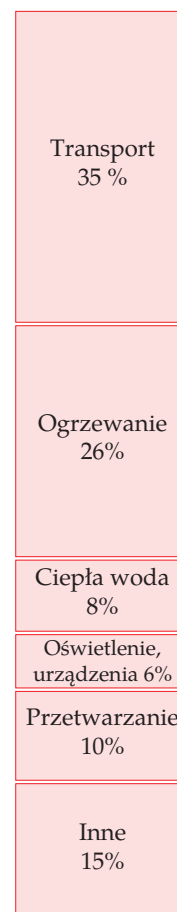
A co z przeciętnym Europejczykiem i przeciętnym Brytyjczykiem? Zużycie energii pierwotnej (czyli energii z paliw, energii wodnej i wiatrowej) przez przeciętnego Europejczyka to około **125 kWh na osobę dziennie**; średnia w Wielkiej Brytanii również wynosi **125 kWh na osobę dziennie**.

Te oficjalne średnie nie uwzględniają jednak dwóch przepływów energetycznych. Po pierwsze, pomijają one „szarą energię” zawartą w importowanych rzeczach (a więc użytą na wytworzenie tych rzeczy); w rozdziale 15 oszacowaliśmy ją na co najmniej 40 kWh/d/o. Po drugie, oficjalne oszacowania „pierwotnego zużycia energii” obejmują jedynie przemysłowe przepływy energii – rzeczy takie, jak paliwa kopalne czy prąd z hydroelektrowni – pomijają jednak naturalną energię zawartą w żywności (a więc zgromadzoną dzięki fotosyntezie).

Kolejną różnicą pomiędzy złożonymi przez nas czerwonymi słupkami a danymi krajowymi jest fakt, że w rozdziałach o zużyciu energii ignorowaliśmy kwestię straty energii podczas przetwarzania jednej jej formy w inną i podczas transportowania energii z jednego miejsca na drugie. Na przykład, szacunki dla samochodu, które wykonaliśmy w części I, pokrywają jedynie energię ropy, a pomijają energię użytą na jej wydobycie, przetworzenie w rafinerii i przewóz z miejsca A do miejsca B. Krajowe sumy statystyczne dotyczą zużycia energii przed stratami na jej konwersję. Straty podczas konwersji różnych form energii w rzeczywistości wynoszą 22% całkowitego krajowego zużycia energii. Większość tych strat ma miejsce w elektrowniach. Straty w liniach przesyłowych zjadają około 1% całkowitego krajowego zużycia energii.

Podczas budowania czerwonego słupka teoretyzowaliśmy jedynie, jak wiele energii zużywa dostatnio żyjąca osoba. Czy to podejście wpłynęło na nasze postrzeganie ważności różnych sfer życia? Przyjrzyjmy się oficjalnym liczbom.

Rys. 18.2 pokazuje rozbieżność zużycia energii na użycie końcowe. Górne dwie kategorie to transport i ogrzewanie (ciepłe powietrze i woda). Te dwie kategorie dominują również w naszym czerwonym słupku w części I. Dobrze.



Rys. 18.2. Zużycie energii z podziałem na użycie końcowe według zestawienia Ministerstwa Handlu i Przemysłu



Fot. 18.5. Hong Kong
Fot. Samuel Louie i Carol Spears

zużyciem energii a bogactwem jest ewidentna: im większe bogactwo (PKB na osobę), tym wyższe zużycie energii na osobę. Wielka Brytania to typowy kraj o wysokim PKB na osobę, na diagramie otoczony przez Niemcy, Francję, Japonię, Austrię, Irlandię, Szwajcarię i Danię. Jedynym wartym uwagi wyjątkiem od reguły „wysokie PKB na osobę implikuje wysokie zużycie energii” jest Hong Kong. PKB na osobę w Hong Kongu jest nawet większe niż w Wielkiej Brytanii, ale zużycie energii wynosi tylko około **80 kWh/d/o**.

Obecne krajowe zużycie energii przypadające na Polaka jest mniejsze niż dla Brytyjczyka i wynosi ok. 80 kWh/d/o (względem 125 kWh/d/o). Również przypadająca na Polaka energia z transportu lotniczego i morskigo oraz importu jest mniejsza. Tak więc w przypadku Polski, moglibyśmy przyjąć obecne zużycie energii na poziomie **100 kWh na osobę dziennie**. Jeśli uwzględnić prognozy przewidujące upodobnianie się naszego sposobu życia do obecnego zachodnioeuropejskiego oraz wynikający stąd dalszy wzrost zużycia energii, w dalszych oszacowaniach dotyczących możliwości zaspokojenia potrzeb energetycznych w sposób zrównoważony założymy identyczny czerwony słupek jak dla Wielkiej Brytanii.

Wniosek, który otrzymujemy z porównywania państw, jest taki, że Wielka Brytania to typowy kraj europejski, a co za tym idzie, stanowi równie dobry przykład do przeanalizowania następującego problemu: *Jak kraj o wysokim standardzie życia może osiągnąć zrównoważone zużycie energii?*

Zielone refleksje

Obiegowa opinia mówi, że Wielka Brytania ma wielkie zasoby energii odnawialnej. Czy byłem zatem zbyt ostry dla zielonej energii? Czy uzyskane przez nas liczby nadają się tylko do kosza? Czy nie oszacowałem możliwości zrównoważonego wytwarzania energii? Porównajmy najpierw nasze zielone wyniki z kilkoma oszacowaniami, które możemy znaleźć w publikacji Brytyjskiej Komisji Zrównoważonego Rozwoju pt. *Rola energii jądrowej w gospodarce niskowęglowej*. Redukcje emisji CO₂ – energia jądrowa i alternatywy. Warte uwagi jest to, że choć Komisja Zrównoważonego Rozwoju bardzo pozytywnie wypowiada się o potencjale odnawialnych źródeł energii („Mamy olbrzymie zasoby energii pływowej, fal, biomasy i słońca”), to wszystkie oszacowania Komisji Zrównoważonego Rozwoju są mniejsze od naszych! (a dokładniej mówiąc, wszystkie oszacowania całkowitej mocy odnawialnych źródeł energii są mniejsze od naszych obliczeń całkowitej ich mocy).

Moje szacunki	IEE	Tyndall	IAG	PIU	CAT
Geotermia: 1 kWh/d	Geotermia: 10 kWh/d				
Pływy: 11 kWh/d	Pływy: 2,4	Pływy: 3,9	Pływy: 0,09	Pływy: 3,9	Pływy: 3,4
Fale: 4 kWh/d	Fale: 2,3	Fale: 2,4	Fale: 1,5	Fale: 2,4	Fale: 11,4
Wiatr, głębokowodne: 32 kWh/d					
Wiatr, płytkowodne: 16 kWh/d	Wiatr na wodzie: 6,4	Wiatr na wodzie: 4,6	Wiatr na wodzie: 4,6	Wiatr na wodzie: 4,6	Wiatr na wodzie: 21
El. wodne: 1,5 kWh/d		El. wodne: 0,08			El. wodne: 0,5
Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 24 kWh/d	Odpady: 4	Uprawy energet., odpady: 2	Uprawy energet., odpady, metan z wysypisk: 3	Uprawy energet., spalanie odpadów, metan z wysypisk: 31 kWh/d	Paliwo z biomasy, odpady: 8
Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 50 kWh/d					
PV, 10 m ² /o: 5		PV: 0,3	PV: 0,02	PV: 12	PV: 1,4
Ogrzewanie słoneczne: 13 kWh/d				Ogrzewanie słoneczne: 1,3	
Wiatr: 20 kWh/d	Wiatr: 2	Wiatr: 2,6	Wiatr: 2,6	Wiatr: 2,5	Wiatr: 1

Rys. 18.6. Oszacowania teoretycznego lub praktycznego potencjału odnawialnych źródeł energii w Wielkiej Brytanii autorstwa Instytutu Inżynierów Elektryków (Institute of Electrical Engineers), Centrum Tyndalla (Tyndall Centre), Międzydepartamentalnej Grupy Analityków (Interdepartmental Analysts Group) oraz Jednostki Wydajności i Innowacji (Performance and Innovation Unit). Są to również propozycje Centrum Alternatywnych Technologii (Centre for Alternative Technology) z planu *Wyspa Brytania na rok 2027*.

Opracowanie Komisji Zrównoważonego Rozwoju podaje oszacowania z czterech źródeł, opisanych poniżej (IEE, Tyndall, IAG, PIU). Rys. 18.6 pokazuje moje oszacowania obok liczb z tych czterech źródeł i obliczeń Centrum Technologii Alternatywnych (CAT).

Źródła danych:

IEE (Instytut Inżynierów Elektryków – The Institute of Electrical Engineers) opublikował w 2002 roku raport o potencjalnych możliwościach odnawialnych źródeł energii w Wielkiej Brytanii. Druga kolumna w rys. 18.6 pokazuje „potencjał techniczny” różnych odnawialnych sposobów wytwarzania elektryczności. Według autorów jest to „górnny limit, którego raczej nigdy nie uda się przekroczyć, nawet w przypadku znaczących zmian społecznych i gospodarczych”.

Centrum **Tyndalla** ds. Badania Zmian Klimatu szacuje całkowity praktyczny potencjał odnawialnych źródeł energii na 15 kWh na osobę dziennie.

IAG (Międzydepartamentalna Grupa Analityków – The Interdepartmental Analysts Group) szacuje potencjał odnawialnych źródeł energii na 12 kWh (przy cenie 7 pensów / kWh) na osobę dziennie, uwzględniając przy tym czynniki *praktyczne i ekonomiczne*.

PIU (Jednostka Wydajności i Innowacji – Performance and Innovation Unit) – ta kolumna pokazuje „szacowany potencjał możliwości wytwarzania energii elektrycznej z zasobów odnawialnych” z dokumentu *Przyczynki DTI do Przeglądu Polityki Energetycznej PIU* [<http://www.world-nuclear.org/reference/pdf/DTI-PIU.pdf>] z roku 2001. Dla każdej technologii prezentuję „maksimum praktyczne” lub, jeśli nie zostało podane – „maksimum teoretyczne”.

CAT (Centrum Technologii Alternatywnych – Centre for Alternative Technology) pokazuje wartości z planu *Wyspa Brytania na rok 2027* Helweg-Larsena i Bulla (2007).

Dla Polski sięgnęliśmy po źródło promujące odnawialne źródła energii. Dane potencjału ekonomicznego pochodzą z publikacji Instytutu Energetyki Odnawianej pt. *Możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce do roku 2020* i przedstawiają realny potencjał techniczny odnawialnych zasobów energii. Na danych tych oparł się m.in. Greenpeace, przygotowując raport *(R)ewolucja energetyczna dla Polski*, silnie promujący odnawialne źródła energii.

W każdym przypadku nasze oszacowania są bardziej optymistyczne, w przypadku biomasy, wiatru, i hydroenergetyki 3–5 razy, dla ogrzewania słonecznego 10 razy, a dla paneli fotowoltaicznych i geotermii o całe rzędy wielkości.

Bio-zasilana Europa

Czasem ludzie pytają mnie: „W czym w ogóle jest problem, skoro całe stulecie przed rewolucją przemysłową żyliśmy w oparciu o energię odnawialną?”. To prawda, nie zapominajmy jednak, że od tego czasu zmieniły się dwie rzeczy: sposób życia i liczba ludności.

Gdybyśmy cofnęli się w czasie o 400 lat, zobaczylibyśmy Europę żyjącą praktycznie całkowicie w oparciu o zasoby odnawialne. Były to głównie: drewno i uprawy, wspierane niekiedy trochę przez energię wiatru, pływy i wodę.

Nasze oszacowania	IEO
Geotermia: 20 kWh/d	Geotermia: 0,2 kWh/d
Wiatr, płytkowodne: 4 kWh/d El. wodne: 1,6 kWh/d	Wiatr, płytkowodne: 1,3 kWh/d El. wodne: 0,5 kWh/d
Biomasa: żywność, biopaliwa, drewno, spalanie odpadów, metan z wysypisk: 36 kWh/d	Biomasa: 12 kWh/d
Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 60 kWh/d	Elektrownie słoneczne (200 m ² /o): 0 kWh/d
PV, 10 m ² /o: 6	
Ogrzewanie słoneczne: 16 kWh/d	PV, 10 m ² /o: 0 Ogrzewanie słoneczne: 1,6 kWh/d
Wiatr: 30 kWh/d	Wiatr: 8 kWh/d
Łącznie: 173,6 kWh/d	Łącznie: 23,5 kWh/d

Rys. 18.6.a

Oszacowano, że przeciętna osoba zużywała przy tym stylu życia około 20 Wh dziennie, a potrzebowała do tego 4 kg drewna, na co potrzeba było 1 ha (10 000 m²) lasu. Obszar przypadający na jedną osobę w Europie w roku 1700 wynosił 52 000 m². W regionach o najwyższej gęstości zaludnienia na jedną osobę przypadał obszar 17 500 m² terenów uprawnych, pastwisk i lasów. Dziś w Wielkiej Brytanii na osobę przypada już tylko 4000 m², tak więc nawet gdybyśmy powrócili do bardzo skromnego, z naszego punktu widzenia, „średniowiecznego” stylu życia i w pełni zalesili nasz kraj, to i tak nie moglibyśmy żyć w sposób zrównoważony. Jest nas na to już po prostu już zbyt wielu.

W Polsce na 1 osobę przypada 8000 m². Lepiej niż dla Wielkiej Brytanii, ale wciąż znacznie więcej niż w średniowieczu.

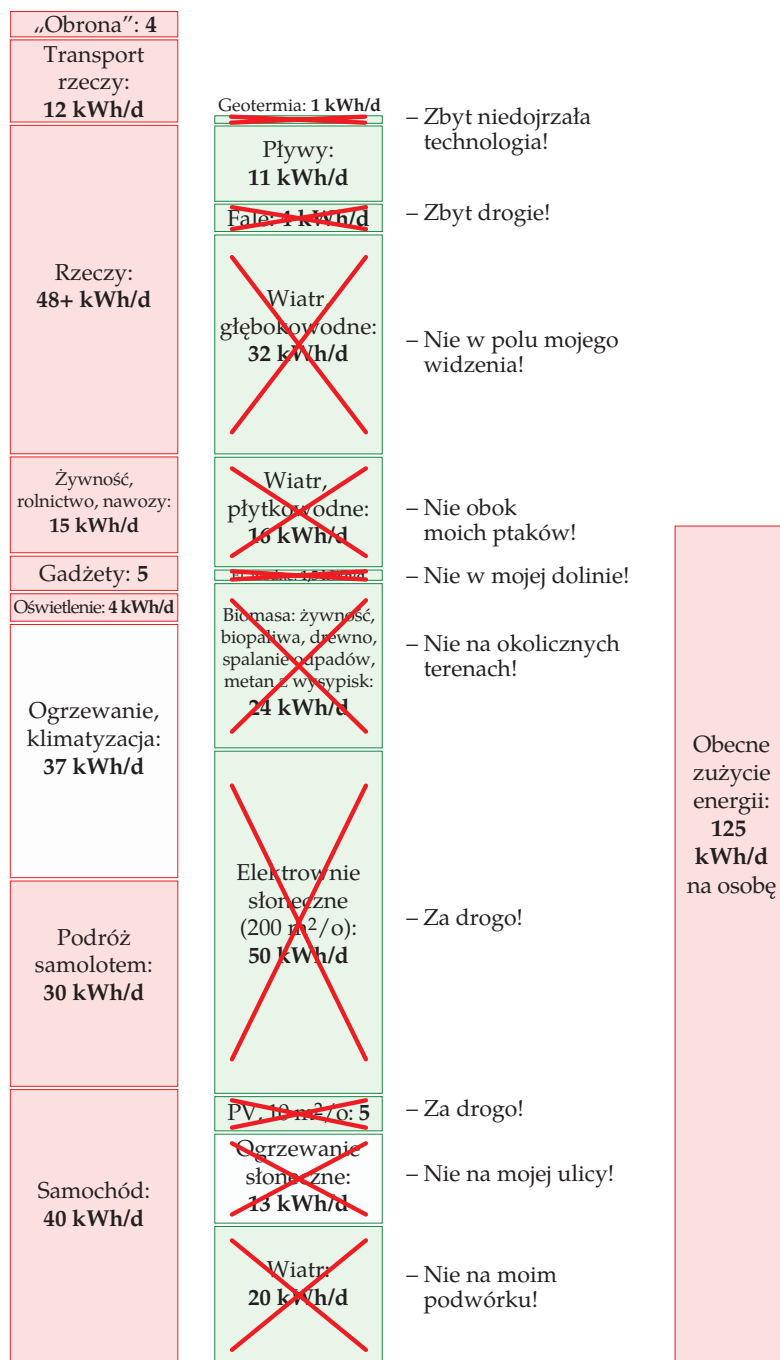
Zielone ambicje i rzeczywistość społeczna

Rys. 18.1 to złe wiadomości. Owszem, z technicznego punktu widzenia. Wielka Brytania ma „olbrzymie” zasoby odnawialne. Jednak realistycznie podchodząc do sprawy, nie wydaje mi się, żeby Wielka Brytania była w stanie żyć w oparciu o własne zasoby odnawialne. W każdym razie nie przy obecnym sposobie życia. Dochodzę do tej konkluzji, słysząc wciąż chór oponentów, witający każdy duży projekt odnawialnych źródeł energii. Ludzie lubią energię odnawialną, *o ile nie jest większa od listka figowego*. Jeśli Brytyjczycy są w czymś dobrzy, to jest to mówienie NIE:

- Farmy wiatrowe? – Nie! Są brzydkie i hałaśliwe!
- Panele słoneczne na dachach? – Nie! To zepsuje widok na ulicach!
- Więcej lasów? – Nie, to zrujnuje wiejski krajobraz!
- Spalanie odpadów? – Nie! Obawiam się zagrożenia zdrowia, korków, pyłu i hałasu.
- Elektrownie wodne? – Dobrze, ale tylko nieduże – to szkodzi środowisku.
- Przybrzeżne elektrownie wiatrowe? – Nie! Bardziej obawiam się tych wkraczających na brzeg szkaradnych linii energetycznych niż w swoim czasie inwazji hitlerowców.
- Energia fal lub geotermiczna? – Nie, to zdecydowanie za drogo.

Po wyrażeniu i przyjęciu do wiadomości wszystkich tych zastrzeżeń obawiam się, że wszystko, czym Wielka Brytania kiedykolwiek będzie dysponować w kwestii odnawialnych źródeł energii, będzie podobne do tego czegoś pokazanego na dole z prawej strony na rys. 18.7.

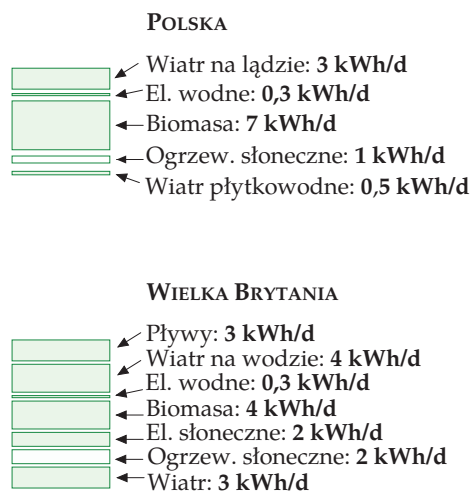
Rys. 18.8 stanowi przewodnik dla każdego, komu przyszłoby do głowy spró-

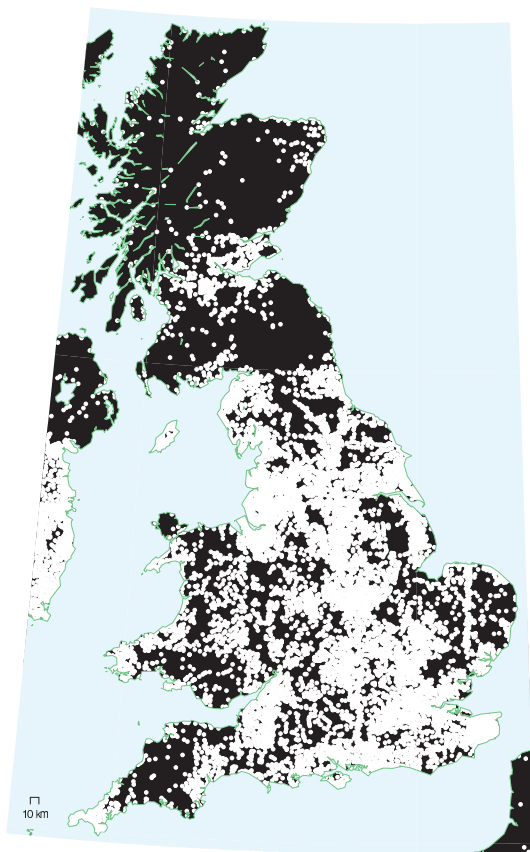


Obecne zużycie energii: 125 kWh/d na osobę

Rys. 18.7. Stan wyścigu po zsumowaniu wszystkich źródeł energii odnawialnej po konsultacjach społecznych.

Obawiam się, że wszystko, co Wielka Brytania będzie w stanie pozyskać z energii odnawialnej, można oszacować na 18 kWh/d/o. Słupek konsumpcji z lewej strony, wynoszący 125 kWh/d/o, to średnie brytyjskie zużycie, nieobejmujące importu i ignorujące energię słoneczną pozyskiwaną w procesie produkcji żywności. Dla Polski byłoby to jeszcze mniej, około 12 kWh/d/o.





Rys. 18.8. Jednym z podnoszonych zastrzeżeń względem elektrowni wiatrowych jest wytwarzany przez nie hałas. Z mapy wyciąłem te tereny, które leżą w promieniu 2 km od osad, wiosek i miast.

Białe pola zostaną najprawdopodobniej w większości wykluczone z rozwoju energetyki wiatrowej.

Pozostałe czarne obszary również najpewniej będą w dużym stopniu wyłączone z uwagi na potrzebę ochrony dziewiczych miejsc przed industrializacją.

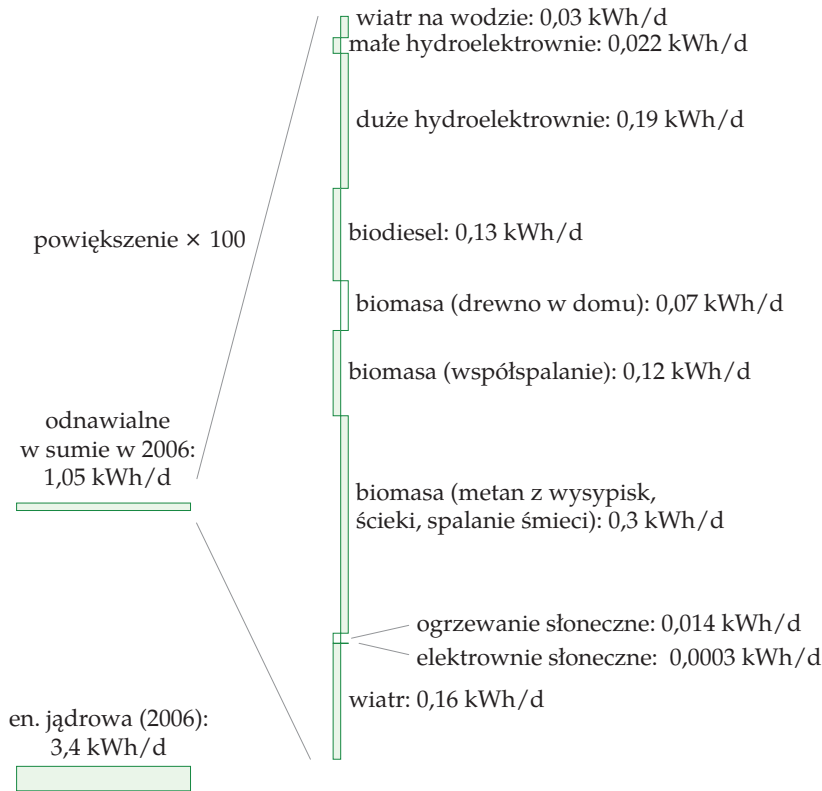
Dane o terenach zamieszkałych na podstawie www.openstreetmap.org

bować budowy farmy wiatrowej w Wielkiej Brytanii. Na mapie kolorem białym oznaczono strefy wykluczające budowę farm wiatrowych w promieniu 2 km od osad, wiosek i miast. Te białe obszary prawdopodobnie będą wyłączone z rozwoju energetyki wiatrowej, gdyż są zbyt blisko ludzi. Na czarno są pokazane wszystkie te rejony, które są położone *ponad 2 km* od osad ludzkich. Te obszary są, z kolei, w dużym stopniu wyłączone spod budowy elektrowni, gdyż stanowią oazę spokoju, a przecież wszyscy, którym leży na sercu dobro środowiska uznają, że takie miejsca należy chronić przed industrializacją. Jeśli więc chcesz uniknąć obiekcji względem swojej elektrowni wiatrowej, wybierz jakieś miejsce, które nie jest pokolorowane ani na czarno, ani na biało.

Niektórzy z ekologów, którzy mają dobre serca, lecz skonfundowane myśli, są właściwie przeszkodą w ochronie klimatu.

Malcolm Wicks, Minister of State for Energy

Zbliżamy się do końca części I. Zakładamy, że chcemy pozbyć się naszej zależności od paliw kopalnych z jednego lub więcej powodów wymienionych w rozdziale 1: zmian klimatu, bezpieczeństwa dostaw i tak dalej. Rys. 18.9 pokazuje, jak wiele mocy możemy obecnie wytwarzać z odnawialnych źródeł energii i energetyki jądrowej. W sumie pokrywają one 4% naszego całkowitego zużycia energii.



Rys. 18.9. Produkcja energii przez instalacje odnawialne i jądrowe w Wielkiej Brytanii w roku 2006. Moc jest wyrażona jak zwykle na osobę. Skala odnawialnych źródeł energii z prawej strony jest powiększona w pionie 100 razy.

1. Dwiema najważniejszymi konkluzjami, które możemy wyciągnąć z części I, są:

Abyśmy poczuli znaczącą różnicę, instalacje wytwarzania energii odnawialnej muszą mieć skalę kraju.

Aby jakiegokolwiek instalacje odnawialne mogły dać wkład proporcjonalny do naszej obecnej konsumpcji, muszą mieć one skalę kraju.

Aby otrzymać znaczący wkład z energii wiatru, musielibyśmy użyć farm wiatrowych o powierzchni Walii.

Aby dostać znaczący wkład od ogniw fotowoltaicznych, należałoby zabudować nimi połowę powierzchni Walii.

Aby dostać znaczący wkład od energii fal, musielibyśmy zabudować tymi instalacjami 500 km wybrzeża.

Aby otrzymać duży wkład od upraw energetycznych, musielibyśmy obsiać nimi 75% powierzchni kraju.

Instalacje energii odnawialnej muszą mieć właściwie rozmiar kraju, ponieważ odnawialne źródła energii są tak bardzo rozproszone. Tabela 18.10 podsumowuje większość mocy na jednostkę powierzchni, z którymi spotkaliśmy się w części I.

Utrzymanie sposobu życia mieszkańców Wielkiej Brytanii za pomocą odnawialnych źródeł energii naszego kraju byłoby bardzo trudne. Bazujące na energii odnawialnej rozwiązania energetyczne będą z konieczności duże i przeszkadzające.

MOC NA JEDNOSTKĘ TERENU	
Wiatr	2 W/m ²
Wiatr przybrzeżny	3 W/m ²
Baseny pływowe	3 W/m ²
Strumienie pływowe	6 W/m ²
Panele fotowoltaiczne	5–20 W/m ²
Rośliny	0,5 W/m ²
Woda deszczowa (wyżyny)	0,24 W/m ²
Instalacje hydroelektryczne	11 W/m ²
Geotermia	0,017 W/m ²

Tabela 18.10. Instalacje energii odnawialnej muszą mieć skalę kraju, gdyż wszystkie źródła energii odnawialnej są tak bardzo rozproszone.

2. Nie będzie łatwo przygotować plan, który daje dość energii z użyciem jedynie jej odnawialnych źródeł. Jeśli Brytyjczycy poważnie myślą o pozbyciu się uzależnienia od paliw kopalnych, muszą wreszcie nauczyć się mówić czemuś TAK. A właściwie kilku „cosiom”.

W części II zadam następujące pytanie: „Zakładając, że nie jesteśmy w stanie zaspokoić całości naszych potrzeb energetycznych ze źródeł odnawialnych, jakie mamy inne opcje?”.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 114 Zużycie energii pierwotnej (czyli energii z paliw, energii wodnej i wiatrowej) przez przeciętnego Europejczyka to około 125 kWh na osobę dziennie... – wartość ta pochodzi z raportu Wskaźnik Rozwoju Ludzkiego, opracowanego przez Program Narodów Zjednoczonych ds. Rozwoju w roku 2007. DTI (obecnie DBERR) corocznie publikuje *Przegląd Statystyk Energetycznych Wielkiej Brytanii*. [uzek2]. W roku 2006, według DUKES, całkowite zużycie energii pierwotnej wyniosło 244 milionów ton ekwiwalentu ropy (MTOE), co odpowiada 130 kWh na osobę dziennie.
- Nie wiem, skąd wzięła się ta rozbieżność pomiędzy oboma źródłami, jednak mogę wyjaśnić, dlaczego wziąłem niższą z podanych liczb. Jak zauważyłem na stronie 27, DUKES używa tego samego przelicznika co ja, przyjmując, że 1 kWh energii chemicznej jest równy 1 kWh energii elektrycznej. Jest jednak jeden mały wyjątek: DUKES definiuje „energię pierwotną” wytwarzaną w elektrowniach jądrowych jako energię termiczną, co w roku 2006 dało 9 kWh/d/o; przy efektywności 38% daje to w moich obliczeniach 3,4 kWh/d/o energii elektrycznej, czyli około 5 kWh/d/o mniej niż według DUKES.
- **Straty w liniach przesyłowych zjadają około 1% całkowitego krajowego zużycia energii.** – Ujmując to inaczej, straty to 8% całości wytwarzanej energii elektrycznej. Z całości 8% strat około 1,5% to straty w dalekodystansowej sieci wysokiego napięcia, a 6% to straty w sieciach lokalnych. – Źródło: MacLeay et al. (2007).
- 115 Rys. 18.4. – Dane z raportu Wskaźnik Rozwoju Ludzkiego, przygotowanego przez Program Narodów Zjednoczonych ds. Rozwoju w roku 2007. [3av4s9].
- 119 ... przeciętna osoba zużywała przy tym [„średniowiecznym” – red.] stylu życia około 20 kWh dziennie... – Źródło: Malanima (2006).
- 119 Bardziej obawiam się tych wkraczających na brzeg szkaradnych linii energetycznych niż w swoim czasie inwazji hitlerowców. – Źródło: [6frj55].

19 Liczy się wszystko, co DUŻE

Ustaliliśmy, że nie da się utrzymać obecnego standardu życia w Wielkiej Brytanii wyłącznie w oparciu o nasze własne odnawialne źródła energii (chyba, że zbudujemy infrastrukturę połączenia lądu i morza wielkości kraju). Co zatem zrobić, by odejść od paliw kopalnych i żyć w sposób zrównoważony? Możemy zbilansować budżet energetyczny albo poprzez zredukowanie popytu, albo zwiększenie podaży, albo – naturalnie – robiąc jedno i drugie.

Nie miejmy złudzeń. Odejście od paliw kopalnych oznacza, że redukcje w popycie i podaży muszą być wielkie. Nie dajcie się zwieść mitowi, że „liczy się każde, nawet małe, działanie”. *Jeżeli każdy robi coś małego, osiągniemy mało.* Musimy zrobić dużo. Konieczne są wielkie zmiany w podaży i popycie.

„Ale przecież, jeżeli 60 mln ludzi zrobi coś małego, to razem będzie dużo..?” Nie. Ta maszyna mnożąca zwana „gdyby każdy” sprawia jedynie, że to, co jest małe, wydaje się duże. Maszyna mnożąca zwana „gdyby każdy” produkuje inspirujące zdania typu „gdyby każdy zrobił TO, otrzymalibyśmy tyle energii/wody/gazu, by zrobić TAMTO”, gdzie TAMTO rzeczywiście brzmi imponująco. Czy to zaskakujące, że TAMTO wydaje się wielkie? Oczywiście nie. Przecież otrzymaliśmy TAMTO, mnożąc TO przez liczbę ludności – jakieś 60 mln! *Oto przykład z Planu działań na rzecz Zielonej Ekonomii Partii Konserwatywnej* (w innych miejscach znacznie bardziej precyzyjnego):

Ładowarka do telefonu komórkowego pobiera ok. (...) 1W, gdyby jednak wszystkie 25 mln ładowarek w Wielkiej Brytanii pozostawały w gniazdku, zużyłyby prąd (219 GWh) wystarczający do zasilenia 66 000 domów przez jeden rok.

66 000? No, no, to strasznie dużo domów! Wyłączcie ładowarki! Liczba 66 000 brzmi imponująco, warto jednak porównać ją z całkowitą liczbą domów, które powinny wziąć udział w tym ćwiczeniu, a mianowicie 25 milionami domów. 66 000 to jedna czwarta procenta z 25 milionów. Dlatego, mimo że zacytowane zdanie jest prawdziwe, rozsądniej jest ująć to w następujący sposób:

Jeżeli zostawiasz swoją ładowarkę w gniazdku, zużywa ona **¼ procenta** całkowitego zużycia prądu w twoim domu.

A jeśli wszyscy tak zrobią?

Jeżeli wszyscy zostawią swoje ładowarki w gniazdku, zużyją one **¼ procenta** całkowitego zużycia prądu w ich domach.

Maszyna mnożąca zwana „gdyby każdy” jest zwodnicza, bo kieruje uwagę ludzi na 25 mln płetek, zamiast na 25 mln rekinów. Mantra „Małe zmiany czynią wielką różnicę” to bzdura w kontekście zmian klimatu oraz systemu energetycznego. Zdanie: „Małe działania wielu ludzi dają dużo” jest prawdziwe, o ile wszystkie te „małe działania” ogniskują się na pojedynczym „dużo” – np. jeżeli milion ludzi daje 10 funtów na rzecz jednej ofiary wypadku, osoba ta otrzymuje 10 mln funtów. To jest dużo. Ale z energią jest zupełnie inaczej. Wszyscy ją zużywamy. A zatem, by osiągnąć „dużą różnicę” w całkowitym zużyciu energii, musimy sprawić, by niemal każdy dokonał „dużej” zmiany w swoim zużyciu energii.

Konieczne są duże zmiany w popycie i podaży energii. Zapotrzebowanie na energię można zredukować na trzy sposoby:



„Chcieliśmy kupić turbinę wiatrową, lecz nie są one zbyt efektywne”.

Rys. 19.1. Zamieszczony dzięki uprzejmości PRIVATE EYE / Roberta Thompsona, www.private-eye.co.uk

1. ograniczając populację (rys. 19.2);
2. zmieniając styl życia;
3. utrzymując obecny styl życia, ale ograniczając jego intensywność energetyczną poprzez „efektywność” i „technologię”.

Podaż można zwiększyć na trzy sposoby:

1. Moglibyśmy odejść od paliw kopalnych, inwestując w technologię „czystego węgla”. Ups! Węgiel jest paliwem kopalnym. Cóż... mimo wszystko rozważymy tę ideę. Zakładając, że będziemy zużywać węgiel w sposób „zrównoważony” (pojęcie to zdefiniujemy za chwilę), ile zapewni to nam energii? Jeżeli zaś nie zależy nam na zrównoważonym wykorzystaniu węgla, a jedynie chcemy zapewnić sobie „bezpieczeństwo dostaw”, to czy węgiel jest rozwiązaniem?
2. Moglibyśmy zainwestować w energetykę jądrową. Czy obecnie stosowana technologia jądrowa jest „zrównoważona”? Czy jest to chociaż rozwiązanie przejściowe, które może wystarczyć przynajmniej na 100 lat?
3. Moglibyśmy zakupić, wyłagać albo ukraść odnawialną energię z innych krajów – pamiętając jednak, że większość krajów jedzie na tym samym wózku, co Wielka Brytania i nie będzie miała energii odnawialnej na zbyciu; mając na uwadze, że pozyskanie energii odnawialnej z innych krajów nie zmniejszy w magiczny sposób ilości instalacji OZE (Odnawialnych Źródeł Energii), które trzeba będzie wybudować. Jeżeli zaczniemy importować energię odnawialną z zagranicy po to, by nie budować instalacji OZE rozmiaru Walii u nas, inni będą musieli zbudować instalacje OZE rozmiaru Walii u siebie.

W następnych siedmiu rozdziałach omówimy najpierw jak istotnie ograniczyć zapotrzebowanie na energię, a następnie, jak zwiększyć podaż, która zaspokoi owe ograniczone, ale wciąż „ogromne” zapotrzebowanie. W tych rozdziałach nie wymienię wszystkich dobrych pomysłów. Omówię tylko wielkie pomysły.

Model Wielkiej Brytanii

By usprawnić i uprościć naszą dyskusję na temat redukcji zapotrzebowania na energię, proponuję skupić się na prostych słupkach konsumpcji energii w Wielkiej Brytanii bez wdawania się w szczegóły – po to, by uzyskać ogólny obraz. Moja modelowa Brytania zużywa energię tylko na trzy sposoby: w ogrzewaniu, transporcie i elektryczności. Konsumpcja energii grzewczej modelowej Brytanii wynosi 40 kWh na osobę dziennie (obecnie całkowicie oparta na paliwach kopalnych); konsumpcja energii w transporcie to również 40 kWh na osobę dziennie (obecnie całkowicie oparta na paliwach kopalnych), a zużycie energii elektrycznej wynosi 18 kWh(e) na osobę dziennie; obecnie elektryczność jest również prawie całkowicie oparta na paliwach kopalnych. Przekształcenie energii paliw kopalnych w energię elektryczną ma sprawność rzędu 40%, więc zasilenie modelowej Wielkiej Brytanii w 18 kWh(e) elektryczności wymaga mocy wejściowej pochodzącej z paliw kopalnych rzędu 45 kWh na osobę dziennie. To uproszczenie ignoruje kilka całkiem istotnych szczegółów takich, jak: rolnictwo, przemysł i energia zawarta w produktach z importu! Mnie jednak zależy na szybkiej rozmowie dotyczącej najważniejszych spraw, które musimy

O ile niemożliwe jest ograniczenie do zera śladu węglowego jakiegokolwiek człowieka, to brak tego człowieka to umożliwiała.

Chris Rapley, były dyrektor
Brytyjskiej Misji Antarktycznej
(British Antarctic Survey)

Potrzeba mniej ludzi, a nie bardziej zielonych.

„Daily Telegraph”, 24 lipca 2007

Demokracja nie przetrwa przeludnienia. Ludzka godność nie przetrwa przeludnienia.

Isaac Asimov



Rys. 19.2. „Będziemy musieli ograniczyć Wasze emisje”. Rysunek zamieszczony dzięki uprzejmości Colina Wheelera

załatwić, aby odejść od paliw kopalnych. Ogrzewanie, transport i elektryczność odpowiadają za ponad połowę zużycia energii w Wielkiej Brytanii. Jeżeli uda nam się stworzyć plan zaspokojenia potrzeb energetycznych w ogrzewaniu, transporcie i elektryczności w sposób zrównoważony, zrobimy krok w dobrym kierunku, w kierunku planu bardziej szczegółowego i spójnego.

Teraz, kiedy przyjął się już model Brytanii, nasza dyskusja o ograniczeniu zapotrzebowania na energię będzie miała tylko trzy elementy. Pierwszy: jak możemy ograniczyć zapotrzebowanie na energię w transporcie i wyeliminować stąd paliwa kopalne? To temat rozdziału 20. Drugi: jak możemy ograniczyć zapotrzebowanie na energię w sektorze ogrzewania i wyeliminować z niego paliwa kopalne? To temat rozdziału 21. Trzeci: co z elektrycznością? W rozdziale 22 rozważymy efektywność zużycia energii elektrycznej.

Trzy możliwości zaspokojenia popytu – czysty węgiel, energia jądrowa oraz energia odnawialna z importu są następnie omawiane w rozdziałach: 23, 24 i 25. Na zakończenie, w rozdziale 26 zastanawiamy się, jak radzić sobie z fluktuacjami w popycie i produkcji energii ze źródeł odnawialnych.

Po zdiagnozowaniu możliwości ograniczenia popytu i zwiększenia podaży energii, w rozdziałach 27 i 28 omawiamy różne sposoby łączenia tych opcji w ramach spójnych planów w celu zaopatrzenia modelowej Brytanii w paliwa transportowe, zapewnienia ogrzewania i elektryczności.

Mógłbym na wielu stronicach omawiać „1001 rzeczy, które możesz zrobić, by coś zmienić”, sądzę jednak, że metoda łowienia trzech najgrubszych ryb wyłoni najbardziej efektywne rozwiązania.

A co z „rzeczami”? Wg Części I tej książki energia zawarta w produktach z importu może być najgrubszą ze wszystkich ryb! Tak, być może jest nawet trupem w szafie. Pozostawmy go jednak chwilowo w szafie i skupmy się na sposobach odejścia od paliw kopalnych w sektorach, które jesteśmy w stanie kontrolować.

Porozmawiajmy więc o transporcie, ogrzewaniu i elektryczności.

Polak zużywa o 30–40% mniej energii elektrycznej i grzewczej niż Brytyjczyk. Mniej też jeździ samochodem. Gdybyśmy chcieli być bardzo dokładni i odzwierciedlić rzeczywistość, przyjęlibyśmy zużycie elektryczności równe 11 kWh(e) na osobę dziennie – produkowanej prawie wyłącznie z węgla ze sprawnością 33% (co odpowiada mocy wejściowej z paliw kopalnych rzędu 30 kWh), a zużycie ciepła i energię wykorzystywaną w transporcie na poziomie 30 kWh na osobę dziennie.

W sumie nie są to wielkie rozbieżności, a jak wspomnieliśmy wcześniej, dążymy do zbliżonego sposobu życia. Dlatego też dla Polski przyjmujemy taki sam czerwony słupek jak dla Wielkiej Brytanii. Ułatwi nam to skupienie się na sednie obliczeń.

A zatem w modelowej Polsce konsumpcja ciepła, zużycie energii w transporcie i zużycie elektryczności będą identyczne jak w Wielkiej Brytanii.

Dla niecierpliwego Czytelnika

Chcesz od razu dowiedzieć się, jak kończy się ta historia? Oto szybkie streszczenie, rzut oka na część II.

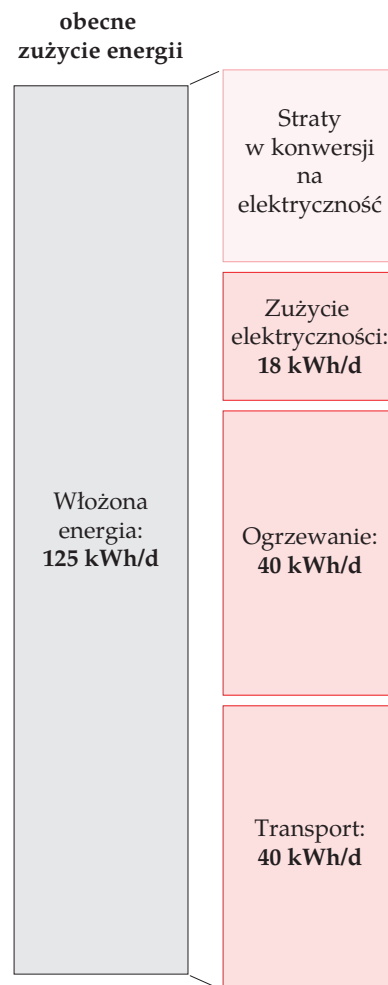
Po pierwsze, elektryfikujemy transport. Elektryfikacja uwalnia transport od paliw kopalnych i jednocześnie czyni go bardziej efektywnym energetycznie (i siłą rzeczy zwiększa nasze zapotrzebowanie na elektryczność z OZE).

Po drugie, by skorzystać z ogrzewania solarnego, przejdziemy na elektryczne ogrzewanie pomieszczeń i wody w budynkach. Użyjemy pomp ciepła, które są czterokrotnie bardziej efektywne energetycznie niż zwykły piecyk elektryczny. Elektryfikacja ogrzewania znów zwiększy zapotrzebowanie na energię ze źródeł odnawialnych.

Po trzecie, zieloną elektryczność otrzymujemy z czterech źródeł – z naszych własnych odnawialnych źródeł energii, być może z „czystego węgla”, być może z atomu, a wreszcie, z odnawialnych źródeł w innych krajach.

Wśród zagranicznych odnawialnych źródeł energii energia słoneczna z pustyni jest możliwością o największym potencjale. O ile jesteśmy w stanie nawiązać pokojową międzynarodową współpracę, energia słoneczna z cudzych pustyni bezsprzecznie ma techniczny potencjał, by dostarczyć i nam, naszym partnerom i w ogóle wszystkim na świecie 125 kWh energii na osobę dziennie.

Czy są pytania? Zachęcam do dalszej lektury.



Rys. 19.3. Zużycie energii w „modelowej Brytanii w 2008 roku”

20 Lepszy transport

Nowoczesne technologie w motoryzacji pozwalają ograniczyć emisje gazów cieplarnianych bez konieczności zmiany wyglądu, komfortu lub mocy samochodu, do których przyzwyczaili się kierowcy.

Kalifornijska Rada Zasobów Atmosferycznych
(California Air Resources Board)

Mniej więcej jedna trzecia energii wykorzystywana jest w transporcie [w Polsce jest podobnie – *red.*] Czy technologia może przyczynić się do zmniejszenia zużycia energii? W tym rozdziale rozważamy możliwości osiągnięcia dwóch celów. Chodzi o dokonanie jak największej redukcji zużycia energii oraz wyeliminowanie zużycia paliw kopalnych w transporcie.

O transporcie mówiliśmy w trzech rozdziałach dotyczących konsumpcji energii: rozdziale 3 (samochody), rozdziale 5 (samoloty) i rozdziale 15 (ciężarowy transport drogowy i morski). Mamy więc do czynienia z dwoma rodzajami transportu: pasażerskim oraz ciężarowym. Naszą jednostką dla transportu pasażerskiego będzie pasażerokilometr (pkm). Praca przewozowa samochodu, który przewozi jedną osobę na dystansie 100 km, wynosi 100 pkm. Praca przewozowa samochodu, który na tym samym dystansie przewozi 4 osoby, wynosi 400 pkm. Analogicznie, naszą jednostką dla transportu towarowego będzie tonokilometr (tkm). Praca przewozowa ciężarówki, która przewozi 5 ton na dystansie 100 km, wynosi 500 tkm. Energię zużytą w transporcie pasażerskim będziemy mierzyć w „kWh na 100 pasażerokilometrów”, a energię zużytą w transporcie ciężarowym w „kWh na tonokilometr”. Miara ta jest zbieżna z „litrami na 100 km” – podobnie jak chcemy, by zużycie paliwa w samochodzie wynosiło jak *najmniej* litrów na 100 km, tak samo chcemy, by zużycie energii wynosiło jak *najmniej* kWh na 100 pkm.

Rozpocniemy ten rozdział od rozważań, jak ograniczyć zużycie energii w transporcie lądowym. By to zdiagnozować, musimy najpierw oszacować, gdzie dokładnie energia jest zużywana. Mamy tu trzy kluczowe aspekty, które zostaną szczegółowo omówione w rozdziale Technicznym A.

1. W *podróżach na krótkie dystanse*, gdy samochód często zatrzymuje się i rusza, energia zużywana jest przede wszystkim do wprowadzenia w ruch i przyspieszenia ruchu pojazdu wraz z tym, co wiezie. Kluczową strategią ograniczania zużycia energii w tego rodzaju transporcie jest *odchudzenie* oraz *pokonywanie większych dystansów między przystankami*. Pomocne może być też hamowanie z odzyskiwaniem energii. Co więcej, warto jeździć *wolniej* i *rzadziej*.
2. W *podróżach na długie dystanse* ze stałą prędkością, koleją lub samochodem najwięcej energii pochłania pokonywanie oporu powietrza, jako że pojazd rusza i przyspiesza tylko raz. Kluczowa strategia ograniczania zużycia energii w tego rodzaju transporcie to: jeździć *wolniej*, *rzadziej* oraz w *długich i wąskich pojazdach*.
3. W transporcie każdego rodzaju zachodzi łańcuch konwersji energii, w którym energia zawarta w paliwie zużywana jest do przemieszczania pojazdu. Ten łańcuch konwersji jest nieuchronnie nieefektywny. Na przykład, w standardowym samochodzie napędzanym paliwem kopalnym zaledwie 25% paliwa służy do przemieszczenia pojazdu, a jakieś 75% niepotrzebnie ogrzewa



Fot. 20.1. Punkt wyjścia dla tego rozdziału: luksusowy miejski van. Przeciętny brytyjski samochód pali 7l na 100 km, co odpowiada zużyciu energii rzędu 80 kWh na 100 km. Czy można to poprawić?

silnik i chłodnicę. W tym wypadku strategia ograniczenia zużycia energii powinna się opierać na zwiększeniu efektywności łańcucha konwersji.

Nasze obserwacje prowadzą do sformułowania sześciu zasad konstrukcji i prowadzenia pojazdu, które pozwolą zwiększyć efektywność energetyczną transportu lądowego: *a)* redukcja strefy przedniej na osobę; *b)* redukcja wagi samochodu na osobę; *c)* jazda ze stałą prędkością i unikanie hamowania; *d)* wolniejsza jazda; *e)* rzadsze podróżowanie; *f)* zwiększenie efektywności łańcucha konwersji energii. Zastanowimy się teraz nad możliwymi zastosowaniami tych zasad.

Jak jeździć lepiej

Powszechnie cytowane statystyki mówią coś w stylu: „Zaledwie 1 procent energii zużywanej przez samochód służy do przemieszczania kierowcy”. Czy można stąd wnosić, że jeżeli się postaramy, możemy produkować samochody 100 razy bardziej efektywnie energetycznie? Odpowiedź brzmi: „Prawie”, ale tylko przy zastosowaniu wyżej wymienionych zasad konstrukcji i prowadzenia pojazdu. I to w stopniu *ekstremalnym*.

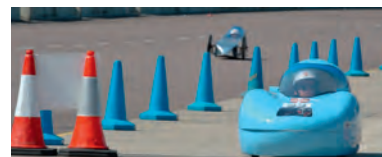
Ilustracją takiej ekstremalnej konstrukcji jest samochód ekologiczny o małej strefie przedniej i niskiej wadze, i który – jeśli mamy pobić wszystkie rekordy – prowadzony jest ostrożnie, z małą i stałą prędkością. Ekosamochód Drużyny Krokodyla (rys. 20.2) przejeżdża 2184 mile na galonie paliwa (czyli pali 0,1 l/100 km) przy prędkości 15 mil/h (24 km/h). To koszt energetyczny 1,3 kWh na 100 km. Pojazd waży 50 kg, jest niższy niż słupek drogowy i mieści bez problemu samotnego nastoletniego kierowcę.

Hmm. Myślę, że kierowca miejskiego vana z rys. 20.1 dostrzegłby różnicę w „wyglądzie, komforcie i mocy”, gdyby kazano mu przesiąść się do takiego ekosamochodu i prowadzić z prędkością nie większą niż 24 km/h. Między bajki można włożyć pomysł, że bez trudu stworzymy samochody 100 razy efektywniejsze energetycznie niż obecnie. Do wyzwania, jakim jest produkowanie samochodów efektywnych energetycznie, powrócimy za moment. Najpierw jednak zdiagnozujemy kilka innych sposobów na zwiększenie efektywności energetycznej transportu lądowego.

Fotografia 20.3 pokazuje pojazd pasażerski co najmniej 25-krotnie efektywniejszy energetycznie niż standardowy samochód na benzynę. To rower. Osiągi roweru (w zakresie zużycia energii na określonym dystansie) są zbliżone do osiągnięć ekosamochodu. Prędkość jest podobna, masa roweru jest mniejsza (bo człowiek zastępuje zbiornik na paliwo i silnik), ale jego strefa przednia jest większa, bo rowerzysta jest kształtem mniej opływowym niż ekosamochód.

Fotografia 20.4 ilustruje kolejną alternatywę dla samochodu na benzynę – pociąg, o całkowitym koszcie energetycznym 1,6 kWh na 100 pasażerokilometrów. W przeciwieństwie do ekosamochodu i roweru, pociąg osiąga znakomitą efektywność, mimo że nie jeździ wolno i nie waży mało w przeliczeniu na osobę. Pociągi kompensują dużą prędkość i dużą wagę dzięki małej strefie przedniej na osobę. Efektywna strefa przednia wynosi 0,8 m² dla rowerzysty i 0,5 m² dla zwykłego samochodu, a w przypadku pełnego pociągu pasażerskiego z Cambridge do Londynu wynosi ona zaledwie 0,02 m² na pasażera!

No, ale teraz wkraczamy na grząski teren – w perspektywie mamy dziele nie pojazdu z „tymi wszystkimi straszonymi ludźmi”. Mimo wszystko zadajmy



Fot. 20.2. Ekosamochód Drużyny Krokodyla zużywa 1,3 kWh energii na 100 km.

Fot. Team Crocodile
www.teamcrocodile.com



Fot. 20.3. „Dziecko na pokładzie”
Ten środek transportu ma koszt energetyczny około 1 kWh na 100 osobokilometrów.



Fot. 20.4. Ten pociąg z 8 wagonami, przy prędkości maksymalnej 100 mil/h (161 km/h), zużywa 1,6 kWh energii na 100 pasażerokilometrów (przy założeniu, że wszystkie miejsca są zajęte).

sobie pytanie: „Jak bardzo możemy ograniczyć zużycie energii, zamieniając samochody na świetnie zaprojektowany transport publiczny?”.



4,4 kWh na 100 pkm, jeżeli pełny



3 – 9 kWh na 100 pkm, jeżeli pełny



7 kWh na 100 pkm, jeżeli pełny



21 kWh na 100 pkm, jeżeli pełny

Fot. 20.5. Efektywność energetyczna wybranych środków transportu, przy założeniu, że wszystkie miejsca są zajęte. Metro, peron i wnętrze pociągu. Dwa pociągi dużej prędkości. Napędzany elektrycznie zużywa 3 kWh na 100 pasażerokilometrów; napędzany dieslem – 9 kWh. Trolejbusy w San Francisco. SeaBus w Vancouver. Fot. Larry

Transport publiczny

Transport publiczny – jeśli pojazdy jeżdżą zapełnione – jest znacznie bardziej efektywny energetycznie niż samochód. Zasilany dieslem autokar przewożący 49 pasażerów, palący 24 l/100 km, jadący z prędkością 105 km/h zużywa **6 kWh energii na 100 pkm**. To 13 razy mniej niż samochód wiozący jedynie kierowcę! Trolejbusy w Vancouver zużywają 270 kWh prądu na 100 pojazdokilometrów, przy średniej prędkości 15 km/h. Jeżeli trolejbus ma na pokładzie 40 pasażerów, wówczas koszt energetyczny przewozu jednego pasażera (koszt transportowy na pasażera) wynosi **7 kWh na 100 pkm**. Koszt transportowy promu w Vancouver wynosi 83 kWh na pojazdokilometr, przy prędkości 13,5 km/h. Prom może przewieźć 400 pasażerów. Jeżeli jest pełny, koszt transportowy na jednego pasażera wynosi **21 kWh na 100 pkm**. Pociągi londyńskiego metra w godzinach szczytu zużywają **4,4 kWh na 100 pkm** – 18 razy mniej niż samochody. Nawet pociągi dużej prędkości, które sprzeniewierzają się dwóm z naszych zasad dotyczących oszczędności energii (bo przemieszczają się dwa razy szybciej niż samochód i dużo ważą), są od niego znacznie bardziej efektywne energetycznie. Jeżeli elektryczny pociąg dużej prędkości jest pełen, jego koszt energetyczny wynosi **3 kWh na 100 pkm** – to 27 razy mniej niż w przypadku samochodu!

Niemniej jednak musimy planować realistycznie. Niektóre pociągi, autokary i autobusy jeżdżą puste (fot. 20.6). Średni koszt energetyczny transportu publicznego jest więc większy niż wskazywałyby podane wyżej liczby, oparte na optymalnym scenariuszu. Jakie jest więc średnie zużycie energii w transporcie publicznym i jak bardzo można, według realistycznych szacunków, ów transport poprawić?

W latach 2006–2007 całkowity koszt energetyczny funkcjonowania londyńskiego metra – włączając oświetlenie, platformy naprawcze, składy i hangary – wyniósł 15 kWh na 100 pkm. To pięć razy mniej niż w przypadku naszego samochodu. W tych samych latach koszt energetyczny londyńskich autobusów wyniósł 32 kWh na 100 pkm. Oczywiście, koszt energetyczny to nie wszystko. Dla pasażerów liczy się prędkość – pociągi podziemne jeżdżą szybciej (średnio z prędkością 33 km/h) niż autobusy (18 km/h). Menadżerów obchodzą koszty – koszty załogi i koszty na pasażerokilometr są niższe w przypadku pociągów podziemnych niż w przypadku autobusów.

Całkowite zużycie energii w systemie tramwajowym w londyńskim Croydon (fot. 20.7) w latach 2006–2007 (włączając zajezdnie tramwajowe i oświetlenie przystanków) wyniosło 9 kWh na 100 pkm, przy średniej prędkości 25 km/h.



32 kWh na 100 pkm



9 kWh na 100 pkm

Jak bardzo można poprawić transport publiczny? Wskazówką może stać się przykład Japonii (tabela 20.8). Przy 19 kWh na 100 pkm i 6 kWh na 100 pkm, autobusy i kolej wyglądają obiecująco. Kolej ma tę zaletę, że może przyczynić się do realizacji obu naszych celów: ograniczenia zużycia energii i uniezależnienia się od paliw kopalnych. Autobusy i autokary mają tę niewątpliwą przewagę, że mogą dotrzeć wszędzie, ale utrzymanie tej elastyczności może być trudne, jeżeli naprawdę chcemy zrezygnować z paliw kopalnych.

Przyjrzyjmy się warszawskiej Szybkiej Kolei Miejskiej (SKM). Dla nowoczesnego pociągu 14 WE średnie rzeczywiste zużycie energii elektrycznej wynosi 7 kWh na pojazdokilometr. Jeśli wszystkie 184 miejsca siedzące są zajęte, oznacza to koszt energetyczny równy 4 kWh na 100 pkm. Zważywszy, że SKM cieszy się w aglomeracji warszawskiej dużą popularnością (w godzinach szczytu pociągi jeżdżą wypełnione po brzegi, co rekompensuje pustki w godzinach poza szczytem), wartość tę możemy uznać za średnią.

Wyczekiwane przez pasażerów rozładowanie tłoku poprzez wprowadzenie większej liczby pociągów podniosłoby zużycie energii do brytyjskich 6 kWh na 100 pkm.

Reasumując, transport publiczny (a szczególnie pociągi elektryczne, tramwaje i autobusy) jest obiecującym sposobem transportowania pasażerów; w kategoriach energii na pasażerokilometr około 5–10 razy lepszym niż samochód. Niemniej jednak ludzie domagają się mobilności, jaką zapewnia własny samochód. Jakie mamy możliwości w tej kwestii?

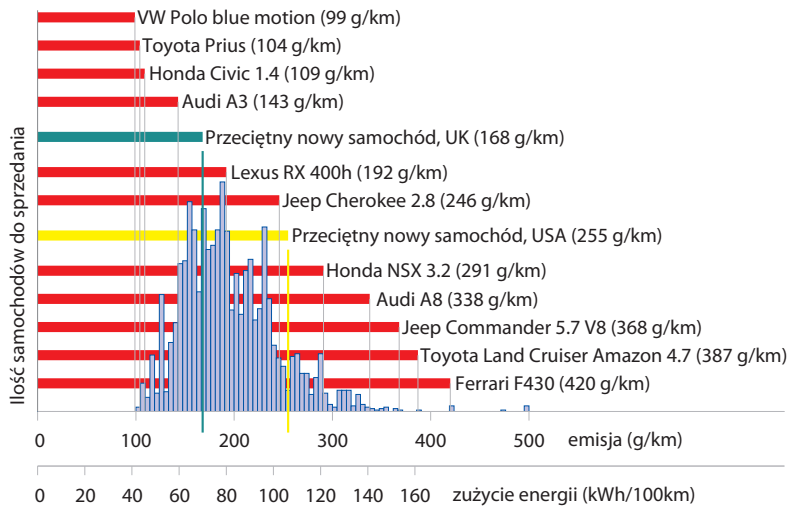


Fot. 20.6. Niektóre pociągi jeżdżą puste. Trzech ludzi i wiolonczeła to jedyni pasażerowie pociągu dużej prędkości z Edynburga do stacji Kings Cross w Londynie.

Fot. 20.7. Wybrane środki transportu oraz ich średnie zużycie energii. Po lewej: piętrosy. Po prawej: tramwaj w dzielnicy Londynu Croydon. Fot. Stephen Parascandolo

Zużycie energii (kWh na 100 pkm)	
Samochód	68
Autobus	19
Kolej	6
Transport lotniczy	51
Transport morski	57

Tabela 20.8. Całkowita efektywność środków transportu w Japonii (1999)



Pojazdy prywatne: technologia, prawodawstwo i zachęty

Można zredukować zużycie energii w samochodach. Dowodem jest rozpiętość efektywności energetycznej samochodów dostępnych na rynku. W 2006 roku można było kupić u tego samego dilerza Hondę Civic 1.4 zużywającą 44 kWh na 100 km oraz Hondę NSX 3.2 zużywającą 116 kWh na 100 km (fot. 20.9). Fakt, że ludzie po prostu *wybijają* z tej szerokiej oferty, oznacza, że potrzebują dodatkowych zachęt i legislacji, by *wybrać* bardziej efektywny energetycznie samochód. Jest wiele sposobów nakłonienia konsumenta do wyboru Hondy Civic zamiast paliwożernej Hondy NSX 3.2: podniesienie ceny paliwa i akcyzy proporcjonalnie do przewidywanego zużycia paliwa, podniesienie podatku drogowego dla paliwożernych samochodów, wprowadzenie przywilejów parkingowych dla samochodów o niskiej emisji CO₂ (fot. 20.10) albo racjonalnie paliwa. Prawdopodobnie metody te nie wywołają aplauzu, przynajmniej wśród części wyborców. Być może dobrą techniką legislacyjną byłoby *wymuszenie* rozsądnego poziomu efektywności energetycznej zamiast pozostawienia niekontrolowanego wyboru. Możemy na przykład w którymś momencie zakazać sprzedaży *wszystkich* samochodów o zużyciu energii większym niż 80 kWh na 100 km; z czasem obniżyć ten próg do 60 kWh na 100 km, potem do 40 kWh na 100 km, itd. Alternatywnie, by pozostawić konsumentom większy wybór, można wymusić na producentach samochodów obniżenie *średniego* zużycia paliwa we wszystkich samochodach, które oferują. Dodatkowe prawodawstwo, ograniczające wagę oraz wielkość strefy przedniej pojazdów pozwoliłoby jednocześnie ograniczyć zużycie paliwa oraz zwiększyć bezpieczeństwo na drogach (fot. 20.11). W dzisiejszych czasach zakup samochodu dyktowany jest modą lub chęcią zaznaczenia statusu. Silna legislacja regulująca efektywność pojazdów nie musi ograniczać wyboru – po prostu wszystkie modne samochody będą efektywne. Dostępny będzie każdy kolor pod warunkiem, że będzie to kolor zielony.

Rys. 20.9. Emisje CO₂, w gramach na km, w wybranych modelach samochodów sprzedawanych w Wielkiej Brytanii. Linia pozioma pokazuje wielkość emisji, a wysokość niebieskiego słupka – liczbę modeli o tym poziomie emisji będących w sprzedaży w 2006 r. Źródło: www.newcar.net.co.uk Druga skala pozioma wskazuje przybliżone wartości zużycia energii, przy założeniu, że z 1 kWh energii chemicznej wiąże się emisja 240 g CO₂.



Fot. 20.10. Specjalna strefa parkowania dla samochodów elektrycznych w Ann Arbor (Michigan, USA)



Fot. 20.11. Samochody-monstra są wystarczająco duże, by utrudnić widoczność i zupełnie zasłonić pieszych.

W Polsce modne i prestiżowe jest posiadanie samochodu typu SUV. Przy średnim spalaniu 14 l na 100 km koszt energetyczny wynosi 140 kWh na 100 km. Jeden z najpopularniejszych modeli na polskim rynku, Skoda Octavia, zużywa znacznie mniej, bo 70 kWh na 100 km. W aglomeracji warszawskiej energetyczny koszt dojazdu Octavią wynosi około 50 kWh na 100 pkm. W porównaniu ze Skodą SKM oferuje dziesięciokrotnie niższy koszt energetyczny na pasażera.

Zanim wyborcy i politycy uzgodnią ustawę na rzecz zwiększenia efektywności energetycznej samochodów, rozważmy inne rozwiązania.



Fot. 20.12. Rondo w Enschede (Holandia)

Rowery

Moja ulubiona propozycja to budowa znakomitej infrastruktury rowerowej wsparta właściwym prawodawstwem (np. obniżenie limitów prędkości dla samochodów i przepisy drogowe uprzywilejowujące rowerzystów). Na fot. 20.12 widzimy rondo w holenderskim Enschede. Rondo składa się z dwóch jezdni – ta dla samochodów jest wewnętrzna wobec tej dla rowerów, jezdnie dzieli pas bezpieczeństwa szerokości samochodu. Zasady pierwszeństwa są takie same, jak na skrzyżowaniach w Wielkiej Brytanii, tyle że samochody opuszczające wewnętrzną jezdnię muszą przepuszczać rowerzystów (zupełnie tak, jak brytyjscy kierowcy mają obowiązek przepuszczać pieszych na pasach). Tam, gdzie istnieje świetna infrastruktura rowerowa, ludzie jeżdżą rowerami, czego dowodzi niezliczona liczba rowerów przed stacją kolejową w Enschede (fot. 20.13).



Fot. 20.13. Kilka holenderskich rowerów



Fot. 20.14. Tymczasem w Wielkiej Brytanii...
Fot. Mike Armstrong

Tak się jakoś składa, że brytyjskim [i polskim – *red.*] ścieżkom rowerowym (fot. 20.14) daleko do holenderskich standardów.

W 2005 roku we francuskim Lyonie powstała prywatna, ale ogólnodostępna sieć rowerowa Vêlo'v. Pomysł okazał się sukcesem. 470 000 mieszkańców Lyonu ma do dyspozycji 2000 rowerów dostępnych na 175 stacjach rowerowych rozrzuconych na obszarze 50 km² (fot. 20.15). Praktycznie w każdym punkcie centrum miasta od stacji rowerowej dzieli nas nie więcej niż 400 metrów. Uczestnicy programu wnoszą opłatę abonamentową w wysokości 10 euro rocznie, po czym mogą nieodpłatnie używać rowerów, jeżeli wycieczka trwa mniej niż pół godziny. Przy dłuższych trasach dopłata wynosi do 1 euro za godzinę. Odwiedzający Lyon mogą wykupić abonament tygodniowy za 1 euro.

Inne możliwości legislacyjne

Pomysł z limitami prędkości nasuwa się sam. Co do zasady, samochody jeżdzące wolniej zużywają mniej energii (patrz: rozdział A). Praktyka czyni mistrza, kierowcy mogą nauczyć się, jak jeździć oszczędniej – rzadsze naciskanie gazu i hamulca, i jazda na najwyższym możliwym biegu pozwoli ograniczyć zużycie paliwa nawet o 20%.

Innym sposobem na zmniejszenie zużycia paliwa jest ograniczenie zatłoczenia dróg. Zatrzymanie się i ruszanie, przyspieszanie i zwalnianie jest znacznie mniej efektywnym sposobem przemieszczania się niż płynna jazda. Tkwienie w korkach to wyjątkowo nieefektywny sposób przebywania kilometrów!

Zatłoczenie pojawia się wówczas, gdy na drogach jest zbyt wiele samochodów. Najprostszym sposobem zmniejszenia tłoku jest pogrupowanie podróżnych w mniejszej liczbie samochodów. Analizując przesiadkę z samochodów do autokarów, obliczymy przestrzeń na drodze zajmowaną przez jedne i drugie. Weźmy zatłoczoną autostradę, którą chcemy pokonywać z prędkością 100 km/h. Bezpieczna odległość między samochodami, przy tej prędkości, wynosi 80 m. Zakładając, że samochody jadą w odstępach 80 m, a każdy samochód wiezie 1,6 osoby, zapakowanie 40 osób do jednego autokaru zwalnia 2 kilometry drogi!

Zatłoczenie można ograniczyć, oferując dobre alternatywy (ścieżki rowerowe, transport publiczny) i pobierając dodatkowe opłaty od tych użytkowników dróg, którzy się do zatłoczenia przyczyniają. W przypisach do tego rozdziału wskazują sprawiedliwą i prostą metodę szacowania tych opłat.

Usprawnianie samochodów

Zakładając, że romans krajów wysoko rozwiniętych z samochodem będzie trwał, jakie technologie zapewnią nam istotne oszczędności energetyczne? Oszczędności rzędu 10% czy 20% to pestka – omówiliśmy już niektóre sposoby ich osiągnięcia (np. produkowanie mniejszych i lżejszych samochodów). Inna możliwość to przejście z benzyny na olej napędowy. Silniki diesla są droższe w produkcji, ale zazwyczaj zużywają mniej paliwa. Czy jednak istnieją technologie, które mogą radykalnie zwiększyć efektywność łańcucha konwersji energii? (Przypominam, że w przeciętnym samochodzie na benzynę 75% energii jest przekształcane w ciepło i wyrzucane chłodnicą!) No i co z naszym celem odejścia od paliw kopalnych?

W tej części omówimy pięć technologii: hamowanie odzyskowe, samochody hybrydowe, samochody elektryczne, napędzane wodorem oraz samochody na sprężone powietrze.



Fot. 20.15. Stacja Vêlo'v w Lyonie



Fot. 20.16. Przy takich korkach pieszo będzie szybciej...



Rys. 20.17. BMW 530i z zainstalowaną przez Artemis Intelligent Power hydrauliką sterowaną elektronicznie. U dołu, po lewej 6-litrowy akumulator (czerwona butla), mieszczący około 0,05 kWh energii w postaci sprężonego azotu. Na dole po prawej dwa 200-kilowatowe silniki hydrauliczne, napędzające tylne koła, służące zarówno do przyspieszania, jak i hamowania. Samochód wciąż jest zasilany standardowym silnikiem benzynowym o mocy 190 kW, ale dzięki sterowanej elektronicznie przekładni hydraulicznej i hamowaniu odzyskowemu, zużywa 30% mniej paliwa.

Hamowanie odzyskowe

Istnieją cztery sposoby odzyskiwania energii w procesie hamowania.

1. Prądnica połączona z kołami może ładować akumulator lub superkondensator.
2. Silniki hydrauliczne napędzane ruchem kół mogą sprężać powietrze, gromadzone następnie w małej butli.
3. Energię można gromadzić w kole zamachowym.
4. Energię hamowania można gromadzić w postaci energii grawitacyjnej, wjeżdżając pod górę (na rampę) zawsze, kiedy chcemy zwolnić. Opcja gromadzenia energii grawitacyjnej jest mało elastyczna, jako że rampa zawsze musi być tam, gdzie hamujemy. To dobre rozwiązanie dla pociągów, czego przykładem jest Victoria – londyńska linia metra. Każda stacja znajduje się na wzniesieniu. Nadjeżdżające pociągi samoistnie hamują, wjeżdżając pod górę, a odjeżdżając, samoistnie przyspieszają. Tak zaprojektowane „garbate” stacje pozwalają oszczędzić 5% energii i zwiększyć prędkość pociągów o 9%.

Elektryczne hamowanie odzyskowe (do magazynowania energii używa się akumulatora) pozwala odzyskać około 50% energii zużywanej na hamowanie, co przekłada się na około 20% redukcji kosztów energetycznych jazdy po mieście.

Systemy hamowania odzyskowego oparte na kole zamachowym lub silniku hydraulicznym wydają się działać lepiej niż systemy oparte na akumulatorach, odzyskując co najmniej 70% energii zużytej na hamowanie. Rys. 20.17 zawiera opis samochodu hybrydowego z silnikiem benzynowym napędzającym elektronicznie sterowany układ hydrauliczny. W zwykłym cyklu jazdy samochód taki zużywa 30% mniej paliwa niż samochód na benzynie. W trakcie jazdy po mieście zużywa o połowę mniej energii – 62 zamiast 131 kWh na 100 km (5,5 zamiast 12 l benzyny/100 km). Ta poprawa efektywności to zasługa zarówno hamowania odzyskowego, jak i technologii hybrydowej. Hydraulika i koło zamachowe są obiecującym sposobem odzyskiwania energii hamowania, bo są to małe systemy zdolne gromadzić duże ilości energii. Układ koła zamachowego, ważący zaledwie 24 kg (fot. 20.18), przeznaczony do magazynowania energii w samochodzie wyścigowym może zgromadzić 400 kJ (0,1 kWh) – ilość wystarczającą do rozpędzenia przeciętnego samochodu do prędkości 100 km/h, jest w stanie dostarczyć lub przyjąć moc 60 kW. Akumulatory o porównywalnej

mocy musiałyby ważyć jakieś 200 kg. Jeśli nie mamy w samochodzie tak dużego akumulatora, rozwiązaniem może być elektryczny system odzyskowy połączony z kondensatorem. Superkondensatory mają parametry magazynowania energii i zasilania podobne jak koło zamachowe.

Samochody hybrydowe

Samochody hybrydowe, takie jak Toyota Prius (fot. 20.19), mają bardziej efektywne silniki i system elektrycznego hamowania odzyskowego, jednak szczerze mówiąc, obecnie oferowane hybrydy nie wyróżniają się zbytnio (rys. 20.9).

Poziome paski na rysunku 20.9 odpowiadają kilku wybranym modelom samochodów. Mamy tutaj dwie hybrydy. Podczas gdy przeciętny brytyjski samochód emituje 168 g CO₂ na km, hybrydowy Prius emituje około 100 g, podobnie jak kilka innych, niehybrydowych pojazdów – VW Polo *blue motion* emituje 99 g/km, a Smart zaledwie 88 g/km.

Druga hybryda to Lexus RX 400h, reklamowany sloganem „Niska emisja, zero poczucia winy!”. Ale przecież jego emisje to 192 g/km – więcej niż brytyjska średnia?! Komisja Etyki Mediów orzekła, że reklama złamała kodeks reklamowy w zakresie prawdomówności, jakości porównań oraz twierdzeń związanych z ochroną środowiska. „Wzięliśmy pod uwagę, że (...) odbiorcy mogli zrozumieć, iż samochód nie stanowi obciążenia dla środowiska naturalnego, co nie jest zgodne z prawdą, że samochód charakteryzuje się niską emisją CO₂ w stosunku do innych samochodów, co także jest nieprawdziwe”.

W praktyce technologie hybrydowe zapewniają oszczędności paliwa rzędu 20–30%. Tak więc ani hybrydy spaliniowo-elektryczne, ani spaliniowo-hydrauliczne pokazane na fot. 20.17 nie są prawdziwym przełomem w transporcie. 30-procentowa redukcja zużycia paliw kopalnych robi wrażenie, ale nie spełnia standardów tej książki. Zgodnie z naszym wyjściowym założeniem mamy odejść od paliw kopalnych, albo przynajmniej zredukować ich zużycie o 90%. Czy możemy wobec tego osiągnąć ten cel bez przesiadki na rowery?

Pojazdy elektryczne

Samochód elektryczny o nazwie REVA miał premierę w czerwcu 2001 roku w Bangalore. Eksportuje się go do Wielkiej Brytanii pod nazwą G-Wiz. Silnik elektryczny G-Wiza o mocy maksymalnej 13 kW pracuje ze stałą mocą 4,8 kW. Wyposażony jest w system hamowania odzyskowego. Zasilą go osiem 6-woltowych akumulatorów kwasowych, na jednym ładowaniu przejeżdża „do 77 km”. Pełne ładowanie pobiera 9,7 kWh prądu. Liczby te oznaczają koszt transportowy rzędu 13 kWh na 100 km.

Producenci zawsze informują o najlepszych możliwych osiągnięciach swojego produktu. Jak to wygląda w rzeczywistości? Rzeczywiste osiągnięcia G-Wiza w Londynie pokazane są na fot. 20.21. Po 19 ładowaniach średni koszt transportowy tego G-Wiza wynosi 21 kWh na 100 km – mniej więcej cztery razy mniej niż w przypadku przeciętnego samochodu na benzynę. Najlepszy wynik to 16 kWh na 100 km, najgorszy – 33 kWh na 100 km. Jeżeli kogoś interesują emisje CO₂, 21 kWh na 100 km jest równoważne 105 g CO₂ na km, zakładając, że ślad węglowy elektryczności wynosi 500 g CO₂ na kWh [dla Polski 21 kWh na 100 km odpowiada emisjom 210 g CO₂ na km, przyjmując, że ślad węglowy elektryczności w Polsce wynosi 1kg CO₂ na kWh – red.]

W tabeli osiągnięć G-Wiz plasuje się na jednym krańcu spektrum. A jeśli chcemy więcej – lepszego przyspieszenia, większej prędkości maksymalnej



Fot. 20.18. System hamowania odzyskowego oparty na kole zamachowym
Fot. Flybrid Systems



Fot. 20.19. Toyota Prius – wg. Jeremiego Clarksona, „bardzo drogi, bardzo skomplikowany, niezbyt ekologiczny, powolny, wyprodukowany niskim kosztem i w ogóle pozbawiony sensu sposób podróżowania”.



i większego zasięgu bez doładowywania? Na drugim końcu spektrum mamy Teslę Roadstera. Tesla Roadster 2008 przejeżdża na jednym ładowaniu 350 km; akumulator litowo-jonowy gromadzi 53 kWh energii, a waży 450 kg (120 Wh/kg). Samochód waży 1220 kg, a moc maksymalna silnika wynosi 185 kW. Jakie jest zużycie energii tego pokaznego samochodu? Co ciekawe, jest mniejsze niż w przypadku G-Wiz i wynosi **15 kWh na 100 km**. Dowodem na to, że zasięg 350 km powinien satysfakcjonować większość ludzi, jest fakt, że zaledwie 8,3% kierowców jeździ do pracy dalej niż 30 km.

Przejrzałem dane dotyczące osiągnięć wielu pojazdów elektrycznych – wymieniam je w przypisach na końcu rozdziału – wydają się zgodne z naszym twierdzeniem, że koszt transportowy samochodów elektrycznych wynosi mniej więcej **15 kWh na 100 km**.

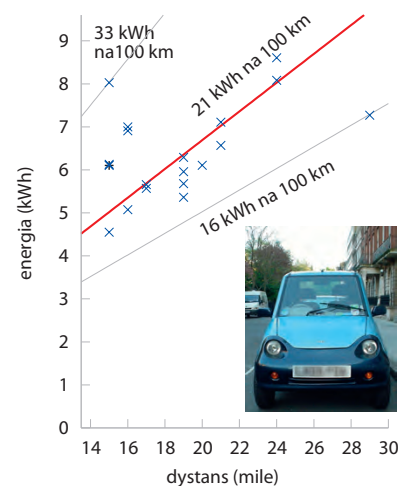
To pięć razy mniej niż nasz standardowy samochód na benzynę i znacznie mniej niż którykolwiek samochód hybrydowy. Hura! By jeździć oszczędnie, nie musimy się tłoczyć w środkach transportu publicznego – nadal możemy pomykać swobodnie, ciesząc się przyjemnościami jazdy w pojedynkę, właśnie dzięki samochodom elektrycznym.

W Pruszkowie produkuje się samochód elektryczny SAM RE-Volt. Silnik o mocy znamionowej 11,6 kW zasilany jest akumulatorami litowo-jonowymi o pojemności 7 kWh każdy. SAM wyposażony jest w system hamowania odzyskowego KERS. Na jednym ładowaniu przejeżdża „do 100 km”. Zużywa przeciętnie 7 kWh na 100 km, czyli o ponad połowę mniej niż średnia oszacowana przez Davida (SAM jest jednak lekkim, dwuosobowym trójkołowcem). Przy koszcie 50 gr za 1 kWh prądu 100-kilometrowa przejażdżka SAM-em kosztuje 3,5 zł.

Ta radosna chwila to dobry moment, by ujawnić wielki wykres podsumowujący ten rozdział. Rys. 20.23 ilustruje zapotrzebowanie na energię wszystkich form transportu pasażerskiego, które przedyskutowaliśmy i jeszcze kilku, które dopiero przedyskutujemy.

Dobrze więc, mamy koniec wyścigu i ogłosiliśmy zwycięzców – to transport publiczny, rowery i samochody elektryczne. A może są inne możliwości, dojeżdżające właśnie do mety? Musimy jeszcze omówić samochody zasilane sprężonym powietrzem i samochody na wodór. Nawet jeśli któryś z nich okaże się lepszy niż samochód elektryczny, nie wpłynie to znacząco na długofalową perspektywę – którąkolwiek z tych trzech technologii wybierzemy, pojazdy powinny być zasilane energią z „zielonych” źródeł.

Fot. 20.20. Pojazdy elektryczne. Od lewej: G-Wiz, rdzewiejący wrak Sinclaira C5, Citroën Berlingo oraz Elettrica

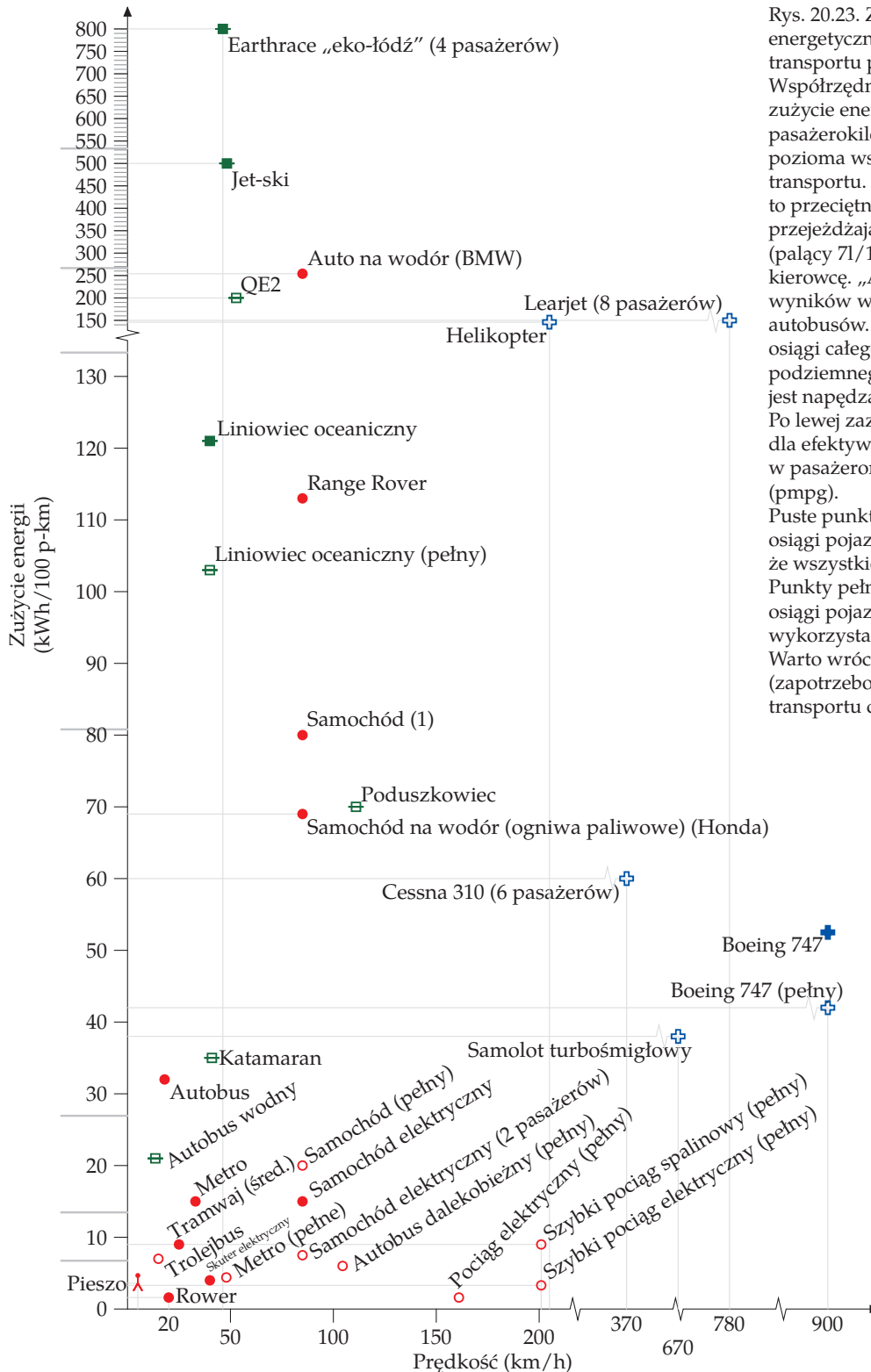


Rys. 20.21. Ilość prądu potrzebna do naładowania G-Wiza w stosunku do przejechanego dystansu. Pomiary przy gniazdku



Fot. 20.22. Tesla Roadster, 15 kWh na 100 km

www.teslamotors.com



Rys. 20.23. Zapotrzebowanie energetyczne różnych środków transportu pasażerskiego. Współrzędna pionowa pokazuje zużycie energii w kWh na 100 pasażerokilometrów. Współrzędna pozioma wskazuje prędkość środka transportu. „Samochód (1)” to przeciętny brytyjski samochód, przejeżdżający 33 mile na galonie (palący 7l/100 km), wiozący tylko kierowcę. „Autobus” to średnia wyników wszystkich londyńskich autobusów. „Metro” odzwierciedla osiągi całego systemu transportu podziemnego Londynu. Katamaran jest napędzany silnikiem diesla. Po lewej zaznaczyłem odpowiednik dla efektywności paliwowej w pasażeromilach na galon brytyjski (pmpg). Puste punkty oznaczają najlepsze osiągi pojazdu przy założeniu, że wszystkie miejsca są zajęte. Punkty pełne oznaczają rzeczywiste osiągi pojazdu dla typowego wykorzystania. Warto wrócić do rys. 15.8 (zapotrzebowanie na energię transportu ciężarowego).

Samochody na sprężone powietrze

Samochody zasilane powietrzem to pomysł nienowowy. Setki tramwajów na sprężone powietrze i gorącą wodę przemierzały ulice Nantes i Paryża w latach 1879–1911. Na fot. 20.24 widać niemiecką lokomotywę pneumatyczną z 1958 roku. Sądzę, że w zakresie efektywności energetycznej technika sprężania powietrza w celu magazynowania energii jest równie dobra, jak akumulatory elektryczne. Sęk w tym, że przy sprężaniu powietrza powstaje ciepło, które raczej nie zostanie spożytkowane efektywnie, a przy rozprężaniu powietrza – chłód, inny produkt uboczny, który też raczej nie zostanie zużyty efektywnie. Technologia sprężania powietrza ma jednak kilka istotnych przewag nad akumulatorem elektrycznym. Na przykład powietrze może być sprężane tysiące razy i nie zużywa się! Interesujące, że pierwszym produktem wypuszczonym na rynek przez Aircar jest skuter elektryczny [www.theaircar.com/acf].

Indyjski Tata Motors deklaruje zainteresowanie samochodami na powietrze. Nie wiadomo jednak, czy będziemy mieli renesans technologii sprężania powietrza, bo nie upubliczniono specyfikacji żadnego nowoczesnego prototypu. Podstawowym ograniczeniem jest fakt, że gęstość energetyczna w butli na sprężone powietrze wynosi zaledwie 11–28 Wh na kg. To mniej więcej tyle, ile w akumulatorze kwasowym i jakieś pięć razy mniej niż w akumulatorze litowo-jonowym (szczegóły dotyczące innych technologii magazynowania dostępne są na rys. 26.13, str. 208). Zasięg samochodu na sprężone powietrze nie będzie nigdy większy niż zasięg pierwszych samochodów elektrycznych. Systemy magazynowania za pomocą sprężonego powietrza mają jednak nad akumulatorami kilka przewag: większa trwałość, tańsza konstrukcja i mniej paskudnych chemikaliów.

Pojazdy napędzane wodorem – samochody jak sterowce

Uważam, że wodór jest przereklamowany. Wolałbym się mylić, nie wiem jednak, w jaki sposób wodór miałby przyczynić się do rozwiązania naszych problemów energetycznych. Wodór nie jest jakimś cudownym źródłem energii, jest jedynie nośnikiem energii, jak bateria wielokrotnego ładowania. I to raczej nieefektywnym nośnikiem energii, z całą masą defektów w użytkowaniu.

„Gospodarkę opartą na wodorze” wsparł magazyn „Nature”. Pochwalił gubernatora Kalifornii Arnolda Schwarzeneggera za to, że jeździ hummerem na wodór (fot. 20.25) „Nature” przytakuje wizji Arnolda, według którego samochody na wodór zastąpią „brudne modele” i konstatuje, że „gubernator jest prawdziwym bohaterem akcji na rzecz klimatu”. Skoro już mowa o wodorowym bohaterstwie, należy zadać sobie kluczowe pytanie: „Skąd weźmiemy energię, by wyprodukować wodór?”. Konwersja energii do postaci wodoru i z wodoru jest zawsze nieefektywna. Przynajmniej przy obecnym poziomie zaawansowania technologicznego.

Oto kilka liczb.

- W projekcie CUTE (Clean Urban Transport for Europe – Czysty Transport dla Europy), który miał pokazać możliwość zastosowania autobusów na ogniwa paliwowe oraz w technologii wodorowej, zasilanie autobusów na wodór wymagało od 80% do 200% więcej energii niż w przypadku zwykłego autobusu z silnikiem diesla.



Fot. 20.24. U góry: tramwaj na sprężone powietrze tankujący sprężone powietrze i parę wodną w Nantes. Napędzanie tramwajów w Nantes pochłaniało 4,4 kg węgla (36 kWh) na pojazdokilometr lub 115 kWh na 100 pkm, przy założeniu, że wszystkie miejsca były zajęte. {5qhvcb}

U dołu: lokomotywa na sprężone powietrze o wadze 9,2 t, ciśnieniu 175 bar, mocy 26 kW.

Fot. Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert i Frankfurter Feldbahnmuseum



Fot. 20.25. Hummer H2H – zielona rewolucja na modłę amerykańską. Fot. General Motors

- Zasilenie BMW na wodór *Hydrogen 7* pochłania **254 kWh energii na 100 km** – 220% więcej niż w przypadku przeciętnego europejskiego samochodu.

Gdyby naszym zadaniem było „odejście od paliw kopalnych w transporcie przy założeniu, że dysponujemy nieskończoną ilością darmowej zielonej energii”, wówczas można by brać pod uwagę energochłonne rozwiązania transportowe, takie jak wodór (aczkolwiek z wodorem wiążą się też inne problemy). Niestety *zielona elektryczność nie jest za darmo*. W istocie, zapewnienie zielonej energii na miarę naszej konsumpcji będzie nie lada wyzwaniem. Paliwa kopalne są wyzwaniem energetycznym. Zmiany klimatu są problemem energetycznym. Musimy skupić się na rozwiązaniach mniej, a nie bardziej energochłonnych! Nie znam żadnego środka transportu lądowego o zużyciu energii wyższym niż samochód na wodór! (Bardziej energochłonny jest tylko odrzutowiec, zużywający jakież **500 kWh na 100 km** oraz *Earthrace* – motorówka napędzana biodiesłem, absurdalnie zwana ekolodnią, zużywająca **800 kWh na 100 pkm**).

Zwolennicy wodoru stwierdzą: „BMW Hydrogen 7 jest prototypem i potężnym autem luksusowym – efektywność technologii się poprawi”. Mam nadzieję, bo jest tu wiele do zrobienia. Tesla Roadster (fot. 20.22) też jest prototypem i potężnym autem luksusowym. A mimo to jest ponad 10 razy efektywniejsza energetycznie niż Hydrogen 7! Kto chce, niech stawia na wodorowego konia, droga wolna. To jednak nierozsądne typować konia, który tak wyraźnie zostaje w tyle. Wystarczy spojrzeć na rys. 20.30 – gdybyśmy nie skompresowali górnej części osi pionowej, samochód na wodór nie zmieściłby się na stronie!

Owszem, Honda na ogniwa paliwowe FCX Clarity jest lepsza – zużywa 69 kWh na 100 km – przewiduję jednak, że kiedy umilkną fanfary „zeroemisyjności”, okaże się, że samochody na wodór zużywają tyle samo energii, co dzisiejsze samochody na benzynę.

Oto kilka kolejnych problemów związanych z wodorem. Wodór jest gorszą formą magazynowania energii niż większość paliw płynnych, a to z uwagi na swoją objętość – niezależnie, czy występuje w postaci gazu pod wysokim ciśnieniem, czy płynu (co wymaga temperatury rzędu minus 253 °C). Nawet pod ciśnieniem 700 atmosfer (co wymaga naprawdę mocnego pojemnika ciśnieniowego) jego gęstość energetyczna (energia na jednostkę objętości) wynosi 22% gęstości benzyny. Kriogeniczny bak BMW Hydrogen 7 waży 120 kg i mieści 8 kg wodoru. Co więcej, wodór stopniowo wycieknie z praktycznie każdego zbiornika. Spróbujmy zaparkować samochód z pełnym bakiem wodoru na stacji kolejowej i wróćmy po tygodniu. Zapewne większość wodoru zniknie.

Kilka pytań o samochody elektryczne

Dowodzi pan, że samochody elektryczne są bardziej efektywne energetycznie niż te zasilane paliwami kopalnymi. Czy jednak przyczynią się do ograniczenia emisji CO₂, skoro większość prądu nadal pochodzi z elektrowni na węgiel i gaz?

Rachunek jest prosty. Założmy, że koszt energetyczny samochodu elektrycznego wynosi 20 kWh(e) na 100 km (choć uważam, że możliwe jest 15 kWh(e) na 100 km, poprzestańmy jednak na ostrożnej kalkulacji). Jeżeli sieć elektryczna ma ślad węglowy rzędu 500 g na kWh(e), wówczas rzeczywista emisja samochodu wyniesie **100 g CO₂ na km**, czyli tyle, ile emisja najmniej emisyjnego samochodu z silnikiem spalinowym (fot. 20.9). Reasumując, samochody elektryczne już teraz są dobrym wyborem. Jeszcze zanim zapewnimy sobie prąd z odnawialnych źródeł.



Fot. 20.26. BMW Hydrogen 7. Zużycie energii: 252 kWh na 100 km
Fot. BMW



Fot. 20.27. „Ekołódka” Earthrace
Fot. David Castor



Fot. 20.28. Honda FCX Clarity – sedan na ogniwa paliwowe zasilane wodorem.
Obok aktorka Jamie Lee Curtis
Fot. automobiles.honda.com

Polska energetyka oparta jest na węglu – brudnym paliwie kopalnym, którego spalanie wiąże się z wysoką emisją CO₂. Do tego polskie elektrownie są niezbyt efektywne, zamieniając w elektryczność jedynie ok. 1/3 energii węgla. W rezultacie prowadzi to do emisji 1 kg CO₂ na każdą kWh prądu – dwukrotnie więcej niż w Wielkiej Brytanii. Związana z przejechaniem 1 km emisja CO₂ nie będzie więc wynosić 100 g, lecz 200 – czyli wynik dla sporej terenówki. Z tego powodu dzisiaj jazda samochodem elektrycznym w Polsce nie jest niestety dobrym sposobem na zmniejszenie emisji dwutlenku węgla.

Produkcja i eksploatacja samochodu kosztuje – niezależnie, czy to samochód elektryczny, czy z silnikiem spalinowym. Jazda samochodem elektrycznym może być tańsza niż jazda samochodem na benzynę czy gaz, jednak jego akumulatory nie są zbyt trwałe. Czy nie powinniśmy tego uwzględnić w kosztach eksploatacji?

To słuszna uwaga. Mój diagram transportowy pokazuje jedynie koszt przejazdu. Jeżeli w samochodzie elektrycznym co kilka lat trzeba wymieniać akumulator, moje liczby mogą być niedoszacowane. Żywotność akumulatora dla Toyoty Prius szacuje się na zaledwie 10 lat, a nowy kosztuje 3500 funtów. Czy posiadacz dziesięcioletniego Priusa zechce tyle zapłacić? Zapewne większość Priusów po 10 latach trafi na złom. Akumulator to pięta achillesowa pojazdów elektrycznych. Zakładam optymistycznie, że wraz z rozpowszechnieniem samochodów na prąd, powstaną lepsze akumulatory.

Mieszkam w gorącym klimacie. Jak mam jeździć elektrycznym samochodem? Muszę mieć w nim energożerną klimatyzację!

Istnieje dobry sposób zaspokojenia tego zwiększonego zapotrzebowania na prąd – 4 m² paneli fotowoltaicznych na dachu samochodu elektrycznego. Jeżeli potrzebujemy włączyć klimatyzację, znaczy to, że świeci słońce. Panele o efektywności rzędu 20% wygenerują do 800 W energii, co wystarczy do zasilenia klimatyzacji. Panele mogą nawet częściowo ładować zaparkowany samochód. Klimatyzacja zasilana słońcem znalazła się na wyposażeniu Mazdy w 1993 roku – ogniwa słoneczne zostały umieszczone w szklanym dachu.

Mieszkam w zimnym klimacie. Jak mam jeździć elektrycznym samochodem? Muszę mieć w nim energożerne ogrzewanie!

Silnik samochodu elektrycznego podczas jazdy zużywa średnio 10 kW, z efektywnością rzędu 90–95%. Pozostała część energii 5–10%, wydzielona w silniku w postaci ciepła. Zapewne da się tak zaprojektować samochody elektryczne do użytku w chłodnym klimacie, by to ciepło, rzędu nawet 250 lub 500 W, ogrzewało wnętrze samochodu. Taka ilość ciepła przyczyniłaby się do ogrzania szyb, kierowcy i pasażerów.

Czy akumulatory litowo-jonowe mogą stanowić zagrożenie w razie wypadku?

Niektóre akumulatory litowo-jonowe źle znoszą krótkie spięcia lub przegrzanie, ale w produkcji są już bezpieczniejsze akumulatory, litowo-fosforanowe. Więcej na ten temat w zabawnym filmiku na www.valence.com

Czy wystarczy litu do akumulatorów, jeżeli zaczniemy masowo produkować samochody elektryczne?

Światowe zasoby litu, w postaci rudy, szacuje się na 9,5 mln ton (str. 175). Akumulator litowo-jonowy zawiera 3% litu. Przy założeniu, że akumulator waży 200 kg, potrzebujemy 6 kg litu na pojazd. Szacowane zasoby rud litu wystarczą na wyprodukowanie akumulatorów dla 1,6 mld pojazdów. To więcej niż mamy obecnie samochodów na świecie (około miliard), ale niewiele więcej, tak więc obawy o wyczerpywanie złóż litu są uzasadnione. Szczególnie, że konkurencję stanowi przemysł jądrowy i pomysł zastosowania litu w reaktorach (rozdział 24). Tysiące razy więcej litu zawiera woda morska – być może dodatkowego litu dostarczą oceany. Co więcej, jak mówi ekspert zajmujący się litem R. Keith Evans: „Nieuzasadnione są obawy, czy wystarczy litu do akumulatorów dla samochodów hybrydowych i elektrycznych i dla innych znanych nam zastosowań”. Tak czy owak, już rozwijają się inne technologie bezlitowych akumulatorów, takie jak akumulator cynkowo-powietrzny [www.revolttechnology.com]. Myślę, że samochód elektryczny ma przyszłość!

Przyszłość latania?

Według Airbusa Superjumbo A380 jest „samolotem o wysokiej efektywności zużycia paliwa”. W rzeczywistości pali zaledwie 12% mniej paliwa na pasażera niż Boeing 747.

Boeing ogłosił podobne rewelacje: nowy 747-8 Intercontinental, obtrąbiony jako przyjazny planecie, ma (według reklamy Boeinga) zaledwie 15% niższe zużycie paliwa niż 747-400.

Wolne tempo postępu technologicznego (w kontraście do postępu w motoryzacji, gdzie przełomy technologiczne przynoszą dwukrotną, a nawet trzykrotną poprawę efektywności), wyjaśniono w rozdziale technicznym C. Samoloty wznoszą się w powietrze, walcząc z podstawowymi prawami fizyki. Każdy samolot, niezależnie od rozmiaru, musi zużywać 0,4 kWh na tonokilometr, by przemieszczać się w powietrzu. Efektywność samolotów i tak została już fantastycznie zoptymalizowana. Nie ma widoków na znaczącą poprawę w tym zakresie.

Jakiś czas temu sądziłem, że rozwiązaniem problemu transportu długodystansowego byłby powrót do tego, co było przed samolotami, czyli statków morskich. Potem przeanalizowałem liczby. Smutna prawda jest taka, że statek zużywa więcej energii na pasażerokilometr niż samolot. Queen Elisabeth 2 zużywa 4 razy więcej energii na pasażerokilometr niż samolot odrzutowy. No dobrze, to statek luksusowy, co z wolniejszym liniowcem klasy turystycznej? W latach 1952–1968 tanim sposobem przedostania się przez Atlantyk była podróż jednym z dwóch holenderskich liniowców, zwanych „Tanimi Bliźniakami” – Maasdamem lub Rijndamem. Pływały z prędkością 16,5 węzłów (30,5 km/h), tak więc podróż z Wielkiej Brytanii do Nowego Jorku zabierała 8 dni. Jeżeli wiozły komplet pasażerów, czyli 893 osób, zużycie energii wynosiło 103 kWh na 100 pkm. Przy średnim wypełnieniu rzędu 85% zużycie energii wynosiło 121 kWh na 100 pkm – ponad dwa razy więcej niż w przypadku samolotu odrzutowego. Oddając statkom sprawiedliwość, energię zużywają nie tylko na transport, ale też na ogrzewanie, gorącą wodę, światło i rozrywki dla załogi i pasażerów, w dodatku przez szereg dni. Niestety, energia zaoszczędzona w domu (bo zużyta na statku) jest niczym w porównaniu z konsumpcją



Fot. 20.29. Airbus A380

energii na liniowcu, która, w przypadku Queen Elisabeth 2, wynosi jakieś 3 000 kWh na osobę dziennie.

Ze smutkiem stwierdzam, że statki nie konsumują mniej energii niż samoloty. Skoro jednak szukamy możliwości podróżowania na długich dystansach bez wykorzystania paliw kopalnych, ciekawą opcją mogą być statki z napędem atomowym (fot. 20.31 i 20.32).

A co z transportem towarowym?

Międzynarodowy towarowy transport morski zaskakująco efektywnie wykorzystuje paliwa kopalne. Odejście od paliw kopalnych w transporcie drogowym jest więc większym priorytetem niż odejście od paliw kopalnych w transporcie morskim. Tak, ale paliwa kopalne są zasobem nieodnawialnym i statki, koniec końców, będą musiały pływać dzięki innemu paliwu. Rozwiązaniem mogą być biopaliwa. Kolejnym może być energia jądrowa. Pierwszym statkiem towarowo-pasażerskim zasilanym energią jądrową był NS Savannah, zwodowany w 1962 jako element inicjatywy prezydenta Dwighta D. Eisenhowera „Atom dla pokoju” (fot. 20.31).

Zasilany 74-megawatowym reaktorem jądrowym, wprawiającym w ruch 15-megawatowy silnik Savannah pływał z prędkością eksploatacyjną 21 węzłów (39 km/h), zabierał 60 pasażerów i 14 000 ton ładunku. Oznacza to koszt transportowy w wysokości 0,14 kWh na tonokilometr. Statek mógł przepłynąć 500 000 km bez pobrania paliwa. Pływa już wiele okrętów jądrowych zarówno wojskowych, jak i cywilnych. Na przykład Rosja dysponuje dziesięcioma lodołamaczami o napędzie nuklearnym, z czego siedem jest wciąż na chodzie. Na fot. 20.32 znajduje się lodołamacz o napędzie jądrowym Jamał, wyposażony w dwa 171-megawatowe reaktory oraz silniki o mocy 55 MW.

„Chwileczkę! Nie wspomniał pan o lewitacji magnetycznej”

Niemiecka firma Transrapid, która zbudowała kolej magnetyczną w chińskim Szanghaju (fot. 20.33), twierdzi: „Superszybki system kolei magnetycznej Transrapid nie ma sobie równych w kategoriach redukcji hałasu, niskiego zużycia energii i użytkowania przestrzeni. Innowacyjny transport bez kontaktu z podłożem oferuje mobilność bez obciążania środowiska naturalnego”.

Lewitacja magnetyczna (*maglev*) to jedna z wielu technologii podawanych jako dobry przykład w dyskusjach na tematy energetyczne. Tymczasem w zakresie zużycia energii, w porównaniu z innymi pociągami dużej prędkości Transrapid nie wypada aż tak korzystnie:

Pociągi dużej prędkości przy prędkości 200 km/h (125 mil/h)

Transrapid 2,2 kWh na 100 pasażerokilometrów (jeśli pełny)

ICE 2,9 kWh na 100 pasażerokilometrów (jeśli pełny)

Strona internetowa Transrapid zawiera porównanie Transrapid z pociągiem Inter-CityExpress (ICE), elektrycznym pociągiem dużych prędkości.

Oto główne powody, dla których kolej magnetyczna wypadła nieco lepiej niż ICE: silnik z napędem magnetycznym ma wysoką sprawność; sam pociąg jest lekki, bo większa część systemu napędowego znajduje się w torowisku;



Fot. 20.30. TSS Rijndam



Fot. 20.31. NS Savannah, pierwszy handlowy statek towarowy o napędzie nuklearnym, przepływający pod Golden Gate Bridge w 1962



Fot. 20.32. Lodołamacz o napędzie nuklearnym Jamał z setką turystów na pokładzie płynie na biegun północny (2001).
Fot. Wofratz

zabiera większą liczbę pasażerów, bo nie potrzebuje miejsca na silniki. Nie bez znaczenia jest fakt, że to dane ze strony producenta *magleva*. Muszą wskazywać, że kolej magnetyczna jest lepsza!

Co ciekawe, ci którzy widzieli Transrapid w Szanghaju, twierdzą, że przy pełnej prędkości jest „równie cichy jak odrzutowiec”.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 131 Powszechnie cytowane statystyki mówią: „Zaledwie 1 procent energii zużywanej przez samochód służy do przemieszczania kierowcy”. Liczne wersje tej legendy różnią się wartością procentową. Jedni mówią: „5% energii służy do przemieszczania kierowcy”. Inni twierdzą: „Zaledwie trzy dziesiąte z jednego procenta energii zawartej w paliwie służy do przemieszczania kierowcy”. [4qgg8q] Według mnie żadna z tych liczb nie jest ani prawdziwa, ani przydatna.
- Osiągi roweru są zbliżone do osiągnięć ekosamochodu. Jazda zwykłym rowerem to koszt energetyczny ok. 1,6 kWh na 100 km, przy prędkości 20 km/h. Szczegóły i adnotacje zawarte są w rozdziale A, str. 262.
 - Pociąg osobowy z Cambridge do Londynu liczący 8 wagonów (fot. 20.4) waży 275 ton i ma 584 miejsc siedzących. Jego prędkość maksymalna wynosi 100 mi/h (161 km/h), a moc wyjściowa – 1,5 MW. Jeżeli wszystkie miejsca są zajęte, to przy prędkości maksymalnej pociąg zużywa najwyżej 1,6 kWh na 100 pasażerokilometrów.
 - 132 Londyńska kolej podziemna. Pociąg linii Victoria składa się z czterech 30,5-tonowych i czterech 20,5-tonowych wagonów (te pierwsze wyposażone są w silniki). Przeciętna waga pociągu wynosi więc 228 ton. Prędkość maksymalna wynosi 45 mi/h (72 km/h). Prędkość średnia – 31 mi/h (50 km/h). Kiedy większość miejsc siedzących jest zajęta, pociąg wiezie około 350 pasażerów; zapakowany po brzegi – około 620. Zużycie energii w godzinach szczytu wynosi mniej więcej 4,4 kWh na 100 pasażerokilometrów (Catling, 1966).
 - Pociąg dużej prędkości. Napędzany silnikiem diesla pociąg InterCity 125 (na fot. 20.5 po lewej) waży 410 ton. Przy prędkości 125 mi/h (201 km/h), zużywana moc wynosi 2,6 MW. Pociąg zabiera do 500 pasażerów. Średnie zużycie paliwa wynosi 0,84 litra diesla na 100 pasażerokilometrów [5o5x5m], co daje koszt transportowy rzędu 9 kWh na 100 pasażerokilometrów. Elektryczny pociąg Class 91 (na fot. 20.5 po lewej) przy prędkości 140 mi/h (225 km/h) zużywa 4,5 MW. Wg Rogera Kempa średnie zużycie energii tego pociągu wynosi 3 kWh na 100 pasażerokilometrów [5o5x5m]. Wg analiz rządowych [5fbeg9] pociągi na magistralach kolejowych wschodniego i zachodniego wybrzeża zużywają około 15 kWh na km (cały pociąg). Liczba miejsc w tych pociągach wynosi 526 (na magistrali wschodniego wybrzeża) i 470 (na zachodnim wybrzeżu). Daje to 2,9 – 3,2 kWh na 100 pasażerokilometrów.
 - 133 całkowity koszt energetyczny funkcjonowania londyńskiego metra wyniósł 15 kWh na 100 pkm (...) koszt energetyczny londyńskich autobusów wyniósł 32 kWh na 100 pkm. Źródło: [679rpc]. Źródło danych dot. prędkości pociągów i autobusów: Ridley and Catling (1982).
 - Całkowite zużycie energii w systemie tramwajowym w londyńskim Croydon. www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf
www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf
www.croydon-tramlink.co.uk
 - 135 W aglomeracji warszawskiej energetyczny koszt dojazdu Octavią wynosi około 50 kWh na 100 pkm. W 2005 roku samochody wiozły przeciętnie 1,3 pasażera (źródło: *Warszawskie Badanie Ruchu 2005*, <http://www.siskom.waw.pl/komunikacja/WBR2005-raport-koncowy.pdf>). Przy koszcie energetycznym samochodu rzędu 70 kWh na 100 km daje to około 50 kWh na 100 pasażerokilometrów.



Fot. 20.33. Pociąg kolei magnetycznej na międzynarodowym lotnisku Pudong w Shanghaju:

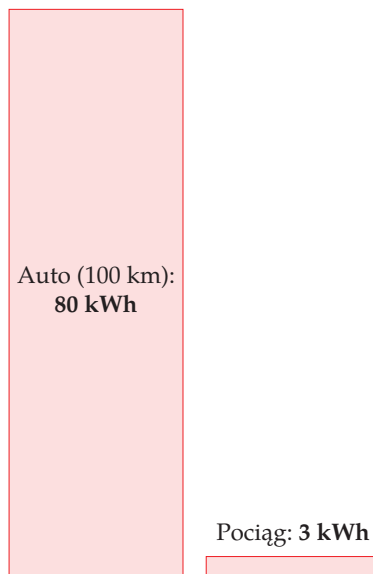
„jadący bez kół,
lejący bez skrzydeł”

Fot. Alex Needham



Fot. 20.34. 9 na 10 samochodów w Londynie to elektryczne G-Wizy (a 95% statystyk sfalszowano)

- 135 (...) **budowa znakomitej infrastruktury rowerowej** (...) – Brytyjskie wytyczne w sprawie projektowania ulic [www.manualforstreets.org.uk] promują projekty ulic o optymalnej prędkości ruchu na poziomie 20 mil/h (32 km/h). Więcej w: Franklin (2007).
- 136 ... **sprawiedliwą i prostą metodę pobierania tych opłat**. Stephen Salter opowiedział mi o świetnym pomysle zautomatyzowanego poboru opłat za wjazd do centrum. Zwykła dzienna opłata za wjazd do centrum Londynu wysyła kierowcom jedynie sygnał – kiedy kierowca zdecyduje się zapłacić, nie ma zachęty, by niewiele jeździć po centrum. Ani też nie odnosi żadnych korzyści, jeżeli skrupulatnie wybierze mało zatłoczone ulice. Zamiast więc delegować odgórnie siły porządkowe, które zdecydują zawczasu, gdzie są płatne strefy, a potem będą je drogo i kosztem naszej intymności monitorować i nagrywać, Salter proponuje prostszy, zdecentralizowany i anonimowy system poboru opłat za wjazd do zatłoczonych stref – kiedykolwiek i gdziekolwiek to zatłoczenie rzeczywiście występuje. System działałby na poziomie kraju. A oto zasady jego funkcjonowania. Potrzebujemy urządzenia, które odpowie nam na pytanie: „Jak bardzo zatłoczona jest droga, którą właśnie jadę?”. Dobrym sposobem mierzenia zatłoczenia jest sprawdzenie „jak dużo samochodów jedzie obok mnie?”. W szybkim ruchu drogowym odległość między pojazdami jest większa niż w powolnym. W korku samochody toczą się z trudem, blisko siebie, jeden za drugim. Liczba samochodów jadących w pobliżu można zmierzyć anonimowo, umieszczając w każdym pojeździe radionadajnik/odbiornik (np. najtańszą komórkę), który będzie transmitował regularne sygnały radiowe zawsze, kiedy silnik jest w ruchu oraz liczył sygnały, które odbiera od innych samochodów. Opłata za przejazd byłaby proporcjonalna do liczby sygnałów naliczonych, można by ją uiszczać na stacjach benzynowych przy okazji tankowania. Radionadajnik/odbiornik zastąpiłby stosowaną dziś w Wielkiej Brytanii winietę podatkową.
- 137 **Systemy hamowania odzyskowego oparte na silniku hydraulicznym lub kole zamachowym odzyskują co najmniej 70% energii zużytej na hamowanie**. Sprężone powietrze stosowane jest do hamowania odzyskowego w ciężarówkach; strona www.eaton.com podaje, że „hydrauliczne wspomaganie startu” (*hydraulic launch assist* – HLA) odzyskuje 70% energii kinetycznej. [5cp27]]. System oparty na kole zamachowym flybridsystems.com również wychwytuje 70% energii kinetycznej: www.flybridsystems.com/F1System.html
Elektryczne hamowanie odzyskowe pozwala odzyskać około 50% energii.
 Źródło: E4tech (2007).
- 138 **Akumulatory o mocy 60 kW musiałyby ważyć jakieś 200 kg**. Dobre akumulatory litowo-jonowe mają moc właściwą rzędu 300 W/kg (Horie i inni, 1997; Mindl, 2003).
- ... **przeciętny brytyjski samochód emituje 168 g CO₂ na km**. To dane z roku 2006 (King, 2008). Średnia emisja nowego samochodu osobowego w SA wyniosła 255 g na km (King, 2008).
 - **Samochody hybrydowe, takie jak Toyota Prius, mają bardziej efektywne silniki i system elektrycznego hamowania odzyskowego**. Silnik benzynowy Priusa pracuje w obiegu Atkinsona zamiast w konwencjonalnym obiegu Otto. Dzięki sprytnemu mieszanii mocy elektrycznej i mocy benzyny, zgodnie z potrzebami kierowcy, Prius zadowala się silnikiem mniejszym niż zazwyczaj mają samochody tej wagi i konwertuje benzynę na pracę w sposób bardziej efektywny niż konwencjonalne silniki spalinowe.
 - **Technologie hybrydowe zapewniają oszczędności paliwa rzędu 20 – 30%**. Na przykład raport badawczy Hitachi (Kaneko i inni, 2004) w opisie pociągów hybrydowych stwierdza, że wysoce efektywne generowanie mocy oraz hamowanie odzyskowe: „Mogą dać oszczędności paliwa rzędu 20% w porównaniu do konwencjonalnych pociągów zasilanych silnikiem diesla”.
- 139 **zaledwie 8,3% kierowców jeździ do pracy dalej niż 30 km**. Źródło: Eddington (2006). Zależność między wielkością akumulatora i zasięgiem samochodu elektrycznego została omówiona w rozdziale A (str. 261).



Rys. 20.35. Koszt energetyczny na podróżnego: 100 km w samochodzie (jedzie tylko kierowca) i 100 km w elektrycznym pociągu dużej prędkości (wszystkie miejsca są zajęte).



Fot. 20.36. Tramwaje sprawdzają się zarówno w Stambule, jak i w Pradze.

- ... **wielu pojazdów elektrycznych**. Wszystkie wymieniam poniżej bez szczególnego porządku. Dane dotyczące osiągnięć pochodzą głównie od producentów. Jak przekonaaliśmy się na stronie 127, rzeczywiste osiągi nie zawsze pokrywają się z deklaracjami producentów.

Th!nk Norweskie samochody elektryczne. Pięciodrzwiowy Th!nk Ox ma zasięg 200 km. Akumulatory ważą 350 kg, a cały samochód – 1 500 kg. Zużycie energii wynosi mniej więcej **20 kWh na 100 km**. www.think.no

Elektryczny Smart „Wersja elektryczna jest zasilana przez silnik o mocy 40 koni mechanicznych BHP (29KW). Przejeżdża do 70 mil (113 km). Prędkość maksymalna wynosi 70 mil/h (113 km/h). Ładowanie w zwykłym gniazdku kosztuje około 1,20 funta i odpowiada emisji CO₂ rzędu 60 g/km [dla Polski 120g/km – red.] [jego odpowiednik wśród samochodów na benzynę, Smart, ma emisję rzędu 116 g/km]. Pełne ładowanie zajmuje około 8 godzin, ale naładowanie akumulatora wyczerpanego w 80% do poziomu naładowania w 80% zabiera mniej więcej 3,5 godziny”. [ze strony: www.whatcar.com/news-article.aspx?NA=226488].

Berlingo Electric 500E Miejski samochód dostawczy (fot. 20.20), ma 27 akumulatorów niklowo-kadmowych i silnik o mocy 28 kW. Ładowność 500 kg. Prędkość maksymalna 100 km/h; zasięg 100 km. **25 kWh na 100 km** (szacunki posiadacza Berlingo). [4wm2w4]

i MiEV Ten samochód elektryczny ma mieć zasięg 160 km na akumulatorach o pojemności 16 kWh. To **10 kWh na 100 km** – wynik lepszy niż w przypadku G-Wiza. Podczas gdy trudno byłoby upchnąć w G-Wizie dwóch dorosłych Europejczyków, prototyp Mitsubishi ma czworo drzwi i cztery pełnowymiarowe siedzenia (fot. 20.38). [658ode]

EV1 Dwuosobowy samochód General Motors ma zasięg na pełnym akumulatorze od 120 do 240 km, hybrydowe akumulatory niklowo-metalowe o pojemności 26,4 kWh. Oznacza to zużycie energii **11 – 22 kWh na 100 km**.

Lightning (fot. 20.39) – ma cztery silniki bezszczotkowe o mocy 120 kW każdy, po jednym na każde koło, system hamowania odzyskowego i szybko ładujące się akumulatory litowo-tytanowe Nanosafe. Pojemność 36 kWh pozwala przejechać 200 mil (320 km). To **11 kWh energii na 100 km**.

Aptera Ta fantastyczna obła ryba to dwuosobowy samochód, którego koszt energetyczny podobno wynosi **6 kWh na 100 km**. Jego współczynnik oporu powietrza wynosi 0,11 (fot. 20.40). W przygotowaniu są modele elektryczne i hybrydowe.

Loremo Tak jak Aptera Loremo (fot. 20.41) ma małą strefę przednią i niski współczynnik oporu powietrza (0,2). On też ma być oferowany zarówno w wersji z silnikiem spalinowym, jak i elektrycznym. Ma dwa pełnowymiarowe miejsca z przodu i dwa dziecięce siedzonka skierowane do tyłu. Loremo EV będzie miał akumulatory litowo-jonowe. Przewiduje się, że będzie miał koszt energetyczny rzędu **6 kWh na 100 km**, prędkość maksymalną 170 km/h oraz zasięg 153 km. Waga 600 kg.

eBox eBox ma akumulator litowo-jonowy o pojemności 35 kWh i wadze 280 kg oraz zasięg 140–180 mil (225–290 km). Silnik o mocy maksymalnej 120 kW pracuje ze stałą mocą 50 kW. Zużycie energii: **12 kWh na 100 km**.

Ze-0 Samochód pięciosobowy i pięciodrzwiowy. Prędkość maksymalna 50 mil/h (80 km/h). Zasięg 50 mil (80 km). Waga, włączając akumulatory, 1350 kg. Akumulatory ołowiowo-kwasowe o pojemności 18 kWh. Silnik 15 kW. **22,4 kWh na 100 km**.

e500 Włoski samochód podobny do Fiata, dwudrzwiowy, czteroosobowy. Prędkość maksymalna 60 mil/h (97 km/h). Zasięg w cyklu miejskim 75 mil (120 km). Akumulator polimerowy litowo-jonowy.

MyCar MyCar to samochód dwuosobowy włoskiego projektu. Prędkość maksymalna 40 mil/h (64 km/h). Zasięg maksymalny 60 mil (97 km). Akumulatory ołowiowo-kwasowe.

Mega City Dwuosobowy samochód o maksymalnej mocy trwałej 4 kW i prędkości maksymalnej 40 mil/h (64 km/h), co daje **11,5 kWh na 100 km**. Waga bez załadunku (włączając akumulatory) – 725 kg. Akumulatory ołowiowe mają pojemność 10 kWh.



Fot. 20.37. Th!nk Ox.
Fot. z: www.think.no

Xebra Podobno ma zasięg 40 km przy akumulatorze o pojemności 4,75 kWh. **12 kWh na 100 km**. Prędkość maksymalna 65 km/h. Akumulatory ołowiono-kwasowe.

TREV Nazwa jest skrótem od The Two-Seater Renewable Energy Vehicle (dwouosobowy samochód na odnawialne źródła energii). TREV jest prototypem zaprojektowanym na Uniwersytecie Południowej Australii (fot. 20.42). Ten trzykołowiec ma zasięg 150 km, prędkość maksymalną 120 km/h, masę 300 kg i akumulatory polimerowe litowo-jonowe o wadze 45 kg. Podczas podróży na dystansie 3000 km zużycie energii wyniosło **6,2 kWh na 100 km**.

Venturi Fetish Ma akumulator o pojemności 28 kWh, ważący 248 kg. Samochód waży 1000 kg. Zasięg 160–250 km. To koszt energetyczny rzędu **11–17 kWh na 100 km**. www.venturifetish.fr/fetish.html

Toyota RAV4 EV Ten całkowicie zasilany elektrycznością mini SUV był w ofercie Toyoty w latach 1997–2003 (fot. 20.43). RAV4 EV ma 24 akumulatory 12-voltowe o pojemności 95 Ah, nikielowo-metalowo-wodorowe (NiMH), zdolne zgromadzić 27,4 kWh. Zasięg 130–190 km. W tym przypadku zużycie energii wynosi **14–21 Wh na 100 km**. Samochodami RAV4 EV jeździła policja w brytyjskim Jersey.

Phoenix SUT – pięciuosobowy sportowy pickup („sport utility truck” – SUT) wyprodukowany w Kalifornii. Ma zasięg „do 130 mil (209 km)” na akumulatorach litowo-jonowych o pojemności 35 kWh (to **17 kWh energii na 100 km**). Akumulatory można naładować w specjalnych punktach ładowania w ciągu 10 minut. www.gizmag.com/go/7446/

SAM RE-Volt – produkowany w Pruszkowie polski samochód elektryczny. Silnik o mocy znamionowej 11,6 kW zasilany jest akumulatorami litowo-jonowymi o pojemności 7 kWh każdy. SAM wyposażony jest w system hamowania odzyskowego KERS. Na jednym ładowaniu przejeżdża „do 100 km”. Zużywa przeciętnie 7 kWh na 100 km. <http://www.auto-elektryczne.pl/sam.html> [red.]

Samochód dostawczy Modec – Modec przewozi dwie tony na dystansie 100 mil (161 km). Masa pojazdu gotowego do jazdy – 3000 kg. www.modec.co.uk

Smith Ampere Mniejszy van dostawczy, akumulatory litowo-jonowe o pojemności 24 kWh. Zasięg „ponad 100 mil (161 km)”. www.smithelectricvehicles.com

Minibus elektryczny – Ze strony www.smithelectricvehicles.com:

Akumulatory Li-Ion o pojemności 40 kWh, silnik o mocy 90 kW z hamowaniem odzyskowym. Zasięg „ponad 100 mil (161 km)”. 15 miejsc siedzących. Masa pojazdu gotowego do jazdy – 3026 kg. Ładowność 1224 kg. W najlepszym razie zużycie energii wynosi **25 kWh na 100 km**. Jeżeli wszystkie miejsca są zajęte, koszt energetyczny na pasażera jest imponująco mały – zaledwie **2 kWh na 100 pkm**.

Autokar elektryczny – Autobus Thunder Sky ma zasięg 180 mil (290 km). Ładuje się w 3 godziny. www.thunder-sky.com

Skuter elektryczny – Vectrix to pokazny skuter (fot. 20.44). Hybrydowy akumulator nikielowo-metalowy ma pojemność 3,7 kWh. Przejedzie do 68 mil (110 km) z prędkością 25 mil/h (40 km/h), ładuje się 2 godziny w zwykłym gniazdku. Na 110 km zużywa 3 kWh, co oznacza **2,75 kWh na 100 km**. Prędkość maksymalna 62 mil/h (100 km/h). Waga 210 kg, moc maksymalna 20 kW. www.vectrix.com

Skuter Oxygen Cargo jest mniejszy. Waży 121 kg, ma zasięg 38 mil (61 km), ładuje się 2–3 godziny. Moc maksymalna 3,5 kW; prędkość maksymalna 28 mil/h (45 km/h). Ma dwa akumulatory Li-Ion i system hamowania odzyskowego. Zasięg można zwiększyć przez dodanie akumulatorów, z których każdy gromadzi 1,2 kWh energii i waży 15 kg. Zużycie energii: **4 kWh na 100 km**.

141 ... gęstość energetyczna w butli na sprężone powietrze wynosi zaledwie 11–28 Wh na kg. Granica teoretyczna, przy założeniu doskonałej kompresji izotermicznej: jeżeli 1 m³ powietrza zostanie powoli skompresowane w 5-litrowej butli pod ciśnieniem 200 bar, potencjalnie można zgromadzić 0,16 kWh w 1,2 kg powietrza. W praktyce, 5-litrowa butla wytrzymująca takie ciśnienie waży ok. 7,5 kg (stalowa) lub 2 kg (z włókien kevlarowych lub węglowych). Ostatecznie gęstość energetyczna wyniesie około 11–28 Wh na kg. Teoretyczna gęstość energetyczna jest niezależna od objętości butli.



Fot. 20.38. The i-MiEV produkcji Mitsubishi. Ma silnik o mocy 47 kW, waży 1080 kg. Prędkość maksymalna 130 km/h



Fot. 20.39. Lightning, 11 kWh na 100 km.

Fot. www.lightningcarcompany.co.uk



Fot. 20.40. APTERA, 6 kWh na 100 km.

Fot. www.aptera.com



Fot. 20.41. Loremo, 6 kWh na 100 km.

Fot. evolution.loremo.com

- 141 Pochwalił gubernatora Kalifornii Arnolda Schwarzeneggera za to, że jeździ Hummerem na wodór. „Nature” nr 438, 24 listopada 2005. Nie twierdzą, że wodór nigdy nie znajdzie zastosowania w transporcie. Wolałbym jednak, by tak prestiżowe pismo jak „Nature”, zamiast wpadać w euforię, dokonało nieco bardziej krytycznej oceny przereklamowanego wodoru.

Wodór i ogniwa paliwowe nie są właściwym rozwiązaniem. Decyzja administracji Busha i władz stanowych Kalifornii o inwestowaniu w wodór to najgorsza decyzja ostatnich lat.

James Woolsey, przewodniczący rady doradczej przy Amerykańskiej Fundacji Czystych Paliw, 27 listopada 2007

We wrześniu 2008 roku „The Economist” napisał: „Niemałże wszyscy są zgodni, że (...) w końcu wszystkie samochody będą zasilane tylko i wyłącznie akumulatorami”.

Dla przeciwwagi, argumenty rzeczników transportu opartego na wodorze znaleźć można na stronie Rocky Mountain Institute dotyczącej „HyperCar” www.rmi.org/hypercar/

- W projekcie CUTE (Clean Urban Transport for Europe – Czysty Transport dla Europy), zasilenie autobusów na wodór wymagało od 80% do 200% więcej energii niż w przypadku zwykłego autobusu z silnikiem diesla. – Źródło: CUTE (2006); Binder i inni (2006).

- 142 Zasilenie BMW na wodór pochłania trzy razy więcej energii niż w przypadku przeciętnego samochodu. Połowę bagażnika w BMW Hydrogen 7 zajmuje 170-litrowy zbiornik na wodór, gromadzący 8 kg wodoru, dający zasięg 200 km na jednym tankowaniu. [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. Wartość kaloryczna wodoru wynosi 39 kWh na kg, a jego wyprodukowanie pochłania co najmniej 63 kWh na kg (w tym 52 kWh z gazu ziemnego i 11 kWh z elektryczności) (CUTE, 2006). Oznacza to, że napełnienie baku 8 kilogramami wodoru pochłania ponad 504 kWh energii, a jeżeli na jednym tankowaniu rzeczywiście da się przejechać 200 km, to koszt energetyczny wynosi 252 kWh na 100 km.

Hydrogen 7 i jego kuzyni na ogniwa paliwowe zasilane wodorem, to pod wieloma względami para w gwizdek.

David Talbot, MIT Technology Review
www.technologyreview.com/Energy/18301/

- Honda FCX Clarity na ogniwa paliwowe zasilane wodorem waży 1625 kg, gromadzi 4,1 kg wodoru pod ciśnieniem 345 bar, na jednym baku pokonuje 280 mil (451 km), przejeżdżając 57 mil na 1 kg wodoru (92 km na kg) w przeciętnych warunkach jazdy. [czjjo], [5a3ryx]. Uwzględniając koszt energetyczny wyprodukowania wodoru podany powyżej i przyjmując, że głównym źródłem energii do produkcji jest gaz ziemny, samochód ma koszt transportowy rzędu 69 kWh na 100 km.

Przedstawiciele Hondy mogą zwodzić dziennikarzy, że samochody na wodór są „zero-emisyjne”, ale niestety nie oszukają klimatu.

Merrick Godhaven

- 144 Akumulator litowo-jonowy zawiera 3% litu. – Źródło: Fisher i inni (2006).
- jak mówi ekspert zajmujący się litem R. Keith Evans: „nieuzasadnione są obawy, czy wystarczy litu” – Evans (2008).
 - dwóch holenderskich liniowców, zwanych „Tanimi Bliźniakami”, www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm. QE2: www.qe2.org.uk
- 145 system kolei magnetycznej Transrapid. www.transrapid.de



Fot. 20.42. TREV. 6 kWh na 100 km.
Fot. www.unisa.edu.au



Fot. 20.43. Toyota RAV4 EV.
Fot. Kenneth Adelman,
www.solarwarrior.com



Fot. 20.44. Vectrix: 2.75 kWh na 100 km
Fot. www.vectrix.com

21 Inteligentne ogrzewanie

W poprzednim rozdziale pokazaliśmy, że elektryfikacja mogłaby zmniejszyć zużycie energii w transporcie do 1/5 obecnego zużycia oraz że transport publiczny i jazda rowerem mogą być nawet 40 razy bardziej efektywne energetycznie niż jazda samochodem. A co z ogrzewaniem? Jakiego rodzaju oszczędności energetyczne oferuje technologia lub też zmiana zachowań użytkowników?

Energię zużywaną do ogrzania budynku liczymy za pomocą poniższej formuły:

$$\text{zużyta energia} = \frac{\text{średnia różnica temperatur} \times \text{współczynnik strat ciepła budynku}}{\text{sprawność systemu ogrzewania}}$$

Formułę tę (omówioną szczegółowo w rozdziale E) zilustruję przykładem. Mój dom to bliźniak z trzema sypialniami zbudowany około 1940 roku (fot. 21.1). Średnia różnica temperatur w domu i za oknem zależy od ustawień termostatu oraz pogody. Jeżeli termostat jest stale ustawiony na 20 °C, **średnia różnica temperatur** może wynosić 9 °C. **Współczynnik strat ciepła budynku** opisuje, jak szybko ciepło ucieka przez ściany, okna i szpary w odpowiedzi na różnicę temperatur. Współczynnik strat ciepła można określić jako *współczynnik nieszczelności*. Mierzony jest on w kWh dziennie na 1 stopień różnicy temperatur. W rozdziale E obliczam, że współczynnik strat ciepła mojego domu w roku 2006 wyniósł 7,7 kWh/dzień/°C. Oto wzór określający tempo, w jakim ciepło ucieka na zewnątrz w procesie przewodnictwa i wentylacji:

$$\text{średnia różnica temperatur} \times \text{współczynnik strat ciepła budynku}$$

Dla przykładu, jeżeli średnia różnica temperatur wynosi 9 °C, wówczas utrata ciepła wynosi:

$$9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/dzień/}^{\circ}\text{C} \approx 70 \text{ kWh/dzień}$$

Na zakończenie, by obliczyć potrzebną energię, dzielimy straty ciepła przez sprawność systemu ogrzewania. W moim domu kondensacyjny kocioł gazowy ma sprawność rzędu 90%, dlatego też:

$$\text{zużyta energia} = \frac{9^{\circ}\text{C} \times 7,7 \text{ kWh/dzień/}^{\circ}\text{C}}{0,9} = 77 \text{ kWh/dzień}$$

To więcej niż wartość przyjęta dla ogrzewania w rozdziale 7. Ma to dwie przyczyny. Po pierwsze formuła zakłada, że całe ciepło pochodzi z kotła gazowego, podczas gdy faktycznie nieco ciepła generują użytkownicy budynku, sprzęt domowy oraz słońce. Po drugie, w rozdziale 7 założyliśmy, że użytkownik stale utrzymuje temperaturę 20 °C tylko w dwóch pomieszczeniach; utrzymanie takiej temperatury w całym domu wymagałoby więcej energii.

No dobrze, jak możemy zatem zmniejszyć ilość energii zużywanej na ogrzewanie? Istnieją trzy linie ataku.

1. Zmniejszenie średniej różnicy temperatur. Można to osiągnąć poprzez przykręcenie termostatu (lub też zmianę pogody, jeżeli mamy chody na górze).
2. Zmniejszenie nieszczelności budynku. Można to osiągnąć poprzez termomodernizację – potrójne szyby w oknach, uszczelnienie szpar oraz wełna izolacyjna na poddaszu – lub też, co bardziej radykalne, poprzez zburzenie



Fot. 21.1. Mój dom

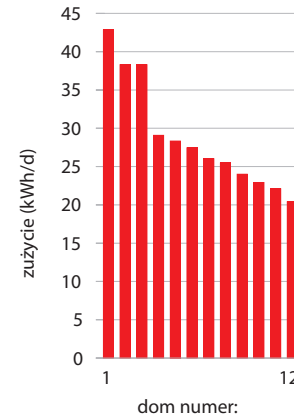
budynku i zastąpienie go nowym, lepiej izolowanym. Albo poprzez przeprowadzkę do budynku o mniejszej przestrzeni na osobę (zazwyczaj większe budynki są bardziej nieszczelne, bo większa jest też powierzchnia ścian zewnętrznych, okien i dachu).

3. Zwiększenie sprawności systemu ogrzewania. Można pomyśleć, że trudno będzie przebić 90%, w rzeczywistości może być znacznie lepiej.

Fajna technologia: termostat

Trudno pobić termostat (w połączeniu z wełnianym swetrem), jeżeli chodzi o stosunek wartości do ceny. Przykręcasz go i twój dom zużywa mniej energii. Magiczne! W Wielkiej Brytanii z obniżeniem temperatury o jeden stopień utrata ciepła zmniejsza się o 10%. Przykręcenie termostatu z 20 °C do 15 °C ograniczyłoby straty ciepła niemal o połowę. Dzięki dodatkowym źródłom ciepła (sprzęt, użytkownicy, słońce), oszczędność energii grzewczej będzie nawet większa niż wynikałoby z samej redukcji strat ciepła.

Niestety, ta znakomita technologia oszczędzania energii ma skutki uboczne. Niektórzy przykręcenie termostatu nazwą zmianą przyzwyczajęń i zaczną kręcić nosem. W dalszej części poczynię kilka sugestii, jak podejść do problemu zmian w zwyczajach. Tymczasem w dowód na to, że „najważniejszym inteligentnym elementem budynku z inteligentnym systemem ogrzewania jest użytkownik”, na wykresie 21.2. pokazujemy dane ze studium Carbon Trust dotyczące zużycia ciepła w 12 identycznych współczesnych budynkach. Możemy krzywić się na rodzinę nr 1, która zużywa dwukrotnie więcej energii do ogrzania domu niż państwo Opatuleni spod nr 12. Niemniej jednak, zwróćmy uwagę na liczby: rodzina nr 1 zużywa 43 kWh dziennie. Szokujące? Chwileczkę, przecież właśnie oszacowaliśmy, że mój dom zapewne zużywa więcej. W istocie, moje zużycie gazu w latach 1993–2003 wyniosło nieco ponad 43 kWh dziennie (rys. 7.10, str. 61). A ja myślałem, że jestem oszczędny! Problemem jest sam dom. Wszystkie współczesne domy w studium Carbon Trust mają współczynnik strat ciepła rzędu 2,7 kWh/dzień/°C, a mój dom – 7,7 kWh/dzień/°C! Drodzy mieszkańcy nieszczelnych domów...



Rys. 21.2. Rzeczywiste zużycie energii w 12 identycznych domach z identycznymi systemami ogrzewania. Wszystkie domy miały powierzchnię 86 m² oraz współczynnik strat ciepła rzędu 2,7 kWh/dzień/°C.
Źródło: Carbon Trust (2007)

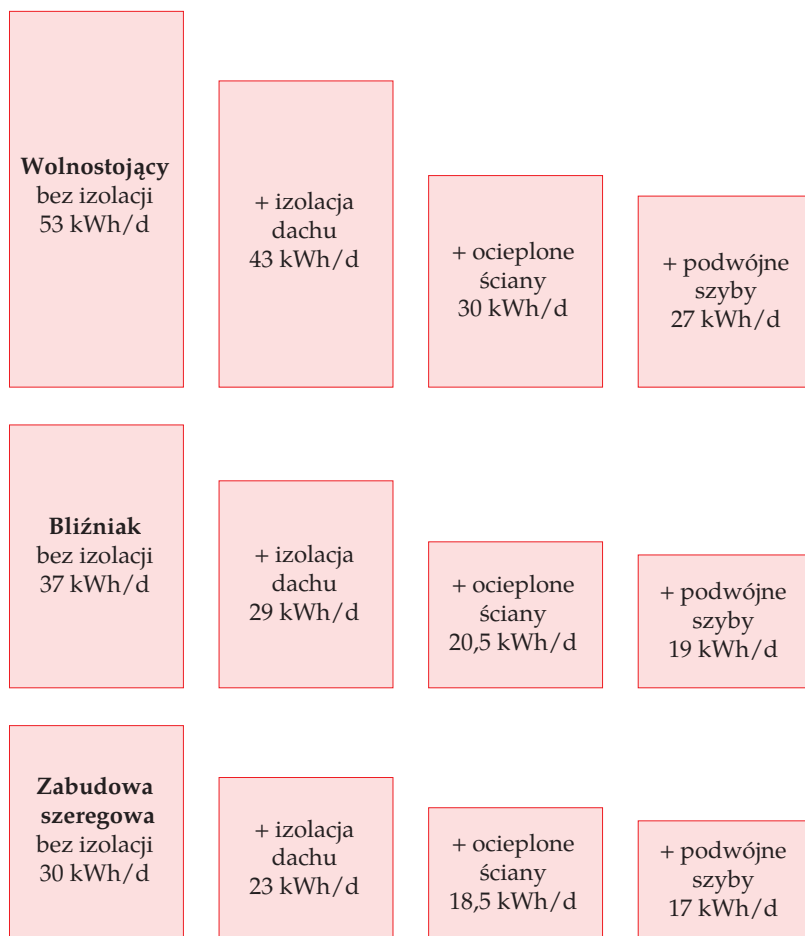
Wojna z nieszczelnością

Co możemy zrobić ze starymi, nieszczelnymi domami oprócz wezwania buldożerów? rys. 21.3 pokazuje, jak zmienia się ilość energii potrzebnej do ogrzania starych domów wolnostojących, bliźniaków i szeregowców w miarę wykonywania inwestycji modernizacyjnych. Ocieplenie poddasza i ścian dwuwarstwowych ogranicza straty ciepła w przeciętnym domu o jakieś 25%. Dzięki dodatkowym źródłom ciepła (słońce, użytkownicy) ta 25-procentowa redukcja przekłada się na około 40% redukcji zużycia ciepła.

Przetestujmy tę ideę.

Studium przypadku

Zaprezentowałem mój dom na str. 151. Cofnijmy się odrobinę. W 2004 roku zainstalowałem kocioł kondensacyjny, który zastąpił stary kocioł gazowy (kotły kondensacyjne wyposażone są w wymiennik ciepła, który odbiera ciepło ze spalin i przekazuje go wodzie obiegowej). Jednocześnie usunąłem zasobnik ciepłej wody (teraz wodę grzeje się wedle potrzeb) i zainstalowałem termostaty przy wszystkich grzejnikach w sypialniach. Oprócz kotła kondensacyjnego zainstalowałem regulację ogrzewania, dzięki czemu mogę ustawiać różne



Rys. 21.3. Ilość energii potrzebna do ogrzania różnych typów domów w Wielkiej Brytanii.

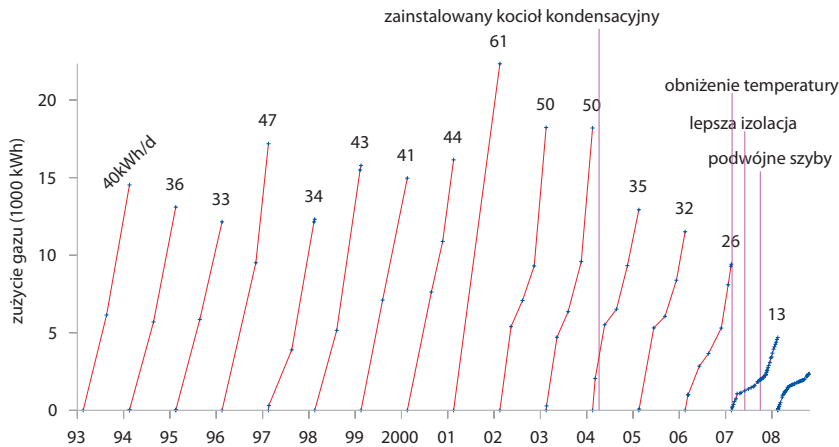
Źródło: Eden i Bending (1985)

temperatury w różnych porach dnia. Po tych zmianach zużycie energii spadło z 50 kWh dziennie do mniej więcej 32 kWh dziennie.

Ograniczenie z 50 do 32 kWh dziennie robi wrażenie, ale jest zupełnie niewystarczające, jeżeli naszym celem jest redukcja osobistego śladu węglowego poniżej 1 tony CO₂ na rok. 32 kWh dziennie pozyskane z gazu odpowiada ponad 2 tonom CO₂ rocznie.

W 2007 roku zacząłem zwracać większą uwagę na wskazania licznika energii. Ociepliłem ściany (fot. 21.5) i poprawiłem izolację poddasza. Tylne drzwi z pojedynczą szybą zastąpiłem drzwiami z szybą podwójną i założyłem drzwi frontowe ze wzmocnioną szybą podwójną (fot. 21.6). Najważniejsze, że zacząłem zwracać większą uwagę na wskazania termostatu – dzięki temu zużycie gazu spadło o połowę. W zeszłym roku zużycie energii wyniosło 13 kWh dziennie!

Z uwagi na to, że w przedstawionym przypadku zmiany zaszły i w budynku i w zachowaniach użytkowników, trudno oszacować, co było najważniejsze. Według moich obliczeń (w rozdziale E) ocieplenie domu zmniejszyło współczynnik strat ciepła o 25%, z 7,7 kWh/dzień/°C do 5,8 kWh/dzień/°C. To nadal więcej niż w domach współcześnie budowanych. To frustrujące, jak trudno zwiększyć szczelność domu już wybudowanego! Moją podstawową radą



Rys. 21.4. Zużycie gazu w moim domu w latach 1993–2007. Linie pokazują łączne zużycie w kWh. Liczba na końcu każdej linii wskazuje średnie zużycie gazu w danym roku w kWh dziennie. Odczyty licznika zaznaczono niebieskimi punktami. Najwyraźniej, im częściej odczytuję licznik, tym mniej gazu zużywam!

jest sprytnie przykręcanie termostatu. Jakie ustawienie termostatu jest rozsądne? Obecnie wielu ludzi uważa, że przy 17 °C jest nieznośnie zimno. Niemniej jednak w latach 70. średnia temperatura w zimie w brytyjskich domach wynosiła 13 °C! Odczucie ciepła zależy od tego, co się robi i co się robiło przez ostatnią godzinę. Sugerowałbym, by *nie myśleć w kategoriach ustawień termostatu*. Zamiast ustawiać termostat w jednej pozycji, spróbuj zostawić go przez większość czasu na naprawdę niskiej temperaturze (dajmy na to 13 albo 15 °C) i podkreślaj go na moment, kiedy robi ci się zimno. To jak z oświetleniem w bibliotece. Jeżeli zadasz sobie pytanie: „Jakie jest właściwe natężenie światła na półkach z książkami?”, bez wątpliwości odpowiesz sobie: „Wystarczające do odczytania tytułów” i pozwolisz, by jasne światło paliło się tam cały czas. Niemniej jednak to pytanie zakłada, że musimy ustalić poziom światła, a przecież nie musimy. Możemy założyć włączniki światła, które uruchamia czytelnik, a po jakimś czasie same się wyłączą. Analogicznie, termostaty nie muszą być cały czas ustawione na 20 °C.

Zanim porzucę temat termostatów, powinienem wspomnieć o klimatyzacji. Czy latem nie doprowadzają Cię do szału budynki z klimatyzacją ustawioną na 18 °C? Pomyleni zarządcy budynków wystawiają wszystkich na temperatury, które zimą uznaliby za zbyt niskie! W Japonii rządowe wytyczne dotyczące klimatyzacji rekomendują temperaturę 28 °C.

Lepsze budynki

Jeżeli masz szansę wybudować nowy budynek, istnieje wiele sposobów na to, by zużywał znacznie mniej energii niż budynki stare. Rys. 21.2 pokazuje, że współczesne domy mają znacznie wyższy standard izolacji niż te z lat 40. Niemniej jednak, standardy budynków mogłyby być jeszcze wyższe, co pokazuje rozdział E. Trzy kluczowe idee dające najlepsze efekty to: (1) naprawdę grubą warstwę izolacyjną w podłodze, ścianach i dachach; (2) pełne uszczelnienie budynku z zapewnieniem aktywnej wentylacji w celu wprowadzania świeżego i usuwania zanieczyszczonego i zawilgoconego powietrza, z wymiennikami ciepła pasywnie odzyskującymi większość ciepła z usuwanego powietrza; (3) takie zaprojektowanie budynku, by wykorzystywał światło słoneczne w możliwie najwyższym stopniu.



Fot. 21.5. Ocieplanie budynku



Fot. 21.6. Nowe drzwi frontowe

Koszt energetyczny ciepła

Do tej pory w niniejszym rozdziale skupialiśmy się na kontroli temperatury oraz szczelności. Teraz zajmiemy się trzecim elementem równania:

$$\text{zużyta energia} = \frac{\text{średnia różnica temperatur} \times \text{współczynnik strat ciepła budynku}}{\text{sprawność systemu ogrzewania}}$$

Jak bardzo efektywnie można uzyskać ciepło? Czy można uzyskać je tanio? Obecnie większość ogrzewania w Wielkiej Brytanii oparta jest na spalaniu paliwa kopalnego – gazu – w kotłach o sprawności rzędu 78–90%. Czy możemy jednocześnie odejść od paliw kopalnych i usprawnić ogrzewanie budynków?

Jedną z technologii, która ma być odpowiedzią na brytyjski problem z ogrzewaniem, jest kogeneracja (wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu – ang. CHP) i jej kuzynka „mikrokogeneracja”. Wyjaśnię teraz, czym jest kogeneracja, aczkolwiek doszedłem do wniosku, że sama w sobie jest złym pomysłem. Lepszą technologią są pompy ciepła, które opiszę nieco dalej.

Średnie roczne zużycie energii na ogrzewanie w Wielkiej Brytanii w roku 2007 wynosiło 155 kWh/m². W Polsce nowo wybudowane domy potrzebują rocznie 90–120 kWh/m², jednak większość domów powstała wcześniej i zużycie energii w nich jest znacznie większe – od 120 do 200 kWh/m² dla domów budowanych po roku 1985 do 300 do 400 kWh/m² rocznie dla starszych domów, które nie przeszły termomodernizacji. Rząd wielkości zapotrzebowania na energię grzewczą w Polsce i Wielkiej Brytanii jest więc podobny. A jak jest ze źródłami energii w Polsce? Połowa ciepła jest dostarczana za pomocą sieci ciepłowniczych. Dominującym paliwem jest węgiel, z jego spalania pochodzi blisko 90% ciepła, resztę energii dają głównie: gaz, ropa i biomasa.

$\frac{3}{4}$ użytkowników indywidualnych w Polsce opala domy węglem (ze sprawnością 50–80%), a 18% gazem (ze sprawnością 75–80%).

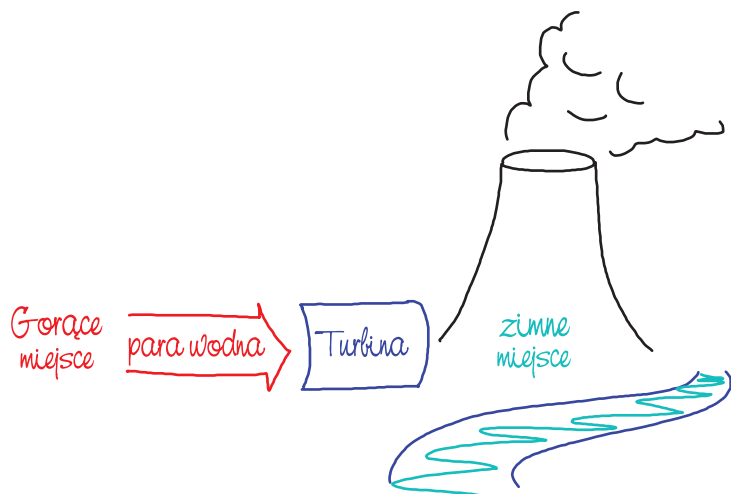


Rys. 21.7. Eggborough. Tu nie ma elektrociepłowni wykorzystujących powstające przy produkcji prądu ciepło.

Kogeneracja

W obiegowej opinii konwencjonalne, scentralizowane elektrownie dużych mocy są szalenie nieefektywne, bo wyrzucają ciepło kominami oraz wieżami chłodniczymi. Wtajemniczeni wiedzą jednak, że po to, by przekształcić energię termiczną w elektryczność, musimy zrzucić ciepło w chłodnym miejscu (fot. 21.8). Tak właśnie działa silnik cieplny. Musi istnieć to chłodne miejsce. A może by tak – mówią niektórzy – potraktować *budynki* jako miejsca zrzutu tego ciepła „odpadowego” zamiast wież chłodniczych czy też wody w rzece? Ten pomysł nazywamy wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu lub kogeneracją, od dziesięcioleci szeroko stosowaną na kontynencie europejskim – w wielu miastach elektrownie dużych mocy są zintegrowane z siecią ciepłowniczą. Orędownicy nowoczesnej odmiany kogeneracji – mikrokogeneracji – proponują, by każdy budynek lub grupa budynków miała własną, małą elektrociepłownię generującą ciepło i elektryczność oraz oddającą część elektryczności do sieci.

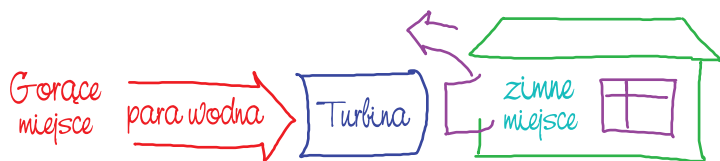
Jest ziarno prawdy w stwierdzeniu, że Wielka Brytania pozostaje w tyle w zakresie sieci ciepłowniczych oraz kogeneracji. Dyskusję utrudnia jednak brak danych liczbowych oraz dwa specyficzne błędy. Po pierwsze, przy porównywaniu



Rys. 21.8. Oto jak działa elektrownia. Musi istnieć chłodne miejsce, gdzie kondensuje się parę, która napędza turbinę. To zimne miejsce to zazwyczaj wieża chłodnicza lub rzeka.

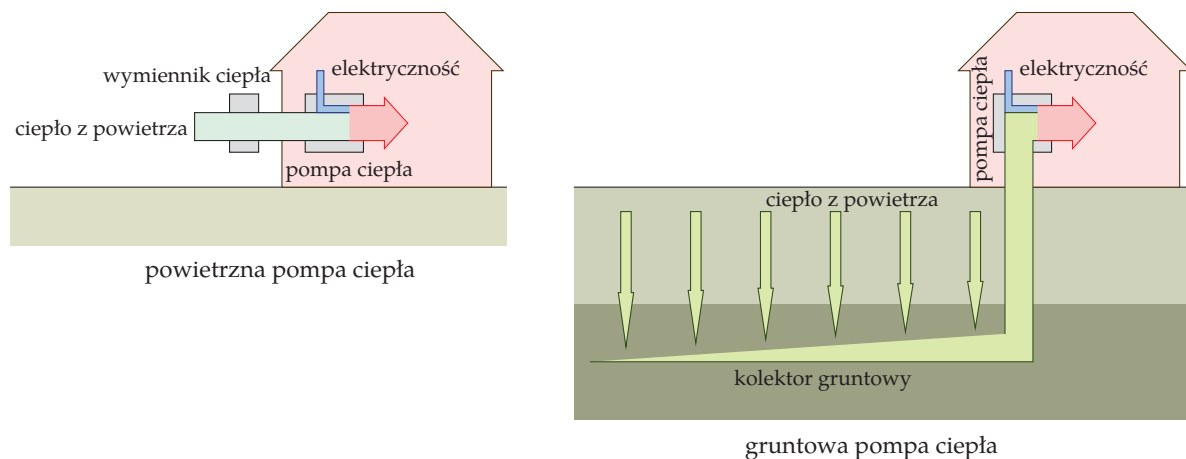
różnych sposobów wykorzystywania paliwa źle definiuje się efektywność, bo zakłada się, że elektryczność ma taką samą wartość jak ciepło. W rzeczywistości elektryczność jest cenniejsza niż ciepło. Po drugie, powszechnie zakłada się, że ciepło „odpadowe” w tradycyjnej elektrowni można odzyskać i spożytkować *bez uszczerbku dla produkcji prądu*. Niestety to nieprawda, co pokażą liczby. Dostarczenie odbiorcy ciepła użytkowego zawsze w pewnym stopniu zmniejsza ilość wyprodukowanej energii. Prawdziwy zysk netto z wytwarzania prądu i ciepła w skojarzeniu jest często mniejszy niż twierdzi rozdmuchana reklama.

Elektrociepłownie w Polsce wytwarzają 63% ciepła sieciowego (czyli około 1/3 całości ciepła). Zasilają one systemy ciepłownicze większości dużych miast, w tym Warszawy, Krakowa, Katowic, Poznania, Łodzi, Gdańska i Wrocławia.



Rys. 21.9. Kogeneracja. Miejski system ciepłowniczy odbiera ciepło, które inaczej uleciałoby wieżą chłodniczą.

Ostatnią przeszkodą w racjonalnej dyskusji na temat kogeneracji jest niedawno powstały mit, jakoby decentralizacja energetyki w jakiś sposób czyniła ją bardziej zieloną. Tak więc scentralizowane elektrownie węglowe są „złe”, a gromady mikroelektrowni są dobre z definicji. Jeżeli jednak decentralizacja jest tak dobrym pomysłem, idea „małe jest piękne” powinna mieć pokrycie w liczbach. Decentralizacja powinna przecież poradzić sobie sama. Liczby pokazują jednak, że *scentralizowana* produkcja energii niesie wiele korzyści zarówno w sensie ekonomicznym, jak i energetycznym. Jedynie w dużych budynkach opłaca się montować lokalne systemy generacyjne, a i tak korzyść wyniesie zaledwie 10 czy 20%.



Rys. 21.10. Pompy ciepła

Brytyjski rząd przyjął za swój cel rozwój kogeneracji do poziomu 10 GW mocy do roku 2010. Sądzę jednak, że rozwój kogeneracji w oparciu o gaz byłby błędem. Taka kogeneracja nie jest zielona – opiera się na paliwie kopalnym i sprawia, że nadal będziemy korzystać z paliw kopalnych. Zważywszy, że pompy ciepła są lepszym rozwiązaniem, sądzę, że powinniśmy przeskoczyć od razu do pomp ciepła z pominięciem kogeneracji opartej na gazie.

Pompy ciepła

Tak jak w przypadku miejskich sieci ciepłowniczych oraz kogeneracji pompy ciepła są szeroko stosowane na kontynencie europejskim, ale rzadko w Wielkiej Brytanii. Pompy ciepła są odwrotnością lodówek. Dotknij tyłu obudowy swojej lodówki – jest ciepła. Lodówka oddaje ciepło z jednego miejsca (swojego wnętrza) w inne (na tył obudowy). Można więc ogrzać budynek, wywracając lodówkę na drugą stronę – umieść *wewnątrz* lodówki w ogrodzie, w ten sposób ochładzając ogród i zostaw tylną ściankę lodówki w kuchni, tym samym ogrzewając dom. Mało kto wie, że ten zabawny pomysł jest naprawdę skutecznym sposobem ogrzania domu. Używając jednego kilowata energii z sieci „lodówka na odwrót”, może wpompować 3 kilowaty ciepła z ogrodu, co oznacza, że do domu dostają się 4 kilowaty ciepła. Pompy ciepła są więc na oko 4 razy bardziej efektywne energetycznie niż standardowy grzejnik elektryczny. Jeżeli efektywność grzejnika wynosi 100%, efektywność pompy ciepła wyniesie 400%. Efektywność pompy ciepła najczęściej definiuje się za pomocą *współczynnika wydajności* (CoP). Jeżeli efektywność wynosi 400%, współczynnik wydajności CoP wynosi 4.

Pompy ciepła można montować na różne sposoby (rys. 21.10). Pompa ciepła może ochładzać *powietrze* w Twoim ogrodzie za pomocą wymiennika ciepła (zazwyczaj jest to mniej więcej metrowe białe pudełko – patrz: fot. 21.11) – w takim wypadku mamy do czynienia z powietrzną pompą ciepła. Opcjonalnie, pompa ciepła może ochładzać *grunt* za pomocą podziemnego systemu rur (długich na wiele dziesiątków metrów) – w tym wypadku mamy do czynienia z gruntową pompą ciepła. Ciepło można również pompować z rzek i jezior.

Niektóre pompy ciepła pompują ciepło dwukierunkowo. Kiedy powietrzna pompa ciepła działa w drugim kierunku, to używa prądu, by ogrzać powietrze na zewnątrz i schłodzić powietrze *wewnątrz* budynku. To klimatyzacja. Wiele systemów klimatyzacji to w gruncie rzeczy pompy ciepła, pracujące właśnie w taki sposób. Gruntowe pompy ciepła również mogą działać jako klimatyzacja. Tak oto jedno urządzenie może ogrzewać dom zimą i chłodzić latem.

Niektórzy twierdzą, że gruntowe pompy ciepła wykorzystują energię geotermalną. To nie tak. Jak widzieliśmy w rozdziale 16, energia geotermalna w większości miejsc na świecie dostarcza zaledwie strużkę mocy na jednostkę powierzchni (jakieś 50 mW/m^2); pompy ciepła nie mają nic wspólnego z tą strużką i mogą służyć zarówno do ogrzania, jak i schłodzenia budynku. Pompy ciepła po prostu wysysają ciepło z gruntu albo je tam zrzucają. Nawet jeżeli stale wysysają ciepło z gruntu, grunt jest stale ogrzewany przez słońce.

W tym rozdziale musimy jeszcze zrobić dwie rzeczy: porównać pompy ciepła z kogeneracją i zdiagnozować ograniczenia gruntowych pomp ciepła.

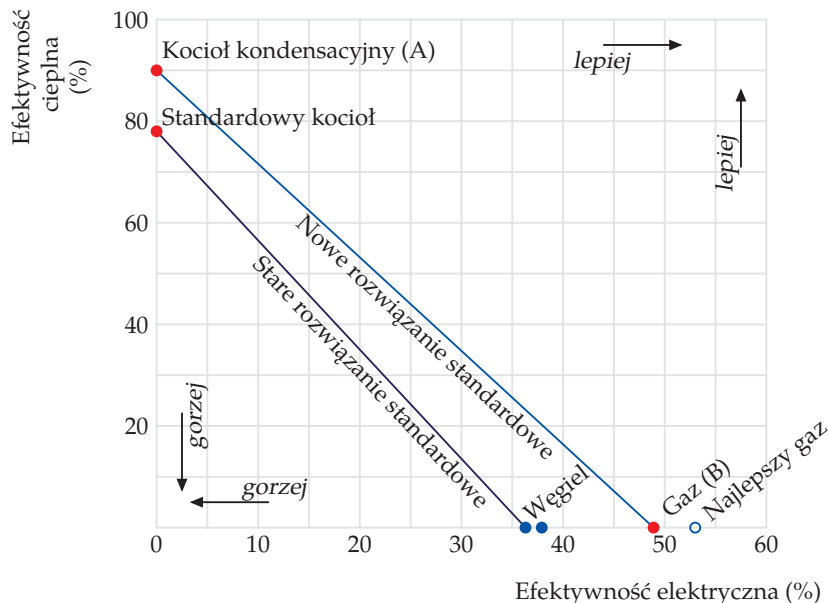
Pompy ciepła w porównaniu z kogeneracją

Wydawało mi się kiedyś, że korzyści z kogeneracji są oczywiste. „To przecież jasne, że powinniśmy używać ciepła zrzucanego z elektrowni do ogrzewania budynków, zamiast wypływać je wieżą chłodniczą!” Niemniej jednak, przyjrawszy się uważnie liczbom dotyczącym funkcjonujących systemów kogeneracyjnych, doszedłem do wniosku, że istnieją lepsze sposoby produkowania energii elektrycznej i cieplnej.

Posłużę się wykresem, który zbuduję trzyetapowo. Wykres pokaże, ile energii elektrycznej lub cieplnej można pozyskać z energii chemicznej. Oś pozioma zilustruje sprawność elektryczną, a oś pionowa – sprawność cieplną.

Systemy standardowe bez kogeneracji

W pierwszym etapie zilustrujemy zwykłe elektrownie (produkujące tylko prąd) i systemy grzewcze (produkujące tylko ciepło).



Fot. 21.11. Zewnętrzne i wewnętrzne elementy powietrznej pompy ciepła o współczynniku wydajności 4. Dla porównania obok wewnętrznej części umieszczono długopis. Ta pompa ciepła Fujitsu może dostarczyć $3,6 \text{ kW}$ ciepła, przy zużyciu zaledwie $0,845 \text{ kW}$ prądu. Może też pracować w odwrotną stronę, dostarczając $2,6 \text{ kW}$ chłodu i zużywając $0,655 \text{ kW}$ prądu.

Kotły kondensacyjne (kropka po lewej, na górze, A) mają sprawność rzędu 90%, ponieważ 10% ciepła ucieka kominem. Brytyjskie elektrownie gazowe (kropka na dole, po prawej, B) obecnie przekształcają energię chemiczną z gazu na energię elektryczną ze sprawnością 49%. By uzyskać z gazu dowolny mix prądu i ciepła, należy spalić odpowiednią ilość gazu oddzielnie w elektrowni i w kotle. „Nowoczesne rozwiązanie standardowe” polegać więc będzie na produkcji prądu i ciepła w dwóch oddzielnych systemach, a może charakteryzować się każdą sprawnością elektryczną i ciepłą na linii A-B.

By umieścić te dane w kontekście historycznym, na wykresie ilustrujemy również przestarzałe systemy produkcji ciepła (zwykły kocioł niekondensacyjny o sprawności 79%) i produkcji prądu sprzed kilku dekad (elektrownia węglowa o sprawności wytwarzania energii elektrycznej 37%).

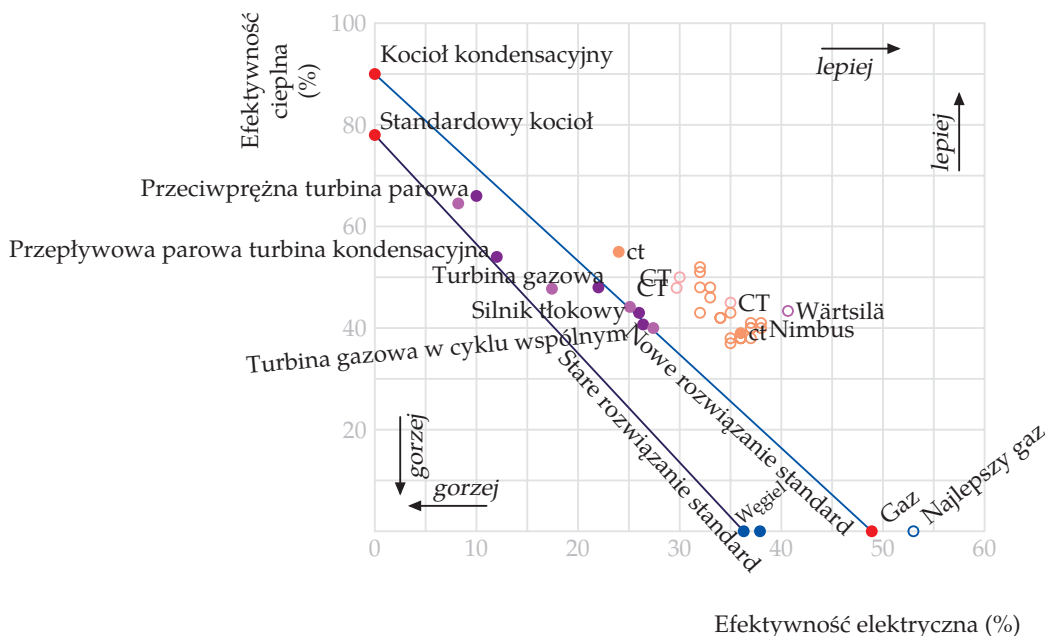
Kogeneracja

Teraz dodamy do wykresu systemy kogeneracyjne, które energię chemiczną przekształcają jednocześnie w prąd i ciepło.

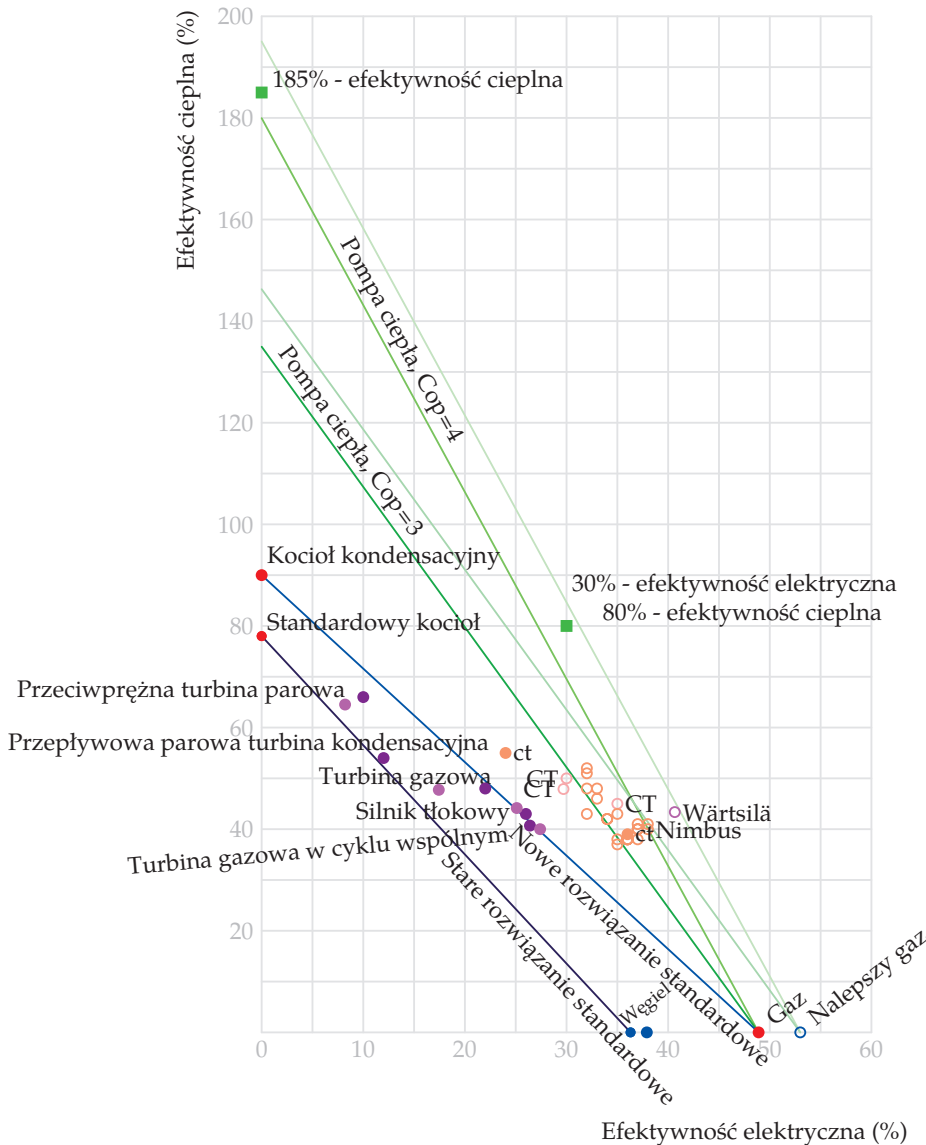
Zapełnione kropki ilustrują średnią wydajność systemów kogeneracyjnych w Wielkiej Brytanii, pogrupowanych według typu. Puste kropki oznaczone jako „CT” ilustrują wydajność idealnych systemów kogeneracyjnych na podstawie danych Carbon Trust; puste kropki oznaczone jako „Nimbus” oparte są na specyfikacjach produktów przygotowanych przez producenta. Kropki oznaczone jako „ct” ilustrują dane Carbon Trust dla dwóch rzeczywiście funkcjonujących systemów (w szpitalu Freemana i hotelu Elizabeth House).

Należy zauważyć, że sprawność elektryczna systemów kogeneracyjnych jest znacznie niższa niż 49-procentowa sprawność zwykłej elektrowni gazowej. Ciepło nie jest więc „darmowym produktem ubocznym”. Zwiększenie produkcji ciepła obniża produkcję prądu.

Powszechnie stosuje się zabieg wrzucania obu liczb (sprawność wytwarzania prądu i sprawność wytwarzania ciepła) do jednego worka sprawności całkowitej



– i tak o turbinach parowych przeciwprężnych dostarczających 10% prądu i 66% ciepła powie się, że mają sprawność 76%. Sądzą jednak, że to mylący sposób sumowania wydajności. Koniec końców, mierząc taką miarą, musielibyśmy uznać, że kocioł kondensacyjny o sprawności 90% jest „bardziej efektywny” niż cały system kogeneracyjny! W rzeczywistości prąd jest cenniejszy niż ciepło.



Wiele kropek ilustrujących na wykresie kogenerację wypada lepiej niż „przeznaczane standardowe metody działania” (produkowanie prądu z węgla i ciepła w kotłach tradycyjnych). Idealne systemy kogeneracyjne wypadają nieco lepiej niż „nowoczesne standardowe metody działania” (produkowanie prądu z gazu, a ciepła w kotłach kondensacyjnych). Musimy jednak brać pod uwagę, że te nieco lepsze osiągi podlegają pewnym ograniczeniom – system kogeneracyjny dostarcza ciepło tylko do miejsc, z którymi jest połączony, a kotły kondensacyj-

ne mogą być instalowane wszędzie tam, gdzie jest dostęp do gazu. W porównaniu do standardowych metod działania systemy kogeneracyjne nie dają elastyczności w zakresie stosunku produkowanego prądu do ciepła – system jest wydajny, kiedy produkuje określony mix prądu i ciepła. Ten brak elastyczności przekłada się na marnotrawstwo, na przykład ciepła – w przeciętnym domu zapotrzebowanie na prąd wzrasta okresowo i w niewielkim stopniu pokrywa się z zapotrzebowaniem na ciepło. Dodatkowo, kiedy małe systemy kogeneracyjne mają na zbyciu energię elektryczną, może być problem z przekazaniem jej do sieci.

Na koniec dodajmy pompy ciepła, używające prądu z sieci do pompowania do budynków ciepła z otoczenia.

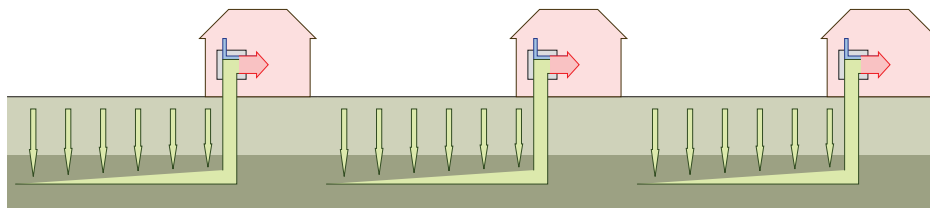
Strome zielone linie ilustrują sprawności elektryczną i cieplną dla pomp ciepła o współczynniku wydajności 3 i 4 przy założeniu, że dodatkowy prąd do pompy jest produkowany przez standardową elektrownię gazową albo przez bardzo nowoczesną elektrownię gazową i że straty na przesyle prądu z elektrowni do budynku, gdzie zainstalowana jest pompa ciepła, wynoszą 8%. Sprawność bardzo nowoczesnej elektrowni gazowej wynosi 53% w warunkach optymalnych (zakładam, że Carbon Trust i Nimbus poczynili podobne założenia przy obliczaniu wartości dla systemów kogeneracyjnych użytych na tym wykresie). W przyszłości pompy ciepła będą pewnie jeszcze wydajniejsze niż tu zakładamy. W Japonii, dzięki dobremu prawodawstwu w zakresie efektywności energetycznej, dostępne są powietrzne pompy ciepła o współczynniku wydajności 4,9.

Warto zauważyć, że pompy ciepła to systemy, które mogą mieć „sprawność większą niż 100%”. Dla przykładu, jeżeli pompę ciepła zasila prąd z „najlepszej elektrowni gazowej”, prąd otrzymujemy ze sprawnością 30%, a ciepło ze sprawnością 80%, co daje „sprawność całkowitą” rzędu 110%. Żaden z systemów kogeneracyjnych nie zbliża się do tej sprawności.

Powiedzmy to głośno. Pompy ciepła mają wyższą sprawność niż kotły kondensacyjne, nawet jeżeli są zasilane prądem z elektrowni gazowych. Jeżeli chcemy ogrzać wiele budynków za pomocą gazu, możemy albo zainstalować kotły kondensacyjne o sprawności 90%, albo przesłać ten sam gaz do nowoczesnej elektrowni gazowej, a we wszystkich budynkach zainstalować pompy ciepła zasilane prądem – w tym drugim przypadku sprawność wahałaby się pomiędzy 140 a 185%. Nie trzeba kopać głębokich dziur w ogrodzie i instalować ogrzewania podłogowego, by skorzystać z dobrodziejstw pompy ciepła – najlepsze powietrzne pompy ciepła (w postaci niewielkiego pudełka na zewnątrz budynku, podobnego do klimatyzatora) mogą zasilić grzejniki w gorącą wodę ze współczynnikiem wydajności powyżej 3. Powietrzna pompa ciepła na fot. 21.11 (str. 158) dostarcza ciepłe powietrze bezpośrednio do pomieszczeń biurowych.

Reasumując, kogeneracja, mimo że brzmi atrakcyjnie, nie jest chyba najlepszym sposobem ogrzewania budynków i produkowania prądu z gazu – przy założeniu, że w budynkach da się zainstalować powietrzne i gruntowe pompy ciepła. Należy podkreślić jeszcze kilka zalet pomp ciepła – można je instalować w każdym budynku z dostępem do elektryczności, można je podłączyć do każdego źródła prądu, będą więc pracować, nawet gdy skończy się gaz lub kiedy cena gazu wystrzeli pod niebiosa. Pompy ciepła są rozwiązaniem elastycznym – można je włączać i wyłączać zgodnie z zapotrzebowaniem użytkowników budynku.

Chcę podkreślić, że to moje porównanie na niekorzyść kogeneracji nie oznacza, że wytwarzanie ciepła i prądu w skojarzeniu jest zawsze złe. Tutaj porównuję jednak sposoby ogrzania zwykłych budynków, do czego wystarczy ciepło niskotemperaturowe. Kogeneracja może również dostarczyć ciepło wysokotemperaturowe na potrzeby przemysłu (np. o temperaturze 200 °C). W zastosowaniach przemysłowych pompy ciepła raczej się nie sprawdzają, bo mają niższy współczynnik wydajności.



Granice rozwoju pomp ciepła

Zima to czy lato temperatury pod powierzchnią gruntu, na głębokości kilku metrów, leniwie oscylują w granicach 11 °C. Grunt teoretycznie daje pompie ciepła lepszą możliwość pochycenia ciepła niż powietrze, które w środku zimy może być nawet o 10–15 °C zimniejsze niż grunt. O ile to tylko możliwe, instalatorzy pomp ciepła doradzają montaż pomp gruntowych (pompy ciepła tracą na sprawności, kiedy różnica temperatur pomiędzy wnętrzem a otoczeniem budynku jest wysoka).

Niemniej jednak grunt nie jest nieograniczonym źródłem ciepła. Ciepło musi skądś pochodzić, a grunt nie jest wcale tak dobrym jego przewodnikiem. Jeżeli wyssimy ciepło z gruntu zbyt szybko, ten znacznie się oziębi i spadnie wydajność pompy gruntowej.

W Wielkiej Brytanii podstawowym zadaniem pomp ciepła byłoby dostarczenie ciepła budynkom w zimie. Pierwotnym źródłem tego ciepła jest słońce, które ogrzewa grunt bezpośrednio przez promieniowanie i poprzez ogrzane powietrze. Tempo wysysania ciepła z gruntu ograniczają dwa czynniki: zimą nie wolno dopuścić do nadmiernego wychłodzenia gruntu, a ciepło wysane zimą musi zostać uzupełnione latem. Jeżeli istnieje ryzyko, że *naturalnie* uzupełnienie ciepła latem nie zrekompensuje ubytku ciepła wysanego zimą, trzeba *aktywnie* stymulować dogrzanie gruntu – np. poprzez uruchomienie instalacji latem w odwrotną stronę, co wpompuje ciepło do gruntu (a schłodzi dom).

Oprzyjmy się na liczbach. Jak dużo gruntu potrzebuje pompa ciepła? Załóżmy, że jesteśmy w okolicy o dużej gęstości zaludnienia – dajmy na to 6200 osób/km² (160 m² na osobę). To gęstość typowa dla brytyjskich przedmieść. Czy *każdy* mógłby zainstalować sobie pompę ciepła bez aktywnego dogrzewania gruntu latem? Obliczenia w rozdziale E (str. 304) wstępnie *temu przeczą*: gdyby każdy w okolicy wysysał z gruntu strumień ciepła rzędu 48 kWh dziennie na osobę (to moje szacunki typowego zapotrzebowania na ciepło zimą w Wielkiej Brytanii), grunt skułby lód. Rozsądne tempo ssania, które pozwoli uniknąć nadmiernego wychłodzenia gruntu, to mniej niż 12 kWh dziennie na osobę. Przejście na gruntowe pompy ciepła wymagałoby projektowania domów z porządnymi mechanizmami dogrzewania gruntu latem – po to, by magazynować tam ciepło na zimę. Można by tu wykorzystywać ciepło z klimatyzacji lub ciepło z dachowych kolektorów słonecznych (Drake Landing Solar Community w Kanadzie

Rys. 21.12. Jak ciasno można upchnąć gruntowe pompy ciepła?

	powierzchnia na osobę (m ²)
Bangalore	37
Manhattan	39
Paryż	40
Chelsea	66
Tokio	72
Moskwa	97
Taipei	104
Haga	152
San Francisco	156
Singapur	156
Cambridge MA	164
Sydney	174
Portsmouth	213

Rys. 21.13. m² powierzchni na osobę w wybranych miastach

gromadzi latem w gruncie ciepło słoneczne do użytku w zimie [www.dlsc.ca]). Powinniśmy jednak założyć, że nie obejdziesz się bez wsparcia w postaci powietrznych pomp ciepła – dopiero wówczas otrzymamy tyle ciepła, ile potrzebujemy (tak długo, jak mamy prąd, by zasilić pompy). W Wielkiej Brytanii temperatury powietrza nie spadają znacznie poniżej zera, stąd też obawy, że spadnie wydajność pomp ciepła, są tu mniej uzasadnione niż w Ameryce Północnej lub Skandynawii.

Rynek pomp ciepła w Polsce jest większy niż w Wielkiej Brytanii. Moc zainstalowana w 2008 roku wynosiła 180 MW(c) w 11 tysiącach instalacji (w stosunku do 135 MW(c) w Wielkiej Brytanii). Jednak rynek ten dopiero się kształtuje. Pompy ciepła, aby były efektywne, wymagają wysokich standardów energooszczędności budynków i systemów grzewczych – te zaś są w Polsce bardzo niskie. Ogranicza to mocno możliwość prostego przechodzenia z ogrzewania konwencjonalnego (węglowego lub gazowego) na systemy oparte na pompach ciepła.

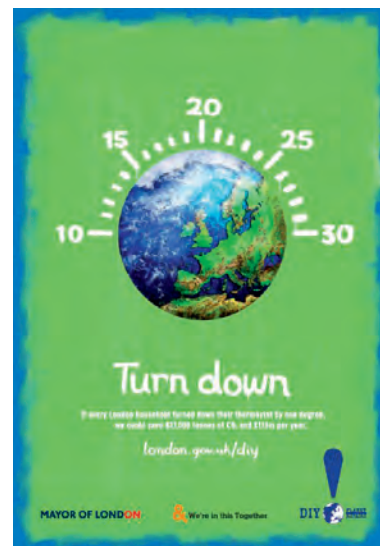
W Polsce, inaczej niż w Wielkiej Brytanii, temperatury powietrza spadają znacznie poniżej zera, przez co wydajność pomp ciepła jest niższa niż na Wyspach. Problem ten można rozwiązać, łącząc pompy ciepła z gruntowymi wymiennikami ciepła (czyli biegnącymi pod ziemią rurami, zimą nagrzewającymi wpadające do budynku powietrze, a latem je schładzającymi).

Gruntowych pomp ciepła nie da się stosować w blokach i wieżowcach, dominujących w krajobrazie polskich miast. Tutaj sprawdzą się raczej powietrzne pompy ciepła, a także tradycyjne kogeneracyjne ciepło sieciowe, oparte jednak raczej na biomase (np. odpadach drzewnych i biogazie), a nie na węglu.

Skonkludujmy, czy można ograniczyć zużycie energii cieplnej? Tak. Czy pozwoli to nam ograniczyć zużycie paliw kopalnych? Tak. Nie zapominając o niskokosztowych inwestycjach w termomodernizację oraz zabiegach z termostatem, powinniśmy zastąpić wszystkie kotły na gaz i węgiel pompami ciepła na prąd – wówczas zużycie energii może spaść do ¼ obecnego poziomu. Naturalnie, taka elektryfikacja zwiększy zużycie prądu. Niemniej jednak, nawet gdyby ta dodatkowa ilość prądu miała pochodzić z elektrowni gazowych, byłoby to znacznie lepsze niż to, co robimy teraz, czyli zwyczajne podpalanie gazu. Pompy ciepła są odporne na energetyczne zwroty akcji – pozwolą nam efektywnie ogrzać budynki, pracując dzięki prądowi z jakiegokolwiek źródła.

Malkontenci twierdzą, że powietrzne pompy ciepła mają nędzny współczynnik wydajności – zaledwie 2 czy 3. Mają nieaktualne dane. Kupując najnowocześniejsze pompy ciepła, możemy liczyć na znacznie lepszy wynik. Inicjatywa, ustawodawca japońskiego rządu, rozpisana na 10 lat, znakomicie przyczyniła się do poprawy wydajności systemów klimatyzacji. Dzięki tym regulacjom pojawiły się powietrzne pompy ciepła o współczynniku wydajności 4,9; takie pompy potrafią podgrzać nie tylko powietrzne, ale też wodę.

A oto kolejny argument sceptyków. „Jeżeli pozwolimy ludziom montować efektywne energetycznie powietrzne pompy ciepła, latem zrobią sobie z tego klimatyzację”. I co z tego? Tak jak wszyscy nie znoszą zbyt mocno odkręconej klimatyzacji, jednak te pompy ciepła są czterokrotnie bardziej efektywne niż jakikolwiek inny sposób grzania zimą! Pokażcie mi lepszą opcję. Drewniane pelety? No jasne, kilku zbieraczy chrustu może sobie nimi palić. Nie ma jednak



Rys. 21.14. Plakat promujący kampanię mera Londynu z 2007 roku pod nazwą „Zrób to sam – remont planety” („DIY planet repairs”). Tekst na plakacie „Przykręć. Gdyby w każdym mieszkaniu w Londynie przykręcić termostat o 1 stopień, zaoszczędzilibyśmy 837 000 ton CO₂ i 110 mln funtów rocznie”.

[london.gov.uk/diy]. W przeliczeniu na osobę, to 0,12 t CO₂ rocznie. To około 1% całkowitych emisji pojedynczej osoby (11 ton), tak więc to dobra rada. Świetna robota, Ken!

tyle drewna, żeby każdy mógł to zrobić. Właściciele lasów niech palą drewnem. Wszyscy inni niech instalują pompy ciepła.

Rolniczy charakter polskiej prowincji i największy w Europie potencjał biomasy pozwala nam bardziej optymistycznie spojrzeć na kwestie kogeneracji i pomp ciepła. Możemy połączyć oba rozwiązania, wykorzystując źródła kogeneracyjne oparte o paliwa odnawialne (np. mikrobiogazownie), zasilające pompę ciepła. Daje to potencjał nawet pięciokrotnej redukcji zużycia rzeczywistego energii pierwotnej (w paliwach przeznaczonych na rynek ciepła). To rozwiązanie skrojone na miarę rolniczej Polski, gdzie wiele wolnostojących wiejskich domów można ogrzać i oświetlić łatwo dostępną biomasą drzewną i rolniczą.

Czy w polskiej energetyce „małe jest piękne”? Uwzględnivszy powyższe uwarunkowania oraz straty na przesyle prądu z dużych elektrowni, wysokosprawna, „synergiczna” energetyka rozproszona jest perspektywicznym rozwiązaniem dla mniejszych miejscowości.

Powinniśmy też poprawić standardy zużycia energii. Niezależnie od źródła grzewczego, łatwiej ogrzać dom potrzebujący mniej energii – dobrze ocieplony, wyposażony w rekuperator i gruntowy wymiennik ciepła, wykorzystujący do ogrzewania energię słoneczną. Idąc tą drogą, można w domach pasywnych (potrzebujących na ogrzewanie poniżej 15 kWh/m² rocznie) praktycznie wyeliminować potrzebę ich ogrzewania – wystarcza do tego ciepło mieszkańców i pracujących w domu urządzeń.



Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

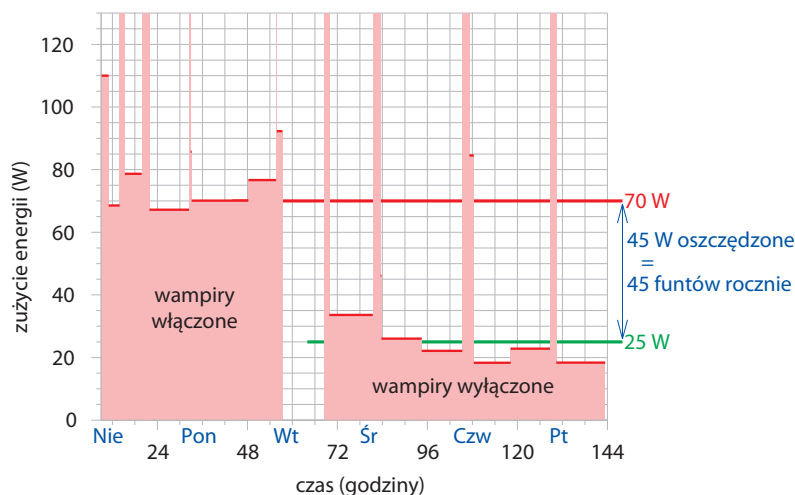
- 152 **Ocieplenie poddasza i ścian dwuwarstwowych ogranicza straty ciepła w przeciętnym domu o jakieś 25%.** Eden i Bending (1985).
- 154 **W latach 70. średnia temperatura w zimie w brytyjskich domach wynosiła 13 °C!** Źródło: Departament Handlu i Przemysłu (2002a, paragraf 3.11).
- 155 **... Wielka Brytania pozostaje w tyle w zakresie sieci ciepłowniczych oraz kogeneracji.** Ciepło odpadowe z brytyjskich elektrowni mogłoby zaspokoić potrzeby grzewcze całego kraju (Wood, 1985). W Danii, w roku 1985, miejskie sieci ciepłownicze obsługiwały 42% rynku ogrzewania powierzchni budynków, transportując ciepło na odległość 20 km i więcej, za pomocą gorącej wody pod ciśnieniem. W 1985 roku w RFN 4 miliony mieszkań były podłączone do sieci ciepłowniczej, skąd otrzymywały przeciętnie 7 kW ciepła. 2/3 dostarczonego ciepła pochodziło z elektrowni. W szwedzkim Vasteras w 1985 roku 98% miejskiego ciepła pochodziło z elektrowni.
- 157 **Pompy ciepła są na oko 4 razy bardziej efektywne energetycznie niż standardowy grzejnik elektryczny.** Więcej na stronie: www.gshp.org.uk
Niektóre pompy ciepła dostępne już w Wielkiej Brytanii mają współczynnik wydajności powyżej 4 [yok2nw]. Są nawet dotacje rządowe na zakup wodnych pomp ciepła, ale tylko tych o współczynniku wydajności powyżej 4,4. [2dtx8z].
Na rynku dostępne są gruntowe pompy ciepła o współczynniku wydajności 5,4 dla chłodzenia i 4,9 dla ogrzewania. [2fd8ar].
- 161 **... powietrzne pompy ciepła o współczynniku wydajności 4,9.** Według HPTCJ (2007) od 2006 roku w Japonii są dostępne pompy ciepła o współczynniku wydajności 6,6. Dzięki rządowym regulacjom współczynnik wydajności pomp ciepła w Japonii wzrósł z 3 do 6 na przestrzeni dekady. HPTCJ (2007) opisuje podgrzewacz wody z powietrzną pompą ciepła o nazwie Eco Cute o współczynniku wydajności 4,9. Eco Cute pojawił się na rynku w 2001 roku [www.ecosystem-japan.com]. Więcej na temat pomp ciepła publikuje Europejska Sieć Pomp Ciepła (European Heat Pump Network): ehpn.fiz-karlsruhe.de/en/, www.kensa-engineering.com, www.heatking.co.uk, www.iceenergy.co.uk
- 164 **Daje to potencjał nawet pięciokrotnej redukcji zużycia rzeczywistego energii pierwotnej.** – Źródło: J. Popczyk, *Energetyka rozproszona* (2010). [32pldfm].

22 Efektywne wykorzystanie prądu

Czy możemy ograniczyć zużycie prądu? Naturalnie, wystarczy wyłączyć urządzenia elektryczne, kiedy ich nie używamy. Innym rozwiązaniem są świetlówki energooszczędne.

Urządzeniom przyjrzelśmy się już w rozdziale 11. Niektóre możemy pominać, ale inne to prawdziwi prądożercy. Drukarka laserowa w moim biurze, stojąc sobie beczynnienie, pożera 17 W – prawie 0,5 kWh dziennie! Mój przyjaciel kupił sobie lampę w Ikea. Okropny zasilacz sieciowy tej lampy (fot. 22.1) ssie 10 W (0,25 kWh dziennie), niezależnie od tego, czy lampa jest włączona, czy też nie. Dorzucmy kilka odtwarzaczy muzyki, DVD, modemy kablowe i urządzenia bezprzewodowe – może się okazać, że da się oszczędzić nawet połowę energii zużywanej w domu.

Według Międzynarodowej Agencji Energetyki zużycie prądu w trybie *standby* (czuwania) odpowiada za około 8% zapotrzebowania na prąd w budynkach mieszkalnych. W Wielkiej Brytanii i Francji, średnie zużycie prądu w trybie czuwania wynosi około 0,75 kWh dziennie na gospodarstwo domowe. Problemem nie jest sam tryb czuwania – chodzi o to, że ten dostępny na rynku jest lichej jakości. Jest zupełnie możliwe produkowanie systemów *standby* pobierających mniej niż 0,01 W; niestety producenci, oszczędzając parę groszy na kosztach produkcji, skazują użytkowników na znacznie wyższe koszty użytkowania.



Polowanie na wampiry

Rys. 22.2 pokazuje eksperyment, który przeprowadziłem we własnym domu. Najpierw przez dwa dni mierzyłem zużycie energii, kiedy byłem poza domem albo spałem. Następnie wyłączyłem wszystkie urządzenia, które zazwyczaj stały włączone i mierzyłem zużycie przez następne trzy dni. Okazało się, że zużycie energii spadło o 45 W, a opłaty za prąd o 45 funtów rocznie, przy założeniu, że prąd kosztuje 11 pensów za kilowatogodzinę.

Od kiedy zacząłem zwracać uwagę na odczyty licznika, całkowite zużycie prądu spadło o połowę (rys. 22.3). Postanowiłem utrzymać tę oszczędność,



Fot. 22.1. Okropny zasilacz prądu zmiennego w lampie sprzedawanej przez Ikea – pobiera prawie 10 W, nawet kiedy lampa jest wyłączona!

Rys. 22.2. Efektywność wyłączania. Zmierzyłem, jakie oszczędności przyniesie wyłączanie prądożerczych wampirów. Wybrałem tydzień, kiedy przez większość dni pracowałem poza domem – tak więc zarówno we dnie, jak i w nocy nie było potrzeby włączania czegokolwiek z wyjątkiem lodówki. Krótkie, skokowe wzrosty zużycia były spowodowane przez mikrofalówkę, toster, zmywarkę lub odkurzacz. W czwartek wyłączyłem większość moich wampirów: dwa odtwarzacze muzyki, odtwarzacz DVD, modem kablowy, router bezprzewodowy i automatyczną sekretarkę. Czerwona linia pokazuje trend zużycia energii w trybie „nikogo nie ma w domu” przed zmianą, a zielona linia – trend zużycia w trybie „nikogo nie ma w domu” po zmianie. Zużycie energii spadło o 45 W lub 1,1 kWh dziennie.

odczytując licznik raz w tygodniu, by sprawdzić, jak udaje się moje polowanie na prądożerne wampiry. Gdyby ten magiczny trick powtórzyć we wszystkich domach i miejscach pracy, otrzymalibyśmy istotne oszczędności. Dlatego też wspólnie z kilkoma kolegami z Cambridge przygotowujemy stronę internetową promującą w zabawny, ale treściwy sposób regularne odczytywanie licznika. Strona ReadYourMeter.org ma zachęcić ludzi do prowadzenia eksperymentów podobnych do mojego, główkowania nad liczbami na liczniku i czerpania satysfakcji z tego, że zużywają mniej prądu.

Mam nadzieję, że tego rodzaju inteligentne pomiary rzeczywiście zrobią różnicę. Jednakże w naszej modelowej Brytanii roku 2050 założyliśmy, że wszystkie te oszczędności zostaną pochłonięte przez cud wzrostu gospodarczego. Wzrost jest jednym z dogmatów naszego społeczeństwa – ludzie będą się bogacić, więc kupią więcej gadżetów. Zapotrzebowanie na coraz nowocześniejsze gry komputerowe sprawia, że komputery zużywają więcej energii. Komputery produkowane w ostatniej dekadzie były całkiem energooszczędne, jednak uznajemy je za nieużyteczne i zastępujemy coraz szybszymi i bardziej prądożernymi modelami.

Chcemy konsumować tyle, co Brytyjczycy, założymy więc, że Polacy marnują tyle samo energii w trybie *standby* – 0,75 kWh dziennie na gospodarstwo domowe. Gdyby Polak wykonał eksperyment Davida i ograniczył zużycie energii o 45 W, zaoszczędziłby ponad 200 zł rocznie (przy cenie 50 groszy za 1 kWh prądu).

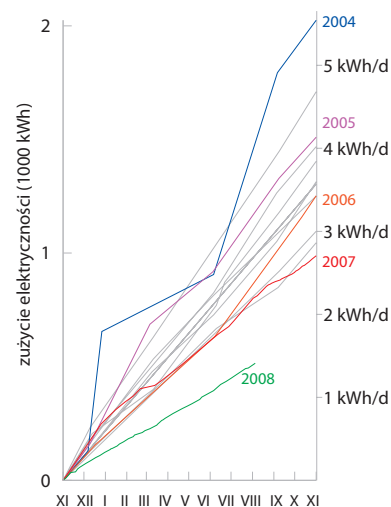
Zakup energooszczędnych żarówek i urządzeń, eliminowanie zużycia prądu przez urządzenia pozostawione w trybie czuwania i włączanie urządzeń na maksymalnie krótki czas bezproblemowo pozwolą zmniejszyć zużycie elektryczności w domu poniżej 1 kWh/d na osobę bez obniżenia komfortu i poziomu życia.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

165 zużycie prądu w trybie czuwania odpowiada za około 8% zapotrzebowania na prąd w budynkach mieszkalnych. – Źródło: Międzynarodowa Agencja Energetyczna – IEA (2001).

Więcej nt. regulacji w zakresie trybu *standby* na stronie: www.iea.org/textbase/subjectqueries/standby.asp



Rys. 22.3. Skumulowane zużycie energii w moim domu, w kWh rok po roku, w latach 1993–2008. Szare linie ilustrują lata 1993–2003 (by uniknąć zagęszczenia, nie wypisałem poszczególnych lat). Linie kolorowe ilustrują okres od roku 2004 do dziś. Skala po prawej pokazuje średnie zużycie energii w kWh dziennie. Polowanie na wampiry rozpocząłem 2 października 2007 roku. W wyniku udanego polowania i zainstalowania energooszczędnych świetlówek zużycie energii spadło z 4 kWh do 2 kWh dziennie.

23 Zrównoważone paliwa kopalne?

Nie uciekniemy od faktu, że paliwa kopalne jeszcze przez dziesięciolecia będą stanowiły istotny element bilansu energetycznego.

rzecznik prasowy rządu brytyjskiego, kwiecień 2008

Nasz obecny radosny postęp nie będzie trwał w nieskończoność.

William Stanley Jevons, 1865

W poprzednich trzech rozdziałach zbadaliśmy główne technologie i zmiany zachowań konsumenckich na rzecz redukcji zużycia energii. Stwierdziliśmy, że możliwe jest ograniczenie o połowę zużycia energii w transporcie (i odchodzenie od paliw kopalnych), o ile przesiądziemy się do samochodów elektrycznych. Stwierdziliśmy, że jeszcze skuteczniej możemy ograniczyć zużycie energii cieplnej (i odchodzić od paliw kopalnych), ocieplając wszystkie budynki i używając elektrycznych pomp ciepła zamiast paliw kopalnych. Wynika z tego, że możemy ograniczyć zużycie energii. Niestety, zaspokojenie nawet tak zredukowanego zapotrzebowania za pomocą brytyjskich źródeł odnawialnych może być bardzo trudne (rys. 18.7, str. 120). Czas więc przeanalizować nieodnawialne opcje produkcji energii.

Weźmy znane rezerwy paliw kopalnych. To w przeważającej części węgiel – jego rezerwy są szacowane na 800–1600 mld ton. Weźmy tę większą wartość, podzielmy ją równo pomiędzy 6 mld ludzi i spalmy w sposób „zrównoważony”. Co rozumiemy przez zużywanie wyczerpywalnych, było nie było, zasobów w sposób „zrównoważony” (czyli bez uszczerbku dla przyszłych pokoleń)? Posłużymy się taką oto arbitralną definicją: tempo spalania jest „zrównoważone”, jeżeli zasobów wystarczy na **1000 lat**. Tona węgla dostarcza 8000 kWh energii chemicznej, więc 1600 mld ton węgla, rozdzielone między 6 mld ludzi w przeciągu 1000 lat, daje energię rzędu **6 kWh dziennie na osobę**. Standardowa elektrownia przekształciłaby tę energię chemiczną w prąd z efektywnością około 37% – daje to w przybliżeniu **2,2 kWh(e) dziennie na osobę**. Jeżeli dbamy o klimat, najpewniej standardowa elektrownia nas nie zadowoli. Prawdopodobnie wybierzemy technologię „czystego węgla”, znaną również jako wychwyty i składowanie dwutlenku węgla (CCS) – technologię będącą jeszcze w powijakach, która pozwala wyłapać większość dwutlenku węgla ze strumienia spalin i wpakować go do dziury pod powierzchnią ziemi. Takie redukcowanie emisji ma istotny koszt energetyczny – ograniczyłoby ilość wyprodukowanego prądu o jakieś 25%. Tak więc „zrównoważone” wykorzystanie znanych rezerw węgla dostarczyłoby zaledwie **1,6 kWh(e) na osobę dziennie**.

Porównajmy owo „zrównoważone” tempo spalania węgla (1,6 mld ton rocznie) z obecnym zużyciem węgla na świecie, które wynosi 6,3 mld ton rocznie i nadal rośnie (w roku 2009 wzrosło ono do blisko 7 miliardów ton).

Jak na tym tle wypadła Wielka Brytania? Szacuje się, że zostało nam 7 mld ton węgla. Kiedy podzielimy 7 mld ton między 60 mln ludzi, otrzymamy 100 ton na osobę. W 1000-letnim horyzoncie oznacza to **2,5 kWh na osobę dziennie**. W elektrowni wyposażonej w CCS to zrównoważone podejście do brytyjskiego węgla dostarczyłoby 1,7 kWh(e) na osobę dziennie.

Wniosek jest jasny:

Czysty węgiel jest tylko technologią przejściową.



Fot. 23.1. Dostawa węgla do elektrowni w Kingsnorth (o mocy 1940 MW) w 2005 roku. Fot. Ian Boyle, www.simplonpc.co.uk

Węgiel: 6 kWh/d

Rys. 23.2. „Zrównoważone paliwa kopalne”

Skoro już rozwijamy technologię „czystego węgla” w celu redukcji emisji gazów cieplarnianych, nawet poklepując się po plecach, musimy uczciwie podliczyć rachunki. Proces spalania węgla wiąże się z emisją gazów cieplarnianych nie tylko w elektrowni, ale też w kopalni. Wydobyciu węgla towarzyszy emisja metanu, tlenku węgla i dwutlenku węgla – zarówno bezpośrednio z pokładów węgla w procesie odkrywania, jak i później z łupków i mułowców składowanych w hałdach. Owe emisje z kopalni podnoszą ślad węglowy (czyli emisję gazów cieplarnianych) przeciętnej elektrowni o około 2%, co elektrownię pracującą w technologii „czystego węgla” czyni jakby mniej czystą. Podobny problem rachunkowy dotyczy gazu naturalnego – jeżeli około 5% gazu wycieka w trakcie transportu z dziury w ziemi do elektrowni, wywołane przez to zanieczyszczenie metanem odpowiada (w przeliczeniu na dwutlenek węgla) 40-procentowemu wzrostowi emisji CO₂ z elektrowni.



Fot. 23.3. Koparka pasąca się na prehistorycznych liściach
Fot. Peter Gunn

Zasoby bilansowe węgla w Polsce są większe niż w Wielkiej Brytanii. Według optymistycznych założeń zostało nam 16 mld ton węgla kamiennego i 22 mld ton węgla brunatnego. Węgiel brunatny jest jednak wyjątkowo brudnym paliwem o wyższej niż węgiel kamienny emisji dwutlenku węgla, a jego wartość opałowa wynosi zaledwie 37% wartości opałowej węgla kamiennego. Dzieląc całkowite zasoby między 40 mln Polaków, uzyskujemy 950 ton na osobę. Uwzględniając niższą wartość opałową węgla brunatnego, w 1000-letnim horyzoncie otrzymujemy 15 kWh na osobę dziennie (10 kWh z węgla kamiennego i 5 kWh z brunatnego). Zrównoważone wykorzystanie węgla w elektrowni z CCS obniżyłoby tę wartość do poziomu **około 11 kWh na osobę dziennie**.

Również dla Polski „czysty węgiel” jest więc tylko technologią przejściową. Teoretyczny potencjał zaspokojenia naszych potrzeb energetycznych (nieuwzględniający barier ekonomicznych i technologicznych ani konieczności zastąpienia węglem innych wciąż wyczerpywanych źródeł energii) jest jednak wyraźnie wyższy niż w Wielkiej Brytanii.

David nie traktuje metanu uwalnianego się z pokładów węgla jako potencjalnego surowca energetycznego. W Polsce postuluje się ponownie badań nad jego wychwytem i wykorzystaniem (takie działania prowadzono i zarzucono w latach 90.) Szacuje się, że zasoby metanu w polskich złożach to ponad 150 mld m³, czym przewyższają udokumentowane ilości w konwencjonalnych złożach gazu ziemnego. Nie jest to jednak perspektywa oszałamiająca. Załóżmy, że zużycie gazu w Polsce nie będzie rosło i nadal wynosić będzie 14 mld m³ rocznie. Zaspokojenie zapotrzebowania na gaz za pomocą metanu z pokładów węgla wyczerpałoby go w 10 lat. Ujmując to w naszych jednostkach, wykorzystanie tych zasobów dałoby każdemu Polakowi około **0,11 kWh na osobę dziennie**.

Nowe technologie węglowe

Przedsiębiorstwo Direct Carbon (directcarbon.com) z siedzibą w Stanford w kalifornijskim Palo Alto rozwija Bezpośrednie Węglowe Ogniwo Paliwowe (*Direct Carbon Fuel Cell*), które przekształca paliwo i powietrze bezpośrednio w prąd i CO₂ bez użycia wody lub turbin parowych. Przedstawiciele firmy twierdzą, że ten sposób produkowania prądu z węgla jest dwukrotnie bardziej efektywny niż ma to miejsce w standardowej elektrowni.

Gdzie kończy się ścieżka „wszystko po staremu”?

Ekonomista William S. Jevons wykonał w 1865 roku proste obliczenie. Dyskutowano wówczas, na jak długo wystarczy brytyjskiego węgla. By odpowiedzieć na to pytanie, zazwyczaj dzielono szacunkowe rezerwy węgla przez jego zużycie i otrzymywano odpowiedzi w rodzaju „na 1000 lat”. Jednakże Jevons stwierdził, że zużycie nie jest stałe. Podwajało się co 20 lat, a „postęp” sprawiał, że tak miało być i w przyszłości. Stąd też obliczenie „rezerwy podzielone przez zużycie” daje odpowiedź nieprawidłową.

Zamiast tego Jevons ekstrapolował wykładniczo rosnącą konsumpcję, obliczając, kiedy całkowite zużycie przekroczy szacunkowe rezerwy. Miało to być znacznie wcześniej niż za 1000 lat. Jevons nie zakładał, że zużycie rosłoby w stałym tempie, ale wskazywał, że wzrost ten nie będzie zrównoważony. Jego rachunki pokazały brytyjskim czytelnikom, że istnieją granice wzrostu i że owe granice mogą ujawnić się całkiem niedługo. Jevons przedstawił śmiałą prognozę, że koniec brytyjskiego „postępu” nastąpi w ciągu stu lat od roku 1865. Miał rację. Wydobywanie węgla w Wielkiej Brytanii osiągnęło szczyt w 1910, a do roku 1965 Wielka Brytania przestała być światową potęgą.

Powtórzmy ten rachunek dla świata. W 2006 roku zużycie węgla wynosiło 6,3 mld ton rocznie. Porównując to z rezerwami wielkości 1600 mld ton, ludzie często mówią: „Węgla wystarczy nam jeszcze na 250 lat”. Jeżeli jednak zakładamy, że scenariusz „wszystko po staremu” („*business as usual*”) wiąże się z rosnącym zużyciem, otrzymamy inną odpowiedź. Gdyby zużycie węgla rosło o 2% rocznie (co mniej więcej odpowiada danym z lat 1930–2 000), wyczerpiemy pokłady węgla do roku 2096. Gdyby zużycie węgla rosło o 3,4% rocznie (tempo wzrostu zużycia na przestrzeni ostatniej dekady), koniec „wszystkiego po staremu” nadejdzie przed rokiem 2072. To nie 250 lat, ale 60! [szybki wzrost zużycia, obecnie już do poziomu blisko 7 miliardów ton rocznie oraz weryfikacja rezerw spowodowały, że światowe rezerwy węgla, jeszcze w 2001 roku szacowane na 250 lat bieżącego zużycia, w roku 2010 były już szacowane jedynie na 119 lat – *red.*]

Gdyby Jevons był tu z nami dzisiaj, jestem pewien, że prognozowałby koniec naszego obecnego radosnego postępu przed rokiem 2050 lub 2060 – chyba, że oberzemy kurs inny niż „wszystko po staremu”.

I my zrewidujmy obliczenia dla Polski. Jeżeli weźmiemy pod uwagę tylko zasoby przemysłowe i operatywne (czyli takie, które rokują pod względem ekonomicznym, technologicznym i ekologicznym), szacuje się, że węgla kamiennego przy obecnym poziomie zużycia wystarczy nam na około 50 lat. Należy zauważyć, że węgiel, który nam pozostał, jest znacznie niższej jakości i głębiej położony niż dotychczas eksploatowane pokłady. Ponadto, jeżeli każda nowa elektrownia węglowa zostanie wyposażona w instalację CCS, spadnie sprawność wykorzystania energii z węgla. By uzyskać tę samą wielkość produkcji prądu i ciepła zużyjemy więcej surowca. Węgiel skończy się nam jeszcze w połowie obecnego stulecia.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 167 ... 1000 lat – zgodnie z moją arbitralną definicją na tyle wystarczy węgla przy jego „zrównoważonym” zużyciu. Wcześniej podobnego obliczenia dokonał Hansen z zespołem (2007), stawiając znak równości pomiędzy „na więcej niż 500 lat” i „na zawsze”.
- Tona ekwiwalentu węgla = 29,3 GJ = 8000 kWh energii chemicznej. Liczba ta nie uwzględnia kosztów energetycznych wydobycia węgla, transportu oraz wychwyty i składowania dwutlenku węgla.
 - **Wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla (CCS)**. Istnieje kilka technologii CCS. Jedna to wychwytywanie CO₂ ze strumienia spalin wylatujących kominem, inne polegają na zgazowaniu węgla i oddzieleniu CO₂ przed spalaniem. Więcej w: Metz i inni (2005). Pierwsza prototypowa elektrownia węglowa z CCS została otwarta 9 września 2008 roku przez szwedzki koncern Vattenfall. [5kpk8].
 - **Brytyjski węgiel**. We wrześniu 2005 roku rezerwy i zasoby w istniejących kopalniach szacowane były na 350 mln ton. W listopadzie 2005 roku potencjalne rezerwy w odkrywkach szacowano na 620 mln ton, a potencjał podziemnego zgazowania węgla – na 7 mld ton. [yebuk8].
- 168 **Polski węgiel**. Dane pochodzą z „Przeglądu Energetycznego” BP 2010 [2uc2vry] oraz opracowania M. Bartosika *Globalne zasoby energii pierwotnej a kryzys energetyczny*, maj 2009. [33na87]].
- **Wydobyciu węgla towarzyszy emisja gazów cieplarnianych**. Więcej na temat emisji metanu z wydobycia węgla znaleźć można na stronie: www.epa.gov/cmopl/, u Jacksona i Kershawa (1996) oraz Thakura i innych (1996). Globalne emisje metanu z wydobycia węgla wynoszą około 400 Mt CO₂e rocznie. Odpowiada to około 2% emisji gazów cieplarnianych związanych ze spalaniem węgla.
Przeciętna zawartość metanu w brytyjskich pokładach węgla wynosi 4,7 m³ na tonę węgla (Jackson i Kershaw, 1996); metan jest uwalniany do atmosfery i ma globalny potencjał tworzenia efektu cieplarnianego odpowiadający około 5% potencjału, jaki ma CO₂ ze spalania węgla.
 - **Zasoby bilansowe węgla w Polsce...**Zasoby bilansowe to takie, które są możliwe i opłacalne w wydobyciu według aktualnych kryteriów wykorzystania gospodarczego.
 - **Jeżeli wycieka 5% gazu, odpowiada to 40-procentowemu wzrostowi emisji CO₂**. Przypadkowe zanieczyszczenie metanem ma prawie ośmiokrotnie większy potencjał ocieplania klimatu niż zanieczyszczenie CO₂ powstałe w wyniku spalania tego metanu. Dlaczego ośmiokrotnie większy, a nie – jak się zazwyczaj podaje – 23-krotnie większy? 23-krotność to stosunek potencjału ocieplenia obliczony w oparciu o równe masy metanu i CO₂. W procesie spalania każda tona metanu (CH₄) zamienia się w 2,75 tony CO₂; natomiast jeżeli wycieka – odpowiada 23 tonom CO₂. 23 dzielone przez 2,75 daje 8,4.
- 169 **Jeżeli każda nowa elektrownia węglowa w Polsce zostanie wyposażona w instalację CCS (...)**. Instalacja CCS ma powstać w należącej do Polskiej Grupy Energetycznej elektrowni Bełchatów. Bełchatowski CCS energetycy podsumowują hasłem „Ekologia, która zabija wydajność”. Sprawność nowego bloku zostanie obniżona z 41,7% do 36,8% i będzie podobna do uzyskiwanej w przestarzałych, nieefektywnych blokach.
- **światowe rezerwy węgla, jeszcze w 2001 roku szacowane na 250 lat bieżącego zużycia, w roku 2010 były już szacowane jedynie na 119 lat**. Patrz: przeglądy energetyczne British Petroleum, dostępne w [3yto6z4] (lata 2001 – 2008) oraz [273yzqs] (2010).
Rekomendacje lektur: World Energy Council. [yhxf8b].
Lektury na temat podziemnego zgazowania węgla: [e2m9n].



24 Energia jądrowa?

Popelniliśmy błąd, stawiając znak równości pomiędzy energią nuklearną a bronią nuklearną, tak jakby wszystko co jądrowe, było złe. To jakby medycynę nuklearną zrównać z bronią nuklearną.

Patrick Moore,
były dyrektor Greenpeace International

Energia jądrowa występuje w dwóch smakach. Reakcję o pierwszym smaku, czyli rozszczepienie jądra atomowego, umiemy wykorzystywać w elektrowniach – do rozszczepienia jako paliwa używa się uranu, wyjątkowo ciężkiego pierwiastka. Nie umiemy wykorzystywać w elektrowniach reakcji o drugim smaku, czyli syntezy (fuzji) jądrowej. W syntezie paliwem byłyby lekkie pierwiastki, w szczególności wodor. Reakcja rozszczepienia polega na rozbiciu ciężkich jąder na jądra o średniej wielkości, czemu towarzyszy uwolnienie energii. Synteza jądrowa polega na złączeniu się dwóch lżejszych jąder w jedno cięższe, co również uwalnia energię.

Zarówno rozszczepienie, jak i synteza mają pewną istotną właściwość: energia nuklearna zawarta w jednym atomie jest w przybliżeniu milion razy większa niż energia chemiczna zawarta w atomie innego paliwa. Oznacza to, że ilość paliwa i odpadów związana z procesem produkcji energii w reaktorze może być milion razy mniejsza niż ilość paliwa i odpadów w elektrowni na węgiel lub gaz o podobnej mocy.

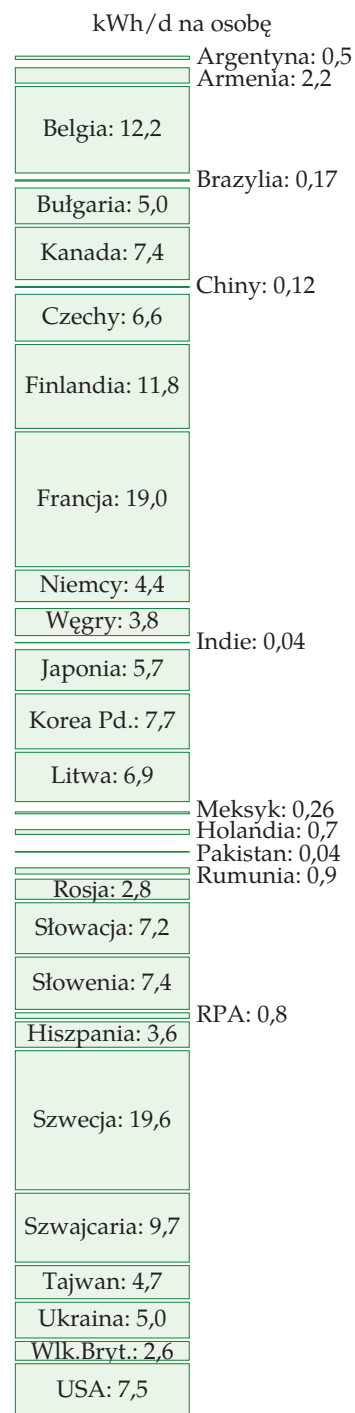
Nadajmy tym kwestiom ludzki wymiar. Ilość paliw kopalnych zużywanych przez „przeciętnego Brytyjczyka” wynosi około 16 kg dziennie – 4 kg węgla, 4 kg ropy i 8 kg gazu [statystyczny Polak zużywa codziennie 10 kg węgla, 1,8 kg ropy i 0,7 kg gazu – red.]

Oznacza to, że każdego dnia paliwa kopalne o tej masie są wydobywane z dziury w ziemi, przewożone, przetwarzane i spalane na nasze konto. Co roku ze spalania węgla i ropy na przeciętnego Brytyjczyka przypada 11 ton odpadu w postaci dwutlenku węgla – to 30 kg dziennie. W poprzednim rozdziale omówiliśmy pomysł polegający na wychwytywaniu dwutlenku węgla, sprężeniu go do formy stałej lub gazowej i przetransportowaniu gdzieś do miejsca składowania. Wyobraźmy sobie, że każdy z nas musi sam wychwycić i złożyć gdzieś swój dwutlenek węgla. 30 kg dwutlenku węgla dziennie to pełen plecak. I to każdego dnia.

Dla porównania ilość naturalnego uranu potrzebnego do wyprodukowania takiej samej ilości energii, ile dostarcza 16 kg paliw kopalnych, w standardowym reaktorze jądrowym wynosi 2 gramy (swoją drogą, owe 2 gramy to więcej niż jedna milionowa tych 16 kg dziennie, gdyż obecnie budowane reaktory spalają jedynie izotop ²³⁵U, który stanowi mniej niż 1% całości uranu). Pozyskanie owych 2 gramów uranu dziennie wymagałoby wydobywania jakichś 200 gramów rudy dziennie. Związane z tym odpady ważą ćwierć grama.

Emisja dwutlenku węgla na pojedynczego Polaka wynosi nieco mniej – 9 ton rocznie (25 kg dziennie) – odrobinę lżejszy plecak.

Strumienie paliw zasilających reaktor i opuszczających go odpadów są więc niewielkie w porównaniu do strumieni związanych z paliwami kopalnymi.



Rys. 24.1. Produkcja energii elektrycznej per capita w elektrowniach jądrowych w 2007 roku, w kWh na osobę dziennie, w każdym kraju dysponującym energią jądrową.

„Małe jest piękne”, jednak w przypadku odpadów jądrowych „małe” nie znaczy „bezproblemowe”. To raczej „pięknie mały” problem.

„Zrównoważona” energia z rozszczepienia jądrowego

Rys. 24.1. pokazuje ilość prądu wyprodukowanego globalnie przez elektrownie jądrowe w 2007 roku, w podziale na poszczególne kraje.

Czy energia jądrowa może być „zrównoważona”? Na moment odłóżmy na bok pojawiające się zazwyczaj pytania o bezpieczeństwo i składowanie odpadów. Kluczową kwestią jest to, jak długo możemy jeszcze rozszczepiać atomy. Jak duże są światowe złoża uranu i innych paliw rozszczepialnych? Czy uranu wystarczy już tylko na dziesięciolecie? A może jednak na setki lat?

W celu oszacowania „zrównoważonej” energii z uranu całkowite rezerwy uranu możliwego do pozyskania na lądzie i w morzu podzieliłem przez 6 mld ludzi i zadałem sobie pytanie: „W jakim tempie możemy tego używać, by wystarczyło na tysiąc lat?”.

Prawie cały możliwy do pozyskania uran znajduje się w morzach i oceanach, a nie w ziemi – woda morska zawiera 3,3 mg uranu na m³ wody, co daje 4,5 mld ton w skali globu. Określiłem uran w oceanach jako „możliwy do pozyskania”, co nieco mija się z prawdą – większość wód morskich jest raczej niedostępna, a oceaniczny pas transmisyjny robi pełną rundę w jakieś tysiąc lat. Co więcej, nikt jeszcze nie pochwalił się pozyskaniem uranu z wody morskiej na skalę przemysłową. Zrobimy więc odrębne rachunki dla dwóch przypadków: w pierwszym oszacujemy tylko zasoby uranu z kopalń, w drugim dodamy również uran oceaniczny.

Ruda uranu, którą da się wydobyć z ziemi po cenach niższych niż 130 dolarów za 1 kg uranu, to jedna tysięczna tych 4,5 mld ton. Jeżeli ceny pójdą w górę, powyżej 130 dolarów, opłacalne stanie się pozyskiwanie uranu ze złóż fosforanów o niskiej koncentracji uranu. Pozyskiwanie uranu z fosforanów jest całkowicie wykonalne, przed 1998 rokiem robiono to w USA i w Belgii. W celu oszacowania zasobów uranu kopalnego zsumuję konwencjonalne rudy uranu i fosforany, co daje zasoby całkowite rzędu 27 mln ton uranu (rys. 24.2).

Rozważymy dwie metody wykorzystania uranu w reaktorze: (a) szeroko stosowana metoda pojedynczego przejścia przez reaktor (*once-through method*) pozwala pozyskać energię głównie z rozszczepialnego izotopu ²³⁵U (który stanowi zaledwie 0,7% ogólnej masy uranu), a odrzuca nierozszczepialny ²³⁸U; (b) reaktory prędkie powielające (*fast breeder reactors*), droższe w budowie, przekształcają ²³⁸U do rozszczepialnego plutonu ²³⁹Pu i produkują mniej więcej 60 razy więcej energii z uranu.

Reaktory pracujące w cyklu paliwowym pojedynczego przejścia używające uranu kopalnego

Elektrownia jądrowa o mocy **1 GW**, pracująca w cyklu paliwowym pojedynczego przejścia przez reaktor, zużywa **162 tony uranu rocznie**. Stąd też zasoby uranu, o których wiemy, możliwe do wydobycia z ziemi, podzielone między 6 mld ludzi, wystarczyłyby na tysiąc lat, o ile na każdego przypadnie **0,55 kWh energii dziennie**. To zrównoważone tempo wyczerpywania uranu pozwoliłoby zasilić zaledwie 136 elektrowni jądrowych i stanowi połowę obecnej produkcji. Bardzo możliwe, że moje szacunki są zaniżone – uranu jeszcze nie brakuje, nie ma więc zachęt do poszukiwań złóż, niewiele działań poszukiwawczych podjęto

	miliony ton uranu
Australia	1,14
Kazachstan	0,82
Kanada	0,44
USA	0,34
RPA	0,34
Namibia	0,28
Brazylia	0,28
Federacja Rosyjska	0,17
Uzbekistan	0,12
<hr/>	
Świat w sumie (zasoby konwencjonalne w ziemi)	4,7
<hr/>	
Fosforany	22
<hr/>	
Woda morska	4 500

Rys. 24.2. Rozpoznane, możliwe do wydobycia zasoby uranu. Górna część tabeli zawiera zasoby zidentyfikowane (*reasonably assured resources + inferred resources*) o koszcie wydobycia poniżej 130 dolarów za kg uranu – stan na 1 stycznia 2005 roku. To zasoby zidentyfikowane na obszarach, gdzie przeprowadzono poszukiwania. W zapasie jest jeszcze 1,3 mln ton zubożonego uranu, produktu ubocznego przetwarzania uranu.



Fot. 24.3. Robotnicy wsuwają pręty paliwowe z uranem do reaktora z moderatorem grafitowym (X-10 Graphite Reactor).

od lat 80-tych XX w, może więc kolejne złoża czekają na odkrycie. W istocie, opracowanie opublikowane w 1980 roku szacowało, że zasoby rud o niskiej zawartości uranu są ponad tysiącrotnie większe niż 27 mln ton założonych tutaj przed chwilą.

Czy obecny sposób wykorzystania kopalnego uranu w reakcji pojedynczego przejścia można uznać za zrównoważony? Trudno powiedzieć z uwagi na brak pewności co do wyników przyszłych poszukiwań uranu. Z pewnością, przy obecnym tempie zużycia energii jądrowej, reaktory pojedynczego przejścia mogą pracować jeszcze przez setki lat. Gdybyśmy jednak chcieli 40-krotnie zwiększyć moc w elektrowniach jądrowych na świecie po to, by odejść od paliw kopalnych i poprawiać standard życia, może się okazać, że reaktory pojedynczego przejścia nie są technologią zrównoważoną.

Reaktory prędkie powielające, używające uranu kopalnego

Uran można wykorzystać 60 razy bardziej efektywnie w reaktorach prędkich powielających, które spalają cały uran – zarówno ^{238}U , jak i ^{235}U (w przeciwieństwie do reaktorów pojedynczego przejścia, które spalają głównie ^{235}U). O ile nie pozbywamy się zużytego paliwa, wyplutego przez reaktor pojedynczego przejścia, ten zubożony uran może zostać ponownie użyty – przepuszczenie uranu przez reaktor pojedynczego przejścia nie musi więc być marnotrawstwem. Gdybyśmy zużyli cały możliwy do wydobycia uran (oraz zapasy uranu zubożonego) w 60-krotnie bardziej efektywnych reaktorach prędkich powielających, uzyskalibyśmy **33 kWh na osobę dziennie**. Spektrum postaw wobec prędkich reaktorów powielających rozciąga się od „to niebezpieczna i nieudana technologia eksperymentalna, na którą trzeba machnąć ręką” do „możemy i natychmiast powinniśmy zacząć budować reaktory powielające”. Nie czuję się kompetentny, by oceniać ryzyko związane z technologią powielania, nie chcę również umieszczać twierdzeń natury etycznej obok faktów. Chcę jedynie pomóc w zrozumieniu liczb. Jedyne twierdzenie natury etycznej, które tutaj promuję, to: „Potrzebujemy planu, który się domyka”.

Reaktor pojedynczego przejścia pracujący na uranie morskim

Uran w morzach i oceanach, pozyskany co do grama i spożytkowany w reaktorach pojedynczego przejścia, odpowiada następującej wartości energii całkowitej:

$$\frac{4,5 \text{ mld ton na planetę}}{162 \text{ ton uranu na gigawatorok}} = 28 \text{ mln gigawatolat na planetę}$$

W jakim tempie możemy pozyskiwać uran z oceanów? Oceany cyrkulują powoli – połowa wód znajduje się w Pacyfiku, a głębokie wody pacyficzne cyrkulują w kierunku powierzchni przy pomocy oceanicznego pasa transmisyjnego w cyklu, który trwa 1600 lat. Wyobraźmy sobie, że pozyskamy 10% uranu na przestrzeni następujących 1600 lat. To tempo pozyskiwania rzędu 280 000 ton rocznie. W reaktorach pojedynczego przejścia dałoby to moc rzędu

$$2,8 \text{ mln gigawatolat} / 1600 \text{ lat} = 1750 \text{ GW}$$

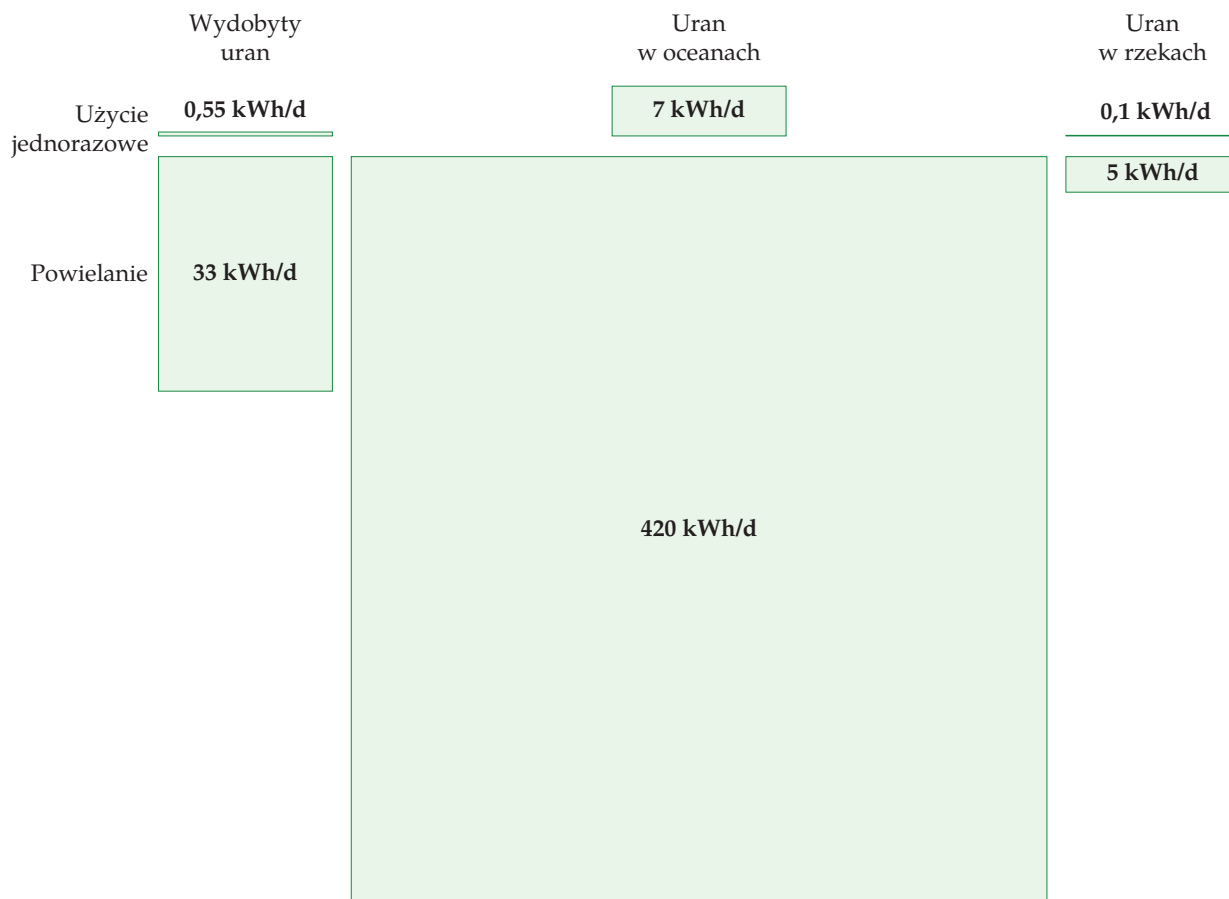
co podzielone między 6 mld ludzi daje **7 kWh na osobę dziennie** (obecnie moc energetyki jądrowej wynosi 369 GW, nasza liczba odpowiada więc 4-krotnemu wzrostowi w stosunku do stanu obecnego). Wnioskuje, że przy pozyskiwaniu



Fot. 24.4. Elektrownia jądrowa Three Mile Island



Fot. 24.5. Zakład Rozwoju Energetyki Jądrowej Dounreay (Nuclear Power Development Establishment), którego podstawowym zadaniem był rozwój technologii reaktorów prędkich powielających.
Fot. John Mullen



uranu z wód morskich i oceanicznych dzisiejsze reaktory pojedynczego przejścia można by uznać za opcję „zrównoważoną” – przy założeniu, że reaktory uranowe pokryją koszt energetyczny procesu pozyskania uranu z oceanu.

Reaktory prędkie powielające pracujące na uranie morskim

Skoro prędkie reaktory są 60-krotnie bardziej efektywne, pozyskanie tej samej ilości uranu z oceanów mogłoby dostarczyć **420 kWh dziennie na osobę**. Nareszcie zrównoważona liczba, która przebija obecne zużycie! Niestety, tylko przy jednoczesnym wsparciu dwóch technologii, z których jedna jest jeszcze w powijakach (pozyskiwanie uranu z oceanów), a druga jest niepopularna (reaktory prędkie powielające).

Uran z rzek

Do uranu z mórz i oceanów dołączmy uran z rzek. Rzeki dostarczają uranu w tempie 32 000 ton rocznie. Gdyby wykorzystać 10% tego potencjału, paliwa wystarczyłoby na 20 GW w reaktorach pojedynczego przejścia albo 1200 GW w prędkich reaktorach powielających. Reaktory prędkie powielające dostarczyłyby **5 kWh na osobę dziennie**.

Wszystkie te liczby podsumowujemy na rys. 24.6.

Rys. 24.6. „Zrównoważona” energia z uranu. Dla porównania, produkcja energii z atomu w skali globu wynosi obecnie 1,2 kWh na osobę dziennie. Produkcja energii jądrowej w Wielkiej Brytanii, która niegdyś wynosiła 4 kWh na osobę dziennie, dzisiaj spada.

A co z kosztami?

Jak zwykle w tej książce, w głównych obliczeniach raczej pomijam rachunek ekonomiczny. Niemniej jednak, z uwagi na to, że potencjał mocy opartej na uranie morskim jest jednym z największych na naszej liście „zrównoważonej” produkcji, warto przeanalizować, czy te wartości znajdują jakiegokolwiek uzasadnienie ekonomiczne.

Badacze japońscy wynaleźli technologię pozyskiwania uranu z wody morskiej kosztującą 100–300 dolarów za kilogram uranu w stosunku do obecnego kosztu około 20 dolarów za kg uranu z rudy. Z uwagi na to, że uran zawiera znacznie więcej energii w jednej tonie niż paliwa tradycyjne, ten pięcio- czy nawet piętnastokrotny wzrost kosztu uranu miałby niewielki wpływ na koszt energii jądrowej – cena energii pozyskanej z atomu zależy przede wszystkim od kosztu wybudowania i likwidacji elektrowni jądrowej, a nie od ceny paliwa. Nawet cena 300 dolarów za kg zwiększyłaby koszt energii jądrowej o zaledwie 1,5 grosza na kWh. Koszt pozyskania uranu można by zmniejszyć, gdyby woda morską znalazła jeszcze inne zastosowanie – na przykład chłodziłaby elektrownię.

Jeszcze nie jesteśmy w domu – czy japońska technologia może być użyta na skalę przemysłową? Jaki jest koszt energetyczny pozyskania uranu z wody? W japońskim eksperymencie trzy klatki wypełnione przyciągającym uran absorbentem ważącym 350 kg zgromadziły „ponad 1 kg tzw. żółtego ciasta (70–90% tlenek uranu U₃O₈), w 240 dni”, co odpowiada 1,6 kg rocznie. Klatki miały powierzchnię przekroju poprzecznego 48 m². By zasilić 1-gigawatową elektrownię jądrową z reaktorem pojedynczego przejścia, potrzebujemy 160 000 kg uranu rocznie, czyli 100 000 razy więcej niż w japońskim eksperymencie. Gdybyśmy po prostu zwiększyli produkcję w japońskiej technologii, która pasywnie pozyskuje uran z morza, moc rzędu 1 GW wymagałaby wykorzystania przestrzeni absorpcyjnej o powierzchni 4,8 km² oraz absorbentu o wadze 350 000 ton – to więcej niż waży stal w samym reaktorze. Spróbujmy nadać tym wielkim liczbom ludzki wymiar – gdyby uran dostarczał, dajmy na to, 22 kWh na osobę dziennie, każdy reaktor o mocy 1 GW obsługiwałby 1 mln ludzi, a na każdego z tych ludzi przypadłoby 0,16 kg uranu rocznie. A zatem obsługa każdej z tych osób wymagałoby 1/10 japońskiej instalacji eksperymentalnej, o wadze 35 kg na osobę i przestrzeni absorpcyjnej 5 m² na osobę. Pomysł budowania takich instalacji pozyskiwania uranu jest skalą zbliżony do pomysłu, by „każdy miał swoje 10 m² paneli słonecznych” albo by „każdy miał swoją jednotonową ciężarówkę oraz specjalne miejsce parkingowe”. Wielkie inwestycje to i owszem, ale nie absurdalnie wielkie.

To były obliczenia dla reaktora pojedynczego przejścia. W przypadku reaktorów prędkich powielających potrzeba 60 razy mniej uranu, waga kolektora uranu na osobę wyniosłaby więc 0,5 kg.

Tor

Tor jest pierwiastkiem radioaktywnym podobnym do uranu. Niegdyś używano go do produkcji koszulek żarowych używanych w lampach gazowych. W skorupie ziemskiej jest go trzy razy więcej niż uranu. Gleby zazwyczaj zawierają około 6 cząstek na milion (ppm) toru, a niektóre minerały – 12% tlenku toru. Woda morska zawiera tego pierwiastka mało, jako że tlenek toru nie rozpuszcza się w wodzie. Tor można spalić całkowicie nawet w prostym reaktorze (inaczej niż w przypadku standardowych reaktorów uranowych, które zużywają

Kraj	Rezerwy (1000 ton)
Turcja	380
Australia	300
Indie	290
Norwegia	170
USA	160
Kanada	100
RPA	35
Brazylia	16
Inne kraje	95
Świat w sumie	1 580

Rys. 24.7. Rozpoznane światowe zasoby toru w monocyte (których wydobycie jest opłacalne).

zaledwie 1% uranu naturalnego). Tor wykorzystywany jest w indyjskich reaktorach nuklearnych. Kiedy wyczerpią się rudy uranu, tor stanie się najprawdopodobniej dominującym paliwem jądrowym.

Reaktory zasilane torem dostarczają 3,6 mld kWh ciepła na tonę toru, co oznacza, że reaktor o mocy 1 GW potrzebuje około 6 ton toru rocznie, przy założeniu, że sprawność generatorów wynosi 40%. Światowe zasoby toru szacowane są na około 6 mln ton – cztery razy więcej niż rozpoznane rezerwy pokazane w tabeli 24.7. Podobnie jak w przypadku uranu, te zasoby mogą być niedoszacowane, z uwagi na niskie obecnie zainteresowanie pracami poszukiwawczymi. Załóżmy, podobnie jak w przypadku uranu, że owe zasoby, podzielone równo przez 6 mld ludzi, mają nam wystarczyć na ponad tysiąc lat – tak „zrównoważona” produkcja energii da nam **4 kWh na osobę dziennie**.

Alternatywny reaktor torowy, tzw. „wzmacniacz energii” lub „układ sterowany akceleratorem”(ADS) według szacunków jego wynalazców – laureata nagrody Nobla Carla Rubbia i jego zespołu – może przekształcić 6 mln ton toru w 15 000 terawatolat energii, czyli 60 kWh na osobę dziennie przez tysiąc lat. Zakładając sprawność przekształcania w energię elektryczną rzędu 40%, zapewniłoby to 24 kWh na osobę dziennie przez tysiąc lat. Co więcej, odpady ze wzmacniacza energii byłyby znacznie mniej radioaktywne. Zdaniem Rubbia i jego współpracowników w swoim czasie opłaci się wydobywać znacznie więcej toru niż obecnie szacowane 6 mln ton. Jeżeli ich prognoza (wydobycie 300 razy większe) jest słuszna, wówczas tor wraz ze wzmacniaczem energii mogłyby zapewnić 120 kWh na osobę dziennie przez najbliższe 60 000 lat.

Wykorzystanie terenu

Wyobraźmy sobie, że Wielka Brytania na serio zaczyna odchodzić od paliw kopalnych i buduje masę nowych reaktorów, nawet jeżeli nie będzie to „zrównoważone”. Czy wszystkie reaktory potrzebne do znacznego uniezależnienia transportu i ciepłownictwa od węgla zmieszczą się w Wielkiej Brytanii? Musimy znać wartość mocy na jednostkę powierzchni elektrowni jądrowej, a ta wynosi około $1\,000\text{ W/m}^2$ (rys. 24.10). Wyobraźmy sobie, że w elektrowni jądrowej produkujemy 22 kWh na osobę dziennie – to w sumie 55 GW (mniej więcej tyle, ile w energetyce jądrowej we Francji), które mogłyby być dostarczone przez 55 elektrowni jądrowych, każda zajmowałaby 1 km^2 . To mniej więcej 0,02% powierzchni kraju. Elektrownie wiatrowe o tej samej mocy średniej potrzebowałyby 500 razy więcej przestrzeni – 10% kraju. Gdyby elektrownie jądrowe sytuować parami wzdłuż wybrzeża (o długości około 3 000 km), wówczas mielibyśmy dwie elektrownie na 100 km. Chociaż wymagana powierzchnia jest raczej skromna, owe elektrownie zajęłyby 2% wybrzeża (2 kilometry z każdego stu).

Założmy, że w Polsce również pozyskujemy z atomu 22 kWh na osobę dziennie. To w sumie 34 GW, dostarczone na przykład przez 34 elektrownie jądrowe o mocy 1 GW, z których każda zajmuje 1 km^2 . To 0,01% powierzchni kraju. Elektrownie wiatrowe o tej samej mocy średniej zajęłyby 7% kraju.

	Wydobyty tor
Reaktor konwencjonalny	4 kWh/d
Reaktor z akceleratorem	24 kWh/d

Rys. 24.8. Potencjał toru

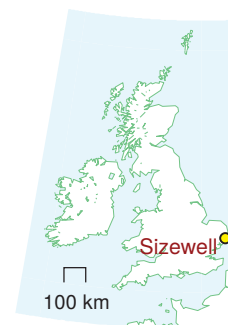
Ekonomia rozbiórki

Jaki jest koszt likwidacji i rozbiórki elektrowni jądrowych? Agencja ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych dysponuje rocznym budżetem 2 mld funtów na następne 25 lat. Przemysł jądrowy sprzedawał każdemu Brytyjczykowi 4 kWh dziennie przez około 25 lat, z czego wynika, że koszt po stronie Agencji ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych wynosi 2,3 p/kWh (10 groszy/kWh). To szczodre subsydium, trzeba jednak powiedzieć, że nie tak szczodre, jak dotacje do energii z morskich farm wiatrowych (ponad 30 groszy/kWh).

Dla Polski, dopiero planującej rozpoczęcie programu jądrowego, istotne są również koszty wybudowania elektrowni jądrowych i dostosowania systemu elektroenergetycznego. Całkowity koszt budowy proponowanych elektrowni może wynieść nawet 110 mld zł. Dodatkowo trzeba będzie przystosować sieci przesyłowe i rozdzielcze (szacowania zazwyczaj dla źródeł wielkiej mocy nakłady te wynoszą około 70% nakładów na same elektrownie).

Koszt wybudowania 1 000 MW mocy szacuje się na 13–21 mld zł. Koszt wybudowania adekwatnej liczby farm wiatrowych jest dzisiaj zbliżony – wynosi około 16 mld zł dla 1400 turbin wiatrowych o mocy 2 MW (dostarczających średnią moc 700 MW, porównywalną do 1000-megawatowego bloku jądrowego).

Przejdźmy do kosztu likwidacji elektrowni. Tutaj warto oprzeć się na doświadczeniach naszego sąsiada – Litwy. Koszt likwidacji i rozbiórki elektrowni jądrowej w Ignalinie na przestrzeni lat 1999–2014 szacuje się na 2,6 mld euro (10,5 mld zł).



Fot. 24.9. Elektrownia jądrowa Sizewell. Blok Sizewell A (na zdjęciu bliżej) o mocy 420 MW, został zamknięty pod koniec 2006 roku. Sizewell B (na zdjęciu z tyłu) ma moc 1,2 GW.
Fot. William Connolley

Bezpieczeństwo

Kwestia bezpieczeństwa energetyki jądrowej na Wyspach wciąż budzi niepokój. W zakładzie przetwarzania wypalonego paliwa jądrowego w technologii THORP w Sellafield, wybudowanym w 1994 kosztem 1,8 mld funtów, doszło do nasilającego się z czasem wycieku z pękniętej rury między sierpniem 2004 a kwietniem 2005 roku. Na przestrzeni tych 8 miesięcy **85 000 litrów** cieczy zawierającej wzbogacony uran wyciekło do systemu rynien, wyposażonego w mechanizmy bezpieczeństwa, które miały błyskawicznie wykrywać każdy wyciek powyżej **15 litrów**. Niestety wyciek nie został zauważony, bowiem obsługa nie dokończyła kontroli działania systemów bezpieczeństwa, a poza tym i tak miała w zwyczaju ignorować alarmy.

System bezpieczeństwa składał się z kilku elementów. Niezależnie od usterki systemu alarmowego rutynowe pomiary bezpieczeństwa cieczy w systemie rynien powinny wykryć nienormalną obecność uranu w ciągu miesiąca od momentu powstania wycieku. Niestety operatorzy często zarzucali rutynowe pomiary, bo mieli co innego na głowie, a kiedy już wykonali pomiar i wykryli odbiegającą od normy obecność uranu w rynnie (28 sierpnia 2004, 26 listopada 2004 oraz 24 lutego 2005 roku), nie podjęto żadnych działań.

Do kwietnia 2005 roku wyciekły **22 tony** uranu, a mimo to nie zadziałał żaden z systemów wykrywania wycieków. Wyciek w końcu wykryto w *księgowości* – grypiopórki policzyły, że zakład opuszcza 10% mniej uranu niż dostarczył do przetworzenia klient! Dzięki Bogu, że prywatnej firmie przyświeca chęć



Rys. 24.10. Sizewell zajmuje mniej niż 1 km². Niebieska sieć ma długość 1 km. © Crown copyright; Ordnance Survey

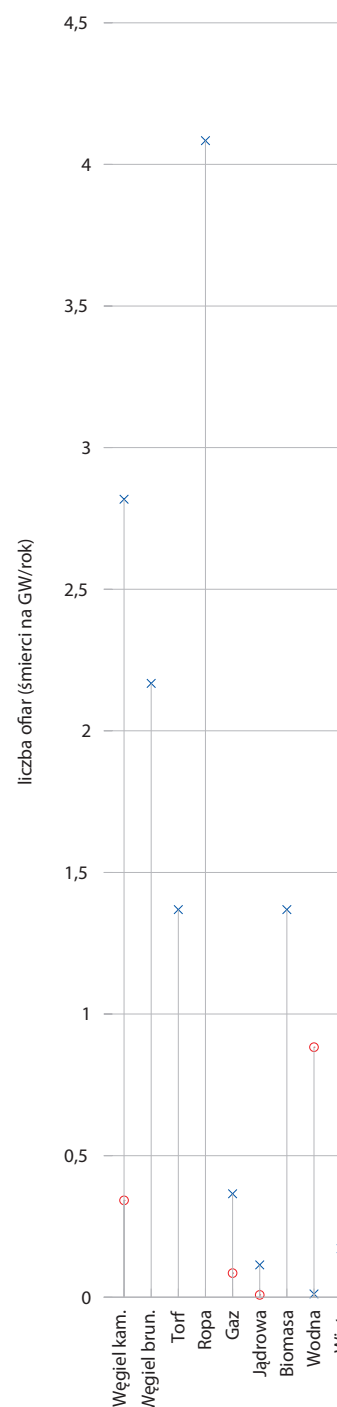
zysku! Słowa krytyki ze strony Głównego Inspektora Instalacji Nuklearnych były miażdżące: „Wydaje się, że obsługa zakładu pozwalała, by instrumenty stale działały w trybie alarmowym, zamiast reagować na alarmy i usuwać sygnalizowane usterki”.

Skoro już pozwalamy prywatnym firmom budować nowe reaktory, jak zapewnić respektowanie wysokich standardów bezpieczeństwa? Nie mam pojęcia.

Mimo wszystko nie powinniśmy mdleć ze strachu na myśl o atomie. Energetyka jądrowa nie jest niewyobrażalnie niebezpieczna. Jest po prostu niebezpieczna, tak jak niebezpieczne są kopalnie węgla, magazyny paliwa, spalanie paliw kopalnych i turbiny wiatrowe. Nawet jeżeli nie mamy gwarancji, że wypadki w elektrowniach jądrowych już się nigdy nie zdarzą, ocenę atomu warto oprzeć na obiektywnym porównaniu z innymi źródłami energii. Weźmy elektrownie węglowe, które narażają społeczeństwo na promieniowanie radioaktywne, ponieważ pył węglowy zazwyczaj zawiera uran. W istocie, według opracowania opublikowanego w piśmie „Science”, Amerykanie żyjący poblizu elektrowni węglowych są narażeni na wyższe dawki promieniowania niż ci żyjący w poblizu elektrowni jądrowych.

W celu porównania zagrożeń związanych z różnymi źródłami energii potrzebujemy nowej jednostki miary. Wybieram zgon na gigawatorok. Spróbuję teraz wyjaśnić, co mam na myśli, mówiąc, że dane źródło energii ma wskaźnik śmiertelności w wysokości 1 zgon na gigawatorok. 1 gigawatorok to energia wyprodukowana przez elektrownię o mocy 1 GW, pracującą z pełną mocą przez 1 rok. Zużycie energii na Wyspach wynosi około 45 GW lub też 45 gigawatolat rocznie. Gdybyśmy więc pozyskiwali energię ze źródeł o wskaźniku śmiertelności 1 zgon na gigawatorok, oznaczałoby to, że system podaży energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii zabija rocznie 45 osób. Dla porównania – co roku na brytyjskich drogach ginie 3000 osób. Jeżeli więc *nie* prowadzisz kampanii na rzecz likwidacji dróg, mógłbyś dojść do wniosku, że 1 zgon na gigawatorok, jakkolwiek smutny to fakt, jest całkiem do przyjęcia. Oczywiście wolelibyśmy 0,1 zgonu na gigawatorok, niestety błyskawicznie zdajemy sobie sprawę, że produkcja energii z paliw kopalnych musi wiązać się z ludzkim kosztem wyższym niż 0,1 zgonu na gigawatorok. Weźmy tylko wypadki na platformach wiertniczych, helikoptery zaginione na morzu, pożary rurociągów, wybuchy w rafineriach i wypadki w kopalniach węgla. W Wielkiej Brytanii co roku wydarzają się dziesiątki wypadków w łańcuchu produkcji energii z paliw kopalnych.

Przeanalizujemy rzeczywiste wskaźniki śmiertelności całego wachlarza źródeł energii elektrycznej. Różnice między poszczególnymi krajami są znaczne. Na przykład w Chinach wskaźnik śmiertelności w kopalniach węgla jest 50-krotnie wyższy niż w większości krajów. Rys. 24.11 prezentuje wyniki opracowania Paul Scherrer Institute oraz projektu Unii Europejskiej pod nazwą ExternE, gdzie dokonano kompleksowych szacunków wszystkich skutków produkcji energii. Według obliczeń Unii Europejskiej węgiel kamienny i brunatny oraz ropa mają najwyższe wskaźniki śmiertelności, następną jest energia z torfu i biomasy, ze wskaźnikiem powyżej 1 zgonu na gigawatorok. Najlepiej wypadają atom i wiatr, ze wskaźnikiem poniżej 0,2 zgonu na gigawatorok. W opracowaniu Unii Europejskiej najlepiej wypada hydroenergetyka, która jest jednak gorzej pozycjonowana przez Paul Scherrer Institute, z uwagi na inny dobór badanych krajów.



Rys. 24.11. Wskaźniki śmiertelności dla poszczególnych technologii produkcji prądu.

X: szacunki Unii Europejskiej w ramach projektu ExternE.
O: Paul Scherrer Institute

Energia jądrowa bezpieczna z natury

W wyniku presji zaniepokojonej opinii publicznej inżynierowie zaprojektowali szereg reaktorów o podwyższonych parametrach bezpieczeństwa. Elektrownia w technologii GT-MHR jest podobno bezpieczna z natury, co więcej, ma większą sprawność przekształcania ciepła w energię elektryczną niż konwencjonalne elektrownie jądrowe [gt-mhr.ga.com].

Mity i nieporozumienia

Powszechnie wskazuje się na dwie wady energetyki jądrowej – koszty budowy oraz odpady. Przeanalizujemy niektóre aspekty tych kwestii.

Wybudowanie elektrowni jądrowej wymaga ogromnych ilości betonu i stali, co wiąże się z ogromną emisją CO₂.

Stal i beton użyte do budowy elektrowni jądrowej o mocy 1 GW mają ślad węglowy rzędu 300 000 t CO₂.

Rozkładając tę „ogromną” ilość na 25-letni okres funkcjonowania reaktora, otrzymamy intensywność emisji CO₂ w g CO₂ na kWh(e):

$$\begin{aligned} \text{intensywność emisji CO}_2 &= \frac{300 \times 10^9 \text{ g}}{10^6 \text{ kWh} \times 220\,000 \text{ h}} \\ \text{związana z budową elektrowni} &= 1,4 \text{ g/kWh(e)} \end{aligned}$$

To znacznie mniej niż w przypadku elektrowni gazowej (najefektywniejszej z elektrowni na paliwa kopalne) o intensywności emisji 400 g CO₂/kWh(e). Międzypaństwowy Panel ds. Zmian Klimatu (IPCC) szacuje, że intensywność emisji CO₂ w całym cyklu życia elektrowni jądrowej (od budowy, poprzez przetwarzanie paliwa aż po likwidację i rozbiórkę) wynosi mniej niż 40 g CO₂/kWh(e) (Sims i in., 2007).

Nie chcę być źle zrozumiany – nie jestem pronuklearny. Jestem prorachunkowy.

Czy odpady z reaktorów jądrowych to wielki problem?

Jak stwierdziliśmy na początku tego rozdziału, ilość odpadów z reaktora jest stosunkowo niewielka. Pyły z elektrowni węglowej wyprodukowane w ciągu roku ważyłyby 4 mln ton (co odpowiada objętości mniej więcej 40 litrów na osobę na rok), natomiast odpady jądrowe z dziesięciu brytyjskich elektrowni jądrowych mają objętość zaledwie 0,84 litrów na osobę rocznie – czyli butelki wina na osobę rocznie (rys. 24.13).

Większość tych odpadów ma niski poziom radioaktywności. 7% to odpady średnioaktywne, a zaledwie 3% (25 ml rocznie) – wysokoaktywne.

Odpady wysokoaktywne to rzeczywiście paskudztwo. Zazwyczaj przez pierwsze 40 lat przetrzymywane są w reaktorze, gdzie są składowane w basenach z wodą i ochładzane. Po tych 40 latach poziom radioaktywności spada tysiąckrotnie. Potem spada nadal – jeżeli przetworzymy odpady, oddzielając uran i pluton do ponownego użycia w paliwie jądrowym, po 1000 lat te niegdyś wysokoaktywne odpady osiągną poziom radioaktywności charakterystyczny dla rudy uranu. Dlatego inżynierowie specjalizujący się w składowaniu odpadów powinni tworzyć plany zabezpieczania odpadów wysokoaktywnych na jakieś tysiąc lat.



Fot. 24.12. Elektrownia w Czarnobylu (u góry) oraz opuszczone miasto Prypieć, powstałe na potrzeby pracowników elektrowni (na dole).
Fot. Nik Stanbridge

Czy to trudne? Tysiąc lat to niewątpliwie bardzo długo w perspektywie trwania rządów i krajów! To jednak niewielkie ilości i, jak sądzę, niewielkie zmartwienie w porównaniu do wszystkich innych odpadów, które zrzucamy na barki przyszłych pokoleń. 25 ml odpadów jądrowych rocznie dałoby mniej niż 2 litry na przestrzeni życia pojedynczego Brytyjczyka. Nawet jeżeli pomnożymy to przez 60 mln ludzi, da się tym zarządzać – to 105 000 m³. Odpowiada to objętości 35 stadionów olimpijskich. Gdyby tak ułożyć te odpady w metrowej warstwie, to zajęłyby 0,1 km².

Istnieje już wiele miejsc, do których nie mamy dostępu. Nie wolno mi wchodzić do Twojego ogrodu. Ty nie powinieneś wchodzić do mojego. Żadne z nas nie będzie mile widziane w letniej rezydencji rodziny królewskiej w Balmoral. Ostrzeżenia „wstęp wzbroniony” są wszędzie. W ten czy inny sposób wyłączaliśmy z użytku Downing Street, lotnisko Heathrow, tereny wojskowe, opuszczone kopalnie. Czy tak trudno wyobrazić sobie, że wyłączamy z użytku na tysiąc lat jeszcze jeden kawałek gruntu, wielkości 1 km², zapewne gdzieś głęboko pod ziemią?

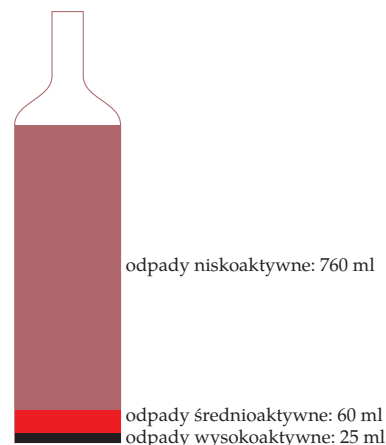
Porównajmy owe 25 ml wysokoaktywnych odpadów na osobę rocznie z innymi, tradycyjnymi odpadami, które obecnie produkujemy – odpady komunalne: 517 kg na osobę rocznie, odpady niebezpieczne: 83 kg na osobę rocznie.

Czasami porównuje się odpady jądrowe, które planujemy wygenerować, z już wygenerowanymi w istniejących reaktorach. Oto liczby dla Wielkiej Brytanii. Prognozowana objętość odpadów o wyższej aktywności do roku 2120, pozostałych po likwidacji istniejących bloków jądrowych, wyniesie 478 000 m³. Z tego 2% (około 10 000 m³) stanowić będą odpady wysokoaktywne (1290 m³) i zużyte paliwo (8150 m³), razem zawierające 92% materiału radioaktywnego. Budowa 10 nowych reaktorów jądrowych (10 GW) oznaczałaby dodatkowe 31 900 m³ zużytego paliwa, co zmieściłoby się w 10 basenach pływackich.

W Wielkiej Brytanii pracują obecnie reaktory o mocy 11 000 MW. W Polsce planuje się budowę dwóch elektrowni jądrowych o mocy 3000 MW każda. Jeśli plany te zostaną zrealizowane, na każdego Polaka przypadnie prawie tyle samo odpadów radioaktywnych, co na Brytyjczyka.

Jeżeli zaczniemy produkować niesamowite ilości energii z rozszczepienia i syntezy, czy nie pogłębimy problemu zmian klimatu – z uwagi na dodatkową energię, która zostanie uwolniona do środowiska?

To pytanie to kaszka z mlekiem. Całkiem łatwo na nie odpowiedzieć, jako że wszystko w tej książce wyraziliśmy za pomocą jednego zestawu jednostek. Najpierw przywołajmy główne liczby dotyczące globalnego bilansu energetycznego ze str. 28 – średnia moc promieniowania słonecznego zaabsorbowanego przez atmosferę, lądy i oceany wynosi 238 W/m²; podwojenie stężenia gazów cieplarnianych zwiększyłoby absorpcję ciepła netto o 4 W/m². Uważa się, że owo 1,7-procentowe zwiększenie pochłaniania ciepła to zła wiadomość dla klimatu. Moc promieniowania Słońca w 11-letnim cyklu słonecznym zmienia się w zakresie 0,25 W/m². Załóżmy teraz, że za 100 lat będzie nas 10 mld i że każdy cieszyć się będzie europejskim standardem życia, zużywając dziennie 125 kWh energii pozyskanej ze źródeł kopalnych, energetyki jądrowej lub geotermii. Na osobę przypadłoby 51 000 m² powierzchni Ziemi. Dzieląc moc/os. przez powierzchnię/os., dowiadujemy się, że wartość tej dodatkowej energii



Rys. 24.13. Brytyjskie odpady jądrowe, w przeliczeniu na osobę rocznie, mają objętość niewiele większą niż butelka wina.

wyprodukowanej przez człowieka wyniesie $0,1 \text{ W/m}^2$. To jedna czterdziesta tych 4 W/m^2 , które tak nas martwią, i nieco mniej niż zmienność słoneczna rzędu $0,25 \text{ W/m}^2$. Tak więc energia wyprodukowana przez człowieka *może w przyszłości* przyczynić się do globalnych zmian klimatu, jednak w bardzo niewielkim stopniu.

Mówi się, że budowa elektrowni jądrowych trwa zbyt długo, by faktycznie robiło to różnicę.

Problemy związane z budową elektrowni jądrowych są wyolbrzymiane za pomocą pewnej mylącej techniki prezentowania danych, którą nazwałem „magicznym polem gry”. Zgodnie z tą techniką, pozornie porównuje się dwie sprawy, ale gdzieś po drodze podstawa porównania ulega zmianie. Redaktor działu *Środowisko* dziennika „Guardian”, podsumowując wyniki raportu *Oxford Research Group*, napisał: „By energetyka jądrowa rzeczywiście przyczyniła się do redukcji globalnych emisji CO_2 na przestrzeni życia kolejnych dwóch pokoleń, powinno powstać prawie 3000 nowych reaktorów, a inaczej – jeden tygodniowo przez następne 60 lat. Cywilny program atomowy tej skali, obejmujący budowę i dostawy, to marzenie ściętej głowy, rzecz niewykonalna. Najwyższe zanotowane do tej pory tempo to 3,4 nowych reaktorów rocznie”. Rzeczywiście, 3000 jest jakby większe niż 3,4! Dzięki technice „magicznego pola gry” mamy tutaj przeskok i na skali **czasowej**, i na skali **przestrzennej**. Podczas gdy pierwsza liczba (3000 nowych reaktorów **na przestrzeni 60 lat**) to zapotrzebowanie w skali **całej planety**, druga liczba (3,4 nowych reaktorów **rocznie**) to maksymalne tempo budowy reaktorów w **pojedynczym kraju** (Francji)!

Uczciwiej byłoby pozostać przy porównaniu w skali planety. We Francji znajduje się 59 z 429 reaktorów działających na świecie, można więc założyć, że maksymalne tempo budowy reaktorów w skali globu to dziesięciokrotność wyniku francuskiego, to znaczy 34 nowe reaktory rocznie. Natomiast wymagane tempo (3000 nowych reaktorów na przestrzeni 60 lat) to 50 nowych reaktorów rocznie. Twierdzenie, że „Cywilny program atomowy tej skali, obejmujący budowę i dostawy, to marzenie ściętej głowy” to duża przesada. Tak, konieczny jest wysoki przyrost, ale tego samego rzędu co już obserwowany w przeszłości.

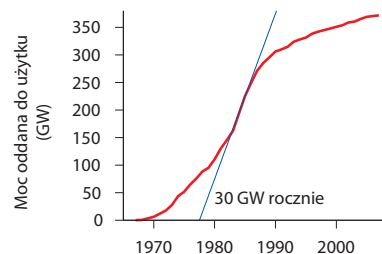
Czy sensownie zakładam, że maksymalne tempo rozwoju atomu na świecie wyniosło 34 nowe reaktory rocznie? Spójrzmy na dane. Rys. 24.14 pokazuje tylko te elektrownie jądrowe, które działały w roku 2007. Tempo rozwoju energetyki jądrowej było najwyższe w 1984 roku i wyniosło (chwila napięcia...) około 30 GW rocznie – około 30 reaktorów o mocy 1 GW. Jesteśmy w domu!

A co z syntezą jądrową?

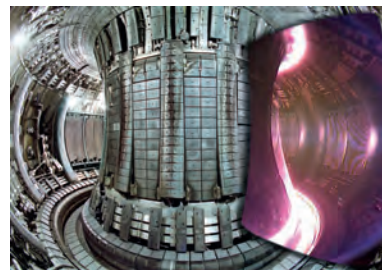
Mówimy, że chcemy nałapać słońca do pudełka. To piękna idea. Sęk w tym, że nie wiemy, jak zrobić to pudełko.

Sébastien Balibar, dyrektor ds. badań, CNRS

Synteza jądrowa jest w fazie spekulacji i eksperymentu. Nie możemy radośnie zakładać, że w zakresie syntezy nastąpi przełom, ale chętnie ocenię, ile energii dostarczy synteza, o ile ów przełom nastąpi.



Rys. 24.14. Całkowity przyrost mocy na świecie w elektrowniach jądrowych wybudowanych od roku 1967 i wciąż funkcjonujących. Tempo rozwoju energetyki jądrowej było najwyższe w 1984 roku i wyniosło 30 GW rocznie.



Fot. 24.15. Wnętrze eksperymentalnego reaktora termojądrowego. Na zdjęcie komory próżniowej JET nałożono zdjęcie plazmy, zrobione zwykłą kamerą telewizyjną.

Fot. EFDA-JET

Za najbardziej obiecujące uważa się dwie reakcje syntezy:

reakcja D-T, w której deuter łączy się z trytem, tworząc hel, oraz

reakcja D-D, w której deuter łączy się z deuterem.

Deuter, naturalnie występujący ciężki izotop wodoru, można pozyskać z wody morskiej. Tryt – jeszcze cięższy izotop wodoru, nie występuje naturalnie w dużych ilościach (ponieważ ma zaledwie 12-letni okres półtrwania), ale można go pozyskać z litu.

ITER to międzynarodowy projekt mający na celu opracowanie stabilnie działającego reaktora termojądrowego. Prototyp ITER będzie przeprowadzał reakcje D-T. Preferuje się D-T, bo wiąże się z uwolnieniem większej ilości energii, a poza tym do działania potrzebuje „zaledwie” temperatury rzędu 100 mln °C, podczas gdy reakcja D-D wymaga 300 mln °C (temperatura w środku Słońca wynosi 15 mln °C).

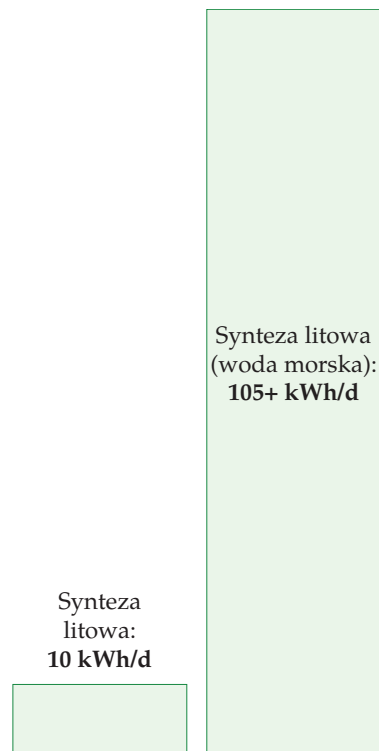
Oddajmy się fantazjom i załóżmy, że projekt ITER odniesie sukces. Ile zrównoważonej energii może nam zapewnić? Elektrownie wykorzystujące reakcję D-T, zasilane litem, znajdą się w kłopotcie, kiedy skończy się lit. Zanim to nastąpi, być może pojawią się inne wytwory futurologii – reaktory termojądrowe zasilane samym deuterem.

Owe futurystyczne źródła energii nazwę syntezą litu i syntezą deuteru, w oparciu o główne paliwo, które trzeba będzie zapewnić. Oszacujmy, ile energii może dostarczyć jedno i drugie źródło.

Synteza litu

Światowe rezerwy litu szacowane są na 9,5 mln ton w złożach rud. Gdyby całość tych rezerw spożytkować na syntezę na przestrzeni tysiąc lat, zapewniłoby to **10 kWh na osobę dziennie**.

Dodatkowo, lit można znaleźć w wodzie morskiej, gdzie osiąga stężenie 0,17 cząstek na milion (ppm). Szacuje się, że pozyskanie litu z wody morskiej w ilości 100 mln kg/rok wymaga energii rzędu 2,5 kWh(e) na gram litu. Jeżeli reaktory



Rys. 24.16. Synteza oparta na litie, zużywanym w sposób „zrównoważony”, mogłaby zaspokoić obecny poziom konsumpcji energii. Lit kopalny zapewniłby 10 kWh na osobę dziennie przez tysiąc lat, lit morski dostarczyłby 105 kWh na osobę dziennie przez ponad milion lat.

Rys. 24.17. Jeżeli uda się przeprowadzić syntezę opartą na deuterze, będzie to obfite źródło energii przez miliony lat. Skala tego diagramu została zmniejszona dziesięciokrotnie w pionie i w poziomie, by potencjał tej syntezy zmieścił się na stronie. Dla porównania, w tej samej skali prezentujemy czerwony i zielony słupek z rys. 18.1.

termojądrowe z grama litu wyprodukują 2300 kWh(e), da to 105 kWh na osobę dziennie (przy populacji wielkości 6 mld). Przy takim tempie eksploatacji litu w oceanach wystarczy na ponad milion lat.

Synteza deuteru

O ile naukowcom i inżynierom uda się przeprowadzić reakcję D-D, mamy kilka bardzo dobrych wiadomości. W każdej tonie wody jest 33 g deuteru, a energia uwolniona z syntezy zaledwie jednego grama deuteru to niewyobrażalnie 100 000 kWh. Zważywszy, że masa oceanu wynosi 230 mln ton na osobę, deuter każdemu powinien zapewnić 30 000 kWh energii dziennie (to ponad stukrotność zużycia energii przeciętnego Amerykanina). I to w populacji dziesięciokrotnie większej niż obecna. I to przez milion lat (rys. 24.17).

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

171 **Rys. 24.1.** – Źródło: Światowe Towarzystwo Nuklearne (World Nuclear Association) [5qntkb]. Moc całkowita działających obecnie reaktorów wynosi 372 GW(e), co wiąże się ze zużyciem 65 000 ton uranu rocznie. Stany Zjednoczone mają 99 GW, Francja – 63,5 GW, Japonia – 47,6 GW, Rosja – 22 GW, Niemcy – 20 GW, Korea Pd. – 17,5 GW, Ukraina – 13 GW, Kanada – 12,6 GW, a Wielka Brytania – 11 GW. W 2007 roku wszystkie reaktory na świecie wygenerowały 2608 TWh energii elektrycznej, co daje średnią dzienną produkcję 300 GW lub też 1,2 kWh na osobę dziennie.

172 **Elektrownia jądrowa o mocy 1 GW, pracująca w cyklu paliwowym pojedynczego przejścia, zużywa 162 tony uranu rocznie.** Źródło: www.world-nuclear.org/info/inf03.html. Działanie elektrowni o mocy 1 GWe o sprawności cieplnej 33%, pracującej ze współczynnikiem obciążenia 83%, wiąże się z następującym „ślądem uranowym” (wykorzystaniem uranu): przy wydobyciu – 16 600 ton 1-procentowej rudy uranu; po rozdrobnieniu rudy – 191 t tlenku uranu (zawierające 162 t naturalnego uranu); po wzbogaceniu i wyprodukowaniu paliwa – 22,4 t tlenku uranu (zawierające 20 t uranu wzbogaconego).

173 **Reaktory prędkie powielające produkują mniej więcej 60 razy więcej energii z uranu.**

– Źródło: www.world-nuclear.org/info/inf98.html. Obecnie liderem w rozwoju reaktorów prędkich powielających jest Japonia.

– **Oszacowano, że zasoby rud o niskiej zawartości uranu są ponad tysiąckrotnie większe niż 27 mln ton założonych tutaj przed chwilą.**

Deffeyes i MacGregor (1980) szacują zasoby uranu w stężeniach 30 ppm lub większych na 3×10^{10} ton (średnia zawartość uranu w rudach przetwarzanych w RPA w 1985 oraz 1990 roku wynosiła 150 ppm (fosforany zwykle zawierają 100 ppm uranu).

A oto, jak na temat rezerw uranu wypowiedziała się World Nuclear Association w lipcu 2008 roku:

„Raz na jakiś czas pojawiają się wątpliwości, czy rozpoznane zasoby uranu wystarczą do zaspokojenia stale rosnącego zapotrzebowania. Mylny paradygmat granic rozwoju (...) nie bierze pod uwagę, jak niewiele wiemy o tym, co rzeczywiście znajduje się w skorupie ziemskiej. Nasza wiedza z zakresu geologii pozwala nam sądzić, że rozpoznane zasoby metali są zaledwie odsetkiem tego, co się tam znajduje”.

„Szacunki odnośnie możliwych do wydobycia zasobów uranu i uranu, który opłaci się pozyskać z rud (...) zależą od intensywności działań poszukiwawczych w przeszłości i zasadniczo opierają się na tym, co wiadomo, a nie na tym, co rzeczywiście występuje w skorupie ziemskiej”.

„Światowe możliwe do wydobycia zasoby uranu (5,5 Mt) (...) wystarczą na ponad 80 lat. To dłużej niż w przypadku większości minerałów. Zgodnie z obecną wiedzą geologiczną dalsze prace poszukiwawcze oraz wyższe ceny uranu z pewnością przyczynią się do odkrycia kolejnych złóż, kiedy obecne zaczną się wyczerpywać”.

„Racjonalni gracze zainwestują w poszukiwania tych nowych rezerw tylko jeżeli będą mieli dużą szansę zwrotu z inwestycji, co zazwyczaj wymaga pozytywnych bodźców cenowych, wywołanych niedostateczną podażą. Jeżeli tylko system gospodarczy funkcjonuje prawidłowo i maksymalizuje efektywność wykorzystania kapitału, rezerwy żadnego minerału, w żadnym momencie, nie powinny wystarczać na dłużej niż na kilkadziesiąt lat”.

[Eksploracja kosztuje; na przykład poszukiwania uranu generują koszt rzędu 1–1,50 dolarów na kg uranu (3,4 dolara/MJ), co stanowi 2% aktualnej ceny uranu, wynoszącej 78 dolarów/kg. Dla kontrastu, koszty poszukiwania ropy wyniosły średnio 6 dolarów za baryłkę (1050 dolarów/MJ) (12% ceny aktualnej), co najmniej na przestrzeni ostatnich 30 lat.]

„W przeciwieństwie do wielu metali eksploatowanych od wieków, dopiero co zaczęliśmy wykorzystywać uran. Do tej pory miał miejsce tylko jeden cykl eksploatacji – odkrycie – produkcja, stymulowany w dużej mierze przez wysokie ceny uranu pod koniec lat 70.”

„Za wcześniej, by mówić o długofalowych brakach uranu, kiedy cały przemysł jądrowy jest tak młody, że wymagał zaledwie jednego cyklu pozyskania uranu”. www.world-nuclear.org/info/inf75.html

Więcej w: Herring (2004); Price i Blaise (2002); Cohen (1983).

IPCC, cytując OECD prognozuje, że przy tempie wykorzystania z roku 2004 konwencjonalne zasoby uranu i uran w fosforanach wystarczy na 670 lat w reaktorach pojedynczego przejścia, na 20 000 lat w reaktorach prędkich powielających z odzyskiem plutonu oraz na 160 000 lat w reaktorach prędkich powielających odzyskujących uran i wszystkie aktywnowce (Sims i in., 2007).

- 175 **Badacze japońscy opracowali technologię pozyskiwania uranu z wody morskiej.** Oszacowanie kosztu na poziomie 100 dolarów za kg pochodzi z prac: Seko i in. (2003) oraz [y3wnzr]; szacunki na poziomie 300 dolarów za kg pochodzą z Agencji Energetyki Jądrowej przy OECD (Nuclear Energy Agency) (2006, str. 130).

Pozyskiwanie uranu z wody morskiej polega na zanurzeniu na kilka miesięcy włókniny w oceanie; płótno zrobione jest z włókien polimerowych, którym poprzez naświetlenie przed zanurzeniem nadaje się lepkość. Lepkie włókna zbierają uran w ilości 2 g na kilogram włókna.

- **Koszt pozyskania uranu można by zmniejszyć, gdyby woda morska znalazła jeszcze inne zastosowanie – na przykład chłodziłaby elektrownię.** Pomysł zasilanej energią jądrową wyspy produkującej wodór przedstawił C. Marchetti. Reaktory powielające chłodzone wodą morską pozyskiwałyby uran z wody chłodniczej w ilości 600 t uranu na 500 000 000 000 t wody.
- **Światowe zasoby toru w monocyte.** Źródło: US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, styczeń 1999. [y7tkm]. Cytowane w UIC Nuclear Issues Briefing Paper #67, listopad 2004.

„Inne rudy o wyższej zawartości toru, takie jak toryt, mogłyby stać się jego źródłem, jeżeli popyt znacząco wzrośnie”. [yju4a4] nie uwzględni danych dla Turcji, które można znaleźć tutaj: [yeyr7z].

- 176 **Reaktory zasilane torem dostarczają $3,6 \times 10^9$ kWh (3,6 mld kWh) ciepła na tonę toru.**

Źródło: www.world-nuclear.org/info/inf62.html.

Jest pole do usprawnień w dziedzinie reaktorów na tor, więc ta wartość może w przyszłości znacząco wzrosnąć.

- **Alternatywny reaktor torowy, tzw. „wzmacniacz energii”.** Więcej w: Rubbia i in. (1995), web.ift.uib.no/~lillestol/EnergyWeb/EA.html [32t5zt], [2qr3yr], [ynk54y].

- 177 **Przemysł jądrowy sprzedawał każdemu Brytyjczykowi 4 kWh dziennie przez około 25 lat.** Całkowita produkcja energii do roku 2006 wyniosła około 2200 TWh. – Źródło: *Przegląd Energetyczny Stephena Saltera (Stephen Salter's Energy Review)* na zamówienie Szkockiej Partii Narodowej.

- Agencja ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych dysponuje rocznym budżetem 2 mld funtów. Tak się składa, że ten budżet likwidacyjny zdaje się rosnąć i rosnąć. Ostatnie szacunki co do całkowitego kosztu likwidacji i rozbiórki mówią o 73 mld funtów, news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm. Z drugiej strony jednak budżet ten jest przeznaczony nie tylko na sprzątanie po cywilnych elektrowniach jądrowych, ale głównie na zakład produkcji bomb atomowych w Sellafield, czyli sprzątanie po wojsku.

- **Koszt po stronie Agencji ds. Likwidacji Obiektów Jądrowych wynosi 2,3 p/kWh (10 groszy/kWh).** W rzeczywistości owe 2 mld mają służyć likwidacji nie tylko cywilnych elektrowni jądrowych, ale też wojskowych zakładów wytwarzania broni jądrowej w Sellafield. Lwia część tej sumy służy więc sprzątanu po wojsku, a nie po produkcji energii. Oznacza to, że podany tu koszt likwidacji starych elektrowni jądrowych za 1 kWh jest przeszacowany.

- **koszty postawienia elektrowni jądrowych i dostosowania polskiego systemu elektroenergetycznego.** [3xz2675] i [2vj2je]
- **Koszt likwidacji i rozbiórki elektrowni jądrowej w Ignalinie.** [3xaph2c].

- 178 **Słowa krytyki ze strony Głównego Inspektora Instalacji Nuklearnych były miażdżące...** (Weightman, 2007).

- **Energetyka jądrowa nie jest niewyobraźalnie niebezpieczna. Jest po prostu niebezpieczna.** Więcej na temat zagrożeń w: Kammen i Hassenzahl (1999).

- **Amerykanie żyjący w pobliżu elektrowni węglowych są narażeni na wyższe dawki promieniowania niż ci żyjący w pobliżu elektrowni jądrowych.** – Źródło: McBride i in. (1978). Zawartość uranu i toru w węglu wynosi odpowiednio około 1 ppm i 2 ppm. Więcej na stronach: gabe.web.psi.ch/research/ra/ra_res.html, www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Companion/E20.12.pdf.xpdf.

- **Atom i wiatr mają najniższe wskaźniki śmiertelności.** Więcej w: Jones (1984). Te wskaźniki pochodzą z opracowań prognozujących przyszłość. Spójrzmy jeszcze w przeszłość.

W Wielkiej Brytanii energetyka jądrowa wygenerowała 200 gigawatolat energii elektrycznej, przy czym doszło do jednego nieszczęśliwego wypadku – w 1978 roku zginął pracownik elektrowni jądrowej w Chapelcross [4f2ekz]. 1 zgon na 200 gigawatolat to imponująco niski wskaźnik w porównaniu z przemysłem paliw kopalnych.

W skali świata historyczne wskaźniki zgonów związanych z atomem są trudne do oszacowania. Nikt nie zginął w wyniku stopienia rdzenia reaktora w Three Mile Island, a związany z tym wyciek od czasu wypadku być może uśmiercił jedną osobę. W Czarnobylu bezpośrednio w wyniku katastrofy zginęły 62 osoby, a 15 okolicznych mieszkańców zmarło na raka tarczycy. Szacuje się, że na nowotwory związane z awarią zmarło 4000 osób w okolicach Czarnobyla i kolejne 5 000 na całym świecie (spośród 7 mln narażonych na opad radioaktywny) (Williams i Baverstock, 2006). Trudno jednak wskazać, które to zgony, jako że nowotwory (w tym wiele spowodowanych promieniowaniem naturalnym) i tak odpowiadają za 25% zgonów w Europie.

By policzyć globalny wskaźnik śmiertelności dla energetyki jądrowej, możemy podzielić szacowaną liczbę ofiar katastrofy w: Czarnobylu (9000 zgonów) przez skumulowaną produkcję energii z atomu w latach 1969–1996, czyli 3685 gigawatolat. Daje to wskaźnik w wysokości 2,4 zgonów na gigawatorok.

Odnosnie zgonów przypisywanych energetyce wiatrowej Caithness Windfarm Information Forum (www.caithnesswindfarms.co.uk) wymienia 49 nieszczęśliwych wypadków w skali globu w latach 1970 – 2007 (35 pracowników przemysłu energetyki wiatrowej oraz 14 osób postronnych). W 2007 roku Paul Gipe wymieniał 34 wypadki śmiertelne w skali globu [www.wind-works.org/articles/BreathLife.html]. W połowie lat 90. wskaźnik śmiertelności związany z energetyką wiatrową wynosił 3,5 zgonu na gigawatorok. Według Paula Gipe’a do końca roku 2000 globalny wskaźnik śmiertelności dla energii z wiatru spadł do 1,3 zgonów na gigawatorok.

A więc notowane do tej pory wskaźniki śmiertelności zarówno energii nuklearnej, jak i wiatrowej są wyższe niż wskazują prognozy na przyszłość.

- 179 **Stal i beton użyte do budowy elektrowni jądrowej o mocy 1 GW mają ślad węglowy rzędu 300 000 t CO₂.** Elektrownia nuklearna o mocy 1 GW zbudowana jest z 520 000 m³ betonu (1,2 mln ton) i 67 000 ton stali [2k8y7o]. Założywszy, że na 1 m³ betonu przypada 240 kg CO₂ [3pvf4], ślad węglowy betonu wynosi jakieś 100 000 t CO₂. Wg Blue Scope Steel [4r7zpg] ślad węglowy stali wynosi około 2,5 tony CO₂ na tonę stali, stąd też 67 000 ton stali ma ślad węglowy rzędu 170 000 ton CO₂.
- 180 **Dyskusja dotycząca odpadów jądrowych.** Źródła: www.world-nuclear.org/info/inf04.html, [49hcnw], [3kduo7].
Porównanie już wygenerowanych i potencjalnych odpadów jądrowych pochodzi z Komisji ds. Zarządzania Odpadami Radioaktywnymi – Committee on Radioactive Waste Management (2006).
- **W Polsce planuje się budowę dwóch elektrowni jądrowych o mocy 3000 MW każda.** [2uf4v9e].
 - 182 **Światowe rezerwy litu szacowane są na 9,5 mln ton.** Największe zasoby litu znajdują się w Boliwii (56,6%), Chile (31,4%) i Stanach Zjednoczonych (4,3%), www.dnpm.gov.br
 - **Lit można znaleźć w wodzie morskiej...** Bada się szereg technologii pozyskiwania litu z wody (Steinberg i Dang, 1975; Tsuruta, 2005; Chitrakar i in., 2001).
 - **Synteza oparta o rezerwy litu.**
Gęstość energetyczna naturalnego litu wynosi około 7500 kWh na gram (Ongena i Van Oost, 2006). Szacunki określające sprawność przekształcania tej energii w elektryczną w reaktorach termojądrowych są różne – od 310 kWh(e)/g litu naturalnego (Eckhartt, 1995) do 3400 kWh(e)/g (Steinberg i Dang, 1975). Zakładam tu 2300 kWh(e)/g w oparciu o szeroko cytowane twierdzenie, że „elektrownia termojądrowa o mocy 1 GW będzie wykorzystywać około 100 kg deuteru i 3 tony naturalnego litu rocznie, produkując około 7 mld kWh energii”. [69vt8r], [6oby22], [63i2lp].

Więcej na temat reakcji rozszczepienia w: Hodgson (1999), Nuttall (2004), Rogner (2000), Williams (2000). Centrum Informacji o Uranie (Uranium Information Center) – www.uic.com.au. www.world-nuclear.org, [wnchw]; na temat kosztów: Zaleski (2005); na temat składowisk odpadów: [shrln]; na temat reaktorów powielających oraz toru: www.energyfromthorium.com; więcej na temat reakcji syntezy na stronach: www.fusion.org.uk, www.askmar.com/Fusion.html

25 A może import energii odnawialnej?

To, czy basen Morza Śródziemnego stanie się w XXI wieku obszarem współpracy czy konfliktu, ma strategiczne znaczenie dla naszego wspólnego bezpieczeństwa.

Joschka Fischer, Minister Spraw Zagranicznych RFN, luty 2004

Wiemy już, że trudno będzie nam odejść od paliw kopalnych i oprzeć się tylko na naszych własnych odnawialnych źródłach energii. Atom też ma swoje ograniczenia. Co jeszcze da się zrobić? A może by tak skorzystać z energii odnawialnej z zagranicy? (Nie żebyśmy mieli do niej jakieś prawo, ale ktoś może być tam zainteresowany sprzedażem nam tej energii).

Większość zasobów, które pozwolą nam żyć w sposób zrównoważony, znajduje się na lądzie – to tam kładziemy panele słoneczne, to tam rosną rośliny energetyczne. Jared Diamond w swojej książce *Upadek* zauważa, że jest wiele czynników warunkujących upadek cywilizacji, jednak wspólną cechą wszystkich upadków jest nadmierne zagęszczenie ludności.

Miejsca takie jak Wielka Brytania i Europa są w opałach, bo mają duże zagęszczenie ludności, a wszystkie dostępne odnawialne źródła energii zajmują dużą powierzchnię i mają niewielką gęstość energetyczną (tabela 25.1). W poszukiwaniu ratunku powinniśmy zwrócić się do krajów, które mają (a) niskie zagęszczenie ludności; (b) dużą powierzchnię oraz (c) energię odnawialną o wysokiej gęstości energetycznej.

Region	Ludność	Obszar (km ²)	Gęstość zaludnienia (o/km ²)	Powierzchnia na osobę (m ²)
Libia	5 760 000	1 750 000	3	305 000
Kazachstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000
Arabia Saudyjska	26 400 000	1 960 000	13	74 200
Algeria	32 500 000	2 380 000	14	73 200
Sudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Świat	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Szkocja	5 050 000	78 700	64	15 500
Unia Europejska	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Walia	2 910 000	20 700	140	7 110
Zjednoczone Królestwo	59 500 000	244 000	243	4 110
Anglia	49 600 000	130 000	380	2 630

Tabela 25.2 wymienia niektóre kraje, które do tego opisu pasują. Na przykład gęstość zaludnienia w Libii jest 70 razy niższa niż w Wielkiej Brytanii, a jej obszar jest 7 razy większy. Inne duże, bogate w przestrzeń kraje to Kazachstan, Arabia Saudyjska, Algieria i Sudan.

We wszystkich tych państwach najbardziej obiecującym źródłem wydaje się być energia słoneczna, a w szczególności technologia koncentrowania energii słonecznej (*concentrating solar power* – CSP), opierająca się na zwierciadłach i soczewkach ogniskujących światło słoneczne. Elektrownie koncentrujące energię słoneczną występują w różnych odmianach, miewają różne kształty i ustawienia luster podążających za słońcem. Wykorzystują one różne

MOC NA JEDNOSTKĘ POWIERZCHNI LĄDU LUB WODY

Wiatr	2 W/m ²
Wiatr na morzu	3 W/m ²
Baseny pływowe	3 W/m ²
Prądy pływowe	6 W/m ²
Moduły fotowolt.	5–20 W/m ²
Rośliny energet.	0,5 W/m ²
Deszczówka (wyżyny)	0,24 W/m ²
Elektrownia wodna	11 W/m ²
Komin słoneczny	0,1 W/m ²
El. słoneczna z koncentracją (pustynia)	15 W/m²

Tabela 25.1. Instalacje OZE muszą zająć cały kraj, bo wszystkie odnawialne źródła potrzebują dużej powierzchni.

Tabela 25.2. Wybrane regiony, uszeregowane według gęstości zaludnienia – od najmniejszej do największej. Więcej danych dot. gęstości zaludnienia na str. 351. Stan na rok 2005. Populacja świata cały czas rośnie i mniej więcej na przełomie lat 2011/2012 osiągnie liczebność 7 miliardów [red.]

technologie konwersji energii w miejscu skupienia promieni słonecznych – na przykład silnik Stirlinga, wodę pod ciśnieniem lub roztwór soli – wszystkie te instalacje dostarczają zbliżoną średnią moc na jednostkę powierzchni, mniej więcej 15 W/m^2 .

Technologia, która załatwia sprawę

„Kwadrat $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ na Saharze mógłby zaspokoić potrzeby energetyczne całego świata”. Czy to prawda? Koncentrowanie energii słonecznej na pustyni dostarcza średnią moc na jednostkę powierzchni rzędu około 15 W/m^2 . Założywszy, że cały ten kwadrat służy tylko i wyłącznie produkcji energii, można by wygenerować 150 GW. To nie równa się obecnemu zużyciu energii na świecie. To nawet nie zbliża się do obecnego globalnego zużycia energii elektrycznej, które wynosi 2000 GW. Globalne zużycie energii wynosi obecnie 15 000 GW.

Prawidłowe jest więc stwierdzenie, że dzisiejszy popyt na energię zaspokoiłby kwadrat na pustyni, całkowicie wypełniony lustrami ogniskującymi, o wielkości 1000 km na 1000 km .

To czterokrotność obszaru Wielkiej Brytanii. Dodatkowo, jeżeli chcemy, by inni na świecie też mieli dostęp do energii, przypuszczalnie powinniśmy zapewnić podaż energii większą niż dzisiejszy popyt. Zapewnienie każdemu na świecie takiej ilości energii, jaką zużywa przeciętny Europejczyk (125 kWh dziennie), wymagałoby dwóch kwadratów 1000 km na 1000 km na pustyni.

Na szczęście świat nie kończy się na Saharze, warto więc pokroić świat na mniejsze regiony i zadać sobie pytanie, jaki obszar musimy wykorzystać na każdej lokalnej pustyni. W przypadku Europy pytanie brzmiałoby: „Jaki obszar północnej Sahary jest konieczny, by każdemu mieszkańcowi Europy i Afryki Północnej zapewnić energię na poziomie zużycia przeciętnego Europejczyka?” Założywszy, że populacja Europy i Afryki Północnej wynosi 1 miliard mieszkańców, wymagany obszar spada do $340\,000 \text{ km}^2$, co odpowiada kwadratowi $600 \text{ km} \times 600 \text{ km}$. To obszar równy powierzchni Niemiec, 140% terytorium Wielkiej Brytanii albo 16 Walii.

Udział Wielkiej Brytanii w tym obszarze 16 Walii wyniosłby jedną Walię: kwadrat 145 km na 145 km na Saharze zaspokoiłby całe zapotrzebowanie na energię pierwotną w Wielkiej Brytanii. Te kwadraty pokazano na rys. 25.5. Warto zauważyć, że chociaż żółty kwadrat może wydawać się „niewielki” na tle Afryki, ma rozmiar Niemiec.

Kwadrat na pustyni o powierzchni $600 \text{ km} \times 600 \text{ km}$ odpowiada obszarowi Polski. Zapewnienie Polakowi energii na poziomie przeciętnego Europejczyka (125 kWh dziennie) wymagałoby zarezerwowania na pustyni obszaru wielkości województwa śląskiego – kwadratu 115 km na 115 km .

Projekt DESERTEC

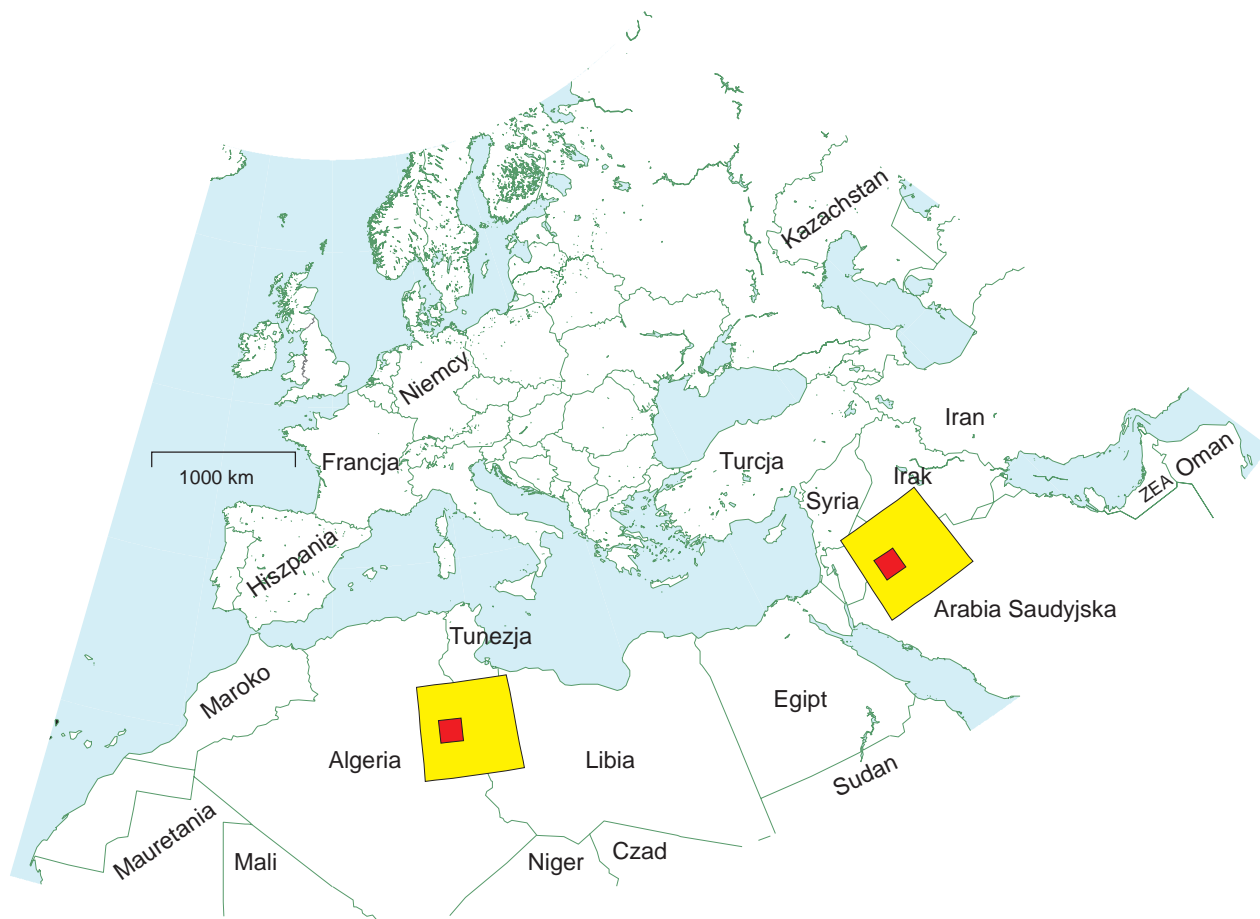
Organizacja o nazwie DESERTEC [www.desertec.org] promuje pomysł wykorzystania CSP w słonecznych krajach śródziemnomorskich i przesyłania tej energii na pochmurną północ za pomocą linii prądu stałego o wysokim napięciu (*high-voltage direct-current* – HVDC) (fot. 25.7). Technologia HVDC stosowana jest od 1954 roku do przesyłu energii elektrycznej zarówno kablami napowietrznymi, jak i podmorskimi (takimi jak interkonektor między Francją



Fot. 25.3. Talerz z silnikiem Stirlinga. Te wspaniałe koncentratory dostarczają moc na jednostkę powierzchni rzędu 14 W/m^2 . Zdjęcie zamieszczamy dzięki uprzejmości Stirling Energy Systems www.stirlingenergy.com
Fot. 25.3. ABB



Fot. 25.4. Andasol – elektrownia słoneczna o mocy „100MW” budowana w Hiszpanii. Nadmiar energii cieplnej wyprodukowanej w ciągu dnia będzie magazynowany w zbiornikach z ciekłymi solami nawet do 7 godzin, zapewniając nieprzerwaną i stabilną podaż energii elektrycznej do sieci. Przewiduje się, że elektrownia będzie produkować 350 GWh rocznie (40 MW). Zwierciadła paraboliczne zajmują 400 ha , stąd też moc na jednostkę powierzchni wyniesie 10 W/m^2 .
Fot. IEA SolarPACES



a Anglią). Używa się jej do przesyłu prądu na dystanse powyżej 1000 km w RPA, Chinach, USA, Kanadzie, Brazylii i Kongu. Typowa linia 500 kV może przesłać 2 GW mocy. Dwutorowa linia HVDC w Brazylii przesyła 6,3 GW.

Połączenia HVDC mają nad tradycyjnymi liniami wysokiego napięcia prądu przemiennego kilka przewag: wymagają mniej rozbudowanej infrastruktury, zajmują mniejszą przestrzeń i wiążą się z niższymi stratami energii przy przesyśle. Straty w przesyśle 3500-kilometrową linią HVDC, włączając koszty konwersji prądu zmiennego w stały, wyniosłyby około 15%. Kolejną zaletą systemów HVDC jest fakt, że wspierają stabilność sieci energetycznych, do których są podłączone.

Według planów DESERTEC należałoby wykorzystać najpierw tereny nadmorskie. Elektrownie CSP umieszczone nad morzem mogłyby jednocześnie odsalać wodę. Ten produkt uboczny stanowiłby cenne źródło wody do picia i dla rolnictwa.

Tabela 25.6 zawiera szacunki DESERTEC odnośnie potencjału produkcji energii w krajach Europy i Afryki Północnej. „Potencjał ekonomiczny” z nawiązką zapewniłby 125 kWh dziennie na osobę miliardowi ludzi. Całkowity „potencjał nadbrzeżny” zapewniłby temu miliardowi 16 kWh na osobę dziennie.

Rys. 25.5. Słynny mały kwadrat. Na mapie pokazano kwadraty wielkości 600 na 600 km – jeden w Afryce i jeden w Arabii Saudyjskiej, Jordanii i Iraku. Koncentrujące elektrownie słoneczne, szczelnie wypełniające jeden taki kwadrat zapewniłyby energię miliardowi ludzi na poziomie średniego zużycia w Europie, czyli 125 kWh dziennie. Powierzchnia jednego kwadratu równa się obszarowi Niemiec i szesnastu Waliom. W każdym z dużych kwadratów mieści się mniejszy kwadrat o powierzchni 145 na 145 km, który ilustruje obszar na Saharze (wielkości jednej Walii), niezbędny do zasilania w energię całej Wielkiej Brytanii.

Kraj	Potencjał ekonomiczny (TWh/rok)	Potencjał nadbrzeżny (TWh/rok)
Algeria	169 000	60
Libia	140 000	500
Arabia Saudyjska	125 000	2 000
Egipt	74 000	500
Irak	29 000	60
Maroko	20 000	300
Oman	19 000	500
Syria	10 000	0
Tunezja	9 200	350
Jordania	6 400	0
Jemen	5 100	390
Izrael	3 100	1
Zjedn. Emiraty Arabskie	2 000	540
Kuwejt	1 500	130
Hiszpania	1 300	70
Katar	800	320
Portugalia	140	7
Turcja	130	12
Razem	620 000 (70 000 GW)	6 000 (650 GW)

Spróbujmy odzwierciedlić na mapie zarys realistycznego planu. Wyobraźmy sobie obszary produkcji energii ze słońca, każdy obejmujący 1500 km² – to mniej więcej obszar Londynu (obszar administracyjny Wielkiego Londynu ma 1580 km²; obwodnica Londynu M25 zamyka obszar 2300 km²). Określmy je mianem stref. Załóżmy, że w każdej ze stref połowę powierzchni zajmą koncentrujące elektrownie słoneczne o średniej gęstości energetycznej 15 W/m², zostawiając miejsce dla rolnictwa, budynków, kolei, dróg, rurociągów i kabli. Przy założeniu 10-procentowych strat na przesyłach ze strefy do konsumenta, każda ze stref produkuje średnio 10 GW energii. Na rys. 25.8 widać takie strefy w skali mapy. By łatwiej było sobie uziścić wielkość tych stref, kilka umieściłem w Wielkiej Brytanii. Cztery takie strefy produkowałyby równowartość całkowitego zużycia elektryczności w Wielkiej Brytanii (16 kWh na osobę dziennie dla 60 mln ludzi). Sześćdziesiąt pięć stref zapewniłoby 16 kWh na osobę dziennie całemu miliardowi mieszkańców Europy i Afryki Północnej. Rys. 25.8 pokazuje 68 stref na pustyni.

Dwie i pół takiej strefy zapewni 16 kWh każdemu Polakowi. Pełne trzy moglibyśmy rezerwować wspólnie ze Słowacją.

Tabela 25.6. Potencjał energetyki słonecznej w Europie i okolicach. Potencjał ekonomiczny to moc możliwa do wygenerowania w odpowiednich miejscach o prawidłowej bezpośredniej irradiancji większej niż 2000 kWh/m²/rok. Potencjał nadbrzeżny to moc możliwa do wygenerowania do wysokości 20 m (w pionie) nad poziomem morza. To szczególnie atrakcyjna opcja, z uwagi na możliwość powiązania z odsalaniem wody. Dla porównania, całkowita moc konieczna do zapewnienia 125 kWh dziennie miliardowi ludzi wynosi 46 000 TWh/rok (5 200 GW). 6000 TWh/rok (650 GW) to 16 kWh na osobę dziennie dla 1 mld ludzi.



Fot. 25.7. Budowa linii wysokiego napięcia prądu stałego między Finlandią a Estonią. Para tych kabli przesyła moc rzędu 350 MW.
Fot. ABB

Rys. 25.8. Każda strefa odpowiada obszarowi wielkości 1500 km², który – w połowie wypełniony instalacjami solarnymi – produkowałby średnio 10 GW. 65 takich stref zapewniłoby dziennie 16 kWh na osobę miliardowi ludzi.



Systemy fotowoltaiczne z koncentratorami

Alternatywą dla koncentrujących termicznych elektrowni słonecznych na pustyniach są koncentrujące systemy fotowoltaiczne dużej skali. Za pomocą takich soczewek lub lusterek ogniskuje się światło słoneczne na wysokiej jakości ogniwach słonecznych wytwarzających prąd. U Faimana i in. (2007) czytamy, że „energetyka słoneczna, a ściślej fotowoltaika z koncentracją energii słonecznej, może być całkowicie konkurencyjna kosztowo w stosunku do paliw kopalnych [w stanach pustynnych takich, jak: Kalifornia, Arizona, Nowy Meksyk i Teksas] bez konieczności dotowania”.

Według producenta koncentrujących systemów fotowoltaicznych Amonix ten rodzaj systemu koncentrującego miałby średnią moc na jednostkę powierzchni rzędu 18 W/m^2 .

Skalę koniecznej infrastruktury uzmysłowi nam również przełożenie na przeciętnego Kowalskiego. Moduł fotowoltaiczny pokazany na fot. 25.9, o mocy szczytowej „25 kW”, średnio generuje około 138 kWh dziennie; życie w amerykańskim stylu oznacza dzisiaj zużycie energii rzędu 250 kWh na osobę dziennie. Zatem odejście od paliw kopalnych w Stanach Zjednoczonych dzięki energii słonecznej wymagałoby z grubsza dwóch takich modułów $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ na osobę.

Pod względem importu energii odnawialnej zza granicy Polska znajduje się praktycznie w tej samej sytuacji co Wielka Brytania i reszta Europy. Nie sąsiadujemy z żadnym z liderów tabeli oferujących niskie zagęszczenie ludności, dużą powierzchnię oraz energię odnawialną o wysokiej gęstości energetycznej.

Powinniśmy popierać stworzenie supersieci energetycznej, łączącej kraje Europy i zapewniającej transfer energii z basenu Morza Śródziemnego oraz zapewniający transfer energii pomiędzy krajami – szczególnie, że możemy mieć olbrzymie problemy z magazynowaniem energii.

Wątpliwości

Coś mi tu nie gra. W rozdziale 6 stwierdzono, że najlepsze ogniwa fotowoltaiczne dostarczają średnio 20 W/m^2 w miejscach o nasłonecznieniu takim jak w Wielkiej Brytanii. Można by przypuszczać, że na pustyni te same ogniwa dostarczą 40 W/m^2 . Dlaczego więc koncentrujące elektrownie słoneczne miałyby dostarczać tylko $15\text{--}20 \text{ W/m}^2$? Przecież systemy z koncentracją powinny być nawet lepsze niż zwykłe, płaskie moduły?

To dobre pytanie. A krótka odpowiedź brzmi: „Nie”. Fotowoltaika z koncentracją nie osiąga lepszej mocy na jednostkę powierzchni niż płaskie moduły. Ustrojstwo z koncentracją musi podążać za słońcem, w innym razie promieniowanie słoneczne nie zostanie właściwie zogniskowane – stąd też, kiedy zaczynamy pakować przyrządy z koncentracją na kawałku terenu, musimy zostawić pomiędzy nimi przerwy. Mnóstwo energii słonecznej ucieka, bo wpada w te przerwy. Mimo to produkuje się systemy z koncentracją, ponieważ obecnie są tańsze niż bardzo drogie płaskie moduły fotowoltaiczne. Celem speców od systemów z koncentracją NIE jest osiągnięcie większej mocy na jednostkę powierzchni. Sama powierzchnia jest tania (tak przynajmniej zakładają). Celem jest dostarczenie jak największej mocy za 1 dolara.



Fot. 25.9. Kolektor fotowoltaiczny z koncentracją o mocy szczytowej 25 kW produkowany przez kalifornijską firmę Amonix. Instalacja o rozmiarze 224 m^2 zawiera 5760 soczewek Fresnela z 260-krotną koncentracją optyczną, z których każda oświetla silikonowe ogniwo o sprawności 25%.

Jeden taki kolektor, odpowiednio ulokowany na pustyni, generuje 138 kWh dziennie – to wystarczy, by zaspokoić potrzeby energetyczne połowy Amerykanina.

Podaję to „ludzkie” porównanie dla lepszego zilustrowania skali potencjału.

Fot. David Faiman

Dlaczego nie rozważa się tutaj pokrycia Sahary płaskimi modułami, skoro charakteryzują się większą gęstością energetyczną?

Bo rozważam tutaj praktyczne możliwości wielkoskalowej zrównoważonej produkcji energii na potrzeby Europy i Afryki Północnej do roku 2050. Przypuszczam, że w 2050 roku zwierciadła wciąż będą tańsze niż moduły fotowoltaiczne, dlatego też powinniśmy skupić się na technologii koncentrowania energii słonecznej.

A co z kominami słonecznymi?

Komin słoneczny, zwany też wieżą słoneczną, wykorzystuje słońce w bardzo prosty sposób. W centrum obszaru pokrytego przezroczystym dachem ze szkła lub plastiku stawia się ogromny komin zasysający powietrze z dołu i wyrzucający do góry. Gorące powietrze jest lżejsze od zimnego, więc się unosi – strumień gorącego powietrza wytworzony w tym podobnym do szklarni kolektorze słonecznym ze świstem ucieka kominem, jednocześnie przyciągając chłodniejsze powietrze z obwodu kolektora. Energia pozyskiwana jest ze strumienia powietrza za pomocą turbin u podstawy komina. Komin słoneczny, choć stosunkowo proste w budowie, nie zapewniają imponującej mocy na jednostkę powierzchni. Elektrownia pilotażowa w hiszpańskim Manzanares działała przez 7 lat, od 1982 do 1989 roku. Komin miał 195 m wysokości i 10 m średnicy, dach kolektora o średnicy 240 m składał się z 6000 m² szkła i 40 000 m² przezroczystego plastiku. Produkcja prądu wynosiła 44 MWh rocznie, co odpowiada mocy na jednostkę powierzchni rzędu 0,1 W/m². Teoretycznie im większy kolektor i im wyższy komin, tym większa gęstość energetyczna komina słonecznego. Inżynierowie odpowiedzialni za projekt Manzanares szacują, że w lokalizacji o irradiancji 2300 kWh/m² rocznie (262 W/m²) tysiącmetrowa wieża posadowiona na kolektorze o średnicy 7 km generowałaby rocznie 680 GWh, dając średnią moc rzędu 78 MW. Oznacza to moc na jednostkę powierzchni około 1,6 W/m², co odpowiada mocy na jednostkę powierzchni farm wiatrowych w Wielkiej Brytanii i jednej dziesiątej mocy na jednostkę powierzchni koncentrujących elektrowni słonecznych (zgodnie z tym, co tutaj policzyliśmy). Podobno komin słoneczny mogłyby generować prąd w cenie zbliżonej do konwencjonalnych elektrowni. Sugeruję, by kraje o dużej wolnej powierzchni i nasłonecznieniu ogłosiły wielki konkurs między kominami słonecznymi a elektrowniami słonecznymi z koncentracją, sponsorowany przez kraje produkujące i konsumujące ropę naftową.

A gdyby tak sprowadzać energię z Islandii, która ma w bród energii geotermalnej i elektrowni wodnych?

W rzeczywistości Islandia już eksportuje energię, zasilając własny przemysł wytwarzający energochłonne produkty. Weźmy aluminium – Islandia wytwarza w ciągu roku niemalże tonę aluminium na mieszkańca! Z punktu widzenia Islandii zyski mogą być spore. Czy jednak Islandia ocali Europę? Zdziwiłbym się, gdyby udało się zwiększyć produkcję energii na Islandii tak, by umożliwić znaczący eksport, choćby tylko do Wielkiej Brytanii. Zróbmy zestawienie z interkontektorem Anglia–Francja, który przesyła do 2 GW pod kanałem La Manche. Ta moc maksymalna odpowiada 0,8 kWh na Brytyjczyka dziennie, co z grubszą przekładą się na 5% średniego zużycia prądu na Wyspach. Średnia wielkość produkcji prądu ze źródeł geotermalnych na Islandii wynosi zaledwie 0,3 GW, a to mniej niż 1% średniego zużycia prądu w Wielkiej Brytanii. Średnia produkcja



Fot. 25.10. Prototypowy komin słoneczny w Manzanares
Fot. ze strony www.solarmillennium.de



Fot. 25.11. Jeszcze więcej energii geotermalnej na Islandii
Fot. Ward

energii elektrycznej na Islandii wynosi 1,1 GW. By przesyłać energię równą zdolności przesyłowej francuskiego interkonektora, Islandia musiałaby potroić produkcję energii elektrycznej. By dostarczyć nam 4 kWh na osobę dziennie (mniej więcej tyle produkują brytyjskie elektrownie jądrowe), Islandia musiałaby zwiększyć produkcję prądu dziesięciokrotnie. Zapewne warto wybudować interkonektory łączące z Islandią, ale nie oczekujmy, że dostarczą nam one poważnych ilości energii.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

187 **Koncentrowanie energii słonecznej na pustyni dostarcza średnią moc na jednostkę powierzchni rzędu około 15 W/m².** Oparłem się na danych dwóch producentów koncentrujących systemów solarnych z przeznaczeniem na pustynie.

Według www.stirlingenergy.com pojedyncze lustro skupiające (talerz) z 25-kilowatowym silnikiem Stirlinga może generować 60 000 kWh/rok w dobrej lokalizacji na pustyni. Przy upakowaniu talerzy w konfiguracji „jeden talerz na 500 m²” daje to średnią moc rzędu 14 W/m². Stirling Energy twierdzi, że lustro skupiające z silnikiem Stirlinga, w kategoriach wygenerowanej energii, najlepiej wykorzystuje zajmowany teren.

Z kolei Ausra (www.ausra.com) używa płaskich lusterek, które podgrzewają wodę do 285 °C, co wprawia w ruch turbinę parową. Gorąca woda pod ciśnieniem może być magazynowana w głębokich, pokrytych metalem zbiornikach, co umożliwia produkcję prądu nocą. W opisie elektrowni o mocy 240 MWe, która ma powstać w Australii, projektanci utrzymują, że 3,5 km² lusterek dostarczyłoby 1,2 TWh – to 38 W na m² lustra (Mills i LiÈvre, 2004). Szacując moc na jednostkę powierzchni, musimy uwzględnić przerwy pomiędzy lustrami. Przedstawiciele Ausra twierdzą, że by zasilić całe Stany Zjednoczone w prąd, potrzebują kwadratu na pustyni o powierzchni 153 km na 153 km (Mills i Morgan, 2008). Całkowita produkcja energii elektrycznej w USA wynosi 3600 TWh/rok, Ausra deklaruje więc moc na jednostkę powierzchni rzędu 18 W/m². Technologia przez nich użyta to *compact linear fresnel reflector* (Mills i Morrison, 2000; Mills i in., 2004; Mills i Morgan, 2008). Notabene, zamiast mówić o „energetyce słonecznej z koncentracją”, Ausra woli używać terminu *elektryczność słoneczna termiczna* (*solar thermal electricity – STE*), podkreślając korzyści z magazynowania energii w postaci ciepła, czego nie potrafią koncentrujące systemy fotowoltaiczne.

Trieb i Knies (2004), którzy są gorącymi zwolennikami energetyki słonecznej z koncentracją, dla poszczególnych technologii koncentrujących przewidują następujące zakresy mocy na jednostkę powierzchni: lustra paraboliczne 14–19 W/m²; linearny reflektor Fresnela 19–8 W/m²; wieża z heliostatami 9–14 W/m²; talerz z silnikiem Stirlinga 9–14 W/m².

W Europie mamy trzy demonstracyjne elektrownie słoneczne z koncentracją: Andasol (używająca lusterek parabolicznych), Solúcar PS10 (wieża w pobliżu Sewilli) i Solartres (wieża magazynująca ciepło w stopionych solach). System paraboliczny Andasol, pokazany na fot. 25.4, ma dostarczać 10 W/m². Wieża słoneczna Solúcar, o mocy 11 MW, jest wyposażona w 624 lustra, każde o powierzchni 121 m². Zwierciadła koncentrują światło słoneczne do gęstości promieniowania nawet na poziomie 650 kW/m². Odbiornik cieplny odbiera moc szczytową rzędu 55 MW. Elektrownia może zmagazynować 20 MWh energii cieplnej, co w warunkach zachmurzenia przedłuża jej pracę o 50 minut. Ma generować 24,2 GWh prądu rocznie, a zajmuje 55 ha. Daje to średnią moc na jednostkę powierzchni rzędu 5 W/m² (źródło: Abengoa Annual Report 2003). Solartres zajmie 142 ha i ma produkować 96,4 GWh/rok – daje to gęstość energetyczną rzędu 8 W/m².

Zarówno Andasol, jak i Solartres w normalnym trybie działania będą wykorzystywać pewne ilości gazu ziemnego.



Fot. 25.12. Inżynierowie montują koncentrującą elektrownię słoneczną eSolar wyposażoną w heliostaty (lustra rotujące i przechylające się w pogoni za słońcem). www.esolar.com produkuje elektrownie średniej wielkości: jednostka o mocy szczytowej 33 MW na 64-hektarowej działce. To 51 W/m² przy mocy szczytowej, przypuszczam więc, że w typowej pustynnej lokalizacji te elektrownie dostarczałyby jedną czwartą tej wartości, czyli 13 W/m².



Fot. 25.13. Wysokonapięciowy układ przesyłowy prądu stałego HVDC w Chinach
Fot. ABB

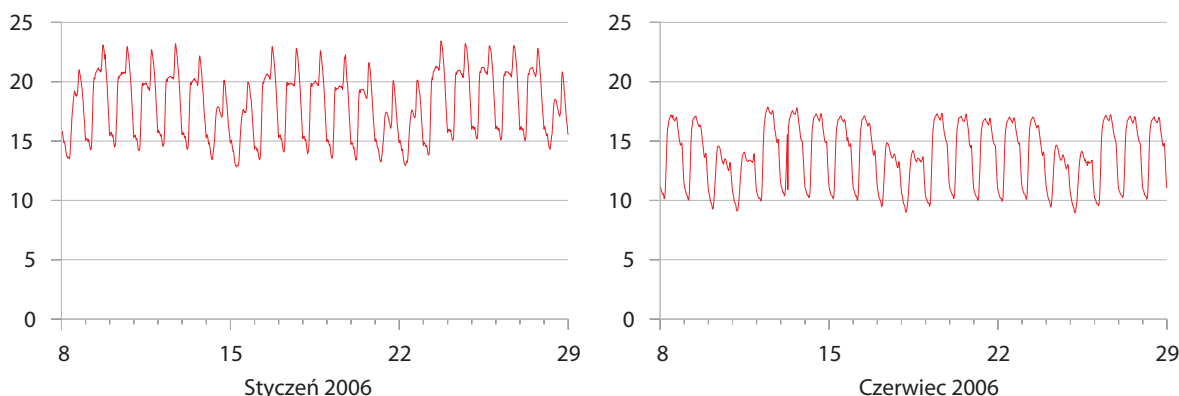
- Technologia HVDC stosowana jest do przesyłu prądu na dystansie powyżej tysiąca km w RPA, Chinach, USA, Kanadzie, Brazylii i Kongu. Źródła: Asplund (2004), Bahrman i Johnson (2007). Więcej na temat HVDC w: Carlsson (2002).
- 188 Straty w przesyśle 3500-kilometrową linią HVDC, włączając koszty konwersji prądu zmiennego w stały, wyniosłyby około 15%. Źródła: Trieb i Knies (2004); van Voorthuysen (2008).
- 191 Według Amonix systemy fotowoltaiczne z koncentracją miałyby średnią moc na jednostkę powierzchni rzędu 18 W/m^2 . Założenia przyjęte na stronie www.amonix.com są następujące: soczewka transmituje 85% światła, sprawność ogniwa wynosi 32%, sprawność kolektora – 25%. Kolejne 10% strat spowodowanych jest zacięciem. Stosunek powierzchni apertury soczewki/powierzchnia terenu wynosi 1/3. Prawidłowa bezpośrednia irradiancja (strumień promieniowania słonecznego na jednostkę powierzchni): $2222 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$. Zakłada się, że przy wydajności maksymalnej każdy kW dostarczy 2000 kWh/rok (średnia rzędu 0,23 kW). Elektrownia o mocy sięgającej 1 GW zajęłaby 12 km² i dostarczyłaby 2000 GWh rocznie. To 18 W/m^2 .
- 192 Kominy słoneczne. – Źródła: Schlaich J (2001); Schlaich i in. (2005); Dennis (2006), www.enviromission.com.au; www.solarairpower.com
- Średnia produkcja prądu ze źródeł geotermalnych na Islandii wynosi zaledwie 0,3 GW. Średnia produkcja energii elektrycznej na Islandii wynosi 1,1 GW. Oto statystyki za rok 2006: 7,3 TWh prądu z energetyki wodnej i 2,6 TWh z geotermii, o mocy, odpowiednio: 1,16 GW i 0,42 GW. Źródło: Państwowa Agencja Energetyczna Orkustofnun (Orkustofnun National Energy Authority). [www.os.is/page/energystatistics].

Rekomendacje lektur: Komisja Europejska (2007), German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics Section Systems Analysis and Technology Assessment (2006), www.solarmillennium.de

26 Fluktuacje i magazynowanie energii

Wiatr, jako bezpośrednia siła napędowa, zupełnie nie nadaje się do zasilania gospodarki opartej na maszynach. W okresach bezwietrznych cały krajowy przemysł zostałby sparaliżowany. Przed epoką silników parowych próbowano osuszać kopalnie przy pomocy energii z wiatraków. Mimo że wiatraki dostarczały dużej mocy, robiły to nieregularnie, kiedy więc zdarzały się długie okresy bezwietrzne, woda zalewała kopalnie, a górnicy tracili pracę.

William Stanley Jevons, 1865



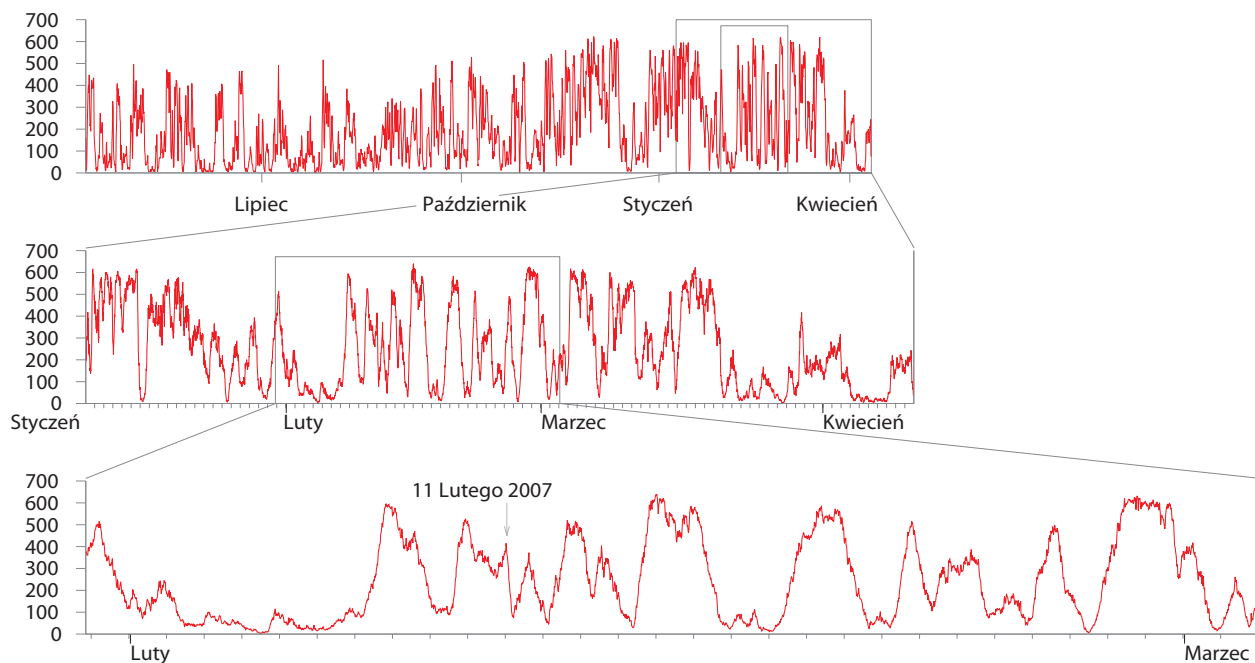
Jeżeli rzucimy w kął paliwa kopalne i postawimy tylko na źródła odnawialne lub tylko na atom, lub na obie te opcje, możemy mieć problem. Większość dużych źródeł odnawialnych nie działa w trybie „włącz–wyłącz”. Kiedy wietrzyk wieje, a słońeczko świeci – można czerpać energię. Dwie godziny później energii może już nie być. W projektach elektrowni jądrowych też raczej nie uwzględnia się guzika „włącz–wyłącz”. Zazwyczaj pracują nieprzerwanie, a produkcję energii można zmniejszyć lub zwiększyć tylko w skali godzin. I tu mamy problem, bo w sieci elektroenergetycznej zużycie musi być cały czas dokładnie równe produkcji. Sieć nie jest w stanie magazynować energii. Po to więc, by nasz plan energetyczny się dopinał, codziennie i w każdej minucie potrzebujemy czegoś, co łatwo włączać i wyłączać. Czegoś z pstryczkiem. Utało się, że tym czymś z pstryczkiem jest źródło energii, które włączamy lub wyłączamy, żeby skompensować fluktuacje podaży w stosunku do popytu (np. elektrownia na węgiel lub gaz!). Jednakże równie skutecznym sposobem harmonizowania podaży z popytem byłoby zapotrzebowanie na energię z pstryczkiem – zlew z energią, który można by zatkać jednym ruchem.

W każdym razie to coś z pstryczkiem musi być wielkie, bo zapotrzebowanie na energię jest bardzo różne (rys. 26.1). Popyt potrafi skoczyć znacząco nawet na przestrzeni kilku minut. W tym rozdziale omawiamy sposoby radzenia sobie z fluktuacjami w popycie i podaży przy całkowitej rezygnacji z paliw kopalnych.

Rys. 26.1. Zapotrzebowanie na prąd w Wielkiej Brytanii (w kWh na osobę dziennie) podczas dwóch tygodni zimą i dwóch tygodni latem 2006 roku.

W styczniu szczytowy pobór ma miejsce o godzinie 18.

Zarówno latem, jak i zimą wyraźnie odznaczają się cykle 5 dni roboczych (gdybyśmy chcieli uzyskać krajowe zapotrzebowanie w GW, wystarczy pamiętać, że szczytowa wartość, 24 kWh na osobę dziennie, odpowiada 60 GW w skali kraju).



Jak bardzo fluktuują źródła odnawialne?

Niezależnie od tego, jak mocno byśmy kochali źródła odnawialne, nie uciekniemy od faktu, że wiatr wieje lub nie wieje.

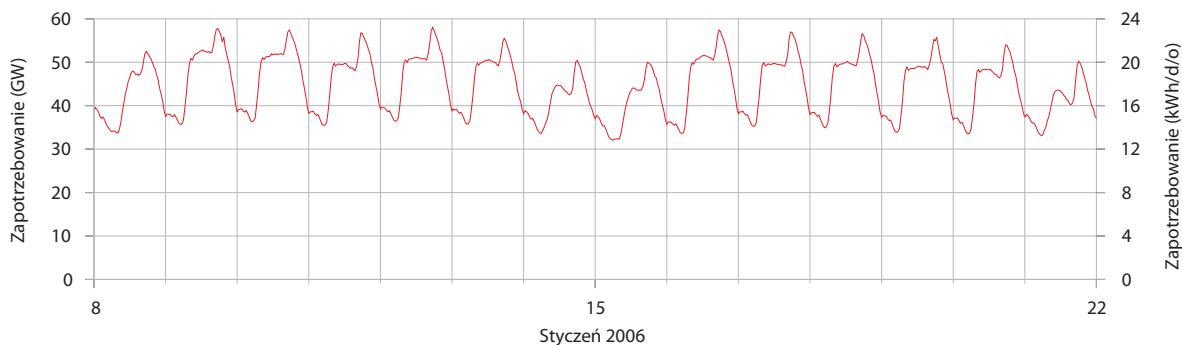
Przeciwnicy energetyki odnawialnej twierdzą: „Energetyka wiatrowa jest nieprzewidywalna, nie zapewnia stabilnej produkcji energii, nie poprawia więc bezpieczeństwa dostaw. Jeżeli postawimy wiele farm wiatrowych, będziemy musieli utrzymać wiele elektrowni na gaz i węgiel, jako zabezpieczenie okresów bezwietrznych”. Nagłówki w prasie typu: „Słaby wiatr przyczyną problemów sieci energetycznej w Teksasie” jeszcze podsycają takie opinie. Zwolennicy energii wiatrowej umniejszają wagę problemu, twierdząc: „Spokojnie. Pojedyncze farmy wiatrowe może nie zapewniają stabilnej produkcji, ale wszystkie farmy wiatrowe *w sumie* dają znacznie większą stabilność”.

Przyjrzyjmy się danym i znajdziemy zrównoważony punkt widzenia. Rys. 26.2 pokazuje całkowitą produkcję sektora energetyki wiatrowej w Irlandii od kwietnia 2006 do kwietnia 2007 roku. Jasno widać, że produkcja nie jest stabilna, nawet jeżeli zbierzemy wiele turbin pokrywających cały kraj. Wielka Brytania jest nieco większa niż Irlandia, ale problem jest ten sam. Między październikiem 2006 a lutym 2007 roku było 17 dni, kiedy 1632 brytyjskich wiatraków pracowało z wydajnością poniżej 10% mocy zainstalowanej. W tym okresie przez 5 dni wydajność wynosiła 5%, zdarzył się też dzień z zaledwie 2-procentową wydajnością.

Przełóżmy na liczby fluktuacje energii wiatrowej w skali kraju. Ważne są dwie kwestie – zmiany w krótkim czasie i długie okresy bezwietrzne. Poszukajmy największej zmiany chwilowej w miesięcznym zestawieniu dla irlandzkiej energetyki wiatrowej.

11 lutego 2007 roku produkcja energii z wiatru w Irlandii spadała nieprzerwanie z 415 MW o północy do 79 MW o 4 nad ranem. To tempo zmiany rzędu

Rys. 26.2. Całkowita produkcja energii (w MW) sektora energetyki wiatrowej w Irlandii, w okresie kwiecień 2006 – kwiecień 2007 roku (górny diagram) oraz uszczegółowienia za okres styczeń–kwiecień 2007 roku (środkowy diagram) i luty 2007 roku (dolny diagram). Szczytowe zapotrzebowanie na prąd w Irlandii wynosi około 5000 MW. Moc zainstalowana w wietrze w 2007 wynosiła 745 MW, w około 60 farmach wiatrowych. Dane są uaktualniane co 15 minut przez www.eirgrid.com



84 MW na godzinę dla całego sektora energetyki wiatrowej o mocy zainstalowanej 745 MW (tempo zmiany to szybkość, z jaką produkcja spadała lub rosła – zbocze wzgórzka na wykresie z 11 lutego). Jeśli więc zwiększymy moc zainstalowaną w brytyjskiej energetyce wiatrowej do 33 GW (co oznaczać będzie średnią produkcję 10 GW), tempo zmiany może wynieść:

$$84 \text{ MW/h} \times \frac{33\,000 \text{ MW}}{745 \text{ MW}} = 3700 \text{ MW/h}$$

przy założeniu, że warunki są u nas podobne do irlandzkich. Więc albo będziemy musieli podnosić produkcję w źródłach zastępczych w tempie 3,7 GW na godzinę – to tak, jakby co godzinę uruchamiać 4 elektrownie jądrowe ze stanu postojowego do pracy z pełną mocą – lub też nauczymy się *obniżyć popyt* w tempie 3,7 GW na godzinę.

Czy da się spełnić te wiatrowe wymogi? By odpowiedzieć na to pytanie, musimy nieco bliżej przyrzeć się gigawatom. Gigawaty to wielkie jednostki energii, używane w skali kraju. Są dla kraju tym, czym dla pojedynczej osoby jest kilowatogodzina dziennie – miłą i wygodną jednostką miary. Średnie zużycie energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii wynosi około 40 GW. Możemy przenieść krajową liczbę na osobiste zużycie – 1 kWh na osobę dziennie odpowiada 2,5 GW w skali kraju. Jeżeli każdy zużywa 16 kWh prądu dziennie, wówczas krajowe zużycie wynosi 40 GW.

Czy tempo zmiany rzędu **4 GW na godzinę** w skali kraju to jakaś kosmiczna wartość? Nie, każdego ranka, jak widać na rys. 26.3, popyt w Wielkiej Brytanii skacze o jakieś 13 GW pomiędzy godz. 6.30 i 8.30 rano. To tempo zmiany rzędu **6,5 GW na godzinę**. Nasi energetycy codziennie radzą sobie w krajowej sieci energetycznej z tempem zmiany większym niż 4 GW na godzinę. Sporadyczne dodatkowe wahnięcia rzędu 4 GW na godzinę, spowodowane nagłymi zmianami siły wiatru, nie powinny nas odwieść od stawiania wiatraków. To po prostu problem, który inżynierowie już rozwiązyali podobnie jak wiele innych. Musimy jedynie wymyślić, jak zharmonizować zawsze zmienny podaż i popyt bez użycia paliw kopalnych. Nie twierdząc, że problem niestabilności produkcji energii z wiatru już został rozwiązany, nie jest jednak trudniejszy niż inne, już załatwione problemy.

Zanim przejdziemy do innych rozwiązań, musimy przenieść na liczby inny problem wiatru – długotrwałe okresy bezwietrzne (nazwijmy je z żeglarską flautą). Na początku lutego 2007 roku w całej Irlandii nie wiało przez 5 dni. Nie było to nic niezwykłego, co można zobaczyć na rys. 26.2. Pogoda bezwietrzna, utrzymująca się przez 2–3 dni zdarza się kilkanaście razy w roku.

Rys. 26.3. Zapotrzebowanie na prąd w Wielkiej Brytanii podczas dwóch tygodni zimą 2006 roku.

Podziałka po prawej pokazuje popyt w skali kraju (GW), a podziałka po lewej – w skali bardziej osobistej (kWh na osobę dziennie).

To te same dane co na rys. 26.1

Z brakiem wiatru można sobie radzić na dwa sposoby. Możemy zgromadzić gdzieś energię, zanim wiatr ucichnie, redukować zapotrzebowanie w całym okresie bezwietrznym lub jedno i drugie. Jeżeli mamy turbiny o mocy zainstalowanej (maksymalnej) 33 GW, dostarczające średnio 10 GW, wówczas ilość energii, którą musimy zawczasu zmagazynować (lub też bez której musimy obejść się w ciągu 5 dni bez wiatru), wyniesie

$$10 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1200 \text{ GWh}$$

(Gigawatogodzina (GWh) to w skali kraju nader wygodna jednostka miary energii. Zużycie prądu w Wielkiej Brytanii wynosi mniej więcej 1000 GWh dziennie).

Wrzucmy tę wartość do ogródka przeciętnego Brytyjczyka – magazyn energii dla całego kraju o pojemności 1200 GWh odpowiada magazynowi energii na osobę o pojemności 20 kWh. Dzięki takim zapasom kraj mógłby przez 5 dni obejść się bez dostaw 10 GW prądu, a każdy obywatel – bez produkcji 4 kWh prądu dziennie.

W Polsce obecne średnie dzienne zużycie energii elektrycznej wynosi obecnie 400 GWh (jest nas mniej i zużywamy mniej elektryczności na osobę).

Magazyn o pojemności 1200 GWh wystarcza na zmagazynowanie jednodniowej produkcji energii przez brytyjskie lądowe farmy wiatrowe. Zgodnie z obliczeniem z rozdziału 4 w Polsce dysponujemy lepszym potencjałem wiatrowym niż Brytyjczycy (30 kWh/d/o w stosunku do 20 kWh/d/o). Zmagazynowanie tych 30 kWh na osobę dziennie wymagałoby (przy uwzględnieniu liczby Polaków równej 40 mln) magazynu o pojemności 1200 GWh – identycznego jak dla Wielkiej Brytanii. Dzięki takim zapasom nasz kraj mógłby przez 5 dni obejść się bez dostaw 10 GW prądu, a każdy Polak – bez produkcji 6 kWh prądu dziennie.

Radzimy sobie z flautą i wahnięciami popytu lub podaży

Musimy rozwiązać dwa problemy – flauta (długie okresy o obniżonej produkcji energii) i wahnięcia (krótkoterminowe zmiany w podaży lub popycie). Przełożyliśmy te problemy na liczby, zakładając, że Wielka Brytania ma około 33 GW mocy zainstalowanej w wietrze. By poradzić sobie z flautą, musimy skutecznie zgromadzić około 1200 GWh energii (20 kWh na osobę). Musimy też poradzić sobie z tempem zmiany dostępnej mocy, równym **6,5 GW na godzinę** (inaczej 0,1 kW na godzinę na osobę).

By sprostać tym problemom, można by rozpowszechnić dwa rozwiązania. Pierwsze jest scentralizowane, a drugie – zdecentralizowane. Pierwsze pozwala radzić sobie z fluktuacjami poprzez gromadzenie energii, a następnie włączanie bądź wyłączanie źródła energii zasilanego z magazynu. Drugie polega na włączaniu lub wyłączaniu części popytu.

Pierwsze rozwiązanie to elektrownie szczytowo-pompowe. Drugie polegałoby na wykorzystaniu akumulatorów pojazdów elektrycznych, które omawialiśmy w rozdziale 20. Zanim przejdę do opisu tych rozwiązań, omówię kilka innych sposobów radzenia sobie z wahnięciami.

Inne rozwiązania po stronie podaży

Niektóre źródła odnawialne da się włączać i wyłączać. Gdybyśmy mieli wiele takich odnawialnych źródeł z pstryczkiem, skończyłyby się wszystkie problemy omawiane w tym rozdziale. Norwegia czy Szwecja mają duże i głębokie zasoby energii wodnej, którą mogą włączać lub wyłączać. Jakie możliwości ma Wielka Brytania?

Po pierwsze, Wielka Brytania może zbudować masę spalarni i instalacji na biomasę, które pełniłyby taką samą rolę, jak dziś elektrownie na gaz czy węgiel. Pstryczek pozwalający włączać i wyłączać spalarnię podnosi koszty tak, jak kosztuje dodatkowa elektrownia na węgiel z przeznaczeniem do pracy tylko od czasu do czasu – generatory tych elektrowni raz stałyby beczynne, a raz pracowałyby ze zdwojoną mocą. Większość generatorów traci na sprawności, kiedy pracuje z przerwami, a nie ze stałym obciążeniem.

Zostawmy koszty. Pozostaje pytanie, jak duże zasoby energii z pstryczkiem możemy wygenerować. Gdybyśmy spalili wszystkie odpady komunalne i porównywalną ilość odpadów rolniczych, średnia produkcja wyniosłaby mniej więcej 3 GW. Możemy wybudować instalacje o mocy *dwa razy większej* (spalarnie zdolne wygenerować 6 GW) z założeniem, że będą pracować tylko przez połowę czasu. Dostarczałyby 6 GW w okresach zwiększonego popytu na energię i zero w godzinach nocnych. Rozruch i wygaszanie pieców tych spalarni nie powinny trwać dłużej niż godzinę. Pozwoliłoby to na radzenie sobie z tempem zmiany rzędu 6 GW na godzinę, ale tylko do wielkości maksymalnej 6 GW! To istotny wkład, ale niewystarczający, jeżeli mamy sobie radzić z fluktuacjami w energetyce wiatrowej rzędu 33 GW.

Biorąc pod uwagę, że na dwóch Polaków przypada trzech Brytyjczyków i zakładając zbliżoną ilość odpadów przypadających na osobę, średnia moc spalarni w Polsce wyniosłaby 2 GW, a dwukrotnie większe instalacje miałyby moc 4 GW.

A co z energetyką wodną? Średni współczynnik obciążenia elektrowni wodnych w Wielkiej Brytanii wynosi 20%, co oznacza, że z łatwością da się zmniejszyć lub zwiększyć produkcję. Co więcej, hydroelektrownie mają tę istotną zaletę, że można je włączyć i wyłączyć w mgnieniu oka. Uruchomienie lub zatrzymanie Glendoe, nowej elektrowni wodnej o mocy 100 MW, zajmie 30 sekund. Tylko w jednej hydroelektrowni mamy tempo zmiany rzędu 12 GW na godzinę! Odpowiednia liczba elektrowni wodnych powinna więc załatwić problem wahnięć podaży energii z wielkich farm wiatrowych. Niemniej jednak, moc obecnie zainstalowana w brytyjskiej energetyce wodnej nie wystarczy, by rozwiązać nasz problem z wahnięciami (przy założeniu, że chcemy poradzić sobie z gwałtownym spadkiem podaży energii z wiatru rzędu, dajmy na to, 10 czy 33 GW). Całkowita moc tradycyjnych elektrowni wodnych w Wielkiej Brytanii wynosi zaledwie około 1,5 GW.

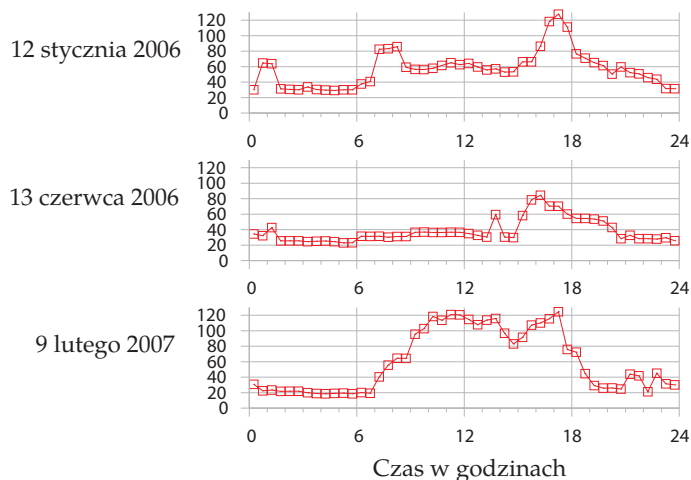
W Polsce całkowita moc elektrowni wodnych (z wyłączeniem szczytowo-pompowych) to 0,75 GW. Największa z nich, znajdująca się we Włocławku, ma moc 160 MW.

Widzimy więc, że nie wystarczy wcisnąć pstryczki w spalarniach, elektrowniach na biomasę i hydroelektrowniach. Potrzebujemy innych rozwiązań.

elektrownia	moc (GW)	(różnica poziomu wód w zbiorniku górnym i dolnym) (m)	objętość (milion m ³)	zmagazynowana energia (GWh)
Ffestiniog	0,36	320 – 295	1,7	1,3
Cruachan	0,40	365 – 334	11,3	10
Foyers	0,30	178 – 172	13,6	6,3
Dinorwig	1,80	542 – 494	6,7	9,1

Tabela 26.4. Elektrownie szczytowo-pompowe w Wielkiej Brytanii. Obecnie da się u nas zmagazynować maksymalnie 30 GWh.

Elektrownie szczytowo-pompowe



Rys. 26.5. Elektrownie szczytowo-pompowe to dobry interes. Ceny prądu, w funtach za MWh, w ciągu trzech dni w 2006 i 2007 roku.

Elektrownie szczytowo-pompowe przepompowują wodę ze zbiornika u podnóża wzniesienia do zbiornika na górze, używając taniego prądu, zakupionego poza szczytem. W okresach wzmożonego zapotrzebowania na elektryczność, odzyskują prąd przy użyciu turbin jak w każdej innej elektrowni wodnej. Wielka Brytania ma cztery elektrownie szczytowo-pompowe, zdolne zmagazynować 30 GWh (tabela 26.4, fot. 26.6). Zazwyczaj gromadzą energię nocą i zwracają ją w ciągu dnia, szczególnie w szczycie zapotrzebowania – to opłacalny biznes, jak pokazuje rys. 26.5. Elektrownia Dinorwig, zdumiewająca katedra wewnątrz góry w Snowdonii, pełni również rolę zabezpieczającą. Jest tak duża, że może uratować krajową sieć energetyczną w sytuacji większej awarii. W 12 sekund startuje od 0 do 1,3 GW mocy.

Dinorwig to królowa wszystkich czterech instalacji. Przyjrzyjmy się jej podstawowym charakterystykom. W Dinorwig można zmagazynować około 9 Wh. Wyższe jezioro znajduje się prawie 500 m nad niższym. Woda o objętości roboczej rzędu 7 mln m³ przepływa w tempie maksymalnym 390 m³/s, dostarczając moc rzędu 1,7 GW w 5 godzin. Sprawność tego systemu magazynowania energii wynosi 75%.

Jednoczesne włączenie wszystkich czterech elektrowni szczytowo-pompowych pozwala wygenerować 2,8 GW prądu. Można je włączyć w mgnieniu oka. Dzisiaj kompensują każde tempo zmiany w popycie lub w podaży prądu z wiatru. Niemniej jednak moc rzędu 2,8 GW nie wystarczy, by zastąpić 10 GW



Fot. 26.6. Llyn Stwlan, górny zbiornik elektrowni szczytowo-pompowej Ffestiniog w północnej Walii. Magazynowana energia: 1,3 GWh. Fot. Adrian Pingstone

lub 33 GW energii wiatrowej. A możliwości magazynowania energii (30 GWh) są tylko cieniem tego czego, potrzeba, by przetrwać wielką flautę (1200 GWh).

Polskie elektrownie szczytowo-pompowe mogą zmagazynować niecałe 10 GWh

elektrownia	moc (GW)	wysokość spadku wody (m)	objętość (milion m ³)	zmagazynowana energia (GWh)
Żarnowiec	0,68	100	13,6	3,6
Porąbka-Żar	0,50	430	2,3	2,6
Solina-Myczkowce	0,20	60	472	1,3 (50)
Czorsztyn-Niedzica	0,09	50	200	1,0 (15)
Żydowo	0,16	83	3,3	0,7
Dychów	0,09	18	3,6	0,2

Uwagi: Górny zbiornik elektrowni Solina-Myczkowce (Jezioro Solińskie) jest wykorzystywany przede wszystkim jako zbiornik retencyjny. Pojemność dolnego zbiornika w Myczkowcach pozwala na pracę elektrowni Solina z pełną mocą w ciągu 5–6 godzin, co oznacza zmagazynowanie energii 1,3 GWh. Gdyby dolny zbiornik był równie duży co górny, elektrownia szczytowo-pompowa w Solinie mogłaby magazynować energię rzędu 50 GWh.

Elektrownia Czorsztyn-Niedzica ze względu na niewielkie różnice w cenie energii w dzień i w nocy pracuje obecnie wyłącznie w trybie turbinowym. Również w tym przypadku ograniczeniem jest rozmiar dolnego zbiornika w Sromowcach. Gdyby dolny zbiornik był równie duży co górny, elektrownia szczytowo-pompowa mogłaby magazynować energię rzędu 15 GWh.

Jednoczesne włączenie wszystkich elektrowni szczytowo-pompowych pozwala wygenerować 1,7 GW prądu. Obecne możliwości magazynowania energii również są zupełnie niewystarczające.

Czy można zbudować więcej elektrowni szczytowo-pompowych? Czy dałoby się rozwiązać problem flauty tylko i wyłącznie dzięki tej technologii?

Czy możemy zmagazynować 1200 GWh?

Zależy nam na znacznie większych systemach, zdolnych zmagazynować w sumie 1200 GWh (około 130 razy tyle co Dinorwig). Potrzebujemy mocy zainstalowanej rzędu 20 GW (czyli około 10 razy tyle, co w Dinorwig). Tak oto przedstawia się sprawa elektrowni szczytowo-pompowych: potrzeba 12 nowych elektrowni, z których każda zmagazynuje 100 GWh (czyli 10 razy tyle co Dinorwig). Wyposażenie do pompowania wody i generowania prądu w każdej z tych elektrowni byłoby takie jak w Dinorwig.

Przy założeniu, że generatory mają sprawność rzędu 90%, w tabeli 26.7 pokazujemy kilka sposobów magazynowania 100 GWh, dla różnych wysokości spadku wody (reguły fizyczne leżące u podstaw tabeli dostępne są w przypisach do rozdziału).

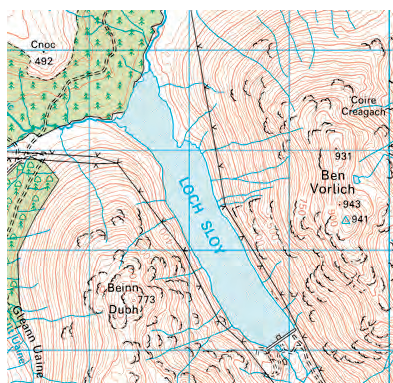
Sposoby na magazynowanie 100 GWh		
wysokość spadku wody z górnego jeziora	wymagana objętość robocza (mln m ³)	przykładowe wielkości i głębokości zbiornika
500 m	80	2 km ² × 40 m
500 m	80	4 km ² × 20 m
200 m	200	5 km ² × 40 m
200 m	200	10 km ² × 20 m
100 m	400	10 km ² × 40 m
100 m	400	20 km ² × 20 m

Czy znajdziemy 12 takich miejsc? Niewątpliwie da się zbudować jeszcze kilka takich elektrowni, jak Dinorwig w Snowdonii. W tabeli 26.8 mamy dwie alternatywne lokalizacje w pobliżu Ffestiniog. Rozważano ich budowę w latach 70., ale zdecydowano się na Dinorwig.

proponowana lokalizacja	moc (GW)	wysokość spadku wody (m)	objętość (mln m ³)	magazynowana energia (GWh)
Bowydd	2,40	250	17,7	12,0
Croesor	1,35	310	8,0	6,7

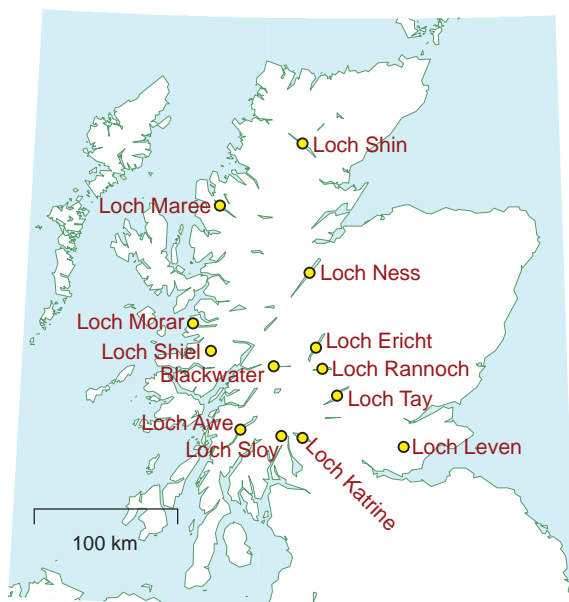
Tabela 26.7. Elektrownie szczytowo-pompowe i sposoby na zmagazynowanie 100 GWh. Komentarz do kolumny 2: objętość robocza Dinorwig wynosi 7 mln m³, a objętość Lake Windermere – 300 mln m³. Komentarz do kolumny 3: zbiornik Rutland Water ma powierzchnię 12,6 km²; Grafham Water – 7,4 km². Zbiornik Carron valley ma 3,9 km². Największym jeziorem w Wielkiej Brytanii jest Loch Lomond o powierzchni 71 km².

Tabela 26.8. Alternatywne lokalizacje dla elektrowni szczytowo-pompowych w Snowdonii. W obu przypadkach dolny zbiornik byłby sztuczny.



Rys. 26.9. Porównanie Dinorwig w Parku Narodowym Snowdonia z Loch Sloy i Loch Lomond. Górne mapy obejmują obszar 10 na 10 km. Na dolnych mapach bok kwadratu niebieskiej siatki mają długość 1 km². Mapy stworzone na podstawie serwisu Ordnance Survey's Get-a-map service www.ordnancesurvey.co.uk/getamap. Reprodukcyjne za zgodą Ordnance Survey. © Crown Copyright 2006





Rys. 26.10. Jeziora w Szkocji, gdzie dałoby się zbudować elektrownie szczytowo-pompowe.

Elektrownie szczytowo-pompowe o znacznie większych możliwościach magazynowania energii niż Dinorwig, można zbudować w Szkocji dzięki rozbudowie istniejących elektrowni wodnych. Wystarczy rzut oka na mapę Szkocji i widzimy, że jedna z możliwych instalacji używałaby jeziora Loch Sloy jako zbiornika wyższego i Loch Lomond jako niższego. Już teraz niewielka elektrownia wodna łączy te jeziora. Na rys. 26.9 w tej samej skali mamy oba te jeziora oraz jeziora Dinorwig. Różnica wysokości pomiędzy jeziorami Loch Sloy i Loch Lomond wynosi około 270 m. Sloy ma powierzchnię około 1,5 km² i już teraz może zgromadzić energię rzędu 20 GWh. Gdyby zaporę Loch Sloy podniesiono o kolejne 40 m, można by gromadzić dodatkowe 40 GWh. Poziom wody w Loch Lomond zmieniałyby się o najwyżej 0,8 m w cyklu. To mniej niż zakres normalnych rocznych zmian poziomu wody w Loch Lomond (2 m).

Rys. 26.10 wskazuje 13 potencjalnych lokalizacji elektrowni szczytowo-pompowych w Szkocji (w większości z nich już zainstalowano elektrownie wodne). Gdyby 10 z nich miało taki potencjał, jaki szacuję dla Loch Sloy, moglibyśmy gromadzić 400 GWh. To jedna trzecia 1200 GWh, których potrzebujemy.

W budowie (trwającej już od ponad 30 lat) jest jedna większa elektrownia szczytowo-pompowa Młoty o mocy 0,75 GW, umożliwiająca zmagazynowanie 1,5 GWh. To kropla w morzu potrzeb. Planując więcej elektrowni szczytowo-pompowych, moglibyśmy wykorzystać doliny górskie, podobnie jak w Solinie czy Czorsztynie – rozbudowa tylko tych dwóch zbiorników pozwoliłaby gromadzić około 65 GWh energii. Osiągnięcie 1200 GWh może być możliwe, jednak na pewno pojawiłoby się wielu oponentów wskazujących, że taki program oznaczałby przesiedlenie setek tysięcy ludzi, zatopienie wielu cennych przyrodniczo terenów, zabytków i cmentarzy, blokadę tras migracji ryb, zagrożenie zalaniem w przypadku pęknięcia tamy itp. Z drugiej strony wiele osób uważa, że górskie jeziora: Solińskie czy Czorsztyńskie – kiedy już powstały – zmieniły okolicę na lepsze, dając łagodniejszy mikroklimat, stymulując rozwój turystyki, dając możliwości wypoczynku nad wodą oraz zapewniając ochronę przeciwpowodziową.



Fot. 26.11. Elektrownia szczytowo-pompowa na Okinawie. Tu ocean służy za dolny zbiornik. Magazynowana moc: 0,2 GWh. Zdjęcie publikujemy dzięki uprzejmości J-Power. www.ieahydro.org

Możemy przeanalizować mapę Wielkiej Brytanii w poszukiwaniu innych lokalizacji. Najlepsze byłyby takie blisko wielkich farm wiatrowych. Można by jeszcze zbudować nowe sztuczne jezioro w nadbrzeżnej dolinie wiszącej, kończącej się nad morzem, z tamą u ujścia doliny. Tutaj morze służyłoby jako dolny zbiornik.

A teraz z innej beczki. Można odpuścić sobie jeziora i zbiorniki wodne i wbudować połowę instalacji w ziemię, w postaci komory podziemnej. Dyskutuje się zbudowanie komory-zbiornika kilometr pod Londynem.

Wydaje się, że budując więcej instalacji pompująco-magazynujących, możemy zwiększyć możliwości magazynowania z 30 GWh do 100 GWh, może nawet do 400 GWh. Niemniej jednak osiągnięcie całych 1200 GWh, na które liczyliśmy, wydaje się trudne. Szczęśliwie jest jeszcze jedno rozwiązanie.

Zarządzanie popytem dzięki samochodom elektrycznym

Podsumujmy nasze wymagania: chcielibyśmy magazynować (lub obejść się bez) 1200 GWh, czyli 20 kWh na osobę oraz radzić sobie z wahaniami popytu do 33 GW (czyli 0,5 kW na osobę). Liczby te są rozkosznie zbliżone w skali do energii i mocy wymaganej dla samochodów elektrycznych. W akumulatorach samochodów elektrycznych opisanych w rozdziale 20 można zgromadzić od 9 kWh do 53 kWh. Krajowa flota 30 mln samochodów elektrycznych zgromadziłaby energię bliską tym 20 kWh na osobę! Typowe ładowarki akumulatorów pobierają 2 lub 3 kW prądu. Jednoczesne włączenie 30 mln ładowarek stanowiłoby zmianę w popycie rzędu 60 GW! Gdyby cały krajowy transport miał napęd elektryczny, średnia moc wymagana do jego zasilania wynosiłaby 40 lub 50 GW. Istnieje więc bliski związek pomiędzy wprowadzeniem na rynek samochodów elektrycznych (omawianych w rozdziale 20) i podniesieniem mocy zainstalowanej w wietrze do 33 GW (przy średniej mocy rzędu 10 GW).

Oto jak można wykorzystać taki związek: samochody elektryczne można podłączyć do inteligentnych ładowarek w domu lub w pracy. Inteligentne ładowarki znałyby zarówno ceny energii elektrycznej, jak i upodobania użytkownika (np. „mój samochód musi być w pełni naładowany do godz. 7 rano w poniedziałek”). Ładowarka mądrze zaspokajałaby wymagania użytkownika, pobierając prąd, kiedy wieje i wyłączając się, kiedy nie wieje lub też kiedy rośnie zapotrzebowanie z innych źródeł. Takie inteligentne ładowarki pomagałyby równoważyć obciążenia w sieci, co mogłoby być wynagradzane finansowo.

Szczególnie pomocne byłyby akumulatory wymienne. Wyobraź sobie, że podjeżdżasz na stację paliw i wymieniasz świeżutkie akumulatory na miejsce zużytych. To stacja paliw byłaby odpowiedzialna za naładowanie akumulatorów. Mogłaby to robić w odpowiednim momencie, zwiększając lub zmniejszając ładowanie tak, by całkowity popyt i podaż zawsze były w równowadze. Używanie wymiennych akumulatorów byłoby wyjątkowo skuteczne. Miliony zapasowych akumulatorów w magazynach stacji paliw stanowiłyby dodatkowy bufor na okresy wielkiej flauty. Niektórzy powiedzą: „Niedoczekanie! Jak mógłbym powierzyć stacji paliw moje akumulatory? A co, jeśli wydadzą mi jakiś lipny?”. No cóż, równie dobrze można pytać: „A co, jeśli na stacji paliw dadzą mi benzynę chrzczoną wodą?”. Osobiście wolałbym, by o mój samochód dbali profesjonalisci, a nie taki muppet jak ja!

Podsumujmy nasze rozwiązania. Możemy bilansować zmieniający się popyt i popyt, włączając lub wyłączając *generatory* energii (np. spalarnie odpadów

i elektrownie wodne), *gromadząc* gdzieś energię i odzyskując ją, kiedy zachodzi potrzeba lub też włączając i wyłączając zużycie.

Możliwości największej skali daje zarządzanie zapotrzebowaniem na prąd przy ładowaniu akumulatorów samochodów elektrycznych. Wykorzystanie do magazynowania energii 30 mln samochodów, każdy z akumulatorami o pojemności 40 kWh (z czego niektóre mogłyby być wymienne i dystrybuowane na stacjach paliw), daje w sumie 1200 GWh. Gdyby jeszcze zelektryfikować transport towarowy, całkowite możliwości magazynowania energii byłyby jeszcze większe.

Istnieje więc piękne powiązanie między energią wiatrową a samochodami elektrycznymi. Gdybyśmy rozwijali flotę samochodów elektrycznych równoległe z rozwojem energetyki wiatrowej (około 3000 nowych samochodów na każdą turbinę o mocy 3 MW) i gdybyśmy wprowadzili inteligentny system ładowania tych samochodów, taka synergia znacznie złagodziłaby problem fluktuacji wiatru. Jeśli myśleć o do samochodów napędzanych wodorem i staną się one niskoenergetycznymi pojazdami przyszłości, wówczas związek wiatr-samochody elektryczne można by zastąpić parą wiatr-samochód na wodór. Turbiny wiatrowe generowałyby prąd. W okresach nadwyżek energii można by produkować wodór i gromadzić go w zbiornikach, do użytku w samochodach lub na przykład w produkcji szkła.

Inne pomysły z zakresu zarządzania popytem i magazynowania

Istnieje kilka innych możliwości zarządzania popytem oraz gromadzenia energii.

Pomysł, żeby tempo produkcji dóbr dostosować do mocy generowanej z odnawialnych źródeł, nie jest nowy. Wiele fabryk aluminium usytuowano blisko elektrowni wodnych. Im więcej deszczu, tym większa produkcja aluminium. Jeżeli prąd służy do produkcji dóbr, które da się zmagazynować, można myśleć o inteligentnym włączaniu i wyłączaniu zapotrzebowania na energię. Na przykład systemy odwróconej osmozy (które odsalają wodę morską – patrz str. 99) konsumują w wielu krajach duże ilości energii (aczkolwiek nie w Wielkiej Brytanii). Innym produktem, który da się magazynować, jest ciepło. Jeżeli zelektryfikujemy systemy ogrzewania i klimatyzację w budynkach, jak sugerowano w rozdziale 21 (a szczególnie podgrzewanie wody i ogrzewanie pomieszczeń), podłączamy do sieci wiele prądożernych urządzeń z wygodnym pstryczkiem. Dobrze ocieplone budynki trzymają ciepło przez wiele godzin, można więc je grzać w dogodnym momencie. Co więcej, w budynkach można by umieścić wielkie zbiorniki termiczne i wprowadzać lub też wyprowadzać z nich ciepło za pomocą pomp ciepła w okresie nadwyżek prądu. Następnie za pomocą drugiego zestawu pomp ciepło lub chłód byłyby dostarczane do miejsc, które trzeba ogrzać lub ochłodzić.

Automatyczna kontrola zapotrzebowania na prąd to pestka. Najprostszym sposobem byłoby projektowanie urządzeń takich, jak lodówki i zamrażarki, które wsłuchują się w częstotliwości sieci elektrycznej. Kiedy w sieci brakuje mocy, częstotliwość spada poniżej standardowych 50 Hz, przy nadmiarze mocy częstotliwość wzrasta powyżej 50 Hz (to tak jak z dynamem w rowerze – kiedy włączasz światło, musisz mocniej naciskać pedał, by dostarczyć dodatkowej mocy, jeżeli tego nie zrobisz, rower zwolni). Lodówki można tak zaprojektować, by regulowały swój wewnętrzny termostat nieco w górę lub nieco w dół,

w odpowiedzi na zmiany w częstotliwości w sieci. W ten sposób mogą pobierać prąd wtedy, kiedy pomagają to sieci, nigdy jednak kosztem temperatury Twojego masła.

Czy zarządzanie popytem może stanowić istotny wkład w nasz wirtualny magazyn energii? Jak dużo prądu wysysają wszystkie nasze lodówki? Przeciętna lodówka pobiera około 18 W. Załóżmy, że w Wielkiej Brytanii jest ich 30 mln. Gdybyśmy wyłączyli na kilka minut wszystkie nasze lodówki, mielibyśmy 0,54 GW mocy, którą da się automatycznie regulować. To całkiem dużo – ponad 1% krajowego zużycia i mniej więcej tyle, ile wynoszą nagłe skoki poboru mocy, kiedy wszyscy włączają czajniki elektryczne, zjednoczeni doświadczeniem religijnym, jakim jest kolejny odcinek tasiemca *EastEnders*. Takie „zwyżki telewizyjne” przekładają się zazwyczaj na skoki popytu rzędu 0,6–0,8 GW. Automataczne wyłączenie wszystkich lodówek niemalże skompensowałoby te dzienne skoki, związane z masowym nastawianiem czajników. Inteligentne lodówki pomogłyby również rozprasować krótkotrwałe fluktuacje energii wiatrowej. Zwyczajki telewizyjne związane z najświętszymi wydarzeniami (np. mecz Wielka Brytania – Szwecja) mogą przekładać się na skoki zapotrzebowania o ponad 2 GW. W takich momentach popyt i podaż bilansuje się poprzez uruchomienie pełnej mocy Dinorwig.

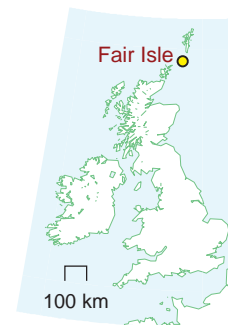
By ułatwić pracę energetykom, nieodmiennie równoważącym popyt i podaż poprzez zmniejszanie i zwiększanie produkcji w elektrowniach, wielu przemysłowych odbiorców energii funkcjonuje w ramach kontraktów, które pozwalają energetykom na odłączenie dostaw prądu z niewielkim wyprzedzeniem. W RPA (gdzie niedobory energii elektrycznej są nader częste) w setkach tysięcy domów zainstalowano sterowane radiowo systemy zarządzania popytem, kontrolujące klimatyzację i bojler elektryczne.

Rozwiązanie duńskie

A oto, jak Dania radzi sobie z niestabilnością produkcji energii z wiatru. Duńczycy *de facto* płacą sąsiadom za możliwość magazynowania energii w ich elektrowniach wodnych. Niemalże cała duńska energia z wiatru jest eksportowana do innych europejskich krajów. Niektóre z nich mają elektrownie wodne, które mogą wyłączać w celu zbilansowania energii. Zaoszczędzoną energię z wody odsprzedają Duńczykom (po wyższej cenie) podczas kolejnego okresu flauty i wysokiego zapotrzebowania. Razem wzięwszy, duński wiatr dostarcza dużo energii, a system jako całość zyskuje stabilność dzięki możliwościom energetyki wodnej.

Czy rozwiązanie duńskie przyjęłoby się w Wielkiej Brytanii? Potrzebowalibyśmy bezpośrednich połączeń o dużej zdolności przesyłowej do krajów dysponujących dużą liczbą elektrowni wodnych z pstryczkiem. Lub też dużego połączenia z ogólnoeuropejską siecią elektroenergetyczną.

Norwegia ma 27,5 GW mocy zainstalowanej w energetyce wodnej, Szwecja – około 16 GW, Islandia – 1,8 GW. W 2003 roku rozważano budowę interkonektora wysokiego napięcia prądu stałego do Szwecji, o zdolności przesyłowej 1,2 GW. Pomysł zarzucono. W 2010 roku zostanie zbudowane połączenie z Holandią – interkonektor BritNed, o zdolności przesyłowej 1 GW. Dania dysponuje 3,1 GW mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej, połączeniem z Norwegią o zdolności przesyłowej 1 GW, połączeniem ze Szwecją o zdolności przesyłowej 0,6 GW i 1,2 GW z Niemcami. Daje to całkowitą zdolność eksportową 2,8 GW, zbliżoną do mocy zainstalowanej w wietrze. By eksportować całą nadwyżkę prądu z wiatru na duńską modłę, Wielka Brytania (przy założeniu



PRODUKCJA	ZUŻYCIE
Wiatr: 4,1	Ogrzewanie: 2,5
Diesel: 1,8	Inne: 2,9

Rys. 26.12. Podaż i popyt energii elektrycznej na Fair Isle, lata 1995–96. Wszystkie wartości podane w kWh na osobę dziennie. Produkcja przewyższa zapotrzebowanie, więc 0,6 kWh na osobę dziennie poszło na straty.

mocy zainstalowanej w wietrze 33 GW) potrzebowałyby połączeń o zdolności przesyłowej 10 GW do Norwegii, 8 GW do Szwecji i 1 GW na Islandię.

Pamiętajmy jednak, że lawinowe inwestowanie w energetykę wiatrową w regionie wyczerpie możliwości magazynowania energii w wodach skandynawskich gór i fiordów. Konkurowanie o moce magazynujące podniesie zyski elektrowni wodnych Norwegii i Szwecji, nie rozwiąże jednak dylematu, co zrobić z nadprodukcją energii z coraz powszechniejszych europejskich farm wiatrowych.

To może dwie sieci?

Radykalnym rozwiązaniem byłoby wydzielenie dla energetyki wiatrowej i innych niestabilnych źródeł energii *drugiej* sieci, która zasilalaby te systemy, które nie potrzebują stabilnej podaży prądu, takich jak ogrzewanie i ładowanie akumulatorów pojazdów elektrycznych. Od roku 1982, czyli od ponad 25 lat szkocka wyspa Fair Isle (70 mieszkańców, powierzchnia 5,6 km²) ma dwie sieci energetyczne, które przesyłają energię z dwóch turbin wiatrowych i, w razie konieczności, z generatora zasilanego dieslem. Prąd dostarczany jest przez jedną z sieci, a tylko w przypadku ogrzewania elektrycznego – przez drugi zestaw kabli. Głównym źródłem ogrzewania elektrycznego jest nadwyżka prądu z turbin wiatrowych, z którą i tak nic nie da się zrobić. Zdalnie sterowane przekaźniki z możliwością programowania reagujące na zmiany częstotliwości kontrolują każdy bojler i piec akumulacyjny w budynkach. Częstotliwość sieci informuje bojler, kiedy powinny się włączyć. W rzeczywistości, na jedno gospodarstwo domowe przypada nawet 6 kanałów częstotliwości, czyli system emuluje siedem sieci. Na Fair Isle z sukcesem wypróbowano system kinetycznego magazynowania energii (koło zamachowe) do gromadzenia energii, dla 20-sekundowych fluktuacji siły wiatru.

Pojazdy elektryczne w roli generatorów prądu

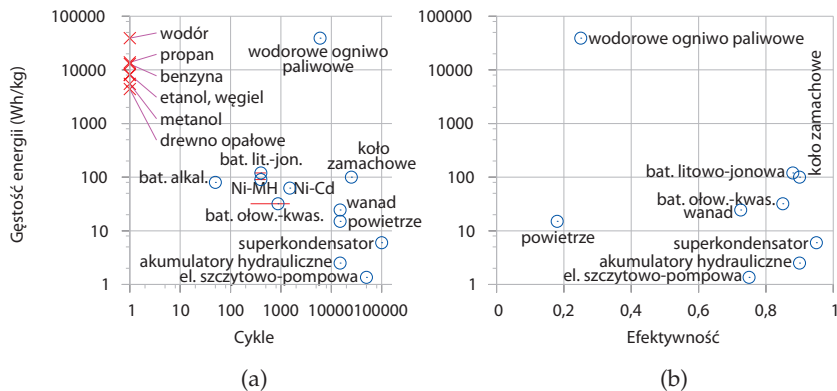
Gdyby w okresach niedoboru prądu akumulatory 30 milionów samochodów elektrycznych działały na odwrót, zwracając prąd do sieci, wówczas przy 2 kW na samochód mielibyśmy potencjalne źródło energii o mocy 60 GW – zbliżonej do mocy zainstalowanej we wszystkich elektrowniach w kraju. Gdyby tylko 1/3 tych samochodów była podłączona jednocześnie, wciąż dawałoby to potencjał rzędu 20 GW mocy. Gdyby każdy z tych samochodów w wypadku kryzysu zwrócił do sieci 2 kWh energii (co odpowiada może 20% pojemności akumulatora), wówczas całkowita energia dostarczona przez flotę samochodową wyniosłaby 20 GWh. To dwa razy więcej niż oferuje elektrownia szczytowo-pompowa Dinorwig.

Inne technologie magazynowania energii

Jest cały wachlarz sposobów gromadzenia energii i wiele kryteriów ich oceny. Rys. 26.13 ilustruje trzy najważniejsze kryteria: gęstość energetyczną (ile energii można zgromadzić na kilogram systemu magazynującego), sprawność (ile energii otrzymujemy na jednostkę energii użytej) i żywotność (na ile cykli gromadzenia energii można liczyć, zanim system będzie wymagał naprawy). Inne istotne kryteria to: maksymalne tempo, w jakim energię można wpompować do systemu i wypompować z niego (często wyrażane w mocy na kg), możliwy okres magazynowania i oczywiście koszt i bezpieczeństwo systemu.

Koła zamachowe

Fot. 26.15. pokazuje monstrualne koło zamachowe, dostarczające szybkich porcji mocy do 0,4 GW, zasilające pewną eksperymentalną instalację. Koło waży 800 t. Wirując z prędkością 225 obrotów na minutę, może zgromadzić 1000 kWh, a jego gęstość energetyczna wynosi około 1 Wh na kg.



Paliwo	wartość kaloryczna	
	(kWh/kg)	(MJ/l)
propan	13,8	25,4
benzyna	13,0	34,7
olej napędowy (diesel)	12,7	37,9
kerozyna (nafta lotnicza)	12,8	37
olej opałowy	12,8	37,3
etanol	8,2	23,4
metanol	5,5	18,0
bioetanol		21,6
węgiel	8,0	
drewno opałowe	4,4	
wodór	39,0	
gaz ziemny	14,85	0,04

(a)

Tabela 26.14. (a) Wartości kaloryczne (gęstości energetyczne na kilogram i na litr) niektórych paliw (w kWh na kg i MJ na litr). (b) Gęstość energetyczna niektórych akumulatorów (w Wh na kg). 1 kWh = 1000Wh

typ baterii	gęstość energetyczna (Wh/kg)	żywotność (cykle)
niklowo-kadmowa	45 – 80	1500
niklowo-metalowo-wodorowa (NiMH)	60 – 120	300 – 500
ołowiowo-kwasowa	30 – 50	200 – 300
litowo-jonowa	110 – 160	300 – 500
polimerowa litowo-jonowa	100 – 130	300 – 500
ładowana alkaliczna	80	50

(b)



Fot. 26.15. Jedno z dwóch kół zamachowych w zakładzie badań nad syntezą jądrową w Culham (w budowie).

Fot. EFDA-JET www.jet.efda.org

Rys. 26.13. Niektóre właściwości systemów magazynowania energii i paliw.

(a) Gęstość energetyczna (w skali logarytmicznej) w stosunku do żywotności (liczba cykli). (b) Gęstość energetyczna versus sprawność. Gęstości energetyczne nie obejmują ciężaru zbiorników, za wyjątkiem „powietrza” (magazynowanie za pomocą sprężonego powietrza). Biorąc pod uwagę masę kriogenicznej butli do przechowywania wodoru, gęstość energetyczna wodoru spada z 39 000 Wh/kg do około 2400 Wh/kg.

System akumulowania energii w samochodzie rajdowym, oparty na kole zamachowym, może zgromadzić 400 kJ (0,1 kWh) energii, a waży 24 kg (str. 126). Daje to gęstość energetyczną rzędu 4,6 Wh na kg.

Wysokoobrotowe koła zamachowe z kompozytu mają gęstość energetyczną do 100 Wh/kg.

Superkondensatory

Superkondensatorów używa się do gromadzenia niewielkich ilości energii elektrycznej (do 1 kWh), tam gdzie konieczne jest wiele cykli działania, a ładowanie musi być sprawne i szybkie. Superkondensatory sprawdzają się lepiej niż akumulatory na przykład w hamowaniu odzyskowym w pojazdach, które często stają i ruszają. Można kupić superkondensatory o gęstości energetycznej 6 Wh/kg.

Amerykańska firma EESstor twierdzi, że potrafi produkować znacznie lepsze kondensatory, przy użyciu tytanianu baru, o gęstości energetycznej 280 Wh/kg.

Wanadowe akumulatory przepływowe (vanadium redox battery – VRB)

Systemy VRB umożliwiają zmagazynowanie 12 MWh energii na irlandzkiej farmie wiatrowej Sorne Hill o mocy „32 MW” i mocy maksymalnej „39 MW”. Ten system akumulacyjny to wielki „akumulator przepływowy”, regeneratywne ogniwo paliwowe redoks [jest to reakcja chemiczna, w której dochodzi zarówno do redukcji, jak i utleniania – *red.*] z kilkoma zbiornikami wanadu w różnych stanach skupienia. System akumulacyjny może złagodzić wahania produkcji farmy wiatrowej na przestrzeni minut. Niestety w okresie flauty, dając 1/3 mocy maksymalnej, magazyn wyczerpie się w godzinę.

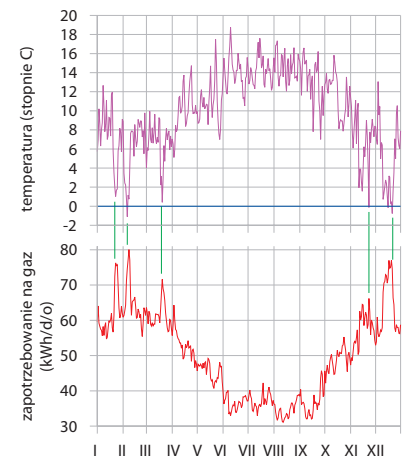
System wanadowy o pojemności 1,5 MWh, kosztujący 480 000 USD, zajmuje 70 m² i waży 107 ton. Akumulator VRB ma żywotność ponad 10 000 cykli. Ładuje i rozładowanie zajmuje tyle samo czasu (w przeciwieństwie do akumulatorów ołowiowo-kwasowych, które ładuje się 5 razy wolniej niż się rozładowuje). Sprawność konwersji energii w obie strony wynosi 70–75%. Objętość konieczna do zgromadzenia 20 kWh (czyli 20 Wh/kg) wynosi 1 m³ dwumolekowego wanadu w kwasie siarkowym.

Zmagazynowanie 10 GWh energii wymagałoby 500 000 m³. To 170 basenów pływackich lub głębokie na 2 metry zbiorniki pokrywające powierzchnię 500 na 500 m.

Budowa większej liczby systemów VRB, by sprostać wyzwaniu zmagazynowania 10 GWh, miałaby znaczący wpływ na światowy rynek wanadu, ale w dłuższej perspektywie nie będzie niedoborów. Obecna globalna produkcja wanadu wynosi 40 000 ton rocznie. System o pojemności 10 GWh zawierałby 36 000 ton wanadu, co z grubszą odpowiada dzisiejszej rocznej produkcji. Wanad jest obecnie produktem ubocznym innych procesów, a całkowite światowe zasoby szacowane są na 63 mln ton.

Rozwiązania „oszczędnościowe”

W dzisiejszym świecie, gdzie z zanieczyszczeniem CO₂ nie wiążą się żadne koszty, poprzeczkę finansową związaną z gromadzeniem energii łatwo zignorować – wystarczy zbudować kolejną elektrownię na gaz, która zaspokoi dodatkowe zapotrzebowanie na prąd albo pozbyć się nadwyżek prądu, trwoniąc go w grzejnikach.



Rys. 26.16. Zapotrzebowanie na gaz (dolny wykres) oraz temperatury (górny wykres) w Wielkiej Brytanii w 2007 roku

Fluktuacje sezonowe

Najdłużej trwające zmiany w popycie i podaży wiążą się z porami roku. Najważniejsza fluktuacja dotyczy ogrzewania budynków, które zwiększa się każdej zimy. Obecnie popyt na gaz w Wielkiej Brytanii zmienia się na prze 2 kWh na osobę dziennie od grudnia do lutego przy wartościach ekstremalnych 30–80 kWh na osobę dziennie (rys. 26.16).

Niektóre źródła odnawialne również doświadczają fluktuacji związanych z porami roku – na przykład latem słońce świeci mocniej, a wiatr jest słabszy.

Jak prześliznąć się przez te długotrwałe fluktuacje? Pojazdy elektryczne i elektrownie szczytowo-pompowe nie zgromadzą potrzebnych ilości energii. Na pewno mielibyśmy spory pożytek z długookresowego magazynowania energii w postaci ciepła. Wielka skała lub cysterna z wodą jest w stanie zgromadzić ciepło dla pojedynczego budynku na całą zimę – kwestię tę rozważamy bardziej szczegółowo w rozdziale E. W Holandii latem ciepło powierzchni dróg jest gromadzone na zimę w zbiornikach wodnych, a następnie dostarczane do budynków za pomocą pomp ciepła. [2wmuw7].

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

196 Całkowita produkcja sektora energetyki wiatrowej w Irlandii.

– Źródło: eirgrid.com [2hxf6c].

– „Słaby wiatr przyczyną problemów sieci energetycznej w Teksasie”. [2l99ht]. Oto jak ja interpretowałbym tę informację: to wydarzenie, aczkolwiek rzadkie, mieści się w granicach normalnego działania sieci. Do sieci przyłączeni są klienci przemysłowi, którym można odciąć dostawy, kiedy popyt przewyższa podaż. Produkcja z wiatru spadła o 1,4 GW, a w tym samym czasie zapotrzebowanie Teksaszczyków wzrosło o 4,4 GW, powodując taki właśnie rozróż między podażą a popytem. Odcięto te dostawy, które można było odciąć, zgodnie z założeniami obsługi takich sytuacji.

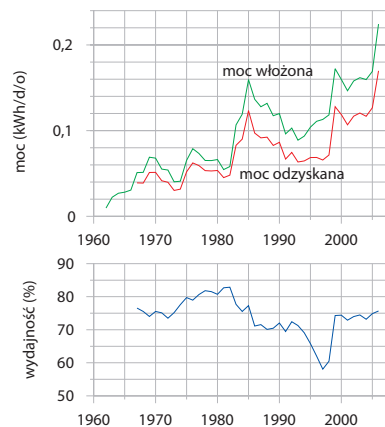
A oto inna sytuacja, w której przydałby się lepszy system planowania energetycznego: „Produkcja energii z wiatru w Hiszpanii bije rekordy, zarządzono cięciem”. [3x2kw]. Przeciętne całkowite zużycie energii elektrycznej w Hiszpanii wynosi 31 GW. W czwartek 4 marca 2008 roku generatory wiatrowe dostarczały 10 GW. „Hiszpański rynek energii stał się szczególnie wrażliwy na fluktuacje wiatru”.

– Zwolennicy energii wiatrowej umniejszają wagę problemu, twierdząc: „Spokojnie. Pojedyncze farmy wiatrowe może nie zapewniają stabilnej produkcji, ale wszystkie farmy wiatrowe w sumie dają znacznie większą stabilność”. Po przykłady odsyłam na stronę yes2wind.com, na której „obala się mit, że nie można polegać na energii wiatrowej” i zakłada się, że „zmiennosc produkcji energii z farm wiatrowych rozsianych w całym kraju jest prawie niezauważalna”. www.yes2wind.com/intermittency_debunk.html

– ... produkcja nie jest stabilna, nawet jeżeli zbierzemy wiele turbin pokrywających cały kraj. Wielka Brytania jest nieco większa niż Irlandia, ale problem jest ten sam. – Źródło: Oswald i in. (2008).

200 Sprawność systemu magazynowania energii w Dinorwig wynosi 75%. Dane na ten temat znajdziemy na rys. 26.17. Więcej informacji na temat Dinorwig i alternatywnych lokalizacji dla elektrowni szczytowo-pompowych w: Baines i in. (1983, 1986).

202 Rys. 26.7. Wymagana objętość robocza (V) została obliczona na podstawie wysokości spadku wody pomiędzy zbiornikami (h) w następujący sposób: jeżeli ϵ oznacza sprawność konwersji energii potencjalnej na prąd, wówczas



Rys. 26.17. Sprawność czterech elektrowni szczytowo-pompowych w Wielkiej Brytanii

$$V = 100 \text{ GWh}/(\rho g h \epsilon)$$

gdzie ρ określa gęstość wody, g to przyspieszenie ziemskie. Założyłem, że generatory mają sprawność $\epsilon = 0,9$.

- 202 Tabela 26.8. Alternatywne lokalizacje dla elektrowni szczytowo-pompowych. Jako górny zbiornik dla Bowydd proponowano Llyn Newydd, współrzędne SH 722 470; dla Croesor – Llyn Cwm-y-Foel, SH 653 466.
- 203 Gdyby 10 szkokkich elektrowni szczytowo-pompowych miało taki potencjał, jak Loch Sloy, moglibyśmy gromadzić 400 GWh. Te przybliżone szacunki oparte są na opracowaniu Strathclyde University [5o2x9u], które wymienia 14 lokalizacji o potencjale magazynowania 514 GWh.
- 205 Lodówki można tak zaprojektować, by regulowały swój wewnętrzny termostat nieco w górę lub nieco w dół, w odpowiedzi na zmiany częstotliwości w sieci. [2n3pmb]. Więcej na stronach: Dynamic Demand, www.dynamicdemand.co.uk; www.rltec.com; www.responsiveload.com
- W RPA (...) zainstalowano sterowane radiowo systemy zarządzania popytem. – Źródło: [2k8h4o].
 - Niemal cała duńska energia z wiatru jest eksportowana do innych europejskich krajów. – Źródło: Sharman (2005).
- 207 Od roku 1982, czyli od ponad 25 lat, szkokka wyspa Fair Isle ma dwie sieci energetyczne. www.fairisle.org.uk/FIECo/
Prędkość wiatru zazwyczaj waha się między 3 m/s i 16 m/s; najczęściej jest to 7 m/s.
- 208 Rys. 26.13. Sprawności magazynowania. Akumulatory litowo-jonowe: sprawność 88%. – Źródło: www.national.com/appinfo/power/files/swcap_eet.pdf
Akumulatory ołowioowo-kwasowe: 85–95%.
– Źródło: www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm
Magazynowanie przy użyciu sprężonego powietrza: sprawność 18%.
– Źródło: Lemofouet-Gatsi i Rufer (2005); Lemofouet-Gatsi (2006). Również Denholm i in. (2005).
Powietrze/olej: akumulatory hydrauliczne, wykorzystywane do hamowania odzyskowego w ciężarówkach, to instalacje na sprężone powietrze o sprawności nawet 90% (w obie strony), które pozwalają odzyskać 70% energii kinetycznej. Źródła: Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27].
- Tabela 26.14. – Źródła: Xtronics xtronics.com/reference/energy_density.htm; Battery University [2sxlyj]; informacja na temat koła zamachowego pochodzi z: Ruddell (2003).
Najnowsze akumulatory o największej gęstości energetycznej to akumulatory litowo-siarkowe i litowo-siarczkowe, o gęstości energetycznej 300 Wh/kg.
Niektórzy rozczarowani zwolennicy wodoru zdają się wspinać po tablicy Mendelejewa i optują za borem. Bor (założywszy, że spalamy go do B_2O_3) ma gęstość energetyczną 15 000Wh na kg, a to świetnie i dużo. Obawiam się jednak, że moje główne zastrzeżenia co do wodoru i tutaj znajdują zastosowanie: produkcja paliwa (tutaj boru z tlenku boru) może być nieefektywna energetycznie, podobnie jak proces spalania.
- 209 Wanadowe akumulatory przepływowe. – Źródła: www.vrbpower.com; irlandzka farma wiatrowa [ktd7a]; szybkość ładowania [627ced]; globalna produkcja [5fasl7].
- 210 ... latem ciepło powierzchni dróg jest gromadzone w zbiornikach wodnych... [2wmuw7].



Fot. 26.18. Potencjalna lokalizacja kolejnej elektrowni szczytowo-pompowej o mocy 7 GWh. Dolina Croesor znajduje się w centrum, między ostrym szczytem (Cnicht) po lewej i szerszymi szczytami (The Moelwyns) po prawej.

27 Pięć planów energetycznych

Jeżeli chcemy uniezależnić się od paliw kopalnych, potrzebujemy radykalnego planu działań. I plan ten musi stanowić logiczną i sensowną całość. Będzie również potrzebował politycznej i finansowej mapy drogowej. Ani polityka, ani ekonomia nie znajdują się w sferze zainteresowań tej krótkiej książki, ograniczę się więc do omówienia technicznej strony takiego spójnego planu.

Istnieje wiele planów, które składają się w spójną całość. W tym rozdziale omówię pięć z nich. Żadnego z tych scenariuszy nie należy traktować jako rozwiązania rekomendowanego przez autora. Moja jedyna rekomendacja brzmi:

Dopilnujcie, by Wasze polityki opierały się na spójnym scenariuszu!

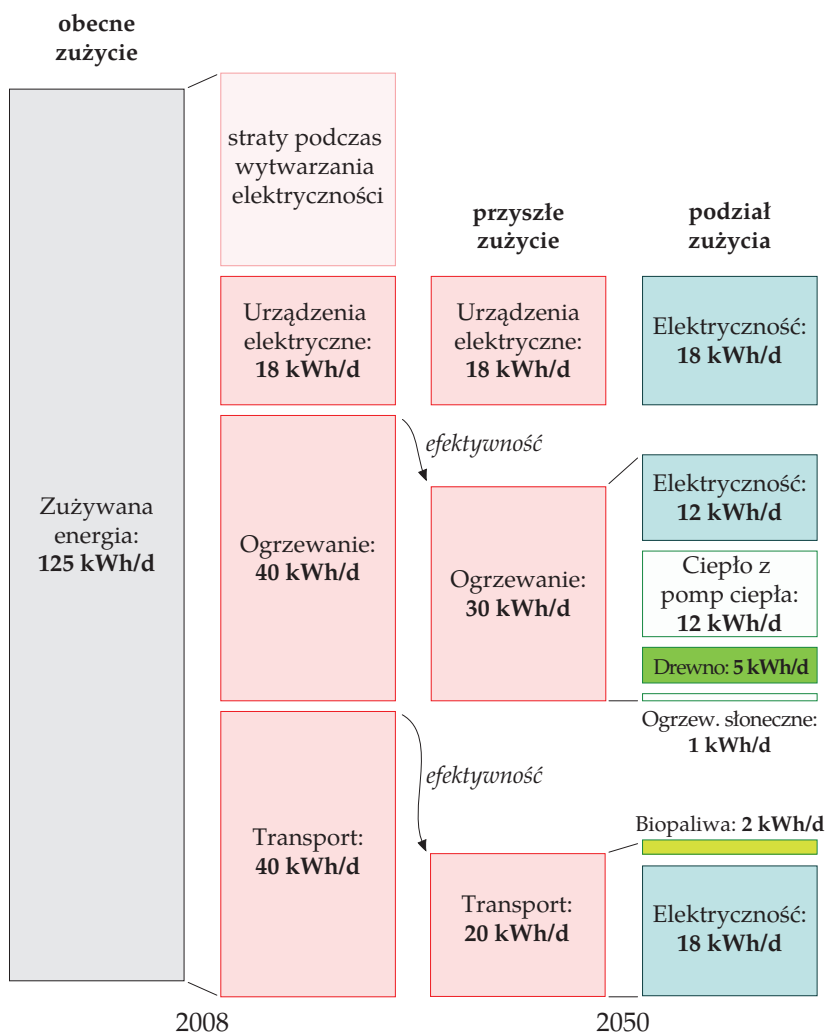
Każdy plan składa się z części dotyczącej popytu i podaży – musimy określić, ile energii będzie zużywał nasz kraj i jak tę energię wyprodukować. By uniknąć wielostronicowych elaboratów, znów posłużę się modelową Brytanią, gdzie energię zużywamy tylko na trzy sposoby: w transporcie, ogrzewaniu i jako elektryczność. To drastyczne uproszczenie pomijające przemysł, rolnictwo, produkcję żywności, import itd. Może to być jednak pomocne, bo umożliwi nam szybkie porównanie i skontrastowanie alternatywnych scenariuszy. Będziemy kiedyś potrzebowali bardziej szczegółowego planu, jednak dzisiaj meta jest jeszcze tak odległa, że prosty model wydaje się najlepszym sposobem wychwycenia istotnych zagadnień.

Zaprezentuję kilka planów, które uważam za technicznie wykonalne w Wielkiej Brytanii do roku 2050. Wszystkie będą miały to samo założenie odnośnie konsumpcji. Podkreślam, nie oznacza to, że uważam ten plan konsumpcji za prawidłowy lub jedyny słuszny. Chcę tylko oszczędzić Ci mnożenia scenariuszy. Po stronie produkcji opiszę kilka rozwiązań o różnym udziale odnawialnych źródeł energii, „czystego” węgla i atomu.

Obecna sytuacja

Oto, jak wygląda dziś sytuacja w modelowej Brytanii. W transporcie (zarówno ludzi, jak i towarów) zużywa się 40 kWh na osobę dziennie. Większość tej energii jest konsumowana w postaci benzyny, diesla lub nafty lotniczej. Ogrzanie pomieszczeń i wody pochłania 40 kWh na osobę dziennie. Dziś duża część tej energii pochodzi z gazu. Podaż energii elektrycznej sumuje się do 18 kWh/d/o, a opiera się na paliwach o wartości energetycznej 45 kWh/d/o (głównie węgiel, gaz i atom). Pozostałe 27 kWh/d/o ulatuje wieżą chłodniczą (25 kWh/d/o) i jest tracone w przesyłce siecią rozdzielczą (2 kWh/d/o). Całkowity wkład energetyczny do dzisiejszej modelowej Brytanii wynosi zatem 125 kWh/d/o.

Wiedząc, że Polacy aspirują do zachodniego sposobu życia, a także aby nie mnożyć scenariuszy, założymy, że planujemy podobne zużycie energii jak w Wielkiej Brytanii.



Rys. 27.1. Obecne zużycie energii na osobę w modelowej Brytanii 2008 (dwie lewe kolumny) i plan konsumpcji na przyszłość z prognozowanym rozbiem na poszczególne paliwa (dwie prawe kolumny). W tym planie zakładamy, że podaż energii elektrycznej wzrośnie z 18 do 48 kWh/o dziennie. UWAGA: dla Polski biopaliwa 6 kWh/d/o, a więc mniej elektryczności w transporcie.

Cechy wspólne wszystkich pięciu planów

W mojej modelowej Brytanii przyszłości zużycie energii spadnie dzięki zastosowaniu w transporcie i ogrzewaniu technologii bardziej efektywnych energetycznie.

We wszystkich pięciu scenariuszach transport jest w dużym stopniu zelektryfikowany. Silniki elektryczne mają większą sprawność niż benzynowe, maleje więc zapotrzebowanie na energię. Transport publiczny (w przeważającej mierze napędzany prądem) jest lepiej zintegrowany, lepiej zarządzany i bardziej odpowiada potrzebom użytkowników. Zakładam, że elektryfikacja da nam transport blisko cztery razy bardziej efektywny energetycznie i że wzrost gospodarczy pozre część tych oszczędności. Rezultatem netto będzie więc obniżenie konsumpcji energii w transporcie o połowę. Jest kilka ważnych typów pojazdów, których nie da się przerobić na prąd i na ich potrzeby produkujemy nasze własne paliwa płynne (np. biodiesel, biometanol lub bioetanol z celulozy). W transporcie zużywamy 18 kWh/d/o prądu

i kWh/d/o paliw płynnych. Akumulatory pojazdów elektrycznych służą do magazynowania energii, „wygładzając” wahania w popycie i podaży prądu. Na potrzeby produkcji biopaliw przeznaczamy około 12% powierzchni Wielkiej Brytanii (500 m² na osobę), przy założeniu, że produkcja biopaliw opiera się na roślinach o sprawności fotosyntezy 1% i że konwersja rośliny w paliwo odbywa się ze sprawnością 33%. Opcjonalnie, biopaliwa można importować, o ile potrafimy przekonać inne kraje, by na produkcję biopaliw na nasze potrzeby przeznaczyły areał rozmiaru Walii.

We wszystkich pięciu planach zużycie energii na ogrzewanie spada, z uwagi na lepsze ocieplenie wszystkich budynków i lepszą kontrolę temperatur (dzięki termostatom, edukacji i promocji ciepłych sweterków noszonych przez seksownych celebrytów). Nowe budynki (czyli wszystkie zbudowane po 2010 roku) są rzeczywiście bardzo dobrze izolowane i praktycznie nie potrzebują ogrzewania. Stare budynki (które wciąż będą stanowić większość w 2050 roku) są ogrzewane głównie przez powietrzne i gruntowe pompy ciepła. Część wody podgrzewana jest za pomocą kolektorów słonecznych (2,5 metra kwadratowego na każdym domu), część prądem, a część pompami ciepła. Niektóre budynki, usytuowane w pobliżu dobrze zarządzanych lasów i plantacji roślin energetycznych są ogrzewane biomasą. W ten sposób zużycie energii na ogrzewanie spada z 40 kWh/d/o do 12 kWh/d/o z prądu, 1 kWh/d/o z kolektorów słonecznych oraz 5 kWh/d/o z drewna.

Drewno do ogrzewania (lub też kogeneracji) pochodzi z pobliskich lasów i plantacji roślin energetycznych (być może miskant, brzoza lub wierzba) pokrywających obszar 30 000 km² (500 m² na osobę). Odpowiada to 18% gruntów rolnych Wielkiej Brytanii o powierzchni 2800 m² na osobę. Rośliny energetyczne uprawia się głównie na glebach niższej klasy, zostawiając lepsze gleby do produkcji żywności. Każde 500 m² roślin energetycznych dostarcza rocznie 0,5 tony suchej masy o wartości energetycznej około 7 kWh dziennie; z tego blisko 30% jest tracone w procesie produkcji i przesyłu ciepła. Ostatecznie do odbiorców trafia 5 kWh/osobę dziennie.

W moich scenariuszach zakładam, że zużycie **prądu** na sprzęt, oświetlenie i inne tego typu sprzęty utrzyma się na dzisiejszym poziomie. A zatem wciąż potrzebujemy 18 kWh na osobę prądu dziennie. Owszem, efektywność energetyczna oświetlenia ulega poprawie dzięki powszechnemu przejściu na diody świecące (LED). Gadzety też będą pożerać mniej prądu. Niestety, dzięki błogosławieństwu wzrostu gospodarczego gadżetów kupimy więcej – choćby systemy do wideokonferencji, które ograniczą konieczność podróżowania.

Całkowite zużycie prądu w tym scenariuszu rośnie (transport elektryczny zużywa 18 kWh na osobę dziennie, a pompy ciepła 12 kWh na osobę dziennie) do 48 kWh na osobę dziennie (lub też 120 GW w skali kraju). Zużycie energii elektrycznej w Wielkiej Brytanii niemal się potraja. Skąd weźmiemy całą tę energię?

Zakładamy, że Polak podobnie jak Brytyjczyk będzie potrzebował 18 kWh/d/o prądu do zasilanie urządzeń elektrycznych oraz kolejne 18 kWh/d/o prądu na transport.

Tak jak Wyspiarze, na ogrzewanie spożytkujemy 30 kWh/d/o. Pozyskamy je jednak inaczej. Brytyjskie 30 kWh/d/o David zapewnia za pomocą 5 kWh/d/o ze spalania drewna, 1 kWh/d/o z solarów oraz 24 kWh/d/o z pomp ciepła o sprawności CoP=2 (12 kWh/d/o prądu zmieniającego się

w ciepło oraz 12 kWh/d/o ciepła pozyskanego za pomocą pompy). W Polsce mamy rozwinięte sieci ciepłownicze umożliwiające kogeneracyjne wytwarzanie ciepła w elektrowniach (węglowych, jądrowych, opalanych biomasą i in.) i lepsze warunki do wykorzystania ciepła geotermicznego. Dysponujemy też większą ilością biomasy na potrzeby kotłów grzewczych. Wykorzystanie ciepła z tych źródeł skutkuje mniejszym niż w Wielkiej Brytanii zapotrzebowaniem na prąd w ogrzewaniu – wystarczy nam na to 6 kWh/d/o.

Czyli w sumie Polak będzie potrzebował o 6 kWh/d/o mniej energii elektrycznej niż Brytyjczyk – 44 kWh/d/o.

Jak wcześniej zauważyliśmy, Polska ma lepsze warunki do produkcji biomasy. Na uprawy biopaliw przeznaczymy 30% powierzchni Polski (ponad 55% gruntów rolnych), co da 2500 m² na osobę. Możemy ten areal zmniejszyć, wykorzystując do celów energetycznych drewno i odpady z lasów. Podobnie jak Brytyjczycy 500 m² przeznaczymy na biopaliwa (2 kWh/d/o), a resztę wykorzystamy częściowo do produkcji prądu (biogazownie i elektrownie na biomasę wytwarzające prąd i ciepło w skojarzeniu), a częściowo bezpośrednio do ogrzewania. Łącznie biomasa (poza biopaliwami) da nam około 20 kWh/d/o (z możliwością pozyskiwania z niej prądu ze sprawnością 33%).

Omówmy niektóre rozwiązania. Nie wszystkie są zrównoważone w przyjętym tutaj rozumieniu, ale wszystkie są niskoemisyjne.

Produkujemy dużo prądu – nasze składowe

By zapewnić bardzo dużo energii elektrycznej, każdy plan w pewnym stopniu opiera się na energii wiatrowej lądowej i morskiej, w pewnym stopniu na fotowoltaice, być może na imporcie energii solarnej z pustyni, na spalaniu odpadów (włączając odpadki domowe i odpady rolnicze), energetyce wodnej (na dzisiejszym poziomie), być może energii fal, pływowych zaporach i lagunach oraz elektrowniach wykorzystujących prądy pływowe, być może na energetyce jądrowej i być może też na „czystym paliwie kopalnym”, czyli węgla spalany w elektrowniach wychwytyjących i składujących dwutlenek węgla. Każdy plan zakłada wyprodukowanie średnio 50 kWh/o dziennie – to zaokrąglenie zapotrzebowania średniego rzędu 48 kWh/o dziennie, uwzględniające straty w przesyłce siecią rozdzielczą.

Niektóre plany obejmują import energii. Dla porównania warto sprawdzić ile energii importujemy dzisiaj. Dowiadujemy się, że w 2006 roku Wielka Brytania importowała 28 kWh/o dziennie paliw pierwotnych – to 23% ich zużycia. W imporcie dominuje węgiel (18 kWh/os dziennie), ropa naftowa (5 kWh/o dziennie) i gaz ziemny (6 kWh/o dziennie). Sprowadzanie paliwa jądrowego (uran) zazwyczaj nie jest traktowane jako import, bo łatwo tu zgromadzić zapasy.

W 2009 roku Polska importowała w paliwach 32 kWh/o dziennie, z czego 24 kWh/o dziennie przypadało na ropę, a 8 kWh/o dziennie na gaz ziemny.

We wszystkich pięciu planach zakładam rozwój systemów spalania odpadów komunalnych. Zamiast na wysypiskach prawie wszystkie odpady, których nie można poddać recyklingowi, lądują w piecu. Spalenie 1 kg odpadów na osobę dziennie dostarcza około 0,5 kWh/o prądu dziennie. Podobna ilość odpadów

rolnych dostarcza 0,6 kWh/os dziennie. Spalenie tych odpadów i przekształcenie ich w energię wymaga jakichś 3 GW mocy, a to dziesięć razy więcej niż całkowita moc spalarni w roku 2008 (rys. 27.2). W Londynie (7 mln mieszkańców) powstałoby 12 spalarni o mocy 30 MW, takich jak spalarnia SELCHP w południowym Londynie (patrz: str. 302). W Birmingham (1 mln mieszkańców) wybudowano by dwie. Na każde dwustutysięczne miasto przypadłaby spalarnia o mocy 10 MW. Obawy, że spalenie odpadów na taką skalę byłoby trudne, brudne i niebezpieczne, powinien rozwiązać rys. 27.3 pokazujący, że wiele krajów europejskich spala znacznie więcej odpadów na osobę niż Wielka Brytania. Fanami spalania są: Niemcy, Szwecja, Dania, Holandia i Szwajcaria, a są to kraje, które trudno podejrzewać o brak higieny! Jedną z zalet tego spalarniowego planu jest eliminacja przyszytych emisji metanu z wysypisk.

Dla Polski również założymy, że spalarnie spalą 1 kg śmieci na osobę dziennie, dostarczając 0,5 kWh prądu na osobę dziennie. Dwukrotnie większa ilość odpadów rolnych na osobę pozwoli nam uzyskać ze spalarni 1,8 kWh/o dziennie.

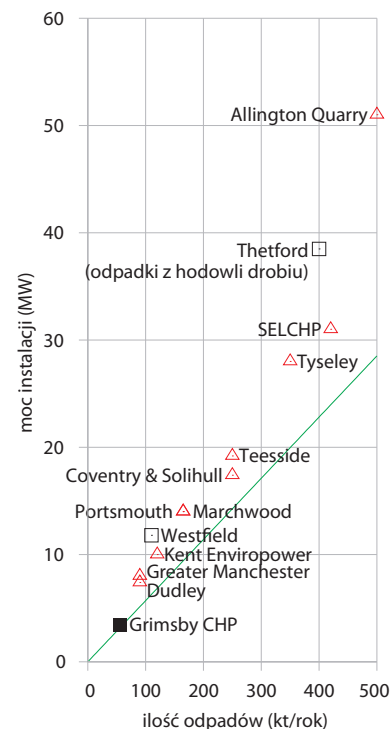
We wszystkich pięciu planach energetyka wodna zapewni 0,2 kWh/o dziennie, tyle samo co dziś.

Obecna moc elektrowni wodnych w Polsce również pozwala na zapewnienie 0,2 kWh/o dziennie. Pozostawmy tę wartość bez zmian.

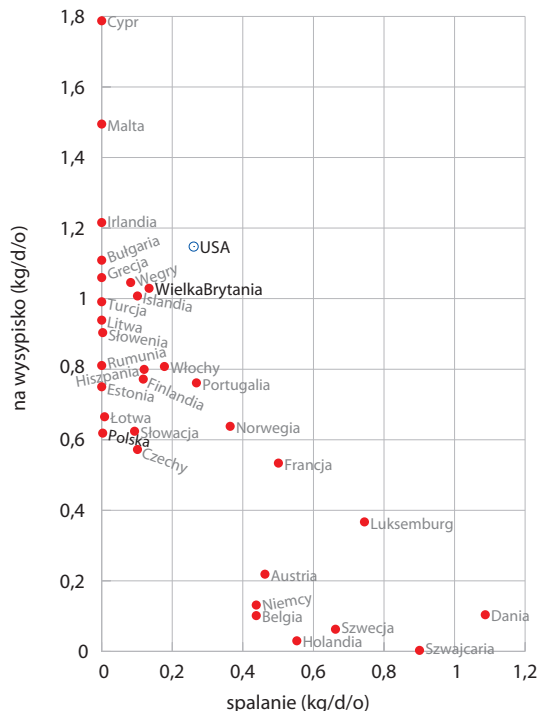
Samochody elektryczne służą dynamicznej regulacji obciążenia sieci. Ich ładowanie pochłania przeciętnie 45 GW (18 kWh/o dziennie). Przez podłączanie lub odłączanie akumulatorów można by łagodzić fluktuacje energii ze słońca lub wiatru (o ile nie są zbyt duże i nie trwają zbyt długo). Zmiany w zapotrzebowaniu na prąd będą większe niż dzisiaj, bo prąd zastąpi gaz w kuchni i w ogrzewaniu (zob.: rys. 26.16 na str. 209). Radzenie sobie ze skokami poboru rzędu 10 GW, trwającymi nawet 5 godzin, będzie wymagało zbudowania pięciu nowych elektrowni szczytowo-pompowych wielkości Dinorwig (lub też przystosowania istniejących elektrowni wodnych do magazynowania energii). By zmagazynować 50 GWh, potrzeba pięciu elektrowni klasy Dinorwig, każda o mocy 2 GW. Niektóre plany będą wymagały nawet większej liczby elektrowni szczytowo-pompowych. Dodatkowym zabezpieczeniem we wszystkich scenariuszach będzie budowa interkonektora do Norwegii o zdolności przesyłowej 2 GW.

Dla Polski również przyjmijmy wielkość 18 kWh/o dziennie elektryczności do ładowania akumulatorów pojazdów, na co potrzebna będzie średnia moc 30 GW (niższa niż w Wielkiej Brytanii ze względu na mniejszą liczbę ludności). Skoki zapotrzebowania na energię elektryczną ze względu na mniejszą liczbę ludności będą w Polsce mniejsze niż brytyjskie 10 GW, zbudujemy więc elektrownie szczytowo-pompowe zdolne magazynować jedynie 30 GWh (co i tak oznacza zwiększenie o 300% obecnych możliwości magazynowania energii przez nasze elektrownie szczytowo-pompowe).

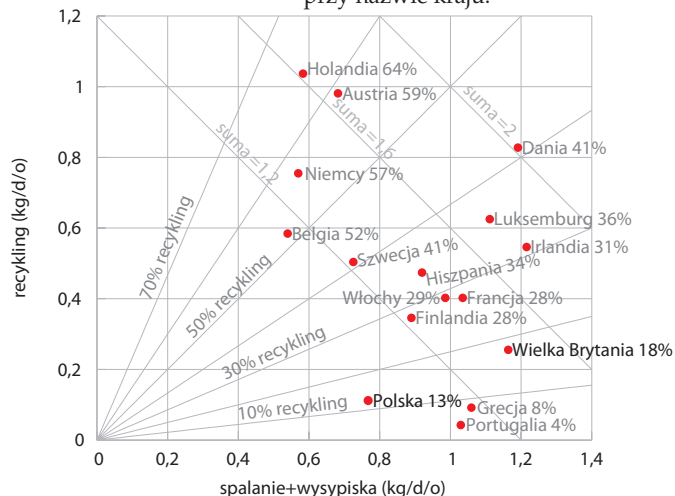
Interkonektory do Skandynawii i Niemiec (a w ogólności paneuropejska sieć energetyczna) również będą pomocne.



Rys. 27.2. Spalarnie odpadów w Wielkiej Brytanii. Linia pokazuje średnią produkcję energii przy założeniu, że 1 kg odpadów to 0,5 kWh prądu.



Rys. 27.3. Po lewej odpady komunalne stałe, składowane, a spalane, w kg na osobę dziennie, w wybranych krajach. Po prawej, ilość odpadów poddanych recyklingowi a odpady składowane lub spalane. Odsetek odpadów poddanych recyklingowi podany przy nazwie kraju.



Produkujemy dużo prądu – Plan D

Plan D (D jak domowa dywersyfikacja) zakłada wykorzystanie szeregu krajowych źródeł elektryczności. Uzależnienie od importu surowców jest relatywnie niewielkie.

A oto skąd bierze się 50 kWh prądu na osobę dziennie w Planie D. Wiatr: 8 kWh/d/o (średnio 20 GW; 66 GW w szczycie) (plus około 400 GWh w współpracujących z energetyką wiatrową elektrowniach szczytowo-pompowych). Fotowoltaika: 3 kWh/d/o. Spalanie odpadów: 1,1 kWh/d/o. Energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o. Fale: 2 kWh/d/o. Pływy: 3,7 kWh/d/o. Atom: 16 kWh/d/o (40 GW). „Czysty węgiel”: 16 kWh/d/o (40 GW).

Pozyskanie 8 kWh/d/o z wiatru wymaga 30-krotnego zwiększenia zainstalowanej mocy elektrowni wiatrowych w stosunku do mocy w roku 2008. Wielka Brytania miałaby trzykrotnie więcej farm wiatrowych niż Niemcy dzisiaj. Zbudowanie takiej liczby wiatraków na morzu w ciągu 10 lat wymagałoby około 50 platform samopodnoszących.

Pozyskanie 3 kWh/o dziennie z fotowoltaiki wymagałoby 6 m² modułów fotowoltaicznych o sprawności 20% na osobę. W większości domów południowa połać dachu byłaby szczelnie pokryta panelami. Opcjonalnie (co pewnie byłoby tańsze i zmniejszyłoby obawy Ligi Ochrony Zabytków) można by розміścić te moduły na wsi, w tradycyjny bawarski sposób (fot. 6.7, str. 50).

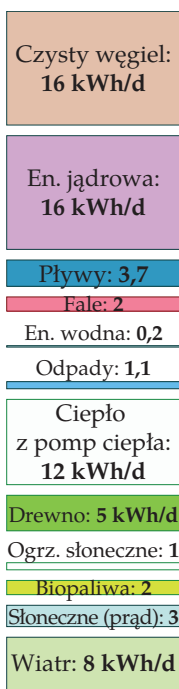
Spalano by 1 kg odpadów na osobę dziennie (generując 0,5 kWh/d/o) i tyle samo odpadów rolnych, co da 0,6 kWh/d/o. Energetyka wodna zapewni 0,2 kWh/d/o, tyle – ile daje dzisiaj.

Pozyskanie energii z fal wymaga 16 000 głębinowych instalacji Pelamis, zajmujących 830 km wybrzeża Atlantyku (zob.: mapa na str. 81).

Energia pływów jest pozyskiwana przez wykorzystujące prądy pływowe elektrownie (o mocy 5 GW), zaporę Severn o mocy 2 GW i laguny pływowe o mocy 2,5 GW, które mogą również magazynować energię.

Pozyskanie 16 kWh/d/o z atomu wymaga 40 GW w elektrowniach jądrowych, co oznacza mniej więcej dziesięciokrotny wzrost mocy w stosunku do roku 2007. Gdybyśmy produkowali z atomu 16 kWh/d/o, w kategoriach produkcji na głowę mieszkańca, plasowalibyśmy się gdzieś pomiędzy Belgią, Finlandią, Francją a Szwecją: zarówno Belgia, jak i Finlandia produkują z atomu około 12 kWh/d/o, Francja i Szwecja – odpowiednio: 19 kWh i 20 kWh/d/o.

By produkować 16 kWh/d/o z „czystego węgla” (40 GW), musielibyśmy wszystkie obecnie działające elektrownie węglowe (dostarczające około 30 GW) wyposażyć w instalacje wychwytu dwutlenku węgla, co zmniejszyłoby produkcję do 22 GW, a następnie wybudować kolejne bloki węglowe o mocy 18 GW. Pozyskanie takiej ilości energii elektrycznej, przy sprawności elektrowni na poziomie 34%, wymagałoby spalania węgla o energii pierwotnej rzędu 53 kWh/d/o, a to nieco więcej niż wszystkie paliwa kopalne obecnie spalane w brytyjskich elektrowniach i znacznie ponad poziom, który w rozdziale 23 uznaliśmy za „zrównoważony”. Taki poziom zużycia jest około 3 razy większy niż obecny import węgla (18 kWh/d/o). Jeżeli nie otworzymy starych kopalni w tym scenariuszu, 32% prądu wytwarzalibyśmy w oparciu o importowany węgiel. Otwarcie kopalni dostarczyłoby energii pierwotnej rzędu 8 kWh/d/o. Tak czy inaczej, w kwestii węgla Wielka Brytania nie będzie samowystarczalna.



Rys. 27.4. Plan D

W polskim Planie D elektryczność wytwarzamy w następujący sposób:

- „czysty węgiel”: 11 kWh/d/o (18 GW),
- atom: 11 kWh/d/o (18 GW),
- wiatr: 12 kWh/d/o (średnio 20 GW; 66 GW w szczycie),
- elektrownie na biomasę i biogazownie: 5 kWh/d/o (8 GW),
- fotowoltaika: 3 kWh/d/o,
- spalanie odpadów: 1,8 kWh/d/o,
- energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o.

Łącznie produkujemy 44 kWh/d/o elektryczności, z czego 18 kWh/d/o wykorzystamy do zasilania transportu, 18 kWh/d/o do zasilania urządzeń elektrycznych, a 6 kWh/d/o przeznaczymy na działanie pomp ciepła.

Ogrzewanie (30 kWh/d/o) zapewniają nam:

- elektrociepłownie (węglowe, jądrowe i na biomasę): 7 kWh/d/o,
- pompy ciepła: 12 kWh/d/o,
- spalanie biomasy: 5 kWh/d/o,
- geotermia: 5 kWh/d/o,
- solary: 1 kWh/d/o.

Polskie elektrownie węglowe wytwarzają obecnie 10 kWh/d/o, a więc prawie tyle, ile chcemy osiągnąć. Jednak większość bloków jest już stara – tak czy inaczej, trzeba będzie je wkrótce zamknąć. Nowo budowane bloki węglowe będą musiały być wyposażone w instalacje wychwytu dwutlenku węgla. Zasobów węgla wystarczy nam na jakieś 40 do 50 lat. Później wskazany byłby import, jednak wszystko wskazuje na to, że do tego czasu Chiny wydrenują rynek węgla. Nie jest to więc scenariusz docelowy, ale obliczony na najbliższych kilkadziesiąt lat.

Pozyskanie 11 kWh/d/o z atomu wymagać będzie 18 GW w elektrowniach jądrowych – obecnie projektowane są elektrownie o mocy 6 GW.

Pozyskanie 12 kWh/d/o z wiatru wymaga 60-krotnego wzrostu zainstalowanej mocy elektrowni wiatrowych w stosunku do roku 2010. Polska miałaby wtedy trzykrotnie więcej farm wiatrowych niż Niemcy dzisiaj. Towarzyszyć temu powinna budowa współpracujących z energetyką wiatrową elektrowni szczytowo-pompowych o możliwości gromadzenia energii około 400 GWh.

Pozyskanie 3 kWh/o dziennie z fotowoltaiki wymagać będzie zainstalowania 5 m² modułów fotowoltaicznych o sprawności 20% na osobę.

W tym scenariuszu w ogóle nie importujemy energii.

Czy coś w tym planie wydaje Ci się nierozsądne lub odstręczające? Jeśli tak, może spodoba Ci się któryś z pozostałych czterech planów.

Produkujemy dużo prądu – Plan N

Za literką N kryje się plan NIMBY [*Not In My BackYard* – tylko nie w moim ogródku, tylko nie u mnie – *red.*] To dla ludzi, którzy nie chcą, by na brytyjskiej wsi rozpanoszyły się odnawialne źródła energii. Nie chcą też nowych elektrowni jądrowych. Omówimy ten plan etapami.

Po pierwsze, przekreślamy gałkę z OZE, ograniczając je w stosunku do ambitnych założeń Planu D. Wiatr daje teraz 2 kWh/d/o (średnio 5 GW); fotowoltaika: 0; fale: 0; pływy: 1 kWh/d/o.

Właśnie straciliśmy 14 kWh/d/o (35 GW w skali kraju), obcinając produkcję z OZE (gwoli ścisłości – produkcja energii z wiatru i tak wzrasta ośmiokrotnie w stosunku do 2008 roku!).

W planie NIMBY ograniczamy produkcję w energetyce jądrowej do 10 kWh/d/o (25 GW) – to redukcja o 15 GW w porównaniu z Planem D, ale wciąż znaczny wzrost w stosunku do obecnego poziomu. 25 GW mocy w energetyce jądrowej da się zapewne upchnąć w istniejących elektrowniach jądrowych, wówczas żadna nowa elektrownia nie powstanie na podwórku zwolennika NIMBY, czyli NIMBYmana. Taki sam jak w Planie D jest wkład „czystego węgla” (16 kWh/d/o – 40 GW), energetyki wodnej i spalania odpadów.

Skąd weźmiemy dodatkowe 50 GW? NIMBYman powiada: „Tylko nie u mnie, ale u innych proszę bardzo”. Dlatego też w planie NIMBY płacimy innym krajom za import energii słonecznej z pustyni rzędu 20 kWh/d/o (50 GW).

Ten scenariusz wymaga stworzenia pięciu stref wielkości Londynu (o średnicy 44 km) na Saharze, wypełnionych elektrowniami słonecznymi. Konieczne będzie również stworzenie sieci transmisyjnej zdolnej dostarczyć do Wielkiej Brytanii 50 GW mocy. Istniejące połączenie wysokiego napięcia z Francji może przesłać zaledwie 2 GW mocy. Nasz plan wymaga więc 25-krotnego wzrostu zdolności przesyłowej połączeń z kontynentem (lub też innego sposobu na transport takiej ilości energii, jak na przykład statki wypełnione metanolem lub borem kursujące z portów na pustynnych wybrzeżach).

Skoro w Planie N mamy mniej energii z wiatru, nie potrzebujemy budować dodatkowych elektrowni szczytowo-pompowych wspomnianych w Planie D. Jednakże plan jest mocno uzależniony od słońca, konieczne więc będzie zbudowanie systemów magazynowania zmiennej energii słonecznej. Systemy gromadzenia energii w stopionych solach to jedna możliwość. Można by również

En. słoneczna
na pustyniach:
20 kWh/d

Czysty węgiel:
16 kWh/d

En. jądrowa:
10 kWh/d

Pływy: **1 kWh/d**

Wodna: **0,2 kWh/d**

Odpady: **1,1 kWh/d**

Ciepło
z pomp ciepła:
12 kWh/d

Drewno: **5 kWh/d**

Ogrz. słoneczne: **1**

Biopaliwa: **2**

Wiatr: **2 kWh/d**

Rys. 27.5. Plan N

skorzystać z elektrowni szczytowo-pompowych w Alpach. Można też przetworzyć energię elektryczną w paliwa, które da się magazynować, takie jak metanol, aczkolwiek konwersja wiąże się ze stratami energetycznymi i trzeba będzie zbudować więcej elektrowni słonecznych.

W tym planie importujemy $32\% + 40\% = 72\%$ prądu.

W Planie N dla Polski zmniejszamy pozyskiwanie energii wiatru i słońca, bo zajmuje to dużo miejsca i ingeruje w krajobraz. Wiatr daje teraz 3 kWh/d/o (średnio 5 GW – i tak dziesięciokrotnie więcej niż obecnie). Będziemy łaskawszy niż David dla fotowoltaiki – w polskim Planie N panele wygenerują 1 kWh/d/o (dysponujemy przecież większą przestrzenią – być może Polacy nie oprotestują wszystkich farm słonecznych). Energia jądrowa też jest kontrowersyjna, ale zakładamy, że ze względu na determinację rządu powstaną planowane dziś bloki o mocy 6 GW (4 kWh/d/o).

W wyniku tych działań straciliśmy 7 kWh/d/o z elektrowni atomowych, 9 kWh/d/o z wiatru, oraz 2 kWh/d/o z fotowoltaiki, czyli łącznie 18 kWh/d/o. To 30 GW mocy, czyli strefa na Saharze o średnicy blisko 80 km, zabudowana elektrowniami słonecznymi. A do tego potężne linie transmisyjne.

Bez zmiany pozostawiamy biomasę, spalarnie, elektrownie wodne i stojące już elektrownie węglowe (które przebudowujemy do standardu wychwyty węglu).

W Planie N elektryczność (44 kWh/d/o) wytwarzamy w następujący sposób:

- energia słoneczna z pustyni: 18 kWh/d/o (30 GW),
- „czysty węgiel”: 11 kWh/d/o (18 GW),
- atom: 4 kWh/d/o (6 GW),
- wiatr: 3 kWh/d/o (średnio 5 GW),
- elektrownie na biomasę i biogazownie: 5 kWh/d/o (8 GW),
- fotowoltaika: 1 kWh/d/o,
- spalanie odpadów: 1,8 kWh/d/o,
- energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o.

Ogrzewanie (30 kWh/d/o) zapewniają nam (identycznie jak w Planie D):

- elektrociepłownie (węglowe, jądrowe i na biomasę): 7 kWh/d/o,
- pompy ciepła: 12 kWh/d/o,
- spalanie biomasy: 5 kWh/d/o,
- geotermia: 5 kWh/d/o,
- solary: 1 kWh/d/o.

W tym planie Polska importuje 41% prądu.

Produkujemy dużo prądu – Plan L

Niektórzy mówią: „Nie chcemy tu atomu!”. Jak możemy wyjść im naprzeciw? Być może to ci antyatomowi buntownicy powinni przekonać NIMBYmanów, że jednak warto postawić w ogródku odnawialne źródła energii.

Możemy stworzyć scenariusz bez atomu, biorąc wszystkie te odnawialne źródła energii z Planu D i zwyczajnie wymieniając atom na energię z pustyni. Tak jak w Planie N dostarczenie tej energii z pustyni wymaga znacznej rozbudowy sieci przesyłowej pomiędzy północną Afryką a Wielką Brytanią. Zdolność

przesyłową interkonektorów kontynent europejski – Wielka Brytania należałoby zwiększyć z 2 GW do co najmniej 40 GW.

A oto skąd w Planie L bierze się 50 kWh prądu na osobę dziennie. Wiatr: 8 kWh/d/o (średnio 20 GW) (plus około 400 GWh we współpracujących elektrowniach szczytowo-pompowych). Fotowoltaika: 3 kWh/d/o. Energetyka wodna i spalanie odpadów: 1,3 kWh/d/o. Fale: 2 kWh/d/o. Pływy: 3,7 kWh/d/o. „Czysty węgiel”: 16 kWh/d/o (40 GW). Energia słoneczna z pustyni: 16 kWh/d/o (średnio 40 GW).

W tym planie importujemy 64% prądu.

Nazywam to Planem L, bo pozostaje w zgodzie z polityką Liberalnych Demokratów (przynajmniej tak było, kiedy pisałem ten rozdział w połowie 2007). Ostatnio wspominali o „prawdziwej niezależności energetycznej dla Wielkiej Brytanii” i ogłosili zeroemisyjną politykę, zgodnie z którą Wielka Brytania stałaby się eksporterem energii netto, jednak bez uszczegółowienia jak osiągnąć taki cel.

W Planie L rezygnujemy z elektrowni atomowych, które zastępujemy importem elektryczności z elektrowni słonecznych w basenie Morza Śródziemnego. Pozostałe elementy Planu L są zgodne z Planem D.

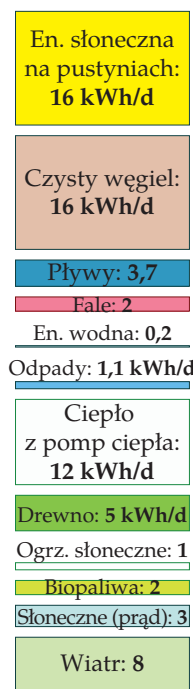
W polskim Planie L elektryczność (44 kWh/d/o) wytwarzamy w następujący sposób:

- energia słoneczna z pustyni: 11 kWh/d/o (30 GW),
- „czysty węgiel”: 11 kWh/d/o (18 GW),
- wiatr: 12 kWh/d/o (średnio 20 GW; 66 GW w szczycie),
- elektrownie na biomasę i biogazownie: 5 kWh/d/o (8 GW),
- fotowoltaika: 3 kWh/d/o,
- spalanie odpadów: 1,8 kWh/d/o,
- energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o.

Ogrzewanie (30 kWh/d/o) zapewniają nam:

- elektrociepłownie (węglowe, jądrowe i na biomasę): 7 kWh/d/o,
- pompy ciepła: 12 kWh/d/o,
- spalanie biomasy: 5 kWh/d/o,
- geotermia: 5 kWh/d/o,
- solary: 1 kWh/d/o.

W tym planie Polska importuje 41% prądu.



Rys. 27.6. Plan L

Produkujemy dużo prądu – Plan Z

Niektórzy mówią: „Nie chcemy atomu i nie chcemy węgla!”. Brzmi dobrze, ale do tego trzeba planu. Nazywam to Planem Z, bo zakładam, że Partia Zielonych sprzeciwia się wykorzystaniu atomu i węgla, aczkolwiek nie sądzę, że wszystkim Zielonym spodoba się reszta mojego planu. Greenpeace, jak mi wiadomo, kocha wiatr. Im również dedykuję Plan Z, bo mam w nim duuużo wiatru.

Złożę Plan Z, ponownie startując od Planu D – produkcja energii z fal skacze o 1 kWh/d/o (pompujemy pieniądze w badania nad energią fal i podnosimy sprawność konwertora Pelamis), a energetyka wiatrowa pączkuje czterokrotnie (w stosunku do Planu D) do 32 kWh/d/o. Wówczas wiatr dostarcza 64% prądu. Oznacza to 120-krotny wzrost mocy wiatrowych zainstalowanych w Wielkiej Brytanii w stosunku do dnia dzisiejszego. Zgodnie z tym planem

rozbudowy brytyjskiej energetyki, całkowita światowa moc wiatraków wzrasta 4-krotnie (w stosunku do 2008) i cały ten wzrost lokuje się na Wyspach Brytyjskich lub dookoła nich.

Niemalże całkowite oparcie Planu Z na odnawialnych źródłach energii, a szczególnie na wietrze, przerośnie możliwości naszej głównej metody równoważenia podaży i popytu, czyli kontrolowanego ładowania milionów akumulatorów samochodowych. Stąd też w Planie Z musimy ująć znacznie więcej elektrowni szczytowo-pompowych, równoważących fluktuacje wiatru w skali dni. Moc elektrowni szczytowo-pompowych równa 400 elektrowniom klasy Dinorwig może całkowicie zastąpić wiatr w trakcie ogólnokrajowej flauty trwającej 2 dni. Około stu brytyjskich jezior i szkockich „loch” trzeba by zabudować systemami magazynowania energii.

W Planie Z elektryczność pochodzi z następujących źródeł. Wiatr: 32 kWh/d/o (średnio 80 GW) (plus około 400 GWh we współpracujących elektrowniach szczytowo-pompowych). Fotowoltaika: 3 kWh/d/o. Energetyka wodna i spalanie odpadów: 1,3 kWh/d/o. Fale: 3 kWh/d/o. Pływy: 3,7 kWh/d/o. Energia słoneczna z pustyni: 7 kWh/d/o (17 GW).

W tym planie 14% prądu pochodzi z importu.

W Planie Z rozbudowujemy elektrownie wiatrowe 2,5-krotnie względem Planu D, do poziomu 30 kWh/d/o, w wyniku czego całkowita globalna moc farm wiatrowych (względem roku 2008) wzrasta 2,5-krotnie. Zgromadzenie zapasu energii na 2 dni flauty wymaga 200-krotnego zwiększenia rezerw energii magazynowanych w elektrowniach szczytowo-pompowych. Jeśli chcemy zabezpieczyć się na 5 dni flauty, musimy je zwiększyć pół tysiaka razy względem stanu obecnego. W tym scenariuszu doliny górskie masowo zamieniamy w elektrownie szczytowo-pompowe.

Po rezygnacji z węgla i atomu jedyne elektrociepłownie to są te na biomasę. Brakujące 6 kWh/d/o ciepła uzupełniamy przez zwiększenie ilości spalanej biomasy o 3 kWh/d/o (z 5 do 8 kWh/d/o), wzrost mocy instalacji geotermicznych o 1 kWh/d/o (z 5 do 6 kWh/d/o) oraz zwiększenie mocy pomp ciepła o 2 kWh/d/o (co wymaga zwiększenia produkcji elektryczności o 1 kWh/d/o do poziomu 45 kWh/d/o). Importowana energia słoneczna z pustyni daje dodatkowe 6 kWh/d/o. Pozostałe składowe Planu Z są takie, jak w Planie D.

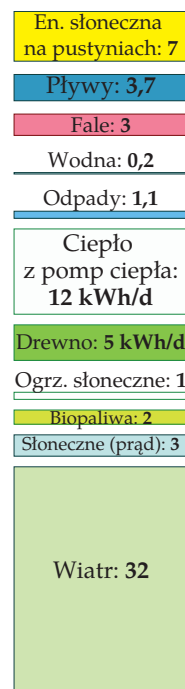
W polskim Planie Z elektryczność (45 kWh/d/o) wytwarzamy w następujący sposób:

- energia słoneczna z pustyni: 6 kWh/d/o (10 GW),
- wiatr: 30 kWh/d/o (średnio 50 GW; 165 GW w szczycie),
- elektrownie na biomasę i biogazownie: 4 kWh/d/o (6 GW),
- fotowoltaika: 3 kWh/d/o,
- spalanie odpadów: 1,8 kWh/d/o,
- energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o.

Ogrzewanie (30 kWh/d/o) zapewniają nam:

- elektrociepłownie (na biomasę): 1 kWh/d/o,
- pompy ciepła: 14 kWh/d/o,
- spalanie biomasy: 8 kWh/d/o,
- geotermia: 6 kWh/d/o,
- solary: 1 kWh/d/o.

W tym planie Polska importuje 13% prądu.



Rys. 27.7. Plan Z

Produkujemy dużo prądu – Plan E

Pod E kryje się ekonomia. W piątym planie zgadujemy, jak zachowałaby się gospodarka liberalna wobec wysokiej ceny dwutlenku węgla. Na gruncie ekonomii, przy wysokim sygnale cenowym ograniczającym emisję CO₂, nie oczekiwałbym palety rozwiązań o zróżnicowanym koszcie. Powinniśmy raczej spodziewać się rozwiązania optymalizującego koszty, gdzie moc dostarcza się po koszcie najniższym. A kiedy w wyścigu na koszty ustawimy „czysty węgiel” i energetykę jądrową, zwycięża atom (energetycy z pewnej brytyjskiej elektrowni powiedzieli mi, że koszty inwestycyjne standardowych „brudnych” elektrowni węglowych wynoszą miliard funtów na GW – mniej więcej tyle, co w przypadku atomu, ale koszty inwestycyjne bloków energetycznych z „czystym węglem”, wliczając CCS, wynoszą około 2 miliardów na GW).

Zakładam, że energia słoneczna z cudzych pustyni przegrywa z atomem, jeśli weźmiemy pod uwagę koszt budowy sieci przesyłowej o długości 2000 km; aczkolwiek van Voorthuysen (2008) uważa, że odkrycia na miarę Nobla w zakresie napędzanej energią słoneczną produkcji paliw chemicznych zrównałyby koszty energii z pustyni z energią z atomu. Z atomem przegrywają również morskie farmy wiatrowe, za to zakładamy, że farmy na lądzie są w kosztach zbliżone.

A oto skąd bierze się 50 kWh prądu na osobę dziennie w Planie E. Wiatr: 4 kWh/d/o (średnio 10 GW). Fotowoltaika: 0. Energetyka wodna i spalanie odpadów: 1,3 kWh/d/o. Fale: 0. Pływy: 0,7 kWh/d/o. Atom: 44 kWh/d/o (110 GW).

W tym planie energetyka jądrowa rośnie dziesięciokrotnie w stosunku do roku 2007. Wielka Brytania dysponowałaby 110 GW z atomu, a to mniej więcej dwa razy większa moc od tej, którą dysponuje dziś Francja. Dorzuciłem odrobinę energii z pływów – zakładam, że dobrze zaprojektowana laguna pływowa może konkurować cenowo z atomem.

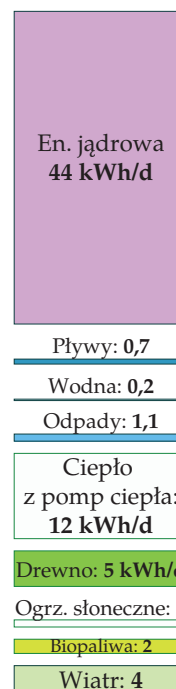
W tym planie Wielka Brytania nie importuje energii ani paliw (z wyjątkiem uranu, którego sprowadzanie, jak już powiedziałem, zazwyczaj nie jest traktowane jako import). Rys. 27.9 podsumowuje wszystkie pięć planów.

W polskim Planie E większość energii również dadzą nam elektrownie atomowe.

Dostarczenie 25 kWh/d/o (48 GW) z atomu wymagałoby rozbudowania programu jądrowego 8-krotnie w stosunku do dzisiejszych założeń rządowych. Realizując ten plan, dysponowalibyśmy mocą elektrowni jądrowych porównywalną do Francji. Wiatr da nam 8 kWh/d/o. Duża ilość ciepła odpadowego z elektrowni jądrowych pozwala ograniczyć moc instalacji geotermicznych do 2 kWh/d/o. Zrezygnujemy też z fotowoltaiki. Pozostałe elementy Planu E są zgodne z Planem D.

W Planie E elektryczność (44 kWh/d/o) wytwarzamy w następujący sposób:

- atom: 29 kWh/d/o (47 GW),
- wiatr: 8 kWh/d/o (średnio 13 GW),
- elektrownie na biomasę i biogazownie: 5 kWh/d/o (8 GW),
- spalanie odpadów: 1,8 kWh/d/o,
- energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o.



Rys. 27.8. Plan E

Ogrzewanie (30 kWh/d/o) zapewniają nam (identycznie, jak w Planie D):

- elektrociepłownie (węglowe, jądrowe i na biomasę): 10 kWh/d/o,
- pompy ciepła: 12 kWh/d/o,
- spalanie biomasy: 5 kWh/d/o,
- geotermia: 2 kWh/d/o,
- solary: 1 kWh/d/o.

W tym planie Polska nie importuje prądu.

Duży udział atomu w polskim planie E nie oznacza, że atom jest tanim źródłem energii. Jego duży udział wynika z tego, że inne, tańsze lub porównywalne elementy planu (takie, jak: wiatr czy biomasa) mają fizycznie ograniczone możliwości dostarczenia energii, a pozostałe, nawet bardzo obiecujące możliwości – takie jak import energii z pustyni – są wciąż od atomu droższe.

Nasze plany a wysysanie CO₂ i podróże lotnicze

W przyszłym świecie, w którym zanieczyszczenie CO₂ ma właściwą cenę (co ma zapobiec katastrofalnym zmianom klimatu), będzie nam zależało na takim schemacie energetycznym, który pozwoli nam zapakować dwutlenek węgla do dziury w ziemi niskim kosztem. Takie schematy neutralizacji emisji pozwoliłyby nam latać na poziomie z roku 2004 (dopóki wystarczy ropy). W roku 2004 średnie emisje CO₂ związane z lataniem wyniosły 0,5 t CO₂ na osobę rocznie. Podliczając całkowity wpływ latania na klimat, rzeczywiste emisje mogły wynieść około 1 t CO₂e na osobę rocznie. We wszystkich pięciu planach założyłem, że 1/5 powierzchni Wielkiej Brytanii zostanie przeznaczona pod uprawę roślin energetycznych, które zostaną spożytkowane na ogrzewanie i kogenerację. Gdybyśmy część tych roślin spalili w elektrowniach wychwytyjących i składających dwutlenek węgla (elektrowniach z „czystym węglem” ujętych w trzech naszych planach), wówczas dodatkowo można by wychwycić 1 t CO₂ na osobę rocznie. Gdyby również komunalne i rolnicze spalarnie powstawały w elektrowniach z CCS i dzieliły z nimi komin, być może dałoby się wychwycić 2 t CO₂ na osobę rocznie. Takie rozwiązanie miałoby dodatkowe koszty – biomasa i odpady pokonywałyby większe odległości, a proces wychwytu CO₂ pochłaniałby sporo energii z roślin. Biomasa w elektrowni to mniej biomasy na ogrzanie budynków. Trzeba ją będzie zastąpić większą liczbą pomp ciepła. Jeżeli celujemy w neutralność emisyjną, warto planować z wyprzedzeniem i szukać lokalizacji dla nowych elektrowni węglowych ze spalarniami w regionach o dużym potencjale biomasy.

1 t CO₂e oznacza emisję gazów cieplarnianych równoważną jednej tonie CO₂.

„Wszystkie te plany to absurd!”

Nie podobają Ci się moje plany? Wcale się nie dziwię. Faktycznie, każdy z nich ma swoje minusy. Stwórz własny plan, odpowiadający Twoim zapatrywaniom. Dopilnuj jednak, by się dopinał!

Być może dojdiesz do wniosku, że sensowny plan musi zakładać mniejsze zużycie energii na osobę. Nawet bym się z Tobą zgodził, ale to trudno sprzedać. Przypomnij sobie odpowiedź Tony’ego Blaira na sugestię, by rzadziej latał na zamorskie wakacje! (str. 239).

Opcjonalnie, możesz orzec, że jest nas za dużo i że wykonalny plan wymaga zmniejszenia populacji. To jeszcze trudniej sprzedać.

Podobnie z ogrzewaniem. Możemy budować domy pasywne, przeprowadzić masową termomodernizację już istniejących, wykorzystać wydajniejsze pompy ciepła (w zestawieniu przyjmujemy współczynnik CoP = 3). Dzięki temu zamiast 30 kWh/d/o na ogrzewanie wystarczy 15 kWh/d/o.

W takim wariantcie potrzebujemy więc jedynie połowy elektryczności i połowy ciepła uwzględnionych we wcześniejszych scenariuszach. Najprostsze co można zrobić, to zmniejszyć o połowę wszystkie słupki w naszych planach. Alternatywnie można utrzymać niektóre elementy takie, jak na przykład: energetyka wodna, spalarnie i biomasa (do wytwarzania prądu, ogrzewania i na produkcję biopaliw), a zapotrzebowanie na energię z pozostałych źródeł zmniejszyć o ponad połowę. W takim scenariuszu (nazwijmy go „+”) nasze plany wyglądałyby następująco:

plan D+	plan N+	plan L+	plan Z+	plan E+
Czysty węgiel: 4 kWh/d	En. słoneczna na pustyniach: 7	En. słoneczna na pustyniach: 5	En. słoneczna na pustyniach: 3	En. jądrowa: 7 kWh/d
En. jądrowa: 4 kWh/d	Czysty węgiel: 4,8 kWh/d	Czysty węgiel: 3 kWh/d	En. wodna: 0,2	En. wodna: 0,2
En. wodna: 0,2	En. jądrowa: 2 kWh/d	En. wodna: 0,2	Odpady: 1,8	Odpady: 1,8
Odpady: 1,8	En. wodna: 0,2	Odpady: 1,8	Pompy ciepła: 2	Pompy ciepła: 2
Pompy ciepła: 2	Pompy ciepła: 2	Pompy ciepła: 2	Elektrociepłownie: 2	Elektrociepłownie: 4
Elektrociepłownie: 4	Elektrociepłownie: 4	Elektrociepłownie: 4	Biomasa ogrz.: 2	Biomasa ogrz.: 2
Biomasa ogrz.: 2	Biomasa ogrz.: 2	Biomasa ogrz.: 2	En. geotermiczna: 4 kWh/d	Biomasa ogrz.: 2
En. geotermiczna: 2 kWh/d	En. geotermiczna: 2 kWh/d	En. geotermiczna: 2 kWh/d	Ogrz. słoneczne: 1	En. geotermiczna: 2 kWh/d
Ogrz. słoneczne: 1	Ogrz. słoneczne: 1	Ogrz. słoneczne: 1	Biomasa prąd: 6	Ogrz. słoneczne: 1
Biomasa prąd: 6	Ogrz. słoneczne: 1	Biomasa prąd: 6	Biopaliwa: 2	Biomasa prąd: 6
Biopaliwa: 2	Biomasa prąd: 6	Biopaliwa: 2	Panele słoneczne: 1	Biopaliwa: 2
Panele słoneczne: 1	Biopaliwa: 2	Panele słoneczne: 1	Wiatr: 10 kWh/d	Wiatr: 7
Wiatr: 5	Wiatr: 2	Wiatr: 5		
Elektryczność: 22	Elektryczność: 22	Elektryczność: 22	Elektryczność: 22	Elektryczność: 22

Rys. 27.9P+. Pięć planów+ dla Polski

Łatwiej byłoby wtedy dopiąć plany energetyczne, prawda? Ale uwaga – mogą podnieść się głosy sprzeciwu. Mniej gadżetów elektrycznych? Tramwaj zamiast samochodu albo pociąg zamiast samolotu? Ten plan też może być trudny do sprzedania.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

215 Spalenie 1 kg odpadów dostarcza około 0,5 kWh prądu.

Wartość kaloryczna odpadów komunalnych stałych wynosi około 2,6 kWh na kg; elektrownie spalające odpady produkują elektryczność ze sprawnością około 20%. – Źródło: Przewodnik po SELCHIP.

217 Rys. 27.3. Dane Eurostatu, www.epa.gov i www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/

221 *Polityka Liberalnych Demokratów*. Więcej na: www.libdems.org.uk: [5os7dy], [yrw2oo].

28 Z perspektywy portfela

Plan na mapie

Rozmach planów z ostatniego rozdziału zrozumiemy dzięki mapie Wielkiej Brytanii, na której umieścimy szósty plan. Szósty scenariusz jest wypadkową wszystkich poprzednich, dlatego nazwiemy go Planem W (rys. 28.1).

Wymagany obszar i koszty instalacji energetycznych pokazano w tabeli 28.3. Dla uproszczenia koszty podane są w dzisiejszych cenach, również dla instalacji prototypowych. Można oczekiwać, że część tych cen znacznie spadnie. Podane kwoty to koszty budowy. Nie obejmują kosztów działania i likwidacji. Koszty „na osobę” wynikają z podzielenia kwoty całkowitej przez 60 milionów obywateli. Pamiętajmy, że nie jest to książka o ekonomii – do tego potrzebowałbym kolejnych 400 stron! Umieszczam tutaj szacunkowe koszty, by pokazać, co może znaleźć się na metce towaru, którym jest domykający się plan.

Chcę podkreślić, że nie optuję za tym konkretnym rozwiązaniem – zawiera szereg elementów, które ja, jako dyktator Wielkiej Brytanii, pominąłbym. Specjalnie ująłem wszystkie dostępne technologie, żebyś mógł stworzyć swoje własne plany, o innym rozkładzie elementów.

Jeśli stwierdzisz, że: „Systemy fotowoltaiczne będą zbyt drogie, chcę mieć w zamian plan z większą ilością energii z pływów”, wiesz już jak go stworzyć – musisz rozwinąć elektrownie pływowe ośmiokrotnie. Jeżeli nie lubisz farm wiatrowych, możesz je usunąć (tylko dokąd?). Miej na uwadze, że więcej elektrowni na morzu oznacza wyższe koszty. Jeżeli chcesz zmniejszyć liczbę farm wiatrowych, proszę bardzo, określ jedynie, czym je zastąpisz. Możesz na przykład wymienić pięć farm wiatrowych (każda zajmująca 100 km²) na dodatkowy gigawat w elektrowniach jądrowych.

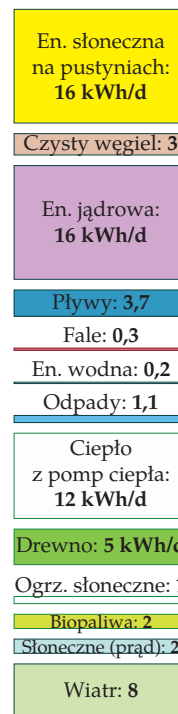
Możesz uznać, że ten plan (tak jak każdy z pięciu planów z poprzedniego rozdziału) przeznaczają nierozsądnie dużo areału na biopaliwa. Świetnie, możesz stwierdzić, że zapotrzebowanie na paliwa płynne w transporcie musi spaść poniżej 2 kWh/d/o założonych w tym planie. Albo że paliwa płynne trzeba produkować w jakiś inny sposób.

Stworzyliśmy analogiczny plan dla Polski. Energia wiatrowa pokrywa 12 kWh/d/o zapotrzebowania na prąd (z czego 10 kWh/d/o pochodzi z elektrowni lądowych, a 2 kWh/d/o z elektrowni morskich). Energia jądrowa zaspokaja 10 kWh/d/o, a import energii elektrycznej z pustynnych elektrowni słonecznych 11 kWh/d/o. Każde z tych trzech źródeł energii daje więc zbliżoną moc. „Czysty węgiel” daje 2 kWh/d/o, lokalne elektrownie słoneczne 2 kWh/d/o, pozostałe źródła energii pokrywają się z planem D: elektrownie wodne wytwarzają 0,2 kWh/d/o, spalarnie 1,8 kWh/d/o, spalanie biomasy 5 kWh/d/o.

Produkujemy 2 kWh/d/o z biopaliw, a ogrzewanie zapewniają elektrociepłowne, geotermia, pompy ciepła i kolektory słoneczne.

W Planie W elektryczność (44 kWh/d/o) wytwarzamy w następujący sposób:

- energia słoneczna z pustyni: 11 kWh/d/o,
- „czysty węgiel”: 2 kWh/d/o,
- atom: 10 kWh/d/o,



Rys. 28.1. Plan W

- wiatr: 12 kWh/d/o,
 - elektrownie na biomasę i biogazownie: 5 kWh/d/o,
 - fotowoltaika: 2 kWh/d/o,
 - spalanie odpadów: 1,8 kWh/d/o,
 - energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o.
- Ogrzewanie (30 kWh/d/o) zapewniają nam (identycznie jak w Planie D):
- elektrociepłownie (węglowe, jądrowe i na biomasę): 7 kWh/d/o,
 - pompy ciepła: 12 kWh/d/o,
 - spalanie biomasy: 5 kWh/d/o,
 - geotermia: 5 kWh/d/o,
 - solary: 1 kWh/d/o.

W tym planie Polska importuje 25% prądu.

Stworzymy też Plan W+, w którym wyprodukujemy połowę energii elektrycznej i połowę ciepła.

W Planie W+ elektryczność (22 kWh/d/o) wytwarzamy w następujący sposób:

- energia słoneczna z pustyni: 5 kWh/d/o,
- „czysty węgiel”: 1 kWh/d/o,
- atom: 4 kWh/d/o,
- wiatr: 3 kWh/d/o,
- elektrownie na biomasę i biogazownie: 6 kWh/d/o,
- fotowoltaika: 1 kWh/d/o,
- spalanie odpadów: 1,8 kWh/d/o,
- energetyka wodna: 0,2 kWh/d/o.

Ogrzewanie (15 kWh/d/o) zapewniają nam (identycznie jak w Planie D+):

- elektrociepłownie (węglowe, jądrowe i na biomasę): 4 kWh/d/o,
- pompy ciepła: 6 kWh/d/o,
- spalanie biomasy: 2 kWh/d/o,
- geotermia: 2 kWh/d/o,
- solary: 1 kWh/d/o.

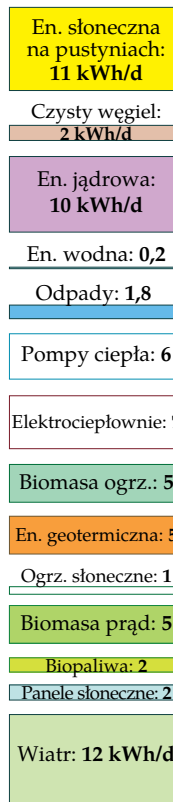
W tym planie Polska importuje 23% prądu.

Plan W+ jest zdecydowanie łatwiejszy w realizacji od Planu W. Bazując na tym planie, relatywnie łatwo można ograniczyć wkład pewnych źródeł energii, a nawet całkowicie je wyeliminować, zastępując innymi.

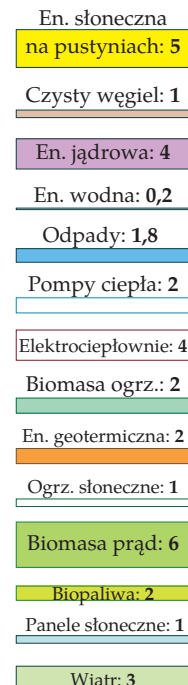
Koszty przejścia z paliw kopalnych na źródła odnawialne

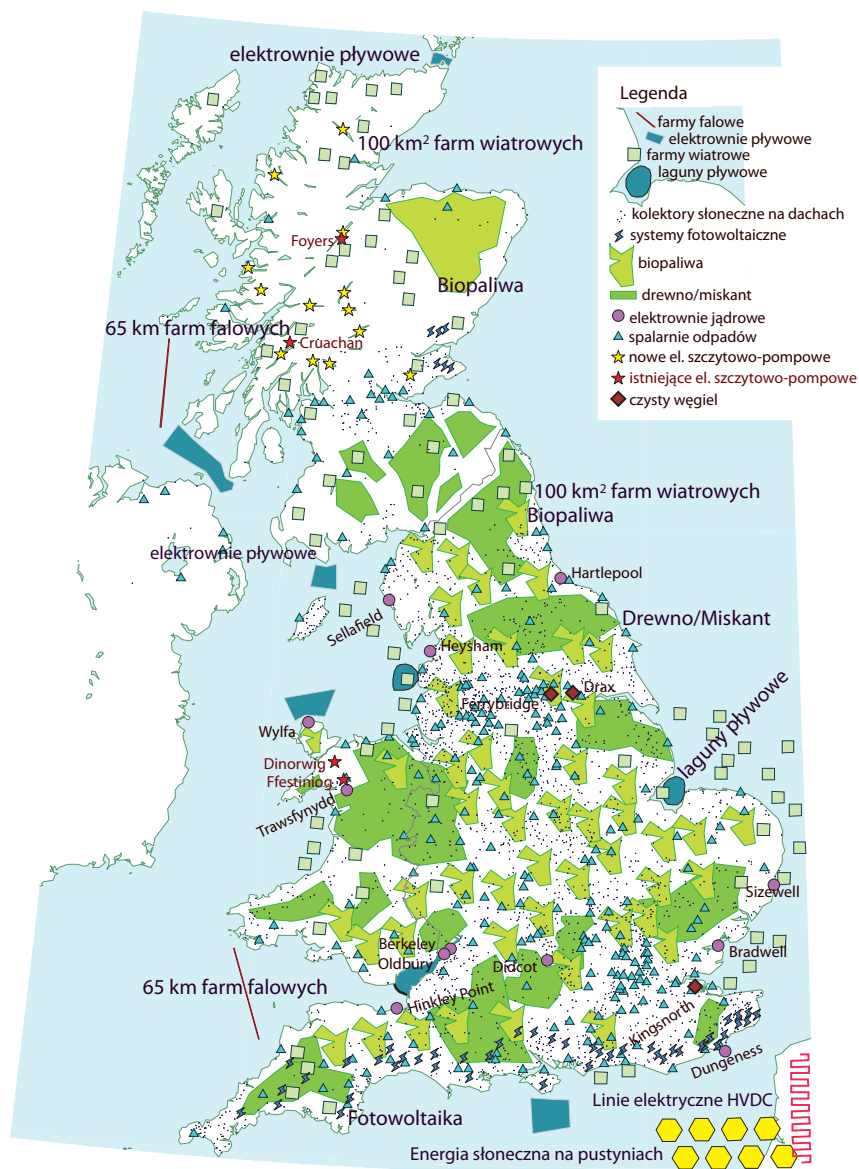
Wybudowanie każdej farmy wiatrowej kosztuje kilka milionów funtów i każda dostarcza kilka megawatów. W przybliżeniu w roku 2008 zainstalowanie jednego wata mocy kosztuje jednego funta, 1 kilowat kosztuje 1000 funtów, megawat w wietrze kosztuje milion (gigawat w atomie miliard, może dwa miliardy). Inne odnawialne źródła energii (OZE) są droższe. Wielka Brytania zużywa obecnie około 300 GW mocy w większości pochodzących z paliw kopalnych. Możemy więc założyć, że porządny przeskok z węgla i gazu na OZE i / lub atom będzie wymagał około 300 GW źródeł odnawialnych i / lub energii jądrowej i będzie kosztować około 300 mld funtów. Przybliżone koszty w tabeli 28.3 wynoszą w sumie 870 mld funtów. Prym wiedzie energetyka słoneczna – fotowoltaika kosztuje 190 mld funtów, a koncentrujące elektrownie słoneczne – 340 mld funtów.

plan W



plan W+





Rys. 28.2. Plan, który się domyka – dla Szkocji, Anglii i Walii.

Szarozielone kwadraty to farmy wiatrowe. Każda zajmuje 100 km² i jest pokazana w skali mapy.

Czerwone linie na morzu to elektrownie falowe, również w skali mapy.

Jasnoniebieskie błyskawice to farmy fotowoltaiczne – każda zajmująca 20 km², w skali mapy.

Niebieskie wieloboki na morzu: elektrownie falowe.

Niebieskie obłe kleksy na morzu (okolice Blackpool i Wash): laguny pływowe.

Jasnozielone obszary na lądzie: lasy i uprawy o krótkiej rotacji (w skali mapy).

Żółtozielone obszary: biopaliwa (w skali mapy).

Małe niebieskie trójkąty: spalarnie (nie w skali mapy).

Duże brązowe diamenty: elektrownie z CCS, ze współspalaniem biomasy (nie w skali mapy).

Fioletowe kropki: elektrownie atomowe (nie w skali mapy).

3,3 GW średniej produkcji w każdej z 12 elektrowni.

Żółte wieloboki na kanale La Manche: elektrownie słoneczne z koncentracją na dalekich pustyniach (w skali mapy, każda 335 km²).

Różowy szlaczek we Francji to nowe linie przesyłowe HVDC, o długości 2000 km, przesyłające 40 GW z dalekich pustyń do Wielkiej Brytanii.

Żółte gwiazdy w Szkocji: nowe elektrownie szczytowo-pompowe.

Czerwone gwiazdy: istniejące elektrownie szczytowo-pompowe.

Niebieskie punkciki: kolektory słoneczne na wszystkich dachach.

	Moc (GW)	Koszt całkowity w zaokrągleniu (mld funtów)	Koszt na osobę (funtów)	Średnia moc dostarczona (kWh/d/o)
52 farmy wiatrowe na lądzie: 5200 km ²	35	27	450	4,2
		– na podstawie danych dla farmy wiatrowej Lewis		
29 morskich farm wiatrowych: 2900 km ²	29	36	650	3,5
		– na podstawie danych dla farmy wiatrowej Ken-tish Flats, włączając 3 mld inwestycji w platformy samopodnoszące		
Elektrownie szczytowo-pompowe: 15 elektrowni podobnych do Dinorwig	30	15	250	
Systemy fotowoltaiczne: 1000 km ²	48	190	3200	2
		– w oparciu o Solarpark w Bawarii		
Kolektory słoneczne (podgrzewające wodę): 1 m ² panelu na dachu na osobę (w sumie 60 km ²)	średnio 2-5	72	1200	1
Spalarnie odpadów: 100 nowych spalarni o mocy 30 MW każda	3	8,5	140	1,1
		– w oparciu o SELCHP		
Pompy ciepła	70 (c)	60	1000	12
Elektrownie falowe: 2500 instalacji Pelamis, 130 km linii brzegowej	1-9 (średnio 0,76)	6 ?	100	0,3
Zapora na rzece Severn: 550 km ²	8 (średnio 2)	15	250	0,8
Laguny pływowe: 800 km ²	średnio 1,75	2,6 ?	45	0,7
Prądy pływowe: 15 000 turbin – 2000 km ²	18 (średnio 5,5)	21 ?	350	2,2
Energetyka jądrowa: 40 elektrowni	45	60	1000	16
		– na podstawie danych dla elektrowni jądrowej Olkiluoto w Finlandii		
„Czysty węgiel”	8	16	270	3
Energetyka słoneczna z koncentracją na pustyniach: 2700 km ²	średnio 40	340	5700	16
		– w oparciu o Solúcar		
Powierzchnia Europy pod 1600 km linii HVDC: 1200 km ²	50	1	15	
		– zakładając koszt wykupu gruntu 7500 funtów za ha		
2000 km linii przesyłowych HVDC	50	1	15	
		– w oparciu o szacunki German Aerospace Center		
Biopaliwa: 30 000 km ²		(brak szacunków)		2
Drewno/miskant: 31 000 km ²		(brak szacunków)		5

Tabela 28.3. Powierzchnie lądu i morza potrzebne do realizacji Planu W i koszty w zaokrągleniu. Kwoty ze znakiem zapytania dotyczą technologii prototypowych, których dokładne koszty trudno oszacować. 1 GW(c) oznacza 1 GW mocy cieplnej.

	Moc	Koszt całkowity w zaokrągleniu	Koszt na osobę	Średnia moc dostarczona
107 farm wiatrowych na lądzie: 10 700 km ²	53,5 GW	320 mld zł	8 300 zł	10 kWh/d/o
13 morskich farm wiatrowych: 1300 km ²	11 GW	130 mld zł	3 400 zł	2 kWh/d/o
Elektrownie szczytowo-pompowe: 15-krotne zwiększenie pojemności	30 GW	67 mld zł	1 800 zł	
Farmy fotowoltaiczne: 1000 km ²	38 GW	570 mld zł	14 800 zł	2,4 kWh/d/o
Kolektory słoneczne (podgrzewające wodę): 1 m ² panelu na dachu na osobę (w sumie 40 km ²)	średnio 1,7 GW(c)	220 mld zł	5 600 zł	1 kWh/d/o
Spalarnie odpadów: 100 nowych spalarni o mocy 30 MW każda	3 GW	40 mld zł	1 100 zł	1.8 kWh/d/o
Pompy ciepła	27 GW(c)	90 mld zł	2 300 zł	6 kWh/d/o
Energetyka jądrowa 6 elektrowni po 3 GW	18 GW	300 mld zł	7 800 zł	10 kWh/d/o
„Czysty węgiel”	3,6 GW	62 mld zł	1600 zł	3 kWh/d/o
Energetyka słoneczna z koncentracją na pustyniach: 1400 km ² średnio	18 GW	920 mld zł	23 800 zł	12 kWh/d/o
Powierzchnia Europy pod 1600 km linii HVDC: 1200 km ²	prześlą mocy 25 GW	zakładając koszt wykupu gruntu 8500 EUR za ha 4,5 mld zł	120 zł	
2000 km linii przesyłowych HVDC	prześlą mocy 25 GW	4,5 mld zł	120 zł	
Biopaliwa: 20 000 km ²		(brak szacunków)		2 kWh/d/o
Drewno/miskant (spalanie): 60 000 km ²		(brak szacunków)		5 kWh/d/o

Tabela 28.3P. Powierzchnie lądu i morza potrzebne do realizacji polskiego Planu W i koszty w zaokrągleniu (w złotych). Kwoty ze znakiem zapytania dotyczą technologii prototypowych, dla których trudno oszacować dokładne koszty. 1 GW(c) oznacza 1 GW mocy cieplnej.

Jako koszt budowy przyjęliśmy (patrz przypisy) dla elektrowni jądrowych 16 mld zł za 1 GW, dla „czystego węgla”: 17,5 mld zł za 1 GW.

Dla elektrowni słonecznych na pustyniach: 12 mld zł za 1 GW, ale ze względu na wykorzystanie przez 24% czasu koszt ten rośnie do 50 mld zł za GW – alternatywnie (podobnie jak dla wiatru, dla którego przyjęliśmy mnożnik x 3), można by przyjąć 4-krotnie większą moc elektrowni.

Dla farm wiatrowych na lądzie: 6 mld zł za 1 GW (pamiętając, że trzeba 3-krotnie większej mocy zainstalowanej na wyprodukowanie takiej ilości energii jak z elektrowni jądrowej lub węglowej).

Dla farm wiatrowych na morzu: 12 mld za 1 GW.

Z punktu widzenia zrównoważonej gospodarki najlepsze wykorzystanie biomasy oferują biogazownie, które nie niszczą materiału organicznego, lecz wręcz wytwarzają doskonały nawóz. Całkowity koszt nowoczesnych instalacji (z uwzględnieniem nie tylko samej instalacji, lecz też zbiorników fermentacyjnych, laguny na płyn pofermentacyjny, przyłącza energetycznego, zbiorników na kiszonkę, pochodni biogazowej, zabezpieczeń itp.) wynosi 13 mld za 1 GW. Warto zauważyć, że koszt prądu wytwarzanego w elektrowni węglowej będzie wyższy ze względu na konieczność zakupu drogiego i droższego paliwa. Dla elektrowni jądrowej koszt ten będzie znacznie mniejszy, a dla elektrowni wiatrowych i słonecznych będzie minimalny.

Koszt realizacji Planu W dla Wielkiej Brytanii to 870 mld funtów, czyli niecałe 40% brytyjskiego PKB. Koszt naszego planu to 2700 mld złotych, czyli mniej więcej 70% kosztów planu brytyjskiego, co wynika głównie z mniejszej liczby ludności Polski oraz większych możliwości wykorzystania biomasy. Ponieważ nasza gospodarka jest jednak mniejsza od brytyjskiej, koszt Planu W dla Polski to mniej więcej 2,5-krotność polskiego PKB.

To koszt szacunkowy, do którego należałoby dopisać m.in. stworzenie inteligentnej sieci energetycznej, termomodernizację budynków, wymianę floty samochodowej itp. Jednak te wydatki i tak będzie trzeba ponieść – nasze sieci energetyczne (oraz elektrownie) są już zdekapitalizowane w 70–80%; termomodernizacja domów zwraca się po kilku czy kilkunastu latach, a samochody po kilkunastu latach też trafiają na złom i są zastępowane nowymi.

Koszty energooszczędnych planów „+” dla Polski, zakładających o połowę mniejsze zużycie energii, będą mniej więcej o połowę mniejsze (w każdym razie w obszarze budowy mocy energetycznych, bo do całościowego rachunku dojdą koszty inwestycji w energooszczędność).

Niemniej jednak koszty te mogą dramatycznie spaść zgodnie z krzywą doświadczeń. Rządowy raport, który wyciekł dzięki „Guardianowi” w sierpniu 2007 roku, szacuje, że osiągnięcie „20% do 2020 roku” (20% energii całkowitej ze źródeł odnawialnych, co wymagałoby wzrostu mocy zainstalowanej w OZE o 80 GW) może kosztować „do 22 mld funtów” (co dawałoby średnio 1,7 mld rocznie). To mniej niż 80 mld, które otrzymujemy z naszych powyższych założeń. Autorzy raportu najwyraźniej uważają, że to i tak za dużo i optują za niższym celem – zaledwie 9% OZE. Opór przed celem „20% do 2020 roku” uzasadniają również tym, że wynikające zeń redukcje emisji gazów cieplarnianych „rodzą ryzyko, że europejski system handlu emisjami stanie się zbędny”. To naprawdę okropne!

Inne wydatki liczone w miliardach

Miliardy to wielkie liczby i trudno je sobie wyobrazić. By przybliżyć koszty odejścia od paliw kopalnych, wymienię teraz inne wydatki liczone w miliardach funtów lub wręcz w miliardach funtów rocznie. Wiele z tych kosztów pokażę w przeliczeniu na obywatela, dzieląc sumę całkowitą przez odpowiednią liczbę ludności.

Rozsądnie będzie porównać to z kwotami, które już teraz wydajemy co roku na energię. W Wielkiej Brytanii wydatki konsumentów na energię wynoszą 75 mld funtów rocznie, a całkowita wartość rynkowa całej zużytej energii wynosi 130 mld funtów rocznie. Wydanie 1,7 mld funtów rocznie na inwestycje w nową infrastrukturę energetyczną ma swoje uzasadnienie – to mniej niż 3% obecnych wydatków na energię!

Inne dobre odniesienie to nasze roczne wydatki na ubezpieczenie. Niektóre niezbędne inwestycje dają niepewną stopę zwrotu, tak jak ubezpieczenie. W Wielkiej Brytanii klienci indywidualni i biznesowi wydają na ubezpieczenie 90 mld funtów rocznie.

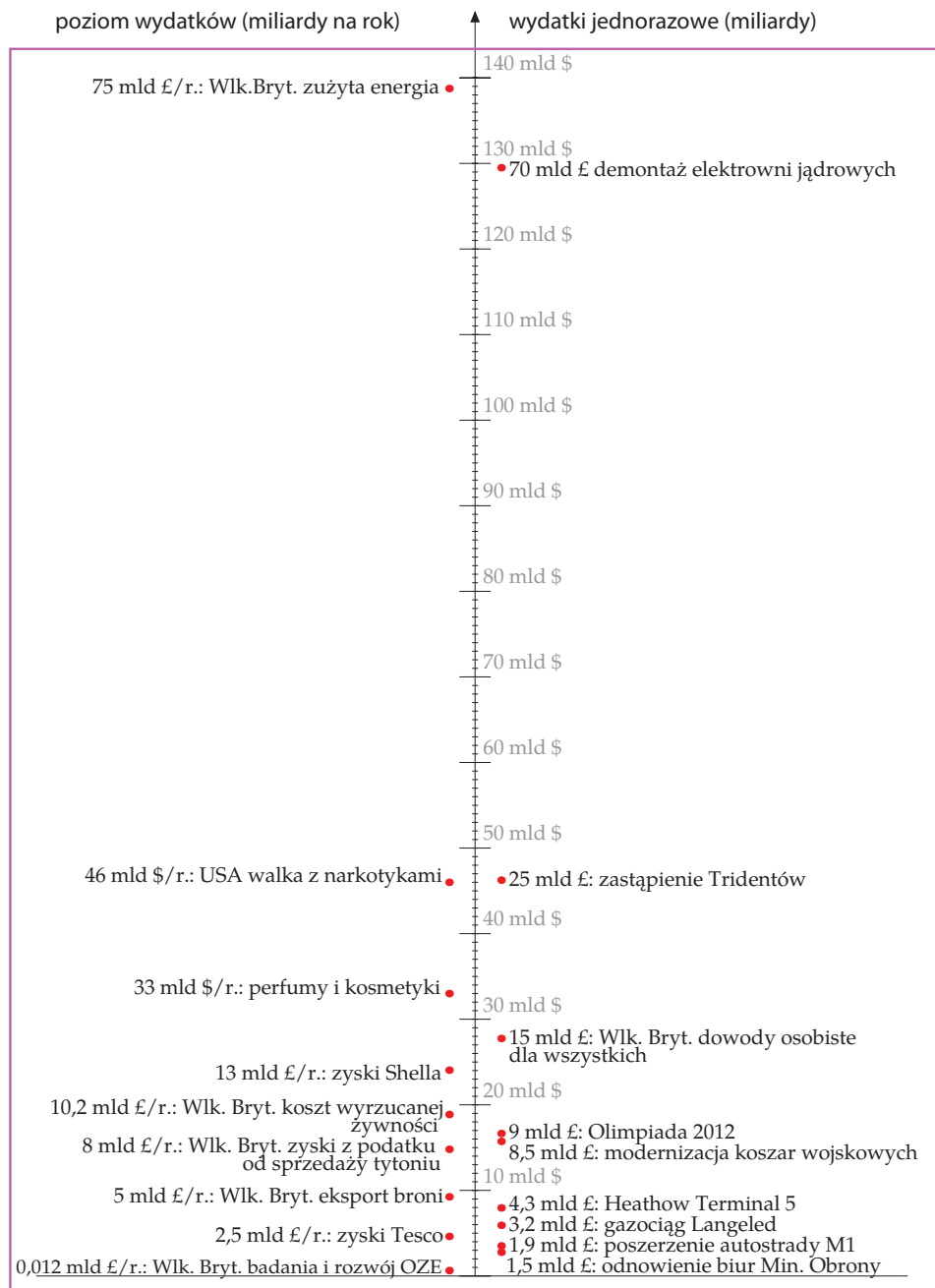
Subsidia

56 mld funtów na przestrzeni 25 lat – tyle wydano na likwidację brytyjskich elektrowni jądrowych i zakładów produkujących broń atomową. To kwota z roku 2004, w 2008 roku wzrosła do 73 miliardów (1200 funtów na Brytyjczyka). [6eoyhg]



Rys. 28.4. Autostrada M1 od węzła 21 do 30

Rys. 28.5. Koszty idące w miliardy. W podziałce na środku duże kreski wyznaczają 10 mld dolarów, a małe kreski – 1 mld dolarów.



Transport

4,3 mld funtów: koszt Terminalu 5 londyńskiego lotniska Heathrow (72 funty na Brytyjczyka).

1,9 mld funtów: koszt poszerzenia 91-kilometrowego odcinka autostrady M1 (od węzła autostradowego 21 do 30, rys. 28.4) [yu8em5]. (32 funty na Brytyjczyka).

Wydarzenia specjalne

Koszt olimpiady w Londynie w 2012: 2,4 mld funtów. Nie, chwila! 5 mld funtów! [3x2cr4]. Może nawet 9 mld funtów... [2dd4mz]. (150 funtów na Brytyjczyka).

Biznes jak zwykle...

2,5 mld funtów/rok: zyski Tesco (deklarowane za 2007 rok). (42 funty rocznie na Brytyjczyka).

10,2 mld funtów/rok: tyle wydają Brytyjczycy na jedzenie, którego nie zjadają (170 funtów rocznie na Brytyjczyka).

11 mld funtów/rok: zyski BP (2006).

13 mld funtów/rok: zyski Royal Dutch Shell (2006).

40 mld dolarów/rok: zyski Exxon (2006).

33 mld dolarów/rok: globalne wydatki na perfumy i kosmetyki do makijażu.

700 mld dolarów/rok: wydatki USA na import ropy naftowej (2300 dolarów rocznie na Amerykanina).

Wydatki rządowe również jak zwykle...

1,5 mld funtów: koszt modernizacji budynków Ministerstwa Obrony (Private Eye nr 1176, 19 stycznia 2007, str. 13) (25 funtów na Brytyjczyka).

15 mld funtów: koszt wprowadzenia dowodów osobistych w Wielkiej Brytanii. [7v1xp]. (250 funtów na Brytyjczyka).

Inwestowanie w przyszłość

3,2 mld funtów: koszt gazociągu Langeled, który transportuje norweski gaz do Wielkiej Brytanii. Zdolność przesyłowa gazociągu wynosi 20 mld m³ rocznie, co odpowiada 25 GW. [6x4nuv] [39g2wz] [3ac8sj]. (53 funty na Brytyjczyka).

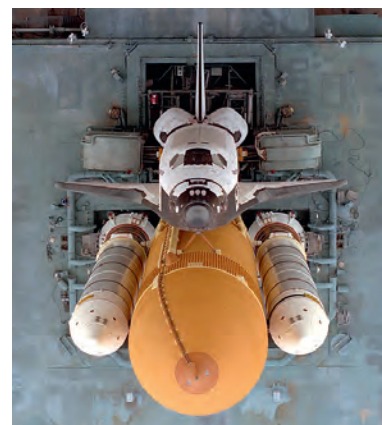
Akcyza na papierosy i inne takie

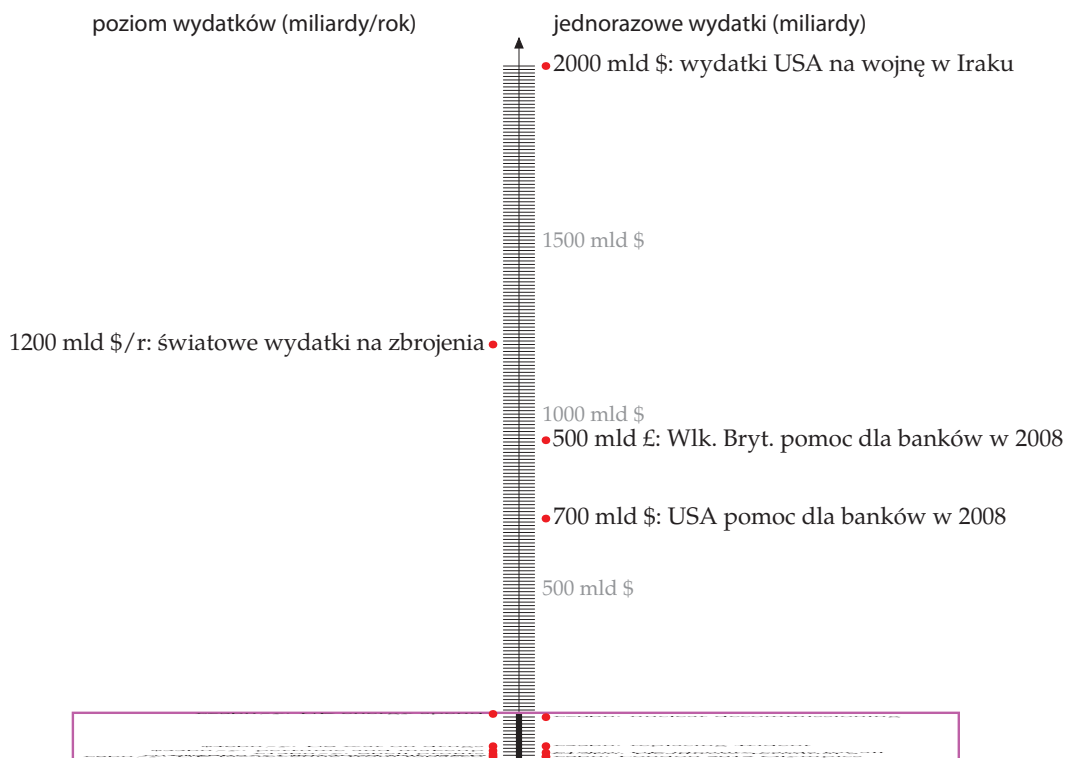
8 mld funtów/rok: wpływy z opodatkowania papierosów w Wielkiej Brytanii [y7kg26]. (130 funtów rocznie na Brytyjczyka). Unia Europejska wydaje niemal miliard euro rocznie na dotowanie uprawy tytoniu. www.ash.org.uk

46 mld dolarów/rok: koszt „wojny z narkotykami” w USA. [r9fcf] (150 dolarów rocznie na Amerykanina).

Przestrzeń kosmiczna

1,7 mld dolarów: koszt jednego wahadłowca kosmicznego (6 dolarów na Amerykanina).





Banki

700 mld dolarów: w październiku 2008 roku amerykański rząd przeznaczył 700 mld dolarów subwencji na wykup długów firm z Wall Street oraz... 500 mld funtów: rząd brytyjski przeznaczył 500 mld funtów na wykup długów banków brytyjskich.

Wojskowość i zbrojenia

5 mld funtów/rok: eksport broni w Wielkiej Brytanii (83 funty rocznie na Brytyjczyka). Z tego 2,5 mld funtów idzie na Środkowy Wschód i 1 mld funtów do Arabii Saudyjskiej. Źródło: „Observer”, 3 grudnia 2006 roku.

8,5 mld funtów: koszt rewitalizacji koszar w Aldershot i Salisbury Plain (140 funtów na Brytyjczyka).

3,8 mld funtów: koszt dwóch lotniskowców (63 funtów na Brytyjczyka). news.bbc.co.uk/1/low/scotland/6914788.stm

4,5 mld dolarów /rok: koszt zaniechania produkcji broni atomowej. Amerykański Departament Energii wydaje niemalże 4,5 mld dolarów rocznie na „zarządzanie arsenałem broni jądrowej” – tylko na jego utrzymanie, bez testowania broni jądrowej i bez wielkoskalowej produkcji nowej broni (15 dolarów rocznie na Amerykanina).

10–25 mld funtów: koszt zastąpienia Tridenta, brytyjskiego systemu arsenału jądrowego.

(170–420 funtów na Brytyjczyka). [ysncks].

63 mld dolarów: amerykańska darowizna w postaci „wsparcia wojskowego” dla Bliskiego Wschodu na przestrzeni 10 lat – mniej więcej po połowie dla Izraela i krajów arabskich. [2vq59t] (210 dolarów na Amerykanina).

Rys. 28.6. Kolejne wydatki idące w miliardy.

Pionowa podziałka została sprasowana dwudziestokrotnie w stosunku do rys. 28.5 co pokazano z zachowaniem skali w fioletowym prostokącie.

1200 mld dolarów/rok: globalne wydatki na zbrojenia. [ym46a9]. (200 dolarów rocznie na mieszkańca Ziemi).

2000 mld dolarów lub więcej: koszt poniesiony przez USA w związku z wojną w Iraku. [99bpt] według laureata nagrody Nobla w dziedzinie ekonomii Josepha Stiglitz. (7000 dolarów na Amerykanina).

Według Raportu Sterna globalne koszty uniknięcia niebezpiecznych zmian klimatu (o ile zaczniemy działać już dziś) wyniosą 440 mld dolarów rocznie (440 dolarów na osobę rocznie, jeżeli podzielimy koszty równo między miliard najbogatszych). W 2005 roku tylko rząd amerykański wydał 480 mld dolarów na działania wojenne i przygotowania do wojny. 840 mld dolarów wyniosły całkowite wydatki na zbrojenia 15 największych krajów, które ponoszą takie wydatki.

Wydatki, które nie idą w miliardy

0,012 mld funtów rocznie: najmniejszy element na rys. 28.5 to wydatki brytyjskiego rządu na badania i rozwój odnawialnych źródeł energii (0,20 funta rocznie na Brytyjczyka).

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 231 **Rys. 28.2.** Założyłem, że farmy fotowoltaiczne mają moc na jednostkę powierzchni 5 W/m² jak farma bawarska ze str. 50. Każda farma na mapie dostarcza średnio 100 MW mocy. Całkowita średnia produkcja wynosiłaby 5 GW, co wymaga z grubsza 50 GW mocy szczytowej (to 16 razy więcej niż moc zainstalowana w fotowoltaice w Niemczech w 2006 roku). Żółte sześciokąty oznaczają energetykę słoneczną z koncentracją. Każdy ma średnią moc 5 GW. Trzeba dwóch takich sześciokątów, by zasilić jedną ze stref z rozdziału 25.
- 233 **Koszt budowy elektrowni jądrowej 16 mld złotych za 1 GW...** Dane z firm energetycznych i agencji ratingowych wskazują, że koszt budowy elektrowni atomowych wynosi od 4,5 do 5,4 mld euro/1000 MW. Dane te potwierdza koncern EDF, który przy okazji publikacji wyników za drugi kwartał 2010 r. poinformował o wzroście kosztów – z 3,3 do 5 mld euro – budowy elektrowni atomowej we Flamanville we Francji (o mocy 1650 GW). [2w2fq24]. Euro przeliczone po kursie 4 zł.
- Wysoka cena reaktorów wynika z niewielkiego wolumenu produkcji i wynikającej z tego niestandardowej konstrukcji każdej elektrowni. Chińska komisja nuklearna przewiduje, że gdy ruszy masowa produkcja zestandaryzowanych reaktorów, ich cena znacząco spadnie. W najbliższych latach Chiny planują rozpoczęcie prac nad reaktorem CAP1700, którego koszty konstrukcyjne mają wynosić 1000 dolarów za kW (czyli 3 mld zł za GW). [325vne].
- ... koszt „czystego węgla” 17,5 mld złotych za 1 GW... Koszt elektrowni z wychwytem dwutlenku węgla o mocy 600 MW, budowanej w Teksasie to 3,5 mld dolarów. [29sdvau]. Dolar przeliczony po kursie 3 zł.
 - ... koszt elektrowni słonecznej na Saharze to 50 mld złotych za 1 GW... elektrownia CSP kosztuje 4000 dolarów/kW i działa przez 22-24% czasu; aż 87% kosztów elektryczności wytwarzanej przez elektrownie CSP jest związanych z początkowymi nakładami na budowę. [yd9eqdl]. Dolar przeliczony po kursie 3 zł.
 - ... koszt elektrowni wiatrowych na lądzie 6 mld złotych za 1 GW... Budowa instalacji wiatrowych w naszym kraju kosztuje 5-7 mln zł za 1 MW zainstalowanej mocy. [29m5gpc].
 - ... koszt elektrowni wiatrowych na morzu 12 mld złotych za 1 GW... Szacuje się, że koszt budowy 1 MW elektrowni wiatrowej *off-shore* wynosi obecnie 3 mln euro. Euro przeliczone po kursie 4 zł. [27m2tzb].
 - ... koszt biogazowni 13 mld złotych za 1 GW... [34s2aea].
- 234 **Rządowy raport, który wyciekł dzięki „Guardianowi” ...** W artykule „Guardiana” z 13 sierpnia 2007 roku czytamy [2bmuod]: „rządowi oficjele w sekrecie poinformowali ministrów, że Wielka Brytania nie ma szans na zbliżenie się do nowego celu Unii Europejskiej w zakresie OZE, na który wiosną zgodził się Tony Blair. Zasugerowali, że znajdują sposób wymigania się od tych zobowiązań”. Rządowy raport dostępny jest tutaj: [3g8nn8].
- 235 **... perfumy...** – Źródło: Worldwatch Institute, www.worldwatch.org/press/news/2004/01/07/
- ... działania wojenne i przygotowania do wojny.... www.conscienceonline.org.uk
 - **Wydatki brytyjskiego rządu na badania i rozwój odnawialnych źródeł energii.** W latach 2002–03, na badania i rozwój w dziedzinie OZE brytyjski rząd przeznaczył 12,2 miliona funtów. Źródło: Komisja ds. Nauki i Technologii Izby Lordów, 4. Raport z Sesji 2003–04. [3jo7q2].
- Równie niska jest rządowa alokacja w Programie Budownictwa Niskoemisyjnego (Low Carbon Buildings Programme) – wynosi 0,018 miliarda funtów rocznie dzielone między wiatr, biomasę, słońce (ogrzewanie wody i prąd), gruntowe pompy ciepła, małe elektrownie wodne i małą kogenerację.

29 *No to co robimy?*

Musimy działać teraz. Nie kiedyś, w przyszłości, ale teraz. Inaczej konsekwencje, już dziś tak tragiczne, będą nieodwracalne. Nie ma nic poważniejszego, pilniejszego i wymagającego silniejszego przywództwa.

Tony Blair, 30 października 2006

...to trochę niepraktyczne.

Tony Blair, dwa miesiące później,
w odpowiedzi na sugestię, że sam powinien pokazać przywództwo
i zaprzestać lotów na wakacje na Barbados.

Wachlarz działań częściowo zależy od naszej motywacji. Przypomnijmy sobie, że na str. 10 omówiliśmy trzy rodzaje motywacji odejścia od paliw kopalnych: koniec ery tanich paliw kopalnych, bezpieczeństwo dostaw oraz zmiany klimatu. Na początek założmy, że naszą motywacją są zmiany klimatu i że chcemy radykalnie ograniczyć emisję gazów cieplarnianych (sceptycy globalnego ocieplenia mogą pominąć tę część i dołączyć do nas na następnej stronie, w sekcji Co z bezpieczeństwem dostaw?).

Co zrobić z zanieczyszczeniem dwutlenkiem węgla?

Nie jesteśmy na drodze do zeroemisyjnej przyszłości. Nie podejmujemy długookresowych inwestycji. Nie rozkwitają przedsięwzięcia zajmujące się wychwytem dwutlenku węgla. I to mimo zaleceń klimatologów i ekonomistów, którzy twierdzą, że dla uniknięcia niebezpiecznych zmian klimatu może być konieczne nawet wysysanie dwutlenku węgla z atmosfery. Co gorsza, CO₂ nie jest jeszcze wychwytywane w żadnej elektrowni (z wyjątkiem małego prototypu w Niemczech).

Dlaczego?

Podstawowym problemem jest brak właściwej wyceny zanieczyszczania CO₂. I nie ma żadnej pewności, że w przyszłości ta wycena będzie prawidłowa. Prawidłowa cena w moim ujęciu to cena wystarczająco wysoka, by skłonić każdą elektrownię węglową do założenia instalacji CCS.

Złagodzenie zmian klimatu to skomplikowana kwestia. Ogólna zasada, którą dałoby się zakreślić jednym pociągnięciem pióra, byłaby taka: cena dwutlenku węgla musi skłonić ludzi, by przestali spalać węgiel bez wychwytu CO₂. Ta ogólna zasada stosuje się do większości rozwiązań – w perspektywie długoterminowej węgiel będzie największym wyzwaniem (ograniczenie emisji z ropy i gazu ma znaczenie drugorzędne, jako że podaż ropy i gazu powinna spadać przez najbliższe 50 lat).

Co w związku z tym powinni zrobić politycy? Dopilnować, by każda elektrownia węglowa została wyposażona w instalację wychwytu CO₂. Pierwszym krokiem jest rządowe finansowanie dla projektu demonstracyjnego w dużej skali, co pozwoli dopracować technologię CCS. Po drugie, politycy powinni dostosować przepisy dotyczące energetyki i dopilnować, by każda elektrownia została wyposażona w tę udoskonaloną technologię. Tutaj najprościej byłoby przyjąć ustawę ustalającą datę, po której wszystkie elektrownie węglowe muszą wychwytywać dwutlenek węgla. Niemniej jednak większość polityków wybranych w demokratycznych wyborach wydaje się sądzić, że sposobem na

zamknięcie drzwi jest stworzenie rynku pozwoleń na pozostawienie szpary w drzwiach. Przyjmijmy dogmat, że problem zmian klimatu powinien zostać rozwiązany przez rynek. Jakie są rynkowe sposoby osiągnięcia naszego prostego celu, czyli wyposażenia wszystkich elektrowni węglowych w instalacje wychwyty CO_2 ? No cóż, możemy się objąć w ramach handlu emisjami – handlu pozwoleniami na emitowanie gazów cieplarnianych i certyfikatami wychwyty CO_2 , gdzie certyfikat wychwyty 1 tony CO_2 byłby wymienialny na pozwolenie na emisję 1 tony zanieczyszczeń. Jednakże właściciele elektrowni węglowych zainwestują w CCS jedynie wtedy, gdy będą pewni, że wysoka cena CO_2 utrzyma się na tyle długo, by inwestycja się zwróciła. Eksperci uważają, że gwarantowana w długim okresie cena CO_2 , rzędu 100 dolarów za tonę, załatwi sprawę.

Stąd też politycy muszą na tyle ambitnie uzgodnić długoterminowe cele redukcji emisji CO_2 , by inwestorzy mieli pewność, że cena CO_2 będzie stale rosła co najmniej do poziomu 100 dolarów za tonę. Opcjonalnie, mogą wystawić pozwolenia na emisje na aukcji, ustalając cenę minimalną. Rządy mogłyby również poręczyć inwestycje w CCS, gwarantując, że wykupią certyfikaty za 100 dolarów za tonę CO_2 niezależnie od sytuacji na rynku handlu pozwoleń na emisje.

Cały czas zastanawiam się, czy nie lepiej byłoby zamknąć te drzwi raz a dobrze zamiast kombinować w ramach międzynarodowego rynku handlu emisjami, który ma jedynie zachęcać do zamykania tych drzwi.

Brytyjska polityka energetyczna jest po prostu dziurawa. Nie daje bezpieczeństwa, nie pozwoli zrealizować naszych zobowiązań w zakresie ochrony klimatu. Nie odpowiada na potrzeby krajów najbardziej potrzebujących.

Lord Patten of Barnes,
przewodniczący grupy zadaniowej ds. energii i zmian klimatu
Uniwersytetu w Oxfordzie,
4 czerwca 2007

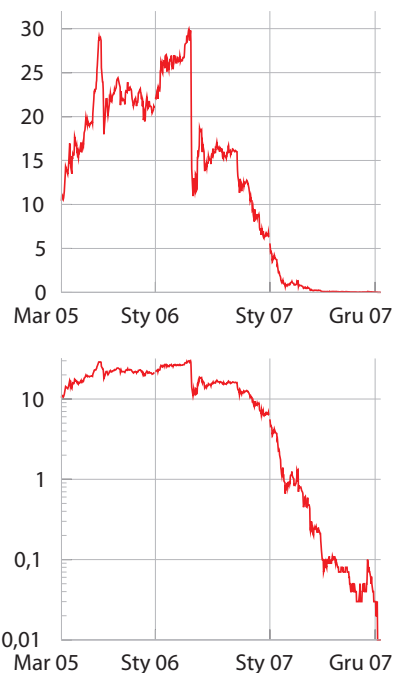
Co z bezpieczeństwem dostaw?

Poszerzmy wachlarz motywacji. Teraz chcemy odejść od paliw kopalnych, by zwiększyć bezpieczeństwo dostaw energii.

Co zrobić, by wzrosły dostawy energii z innych źródeł i efektywność energetyczna? Jedna postawa to: „Niech zadziała niewidzialna ręka rynku. Paliwa kopalne będą coraz droższe, źródła odnawialne i atom staną się relatywnie tańsze i racjonalny konsument wybierze technologie efektywne energetycznie”. Dziwi mnie wiara w rynek, zważywszy, jak często rynki serwują nam wyżki i spadki, załamania kredytowe czy też upadki banków. Rynki mogą się sprawdzać przy podejmowaniu niektórych decyzji krótkoterminowych, przy inwestycjach z dziesięcioletnim zwrotem. Ale czy możemy oczekiwać, że rynki pomogą nam podjąć słuszne decyzje odnośnie energii? Decyzje, których skutki będą mieć wpływ na kolejne dziesięciolecia lub stulecia?

Jeżeli pozwolimy wolnemu rynkowi budować domy, będą to domy słabo izolowane. Dzisiejsze domy są bardziej efektywne energetyczne tylko dzięki legislacji.

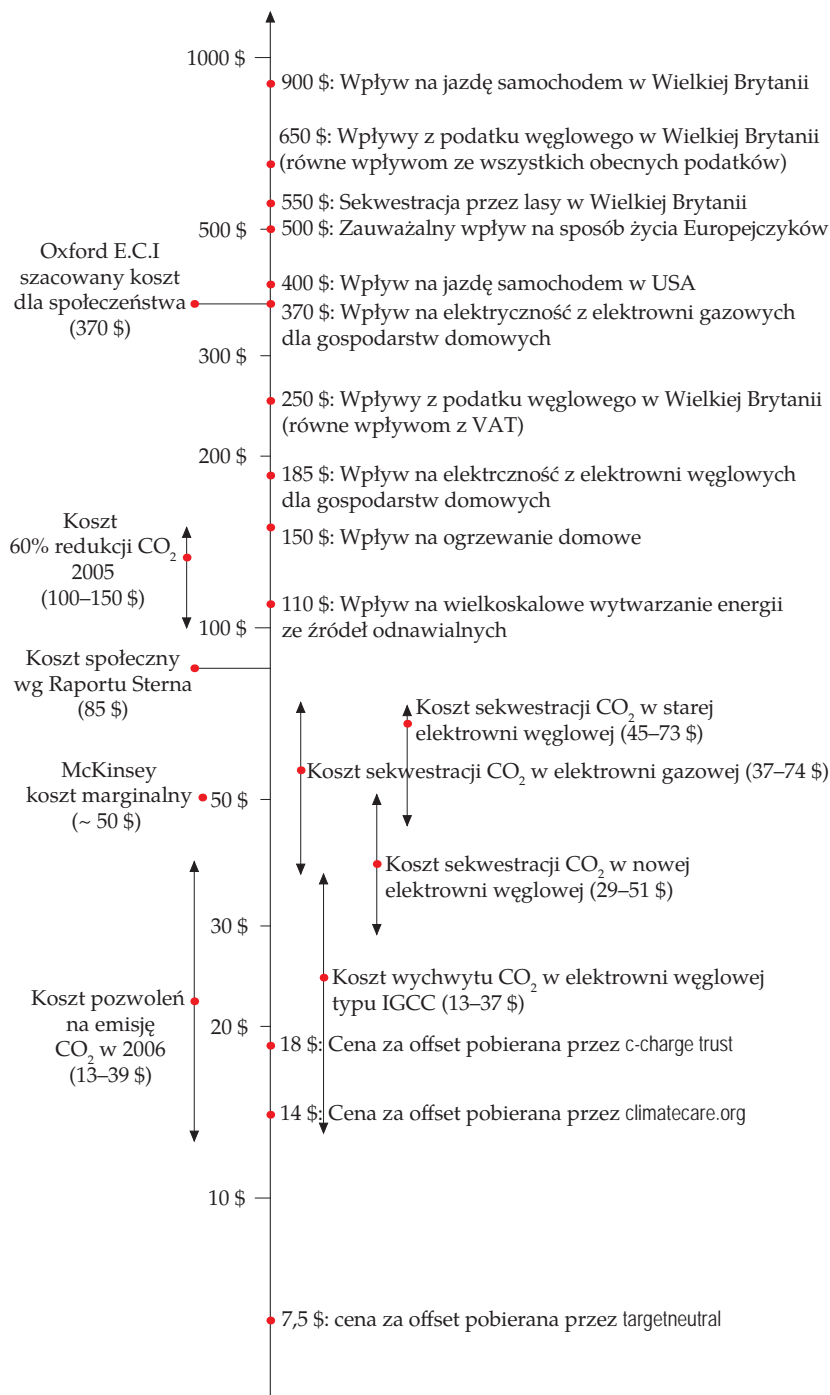
Wolny rynek nie odpowiada za budowanie dróg, kolei, buspasów, parkingów czy ścieżek rowerowych. Za to budowa dróg, parkingów i ścieżek rowerowych ma istotny wpływ na nasze transportowe wybory. Podobnie jak regulacje związane



Rys. 29.1. A to ci dopiero skuteczność! Cena tony CO_2 w euro w pierwszym okresie działania europejskiego systemu handlu emisjami.

Na górnym wykresie wykres ceny uprawnień do emisji w skali liniowej, na dole w logarytmicznej (ponieważ na górnym wykresie cena w drugiej połowie 2007 roku jest nieodróżnialna od zera).

Źródło: www.eex.com



Rys. 29.2. Jaka cena CO₂ skłoniłaby społeczeństwo do znacznego ograniczenia emisji?

Diagram pokazuje poziom cen dwutlenku węgla (za tonę), przy którym poszczególne inwestycje staną się opłacalne ekonomicznie albo wpłynie na poszczególne zachowania (przy założeniu, że istotne zmiany zachowań w zakresie np. podróży samolotem i samochodem zajdą, kiedy cena CO₂ podwoi koszt tych działań). Jeśli koszt wzrośnie do 20 – 70 USD za tonę, CO₂ będzie wystarczająco drogie, by opłacało się wyposażyć nowe i stare elektrownie w instalację wychwytu CO₂.

Przy cenie 110 USD za tonę zaczęłyby na siebie zarabiać elektrownie OZE dużej skali, które teraz dostarczają prąd po 3 pенса (14 gr) za kWh, czyli drożej niż elektrownie gazowe. Dla przykładu, rozważana elektrownia wodna na rzece Severn produkowałaby energię z fal o koszcie 6 pенса (28 gr) za kWh, a to 3,3 pенса więcej niż średnia cena prądu, wynosząca 2,7 pенса (12 gr) za kWh. Gdyby każde 1000 kWh wyprodukowane przez tę elektrownię wiązało się z uniknięciem emisji 1 tony CO₂ o wartości 60 funtów za tonę, elektrownia na Severn zaczęłaby na siebie zarabiać.

Przy cenie 150 USD za tonę indywidualni użytkownicy gazu zobaczą koszt dwutlenku węgla na rachunkach za ogrzewanie. Cena rządu 250 USD za tonę podniosłaby koszt baryłki ropy o 100 USD.

Przy cenie 370 USD za tonę zanieczyszczenie CO₂ kosztowałoby na tyle dużo, by spadła liczba podróży samolotem.

Przy cenie 500 USD za tonę przeciętny Europejczyk, który nie zmienił swoich przyzwyczajzeń, wydawałby 12% dochodu na koszt emisji związany z jazdą samochodem, lataniem i ogrzewaniem domu gazem.

Przy cenie 900 USD za tonę zauważalnie wzrósłby koszt jazdy samochodem.

z planowaniem przestrzennym, które określają, gdzie wolno zbudować domy i kompleksy biurowe i jak gęsto można rozmieścić domy na skrawku gruntu, mają przemożny wpływ na to, jak będziemy podróżować. Jeżeli tworzy się nowe miasteczko bez stacji kolejowej, nie ma co się spodziewać, że jego mieszkańcy będą odbywać dalekie podróże pociągiem. Jeżeli domy i miejsca pracy będą od siebie oddalone bardziej niż o kilkanaście kilometrów, wielu ludzi stwierdzi, że musi dojeżdżać samochodem.

Produkcja rzeczy pochłania bardzo dużo energii. Na wolnym rynku wielu wytwórców dostarcza nam produkty, które mają się zepsuć. Trzeba je będzie wyrzucić i zastąpić, co zapewni większe obroty producentom.

Rynek może odegrać pewną rolę, ale twierdzenie: „Zostawmy wszystko niewidzialnej ręce rynku” jest po prostu niemądre. Musimy porozmawiać o prawodawstwie, regulacjach i podatkach.

Zazieleniamy system podatkowy

Musimy gruntownie zrewidować wszystkie nasze podatki i opłaty. Cel: zwiększyć podatki od zanieczyszczeń (szczególnie od paliw kopalnych), a zmniejszyć opodatkowanie ludzkiej pracy.

Nicolas Sarkozy, prezydent Francji

Teraz taniej jest kupić nową mikrofalówkę, odtwarzacz DVD czy odkurzacz niż naprawić stary sprzęt. To szaleństwo.

Ten idiotyzm częściowo wynika z naszego systemu podatkowego, który nakłada podatki na pracę właściciela punktu napraw AGD i zmusza go do czasochłonnego wypełniania papierzysk. Facet robi coś dobrego, naprawia moją mikrofalówkę, a mimo to fiskus utrudnia mu prowadzenie biznesu.

Pomysł z „zazielenieniem systemu podatkowego” opiera się na przesunięciu opodatkowania z tego, co dobre (np. praca) na to, co złe (np. szkoda dla środowiska naturalnego). Zwolennicy ekologicznej reformy podatkowej sugerują, by cięcia podatkowe w zakresie tego co dobre zostały zrównoważone podniesieniem podatków na to, co złe. W ten sposób reforma byłaby neutralna dla budżetu.

Podatek węglowy

Jeżeli mamy promować technologie obywające się bez paliw kopalnych, po pierwsze musimy podnieść podatek od dwutlenku węgla. Cena CO₂ musi być na tyle wysoka, by stymulować inwestycje w substytuty paliw kopalnych i w efektywność energetyczną. Zauważ, że to samo promowaliśmy w poprzedniej części. Niezależnie, czy przyświeca Ci idea ochrony klimatu, czy zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii, polityczny wynik jest jeden – potrzebujemy wysokiej i stabilnej ceny CO₂. rys. 29.2 pokazuje w przybliżeniu, jak różne ceny CO₂ wpłyną na zmiany zachowań i kierunki inwestycji. Mamy tu też znacznie niższe opłaty pobierane przez organizacje, które podobno kompensują emisje gazów cieplarnianych („offset”). W jaki sposób doprowadzić do podniesienia ceny dwutlenku węgla? Czy europejski system handlu emisjami – ETS (rys. 29.1) to dobra ścieżka? To pytanie do ekonomistów i specjalistów od stosunków międzynarodowych. Według ekonomistów z Cambridge, Michaela Grubba i Davida Newbery’ego, ETS nie spełnia swojej roli – „zastosowane instrumenty nie wygenerują inwestycji na miarę potrzeb”.

„The Economist” rekomenduje podatek węglowy jako podstawowy mechanizm rządowego wspierania czystych źródeł energii. Grupa Polityczna Partii Konserwatywnej ds. Jakości Życia również rekomenduje podniesienie podatków ekologicznych i obniżenie innych podatków – „przejdźcie od płac skoro zarabiasz do płac skoro spalasz”. Królewska Komisja ds. Zanieczyszczenia Środowiska również stwierdza, że Wielka Brytania powinna wprowadzić podatek węglowy. „Opodatkowanie powinno nastąpić u źródła i objąć wszystkie sektory”.

Mamy więc wyraźne poparcie dla wysokiego podatku węglowego i obniżenia podatków dochodowych obywateli i firm oraz VAT-u. Niestety podatki i rynek nie wystarczą, by uruchomić wszystkie konieczne działania. Podejście: podatki plus rynek zawodzi, kiedy konsumenci podejmują irracjonalne decyzje, kiedy cenią sobie wyżej dzisiejszą gotówkę niż jutrzejsze oszczędności lub też, kiedy wybierając towar, nie płacą wszystkich kosztów związanych z tym wyborem.

W istocie niektóre marki są uspokajająco drogie. Wybory konsumentów nie są determinowane tylko ceną. Wielu dba bardziej o wizerunek i skojarzenia związane z marką, a niektórzy świadomie kupują to co drogie.

Kiedy kupimy nieefektywny energetycznie sprzęt, klamka zapadła. Najważniejsze, by takie nieefektywne produkty w ogóle nie były produkowane. Lub też by konsumentowi można było wyperswadować kupno nieefektywnego sprzętu.

Oto kilka innych przykładów słabości wolnego rynku

Bariera wejścia na rynek

Wyobraźmy sobie, że podatki węglowe są na tyle wysokie, że superwypasiony niskoemisyjny gadżet kosztowałby 5% mniej niż jego sprzedawany od lat wysokoemisyjny konkurent wapniak-gadżet, gdyby był produkowany masowo i w tych samych ilościach. Dzięki zastosowaniu sprytnej technologii, emisje ekogadżetu są fantastycznie niskie – 90% niższe niż u konkurencji. Oczywiście byłoby dobrze, gdyby wszyscy z miejsca zaczęli kupować ekogadżety zamiast wapniak-gadżetów. A jednak obecnie sprzedaż nowych ekogadżetów jest niewielka, stąd też koszty na jednostkę produktu są wyższe niż dla wapniak-gadżetu. Tylko kilku ekologów z liściem we włosach i naukowców w fartuchach kupi ekogadżet i firma Eko-gadżet spółka z o.o. zbankrutuje.

Być może konieczne są interwencje rządów, które pozwolą na gładki start i otworzą szanse innowacjom. Wsparcie finansowe badań i rozwoju? Zachęty podatkowe promujące zakup nowego produktu (tak jak zachęty podatkowe, które pozwoliły na gładkie przejście od benzyny ołowiowej do bezołowiowej)?

Problem małych różnic w cenie

Wyobraźmy sobie, że Eko-gadżet sp. z o.o. jednak rozwija produkcję i że podatki węglowe są na tyle wysokie, że ekogadżet rzeczywiście kosztuje 5% mniej niż sprzedawany od lat wysokoemisyjny konkurent produkowany przez Wapniak SA. Myślicie, że teraz dzięki podatkowi węglowemu ludzie rzucą się na niskoemisyjne ekogadżety?

Co to, to nie! Po pierwsze, wielu konsumentów nie przywiązuje wagi do 5% różnicy w cenie. Wizerunek jest najważniejszy! Po drugie, jeżeli w ogóle Wapniak SA poczuje na plecach oddech konkurencji, odświeży wizerunek

wapniak-gadżetu, podkreślając, że jest bardziej patriotyczny, że teraz można go mieć w kolorze zielonym i że fajni ludzie pozostają wierni staremu dobremu wapniak-gadżetowi. „Prawdziwi mężczyźni wybierają wapniak-gadżety”. Jeżeli to nie zadziała, Wapniak SA roześle notki prasowe z informacją, że według naukowców długotrwałe używanie ekogadżetów może powodować raka, powoła się na przypadek starszej pani, która potknęła się o ekogadżet lub zasugeruje, że ekogadżety szkodzą nietoperzowi rudawce nilowej. Lęk. Niepewność. Wątpliwości.

Ostatecznie w ramach planu awaryjnego korporacja Wapniak SA zawsze może wykupić spółkę Eko-gadżet. Zwycięski produkt wcale nie musi być efektywny energetycznie, o ile zachęta cenowa będzie zaledwie pięcioprocentowa.

Jak rozwiązać ten problem? Może rząd powinien po prostu zabronić sprzedaży wapniak-gadżetów (tak jak zabronił sprzedaży benzyny ołowiowej)?

Przypadek Larrego i Tiny

Wyobraźmy sobie, że Larry jest właścicielem budynku i wynajmuje mieszkanie Tinie. Larry jest odpowiedzialny za wyposażenie i remonty w mieszkaniu, a Tina opłaca comiesięczne rachunki za ogrzewanie i prąd. I tu mamy problem. Larremu nie opłaca się inwestować w modernizację mieszkania, co obniżyłoby rachunki Tiny. Mógłby zainstalować świetlówki energooszczędne, podłączyć bardziej efektywną energetycznie lodówkę. Dodatkowy koszt takich przyjaznych środowisku sprzętów szybko by się zwrócił, ale pieniądze lądowałyby w kieszeni Tiny, nie Larrego. Na tej samej zasadzie Larry nie ma powodu, by ocieplić mieszkanie lub wstawić okna o podwójnych szybach, szczególnie kiedy sobie pomyśli, że chłopak Tiny, Wayne, mógłby rozbić okno po pijaku. Co do zasady na doskonale działającym rynku zarówno Larry, jak i Tina podjęliby „właściwe” decyzje. Larry zainstalowałby energooszczędne sprzęty, a potem podniósłby nieco czynsz. Tina rozumiałaby, że w nowoczesnym, dobrze wyposażonym mieszkaniu rachunki będą niższe i zgodziłaby się na podwyżkę czynszu. Larry zażądałby dodatkowego depozytu na wypadek, gdyby Wayne rozbił szybę w nowym, drogim oknie, a Tina postąpiłaby racjonalnie i pozbyła się Wayne’a. Jednak nie sądzę, by Larry i Tina zadziałali zgodnie z zasadami idealnego rynku. Tina nie ma grosza przy duszy, nie wysupła pieniędzy na wysoką kaucję. Larremu bardzo zależy na wynajmie mieszkania, więc Tina nie ufa jego zapewnieniom odnośnie niskich rachunków. Myśli, że pewnie to wyolbrzymia.

Konieczny jest jakiś rodzaj interwencji, by skłonić Larrego i Tinę do podjęcia właściwych działań – na przykład rząd mógłby nałożyć wysoki podatek na sprzęty nieefektywne energetycznie, zabronić sprzedaży lodówek, które nie spełniają odpowiednich standardów, narzucić wysokie standardy izolacji dla wszystkich budynków lub też wprowadzić obowiązkowy system niezależnego audytu energetycznego tak, żeby Tina mogła przejrzeć sobie profil energetyczny mieszkania przed wynajmem.

Inwestycje w badania i rozwój

Ubolewamy nad tym, jak niskie kwoty rząd przeznaczył na badania i rozwój w zakresie odnawialnych źródeł energii (12,2 mln funtów w latach 2002–03). (...) To musi się zmienić, jeżeli chcemy korzystać z innych źródeł odnawialnych, a nie tylko z wiatru. Trudno oprzeć się wrażeniu, że rząd nie przykłada do problemów energetycznych wystarczającej wagi.

Komisja ds. Nauki i Technologii Izby Lordów

Brak rozumienia nauki często prowadzi do powierzchownych decyzji politycznych. Energetyczna biała księga z 2003 roku jest tego dobrym przykładem. Nie chciałbym publicznie nazwać tego amatorszczyzną, jednak ta publikacja nie podchodzi do problemu realistycznie.

Sir David King, były główny doradca naukowy rządu Wielkiej Brytanii

Uczestnicząc w pracach rządowego Zespołu Doradczego ds. OZE (...) czułem się tak, jakbym oglądał kilkadziesiąt odcinków politycznego sitcomu w zwolnionym tempie. Nie sądzę, by rząd kiedykolwiek poważnie podchodził do OZE.

Jeremy Leggett, założyciel Solarcentury

Liczy mówią same za siebie. Wystarczy spojrzeć na rys. 28.5 (str. 235) i porównać miliardy wydane na remonty biur i zabawki militarne ze stukrotnie niższymi wydatkami na badania i rozwój w zakresie OZE. Dziesiątki lat zabiera dopracowanie technologii energii z prądów pływowych, energii słonecznej z koncentracją czy fotowoltaiki. Synteza jądrowa też wymaga dziesięcioleci. Wszystkie te technologie, jeżeli mają się upowszechnić, na początku potrzebują wsparcia.

Działania dla każdego

Ludzie czasem pytają mnie: „Co ja mogę zrobić?”. W tabeli 29.3 wymieniam osiem prostych działań, które może podjąć każdy z nas i pokazuję związane z nimi przybliżone oszczędności energii. Są pewne warunki. Twoje oszczędności będą zależeć od punktu, z którego startujesz. W tabeli 29.3 zakładamy, że punktem odniesienia jest osoba zużywająca więcej energii niż wskazuje średnia.

Proste działania	Możliwe oszczędności
Nałóż wełniany sweter i przykręć termostat (np. do 15 – 17 °C). Załóż oddzielne termostaty na wszystkich grzejnikach. Wyłącz ogrzewanie, kiedy nikogo nie ma w domu. To samo zrób w pracy.	20 kWh/d
Odczytuj wszystkie liczniki (gazu, prądu, wody) raz w tygodniu i zidentyfikuj łatwe działania, które pozwolą Ci ograniczyć zużycie (np. wyłączanie sprzętów). Załóż się z przyjaciелеm, kto bardziej zmniejszy zużycie. Odczytuj liczniki w pracy, tworząc zwyczaj stałego audytu energetycznego.	4 kWh/d
Zrezygnuj z latania.	35 kWh/d
Prowadź samochód rzadziej, wolniej, łagodniej. Dziel auto z innymi, wybierz samochód elektryczny, dołącz do klubu wspólnej jazdy. Wybierz rower, spacer, pociąg lub autobus.	20 kWh/d
Pracuj na swoim starym sprzęcie (np. komputerze), nie wymieniał go przedwcześnie.	4 kWh/d
Wymień oświetlenie na fluorescencyjne lub LED.	4 kWh/d
Nie ładuj do koszyka co popadnie. Nie pakuj zakupów.	20 kWh/d
Bądź wegetarianinem przez 6 dni w tygodniu.	10 kWh/d

Tabela 29.3. Osiem prostych działań dla każdego

Powyższe działania łatwo wdrożyć. Te z tabeli 29.4 wymagają nieco więcej planowania, determinacji i pieniędzy.

Duże działania	Możliwe oszczędności
Wyciągnij przeciągi.	5 kWh/d
Podwójne szyby.	10 kWh/d
Popraw izolację ścian, dachu i podłogi.	10 kWh/d
Kolektory słoneczne.	8 kWh/d
Moduły fotowoltaiczne.	5 kWh/d
Zburz stary dom i postaw nowy.	35 kWh/d
Zastąp ogrzewanie na węgiel lub gaz powietrznymi i gruntowymi pompami ciepła.	10 kWh/d

Tabela 29.4. Siedem trudniejszych działań

Na zakończenie w tabeli 29.5 wymieniam dwa pomniejsze działania – proste zmiany dające niewielkie oszczędności.

Działanie	Możliwe oszczędności
Pierz w zimnej wodzie.	0,5 kWh/d
Nie susz ubrań w suszarce bębnowej. Susz je na sznurze lub w suszarni.	0,5 kWh/d

Tabela 29.5. Kolejne prostsze działania dające mniejsze oszczędności

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

239 „... to trochę niepraktyczne”. Pełną transkrypcję wywiadu z Tonym Blairem z 9 stycznia 2007 roku można znaleźć tutaj: [2ykfgw]. A oto kolejne cytaty:

Dziennikarz: Nie myślał pan kiedyś, by zrezygnować z wakacji na Barbados i nie latać tych tysięcy kilometrów?

Tony Blair: Szczerze mówiąc, wolałbym nie zrezygnować z zagranicznych wakacji.

Dziennikarz: Dałby pan przecież świetny przykład. Te wszystkie dalekie podróże samolotem do słonecznych krajów... Może tak wakacje bliżej domu?

Tony Blair: Taaaak. Osobiście uważam, że to trochę niepraktyczne wymagać od ludzi, by tak się zachowali. Powinniśmy raczej sprawić, by podróże lotnicze były bardziej efektywne energetycznie, by pojawiły się nowe paliwa, które pozwolą nam zużywać mniej energii i mniej emitować. Mamy na przykład nowe konstrukcje samolotów, które są znacznie bardziej efektywne energetycznie.

Ja wiem, że ludzie zawsze... ludzie pewnie myślą, że premier nie powinien w ogóle mieć wakacji, ale wydaje mi się, że teraz stawiamy przed ludźmi nie-realne cele, kiedy im mówimy, że zlikwidujemy tanie latanie... Wie pan, cały czas czekam, kiedy pojawi się pierwszy polityk, który w trakcie wyborów powie ludziom coś takiego. Nikt tego nie powie.

„Musimy działać teraz. Nie kiedyś w przyszłości, ale teraz. Inaczej konsekwencje, już dziś tak tragiczne, będą nieodwracalne. Nie ma nic poważniejszego, pilniejszego i wymagającego silniejszego przywództwa”. Powyższy cytat pochodzi z przemówienia Tony’ego Blaira na konferencji promującej Raport Sterna, wygłoszonego 30 października 2006 roku. [2nsvx2]. Więcej komentarzy na ten temat w: [yxq5xk].

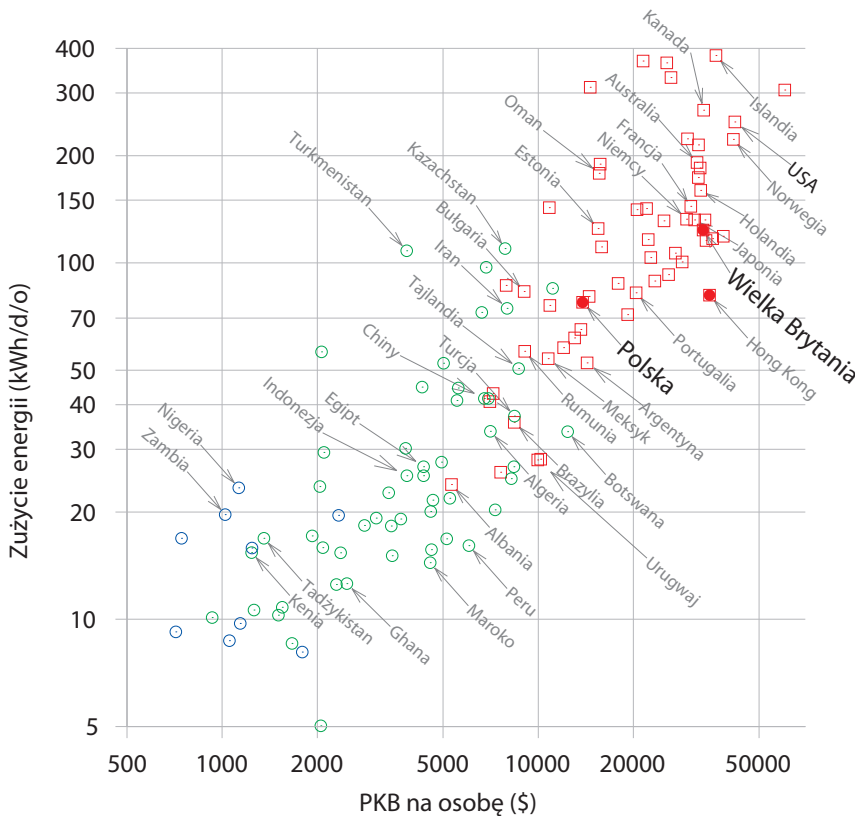
242 **Ekologiczna reforma podatkowa.** Więcej na stronie Komisji na rzecz Zielonej Polityki Fiskalnej (Green Fiscal Commission), www.greenfiscalcommission.org.uk.

243 „The Economist” rekomenduje podatek węglowy. „Nowa era energetyki jądrowej”, „The Economist”, 8 września 2007.

– Grupa Polityczna Partii Konserwatywnej ds. Jakości Życia – Gummer i in. (2007).

30 Plany energetyczne dla Europy, Ameryki Północnej i świata

Rys. 30.1 pokazuje zużycie energii w wybranych krajach i regionach w stosunku do ich produktu krajowego brutto (PKB). Powszechnie uważa się, że rozwój i wzrost są dla ludzkości dobre. W związku z tym, szkicując plany zrównoważonej energetyki założę, że wszystkie kraje o niskim PKB będą wędrować na prawą stronę diagramu. A wraz ze wzrostem PKB nieuchronnie wzrośnie zużycie energii – nie wiemy jednak o ile. Poziom zużycia dla przeciętnego Europejczyka (125 kWh na osobę dziennie) wydaje się rozsądnym założeniem. Może się też zdarzyć, że działania na rzecz efektywności, przewidziane w modelowej Brytanii z rozdziałów: 19–28, pozwolą wszystkim krajom na osiągnięcie europejskiego standardu życia przy niższym zużyciu energii. W planie na str. 213 zużycie energii w modelowej Brytanii spadło do około 68 kWh/d/o. Pamiętając, że w modelowej Brytanii pominięto dużą część przemysłu, założmy nieco wyższy cel, na poziomie zużycia Hong Kongu – 80 kWh/d/o.



Rys. 30.1. Zużycie energii *per capita* w stosunku do PKB *per capita*, w dolarach amerykańskich, według parytetu siły nabywczej. Dane pochodzą z Raportu o Rozwoju Społecznym (Human Development Report) Programu Narodów Zjednoczonych ds. Rozwoju (UNDP) z 2007 roku. Kwadraty oznaczają kraje o „wysokim wskaźniku rozwoju” społecznego a kółka – o „średnim” lub „niskim”. Obie zmienne w skali logarytmicznej. Rys. 18.4 pokazuje te same dane w normalnej skali liniowej.

Rachunki dla Europy

Czy Europa może bazować na źródłach odnawialnych?

Średnia gęstość zaludnienia w Europie jest mniej więcej o połowę niższa niż w Wielkiej Brytanii, mamy więc więcej powierzchni na ustawienie rozległych instalacji OZE. Obszar Unii Europejskiej to około 9000 m² na osobę. Niestety

wiele źródeł odnawialnych na kontynencie ma mniejszą gęstość energetyczną niż w Wielkiej Brytanii – na większości obszaru Europy mniej wieje, jest mniej fal, nie ma pływów. Gdzieś tam mają lepsze warunki dla energetyki wodnej (w Skandynawii i Europie Środkowej), gdzieś tam mocniej świeci słońce. Wypracujmy jakieś przybliżone liczby.

Wiatr

Centralna część kontynentu europejskiego charakteryzuje się niższymi przeciętnymi prędkościami wiatru niż Wyspy Brytyjskie. Na przykład na większości obszaru Włoch prędkości wiatru oscylują poniżej 4 m/s.

Założmy, że 1/5 Europy ma wystarczająco dobre wiatry, by opłacało się stawiać farmy wiatrowe o gęstości energetycznej 2 W/m². Następnie założmy, że zalecamy tym regionom taką samą kurację jak Wielkiej Brytanii w rozdziale 4 wypełniając 10% ich obszaru wiatrakami. Obszar Unii Europejskiej to około 9000 m² na osobę. Stąd też wiatr daje:

$$\frac{1}{5} \times 10\% \times 9000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ W}$$

czyli 9 kWh/o/d.

Energetyka wodna

W Europie produkcja energii z wody wynosi 590 TWh rocznie (67 GW), co podzielone między 500 milionów daje 3,2 kWh na osobę dziennie. Prym wiodą Norwegia, Francja, Szwecja, Włochy, Austria i Szwajcaria. Gdyby każdy kraj podwoił liczbę elektrowni wodnych (co może być trudne), wówczas energia z wody zapewniłaby 6,4 kWh na osobę dziennie.

Fale

Mnożąc całe wybrzeże Atlantyku (około 4000 km) przez zakładaną średnią produkcję rzędu 10 kW/m, otrzymujemy 2 kWh na osobę dziennie. Fale w Bałtyku i Morzu Śródziemnym nie są warte dyskusji.

Pływy

Podważając potencjał oszacowany dla Wysp Brytyjskich (11 kWh na osobę dziennie, patrz: rozdział 14), uwzględnimy potencjał pływów u wybrzeży Francji, Irlandii i Norwegii. Dzieląc to przez 500 mln Europejczyków, otrzymujemy 2,6 kWh na osobę dziennie. Potencjał wybrzeży Bałtyku i Morza Śródziemnego nie jest wart rozważań.

Moduły fotowoltaiczne i kolektory na dachach

Jest wiele miejsc bardziej słonecznych niż Wielka Brytania, dlatego panele słoneczne zapewnią kontynentowi więcej energii. 10 m² dachowych modułów fotowoltaicznych dostarczyłoby około 7 kWh dziennie wszędzie na południe od Wielkiej Brytanii. 2 m² kolektorów słonecznych zapewniłoby średnio 3,6 kWh dziennie ciepła niskotemperaturowego (sugerowanie większej powierzchni na osobę nie ma sensu, bo to powinno zaspokoić typowe zapotrzebowanie na gorącą wodę).

Co jeszcze?

Do tej pory zbieraliśmy: $9 + 6,4 + 2 + 2,6 + 7 + 3,6 = 30,6$ kWh na osobę dziennie. Nie wymieniliśmy jeszcze energii geotermalnej i energetyki słonecznej dużej skali (opartej na zwierciadłach, panelach lub biomasie).

Geotermia może być pomocna, ale wciąż jest w fazie badań. Traktowałbym ją jak syntezę jądrową – to dobra inwestycja, ale za wcześnie, by na nią stawiać.

A co z farmami słonecznymi? Można by przeznaczyć 5% Europy (450 m² na osobę) na systemy fotowoltaiczne, takie jak farma bawarska pokazana na fot. 6.7 (o gęstości energetycznej rzędu 5 W/m²). Zapewniłoby to średnią moc rzędu:

$$5 \text{ W/m}^2 \times 450 \text{ m}^2 = 54 \text{ kWh na osobę dziennie.}$$

Tak więc systemy fotowoltaiczne zapewniłyby dużo energii. Podstawowym problemem jest ich koszt. No i skąd wziąć energię zimą?

Uprawy energetyczne? Rośliny wychwytyją zaledwie 0,5 W/m² (fot. 6.11). Europa musi się wyżywić, stąd też ilość energii dostarczonej przez rośliny (innej niż kalorie w pożywieniu), nigdy nie będzie imponująca. Owszem, tu i ówdzie będzie rzepak, gdzie indziej lasy, ale nie wyobrażam sobie jednak, by całkowity wkład roślin energetycznych był większy niż **12 kWh na osobę dziennie**.

Podsumowanie

Bądźmy realistami. Podobnie jak Wielka Brytania Europa nie może oprzeć się tylko na własnych źródłach odnawialnych. By móc odejść od paliw kopalnych, Europa musi zwrócić się ku energetyce jądrowej lub też energii słonecznej z cudzych pustyń albo ku jednej i drugiej.

Rachunki dla Ameryki Północnej

Przeciętny Amerykanin zużywa 250 kWh na osobę dziennie. Czy źródła odnawialne temu sprostają? Wyobraźmy sobie, że narzucamy szokujące standardy efektywności (takie, jak: efektywne energetycznie samochody i elektryczne pociągi dużych prędkości), przez co Amerykanie upadają w otchłań nędzy, czyli zużywają energię na poziomie przeciętnego Europejczyka czy Japończyka (125 kWh na osobę dziennie).

Wiatr

Zespół Elliotta (1991) szacuje potencjał energii wiatrowej w USA. Najsilniej wieje w Północnej Dakocie, Wyoming i Montanie. Według ich obliczeń w całym kraju można by wykorzystać 435 000 km² (bez ryzyka większych protestów), generując 4600 TWh rocznie (czyli **42 kWh na osobę dziennie**, po podzieleniu przez 300 mln mieszkańców). W rachunkach założyli gęstość energetyczną rzędu 1,2 W/m² (nawiasem mówiąc, to mniej niż nasze 2 W/m², założone w rozdziale 4). Powierzchnia tych farm wiatrowych (435 000 km²) z grubsza odpowiada wielkości Kalifornii. Należałoby wybudować wiatraki o mocy około 2600 GW (przy założeniu współczynnika obciążenia 20%), a to dwieście razy więcej niż dzisiaj.



Fot. 30.2. Kolektor słoneczny podgrzewający wodę pewnej rodzinie z Michigan. Pompa kolektora jest zasilana niewielkim modulem fotowoltaicznym umieszczonym po lewej.

Farmy na morzu

Założmy, że na płytkich wodach przybrzeżnych o powierzchni Delaware i Connecticut (20 000 km² – duża część wszystkich płytkich wód wschodniego wybrzeża USA) stawiamy farmy wiatrowe o gęstości energetycznej 3 W/m². Otrzymujemy średnią moc 60 GW, co dzielone na 300 mln mieszkańców daje 4,8 kWh/d/o. Trzeba by wybudować 15 razy więcej wiatraków, niż stoi dzisiaj w USA.

Energia geotermalna

W rozdziale 16 wspominałem opracowanie na temat geotermii wykonane w MIT (Massachusetts Institute of Technology, 2006). Autorzy optymistycznie oceniają potencjał energii geotermalnej w Ameryce Północnej, a szczególnie w stanach zachodnich, dysponujących większą liczbą gorących skał. „Przy rozsądnych inwestycjach w badania i rozwój, wspomagane systemy geotermalne mogą zapewnić co najmniej 100 GW(e) konkurencyjnej cenowo mocy na przetrzeni następnych 50 lat. Co za tym idzie, mogą one być stabilnym źródłem energii w perspektywie długookresowej”. Założmy, że mają rację. 100 GW prądu, dzielone na 300 mln mieszkańców, daje 8 kWh na osobę dziennie.

Energetyka wodna

Elektrownie wodne w Kanadzie, USA i Meksyku generują jakieś 660 TWh energii rocznie. Dzielone na 500 mln ludzi daje to 3,6 kWh na osobę dziennie. Gdyby udało się podwoić produkcję w energetyce wodnej w Ameryce Północnej, hydroenergia zapewniałaby 7,2 kWh na osobę dziennie.

Co jeszcze?

Jak dotąd mamy: 42 + 4,8 + 8 + 7,2 = 62 kWh na osobę dziennie. To nie wystarczyłoby nawet Europejczykowi! Mógłbym rozważyć szereg innych opcji, na przykład zrównoważone spalanie kanadyjskich lasów. Zamiast jednak przedłużać agonię, przeskoczmy od razu do technologii, która załatwia nam sprawę – do koncentrowania energii słonecznej.

Na rys. 30.3 oznaczono obszary w Ameryce Północnej, które dostarczyłyby każdemu mieszkańcowi (500 mln ludzi) średnio 250 kWh dziennie.

Podsumowanie

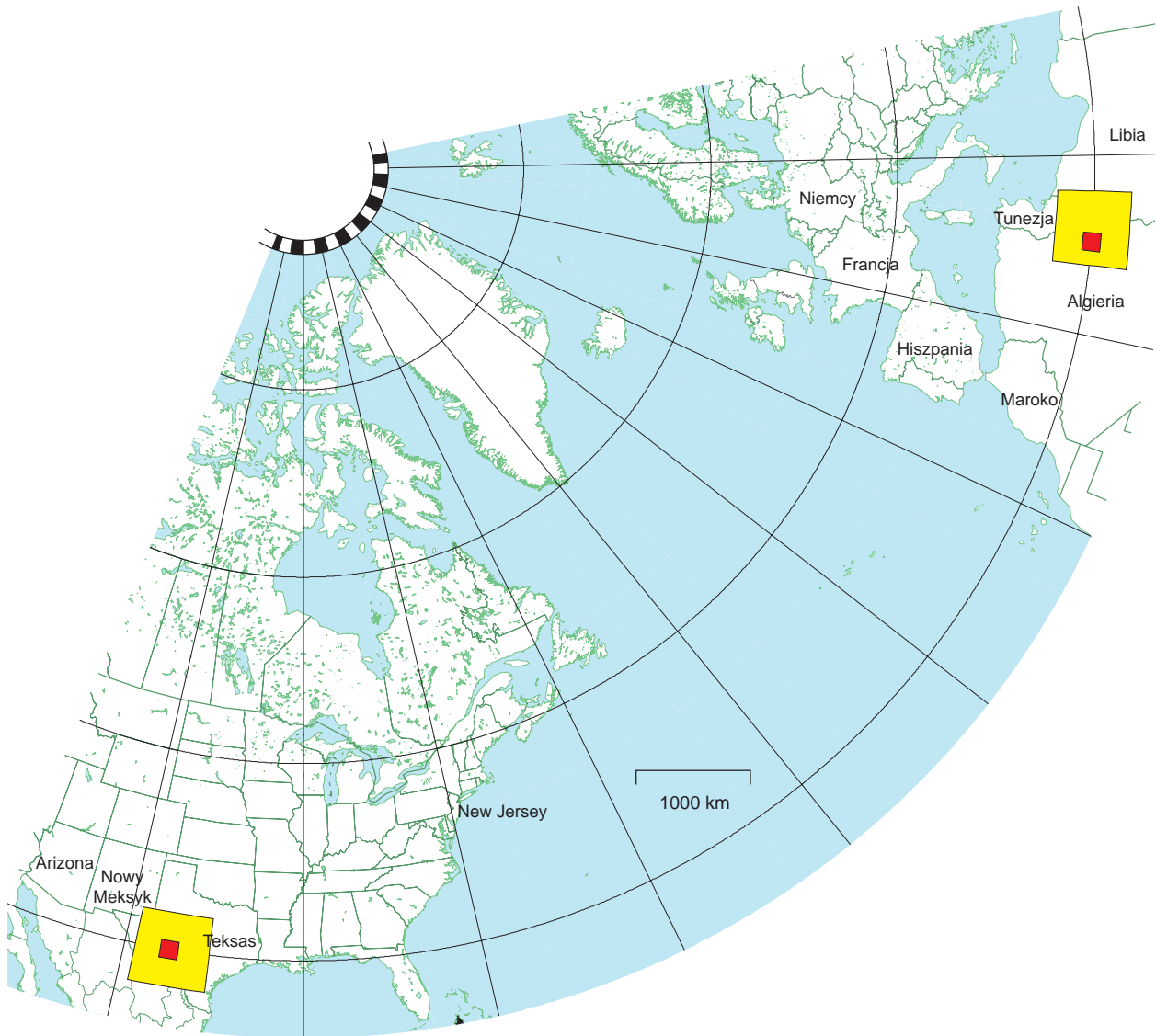
Odnawialne źródła w Ameryce Północnej inne niż słońce nie wystarczą. Jeżeli jednak na masową skalę rozwinie się energetyka słoneczna, energii będzie w bród. Ameryka Północna potrzebuje słońca z własnych pustyń albo atomu, albo jednego i drugiego.

Rachunki dla świata

Jak zapewnić 6 miliardom ludzi europejski standard życia, na poziomie zużycia energii równym 80 kWh na osobę dziennie?

Wiatr

Wyjątkowe miejsca na mapie świata o silnym i stabilnym wietrze to środkowe stany USA (Kansas, Oklahoma), Saskatchewan w Kanadzie, południowe krańce



Rys. 30.3. Kwadraty znów atakują. Kwadrat wielkości 600 km na 600 km w Ameryce Północnej, szczelnie wypełniony elektrowniami koncentrującymi energię słoneczną pozwoliłby 500 mln ludzi zużywać prąd na dzisiejszym amerykańskim poziomie (250 kWh dziennie).

Na mapie mamy również kwadrat 600 km na 600 km w Afryce, na który już się natknęliśmy. Tak jak wcześniej, zakładam tutaj gęstość energetyczną rzędu 15 W/m^2 .

Powierzchnia jednego żółtego kwadratu jest nieco większa od Arizony i 16 razy większa niż New Jersey.

W każdym z dużych kwadratów mamy mniejszy, o wielkości 145 na 145 km, wyznaczający obszar na pustyni (o wielkości jednego New Jersey) konieczny do zapewnienia 250 kWh/d/o trzydziestu milionom ludzi.

Argentyny i Chile, pn.-wsch. Australia; pn.-wsch. i pn.-zach. Chiny, pn.-zach. Sudan; pld.-zach. RPA, Somalia, Iran i Afganistan. I farmy wszędzie na morzach za wyjątkiem pasa tropików wokół równika, o szerokości 60 stopni.

Do oszacowania globalnego posłużymy się liczbami Greenpeace i Europejskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej: „Całkowite dostępne zasoby wiatru na świecie szacuje się na 53 000 TWh rocznie”. To **24 kWh na osobę dziennie**.

Energetyka wodna

W skali świata energetyka wodna dostarcza około 1,4 kWh na osobę dziennie.

Na stronie www.ieahydro.org czytamy: „Międzynarodowe Stowarzyszenie Hydroenergetyki i Międzynarodowa Agencja Energii szacują całkowity potencjał techniczny energetyki wodnej na 14 000 TWh rocznie (6,4 kWh na osobę dziennie w skali globu), z czego rozwój około 8000 TWh/rok (**3,6 kWh na osobę dziennie**) uważa się obecnie za opłacalny ekonomicznie. Większość tego potencjału zidentyfikowano w Afryce, Azji i Ameryce Łacińskiej”.

Pływy

Istnieje kilka miejsc na świecie o potencjale energii z pływów zbliżonym do ujścia Severn (rys. 14.8). W Argentynie mamy dwa takie punkty: San José i Golfo Nuevo, Australia ma Walcott Inlet, USA i Kanada dzielą Zatokę Fundy, Kanada ma Cobequid, Indie Zatokę Khambat, USA mają Turnagain Arm i Knik Arm, a Rosja Tugur.

Prawdziwym pływowym olbrzymem jest rosyjska Zatoka Penżyńska (Morze Ochockie) o zasobach rzędu 22 GW – dziesięciokrotnie większych niż Severn!

Kowalik (2004) szacuje, że w skali globu można by generować 40–80 GW mocy z pływów. Podzielone na 6 mld ludzi daje to **0,16–0,32 kWh na osobę dziennie**.

Fale

Można oszacować całkowity potencjał energii z fal, mnożąc długość wybrzeży wystawionych na silne wiatry (około 300 000 km) przez typową moc na jednostkę długości wybrzeża (10 kW na metr). Otrzymujemy 3000 GW.

Zakładając, że 10% tego potencjału jest pochwycone przez elektrownie falowe o 50-procentowej sprawności konwersji mocy fal na elektryczność, energia fal mogłaby zapewnić **0,5 kWh na osobę dziennie**.

Energia geotermalna

Według D. H. Freestona z Instytutu Geotermii w Auckland moc zainstalowana w geotermii na świecie w 1995 roku wyniosła około 4 GW, czyli 0,01 kWh na osobę dziennie. Załóżmy, że naukowcy z MIT mają rację (str. 107) i że wszędzie jest tak jak w Stanach, czyli że energia geotermalna może zapewnić **8 kWh na osobę dziennie**.

Słońce w roślinach energetycznych

Ludzie ekscytują się roślinami energetycznymi, takimi jak jatrofa (podobno nie będzie konkurować o glebę z żywnością, bo rośnie na nieużytkach). Zanim wpadną w zachwyt, powinni przyrzeć się liczbom. Liczby dotyczące jatrofy

znajdują się na str. 299. Nawet gdyby pokryć całą Afrykę plantacjami jatrofy, generowana moc, podzielona na sześć miliardów ludzi, zapewniłaby **8 kWh na osobę dziennie** (a to zaledwie energia jednej trzeciej obecnego zużycia ropy na świecie). Nie porzucimy nałogu ropy, przedstawiając się na jatrofę!

Oszacujmy, jak dużo energii mogą dostarczyć rośliny energetyczne w skali globu. Użyjemy tej samej metody, jak w rozdziale 6 dla Wielkiej Brytanii – przeznaczamy na uprawę wszystkie grunty orne. Obecnie 18% powierzchni świata to grunty orne – 27 mln km². To **4500 m² na osobę** w sześcimiiliardowej populacji. Przy założeniu gęstości energetycznej 0,5 W/m² i strat rzędu 33% związanych z uprawą i przetwarzaniem, uprawy energetyczne, zajmując całość obszarów rolniczych, zapewniłyby **36 kWh na osobę dziennie**. A może te szacunki są zaniżone, skoro na rys. 6.11 (str. 52) widzimy, że brazylijska trzcina cukrowa charakteryzuje się gęstością energetyczną rzędu 1,6 W/m² (trzy razy większą niż właśnie założyliśmy)? No dobrze, brazylijskie uprawy energetyczne mogą mieć przyszłość. Chciałbym teraz przejść do naszej ostatniej możliwości.

Kolektory słoneczne, moduły fotowoltaiczne i koncentrowanie energii słonecznej

Kolektory słoneczne? Nic, tylko instalować. Sprawdzą się niemal wszędzie na świecie. Światowym liderem w tym zakresie są Chiny. Na świecie mamy ponad 100 GW mocy w kolektorach słonecznych, z czego ponad połowa przypada Chinom.

Systemy fotowoltaiczne sprawdzą się w Europie, ale stwierdziliśmy, że są za drogie. Mam oczywiście nadzieję, że się mylę. Byłoby cudownie, gdyby koszt fotowoltaiki spadł tak samo, jak na przestrzeni ostatnich 40 lat spadły ceny komputerów.

Zakładam, że w wielu rejonach świata najlepszym sposobem generowania prądu ze słońca byłoby koncentrowanie energii słonecznej, co omawialiśmy na stronie 187 i 251. Ustaliliśmy już, że miliardowi ludzi w Europie i Afryce Północnej wystarczyłyby elektrownie słoneczne pokrywające kawał pustyni blisko basenu Morza Śródziemnego i że potrzeby energetyczne pięciuset milionów w Ameryce Północnej zaspokoilyby elektrownie wielkości Arizony na pustyniach USA i Meksyku. Identyfikację odpowiednich pustyń dla pozostałych 4,5 mld ludzi pozostawiam Czytelnikom.

Podsumowanie

Potencjał (z wyłączeniem energetyki słonecznej) jest następujący. Wiatr: 24 kWh/d/o, energetyka wodna: 3,6 kWh/d/o, pływy: 0,3 kWh/d/o, fale: 0,5 kWh/d/o, geotermia:

8 kWh/d/o, co w sumie daje 36 kWh/d/o. Naszym celem było zużycie na poziomie energooszczędnego Europejczyka, czyli 80 kWh na osobę dziennie. Konkluzja jest jasna – potencjał innych niż słońce odnawialnych źródeł energii może i jest „ogromny”, ale nie jest wystarczający. By dopełnić plan, musimy oprzeć się na wybranych formach energetyki słonecznej. Lub też na atomie. Albo na jednym i drugim.

Sheffield	28%
Edinburgh	30%
Manchester	31%
Cork	32%
Londyn	34%
Kolonia	35%
Kopenhaga	38%
Monachium	38%
Paryż	39%
Berlin	42%
Wellington, NZ	43%
Seattle	46%
Toronto	46%
Detroit, MI	54%
Winnipeg	55%
Pekin 2403	55%
Sydney 2446	56%
Pula, Chorwacja	57%
Nicea, Francja	58%
Boston, MA	58%
Bangkok, Tajlandia	60%
Chicago	60%
Nowy Jork	61%
Lizbona, Portugalia	61%
Kingston, Jamajka	62%
San Antonio	62%
Sewilla, Hiszpania	66%
Nairobi, Kenia	68%
Johannesburg, RPA	71%
Tel Aviv	74%
Los Angeles	77%
Upington, RPA	91%
Yuma, AZ	93%
Pustynia Sahara	98%

Tabela 30.4. Nasłonecznienie w różnych miejscach na świecie [3doaeq]

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

250 Potencjał energetyki wiatrowej na morzu w Ameryce Północnej:

www.ocean.udel.edu/windpower/ResourceMap/index-wn-dp.html

- Ameryka Północna potrzebuje słońca z własnych pustyń, albo atomu albo jednego i drugiego. O planie firmy Google z 2008 roku zakładającym 40% redukcję zużycia paliw kopalnych w USA można przeczytać w artykule Jeffery'a Greenblatta *Czysta Energia 2030* [3lcw9c]. Główne działania to: zwiększenie efektywności energetycznej, elektryfikacja transportu i produkcja prądu ze źródeł odnawialnych. Plan produkcji energii elektrycznej zawiera:

10,6 kWh/d/o	z wiatru,
2,7 kWh/d/o	z fotowoltaiki,
1,9 kWh/d/o	z koncentrujących elektrowni słonecznych,
1,7 kWh/d/o	z biomasy,
i 5,8 kWh/d/o	z geotermii

do roku 2030. To razem 23 kWh/d/o z nowych odnawialnych źródeł energii. W planie zakłada się również niewielki wzrost produkcji w energetyce jądrowej, z 7,2 kWh/d/o do 8,3 kWh/d/o. Produkcja w energetyce wodnej pozostaje bez zmian. W użyciu pozostałby gaz, zapewniając 4 kWh/d/o.

253 Całkowity potencjał energetyki wodnej... – Źródło: www.ieahydro.org/faq.htm.

- Globalny potencjał energii z fal jest szacowany na 3000 GW. Więcej w: Quayle i Changery (1981).
- Moc zainstalowana w geotermii w 1995 roku. Freeston (1996).

254 Uprawy energetyczne. Szacunki zbliżone do moich podaje Rogner (2000).

31 Ostatnia deska ratunku

Wychwyt dwutlenku węgla z powietrza to ostatnia rzecz, którą warto rozważać.

Świadomie bawię się podwójnym znaczeniem tego zdania. Z jednej strony, wychwycenie dwutlenku węgla z atmosfery pochłonie takie ilości energii, że rozważanie tej opcji trąci absurdem (co więcej, rodzi się obawa, że nawet napomknienie o teoretycznej możliwości „naprawienia” klimatu dzięki geoinżynierii odwiedzie ludzi od działań tu i teraz). Z drugiej strony, naprawdę uważam, że powinniśmy o tym rozmawiać, szukać najlepszych rozwiązań, finansować badania. Wychwyt dwutlenku węgla może okazać się naszą ostatnią deską ratunku, jeżeli zmiany klimatu będą tak katastrofalne, jak ostrzegają klimatolodzy i jeżeli ludzkość nie wykorzysta tańszych i bardziej sensownych opcji, dziś jeszcze dostępnych.

Zanim przejdziemy do wychwytu dwutlenku węgla z atmosfery, musimy zrozumieć, jak funkcjonuje obieg węgla w przyrodzie.

Zrozumieć CO₂

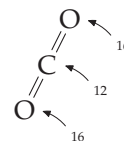
Kiedy tworzyłem szkic tej książki, zamierzałem zupełnie zignorować nauki o klimacie. W niektórych kręgach pytanie: „Czy zmiany klimatu mają miejsce?” budzi kontrowersje. Podobnie jak pytania: „Czy człowiek jest za nie odpowiedzialny?” oraz „A czy to ważne?”. Oraz – dajmy susa na koniec łańcucha kontrowersji – „Co powinniśmy z tym zrobić?”. Wiedziałem, że same odnawialne źródła wymagają tyle uwagi, że lepiej unikać kontrowersji. Chciałem argumentować: „Nieważne kiedy skończą się paliwa kopalne, nieważne czy zmiany klimatu zachodzą, czy też nie, *spalanie paliw kopalnych* i tak nie jest zrównoważone. Zaplanujmy zrównoważony sposób życia i policzmy, jak dużo zrównoważonej energii mamy na stanie”.

Jednakże zmiany klimatu zaczęły funkcjonować w świadomości społecznej i rodzą szereg ciekawych pytań natury ogólnej. Dlatego też omawiam je skrótowo i we wstępie, i w tym rozdziale. Zamiast pełnego omówienia zaproponuję kilka interesujących liczb.

Jednostki

Opłaty za zanieczyszczenie dwutlenkiem węgla są zazwyczaj liczone w dolarach lub euro za tonę CO₂, dlatego też tona CO₂ będzie naszą główną jednostką przy określaniu emisji CO₂ na głowę mieszkańca, a tona CO₂ rocznie posłuży do określenia rocznej emisji (emisja gazów cieplarnianych przeciętnego Europejczyka to odpowiednik 11 ton CO₂ rocznie lub 30 kg CO₂ dziennie). Jednakże omawiając pierwiastek węgla obecny w paliwach kopalnych, roślinności, glebie i wodzie, będę mówił o tonach węgla¹. Jedna tona CO₂ zawiera 12/44 tony węgla, czyli nieco więcej niż ćwierć tony. W skali globu będę mówił o gigatonach węgla (Gt C). Gigatona węgla to miliard ton. Trudno sobie wyobrazić gigatony. Jeżeli chciałbyś sprowadzić je do ludzkich rozmiarów wyobraź sobie, że spalasz jedną tonę czystego węgla [co odpowiada około 1,4 t węgla kamiennego – *red.*] Tyle może pochłonąć ogrzanie domu przez rok. Teraz pomyśl, że każdy na świecie spala 1 tonę czystego węgla rocznie – to 6 Gt C rocznie dla populacji 6 mld.

¹ Z uwagi na wieloznaczność polskiego słowa „węgiel” w tym rozdziale „węgiel” będzie oznaczał pierwiastek węgla (*carbon*). Tam, gdzie będzie mowa o węglu (*coal*) użyjemy sformułowania „węgiel kamienny” [*red.*]



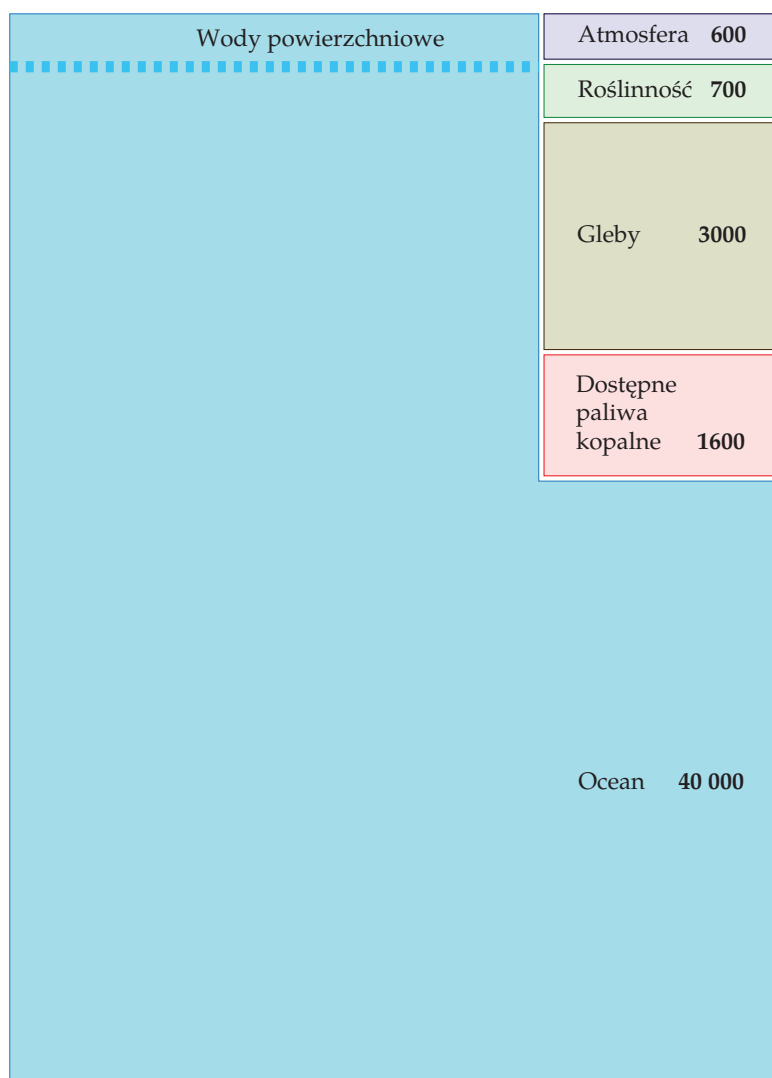
Rys. 31.1. Stosunek masowy węgla do CO₂ wynosi 12 do 44, ponieważ atom węgla waży 12 jednostek, a dwa atomy tlenu 16 jednostek każdy. 12 + 16 + 16 = 44

Gdzie jest ten węgiel?

Gdzie jest cały ten węgiel? Jeżeli chcemy zrozumieć konsekwencje emisji CO₂, musimy wiedzieć, ile węgla jest w oceanach, glebie i roślinności, a ile w atmosferze.

Rys. 31.2 pokazuje, gdzie jest węgiel. Większość (40 000 Gt) znajduje się w oceanach (w postaci rozpuszczonego gazu CO₂, węglanów, żywych roślin i zwierząt oraz rozkładającej się materii). Gleby i roślinność wspólnie zawierają około 3700 Gt. Dostępne paliwa kopalne (głównie węgiel kamienny) zawierają około 1600 Gt (a z uwzględnieniem złóż uważanych obecnie za nieopłacalne w eksploatacji i paliw niekonwencjonalnych może to być nawet 5000 Gt – *red.*) I wreszcie atmosfera zawiera 750 Gt węgla.

Jeszcze do niedawna wszystkie „magazyny” węgla trwały we względnej równowadze – wszystkie wypływy węgla z magazynu (czy to z gleby, roślin, czy z atmosfery) były równoważone przez taki sam dopływ do magazynu.



Rys. 31.2. Szacowana zawartość węgla, w gigatonach, w dostępnych miejscach na ziemi. Potężne ilości węgla zawierają również skały. Tutaj węgiel przemieszcza się w skali milionów lat, a długookresową równowagę warunkuje węgiel w osadach (w procesie subdukcji przedostający się pod płyty tektoniczne) oraz węgiel wypływany od czasu do czasu przez wulkany. Dla uproszczenia pomijam ten geologiczny obieg węgla. Wulkany emitują 200 razy mniej dwutlenku węgla niż my.

Wpływy i wypływy w magazynie paliw kopalnych były nieznaczne. Jednak później człowiek zaczął spalać paliwa kopalne. Stworzyło to dwa dodatkowe niezrównoważone strumienie, co widać na rys. 31.3.

Tempo spalania paliw kopalnych wynosiło w przybliżeniu 1 Gt C w 1920 roku, 2 Gt C w 1955 roku i 8,4 Gt C w 2006 roku (z uwzględnieniem niewielkiego wkładu produkcji cementu, która uwalnia CO_2 z wapienia).

Jak bardzo te dodatkowe strumienie zmieniły obraz z rys. 31.2? No cóż, dokładnie nie wiadomo. Rys. 31.3 pokazuje kluczowe kwestie, o których już nam wiadomo. Duża część tych dodatkowych 8,4 Gt C rocznie zostaje w atmosferze, podnosząc stężenie dwutlenku węgla. Atmosfera stosunkowo szybko wymienia węgiel z wodami powierzchniowymi mórz i oceanów (osiąganie stanu równowagi pomiędzy atmosferą i oceanami zajmuje zaledwie 5–10 lat), przez co zachodzi przepływ CO_2 netto z atmosfery do wód powierzchniowych w wysokości 2 Gt C rocznie (ostatnie badania wskazują, że tempo wchłaniania węgla przez oceany może spadać). Ten nierównoważony przepływ do wód powierzchniowych prowadzi do zakwaszenia oceanów (co można porównać do robienia z oceanów wielkiej wody mineralnej, poprzez ich nasycenie dwutlenkiem węgla w tempie 1 miliona ton CO_2 na godzinę), a to złe wieści dla raf koralowych. Trochę węgla wchłania również roślinność i gleby (być może 1,5 Gt C rocznie), ale te przepływy nie zostały dobrze zbadane. Ponieważ mniej więcej połowa emisji węgla zostaje w atmosferze, dalsze zanieczyszczanie węglem zwiększa stężenie CO_2 w atmosferze i w wodach powierzchniowych.

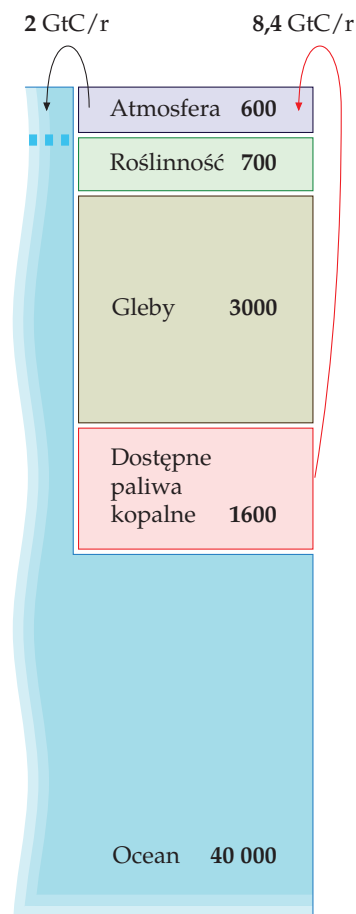
Gdzie na dłuższą metę wyłącza to dodatkowe CO_2 ? No cóż, wzięwszy pod uwagę, że węgla w paliwach kopalnych jest znacznie mniej niż w morzach i oceanach, na dłuższą metę ten dodatkowy węgiel trafi do oceanu, a jego zawartość w atmosferze, roślinności i glebach wróci do normalnego poziomu. Niemniej jednak ta „dłuższa meta” liczona jest w tysiącach lat.

Dla małego impulsu to prawda. Jeśli jednak spalimy całość dostępnych paliw kopalnych (według niektórych oszacowań nawet 5000 Gt C), to będziemy mieć DUŻY impuls.

W takiej sytuacji większa koncentracja jonów węglanowych w oceanach spowoduje rozpuszczenie znajdujących się tam osadów węglanowych (to zjawisko zwane dodatnim sprzężeniem zwrotnym, opisane jest w kolejnych akapitach). Kwasowość oceanów sięgnie poziomów niespotykanych od 250 mln lat – a wszystko w ciągu stulecia. W atmosferze nawet po 1000 lat pozostanie blisko połowa wyrzuconego przez nas CO_2 , trwale zmieniając panujące na Ziemi warunki.

Powrót kwasowości oceanów do punktu wyjścia zajmie setki tysięcy lat. Dopiero wietrzenie węglanów, granitów i bazaltów wyciągnie CO_2 z atmosfery. Patrz np.: [3x6yh95].

Jak już powiedziałem, przywracanie równowagi pomiędzy atmosferą i wodami powierzchniowymi zachodzi szybko. Spójrzmy jednak na przerywaną linię na rys. 31.2 i rys. 31.3, oddzielającą wody powierzchniowe od reszty oceanu. W skali 50 lat ta granica jest niczym solidny mur. Węgiel radioaktywny rozproszony po świecie w wyniku testów jądrowych w latach 60. i 70. spenetrował oceany zaledwie na głębokość 400 m. Tymczasem średnia głębokość oceanów wynosi około 4000 m.



Rys. 31.3. Strzałki ilustrują dwa dodatkowe przepływy węgla spowodowane spalaniem paliw kopalnych. Zachodzi nierównowaga pomiędzy 8,4 Gt C/rok emitowanego ze spalania paliw kopalnych a 2 Gt C/rok pochłanianego przez oceany. Na rysunku pominięto słabiej zbadane przepływy między atmosferą, glebą, roślinnością itd.

Oceany cyrkulują powoli – woda głębinowa potrzebuje 1000 lat na podróż w tę i z powrotem (na powierzchnię, a potem w głębinę). W przeciwieństwie do cyrkulacji powierzchniowej, wzbudzonej przez wiatry cyrkulacja wód głębinowych jest stymulowana poprzez kombinację gradientu temperatur i gradientu zasolenia. Dlatego nazywa się ją cyrkulacją termohalinową.

Powolna rotacja wód oceanicznych ma fundamentalne konsekwencje – mamy wystarczająco dużo paliw kopalnych, by poważnie wpłynąć na klimat najbliższych tysięcy lat.

Gdzie łąduje węgiel?

Rys. 31.3. to wielkie uproszczenie. Ludzie tworzą dodatkowe strumienie nieujęte na diagramie – tylko wypalenie torfu i lasów na Borneo w 1997 roku uwolniło do atmosfery 0,7 Gt C. Incydentalne pożary pokładów węgla uwalniają około 0,25 Gt C rocznie.

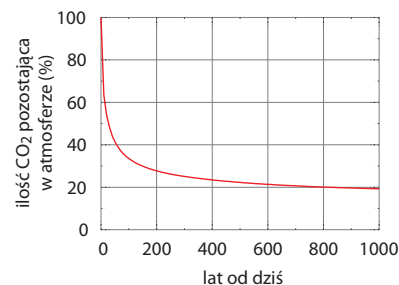
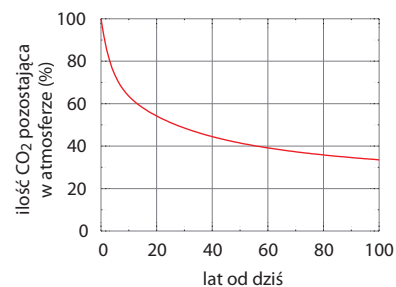
Niemniej jednak ten rysunek pomoże nam zrozumieć, co może się wydarzyć w krótkiej i średniej perspektywie czasowej w ramach różnych strategii. Jeżeli zostawimy wszystko po staremu i w ciągu 50 najbliższych lat spalimy kolejne 500 Gt węgla, można oczekiwać, że węgiel nadal będzie sączył się do oceanu w tempie 2 Gt C rocznie.

Do roku 2055 co najmniej 100 Gt z tych 500 trafiłoby do wód powierzchniowych, a stężenie CO₂ w atmosferze podwoiłoby się w stosunku do okresu przedprzemysłowego.

Gdybyśmy do lat 50. XXI wieku zaprzestali spalania paliw kopalnych, dwugigatonowy przepływ z atmosfery do oceanu zmniejszyłby się (wydawało mi się kiedyś, że ten przepływ do oceanu trwałby dziesiątki lat i tak by się działo, gdyby wody powierzchniowe i atmosfera były w nierównowadze; jednakże, jak już wspominałem, wody powierzchniowe i atmosfera wracają do równowagi w zaledwie kilka lat). Większość z tych 500 Gt, które wypływają do atmosfery, stopniowo wsącza się do oceanu na przestrzeni następnego kilku tysięcy lat, kiedy wody powierzchniowe przesuną się w głąb i ustąpią wodom z głębin.

Nasze perturbacje ze stężeniami węgla zostaną skorygowane, ale dopiero za tysiące lat. I to przy założeniu, że tak poważna perturbacja nie zmodyfikuje drastycznie ekosystemów. Jest możliwe, że zakwaszenie wód powierzchniowych oceanu może na tyle zniszczyć roślinność oceaniczną, że powstanie błędne koło – zakwaszenie oznacza wymieranie flory oceanicznej, która pobiera z oceanu mniej CO₂, co zwiększa zakwaszenie oceanu. Zjawisko błędnego koła (co naukowcy nazywają dodatnim sprzężeniem zwrotnym) miało już miejsce na Ziemi – uważa się, że epoki lodowcowe kończyły się relatywnie szybko właśnie z powodu cykli dodatnich sprzężeń zwrotnych, kiedy to rosnące temperatury prowadziły do topnienia śniegu i lodu powierzchniowego, co zmniejszało ilość promieniowania słonecznego odbitego od ziemi, przez co ziemia pochłaniała więcej ciepła, co finalnie prowadziło do wzrostu temperatur (woda pośniegowa jest znacznie ciemniejsza niż sam śnieg).

Co więcej, ogrzewające się oceany pozbywały się też dwutlenku węgla i metanu (również silnego gazu cieplarnianego), rosła też ilość pary wodnej (również gazu cieplarnianego) w atmosferze, co dodatkowo wpływało na wzrost temperatury. Wpływ obu mechanizmów – rosnącej koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze oraz odsłaniania ciemnej powierzchni w wyniku topnienia śniegu i lodu – był porównywalny.



Rys. 31.4. Tempo pochłaniania małego impulsu CO₂ wyemitowanego dzisiaj według modelu cyklu węglowego Berna
Źródło: Hansen i in. (2007)

Niepokojące dodatnie sprzężenie zwrotne może dotyczyć hydratów metanu, gigatonami zamrożonych na Syberii i setkami gigaton w szelfach kontynentalnych. Ocieplenie większe niż o 1 °C może spowodować topnienie hydratów metanu, co uwolni do atmosfery metan, który przyczynia się do globalnego ocieplenia bardziej niż CO₂.

To nie miejsce na szczegółowe dyskusje na temat obszarów niepewności związanych ze zmianami klimatu. Gorąco polecam lekturę książek: *Avoiding Dangerous Climate Change* (Schellnhuber i in., 2006) i *Global Climate Change* (Dessler i Parson, 2006), jak również prace Hansena i innych (2007) oraz Charneya i innych (1979).

Tematem tego rozdziału jest „naprawianie” klimatu przez wychwyty dwutlenku węgla z powietrza. Teraz omówimy koszty energetyczne takiej operacji.

Koszt wychwyty

Dzisiaj wyciąganie węgla z ziemi kosztuje górę forsy. W przyszłości zapakowanie go z powrotem do ziemi może kosztować niepomiernie większą górę forsy. Jeżeli dziś nie ograniczymy emisji, być może za kilkadziesiąt lat jakaś międzynarodowa koalicja zapłaci za monstrualny odkurzacz, który po nas wszystkich posprząta.

Zanim przejdziemy do szczegółów wychwyty węgla z atmosfery, zastanówmy się, ile energii to pochłonie. Każda nasza technologia będzie podlegać podstawowym prawom fizyki. Tak się niestety składa, że wychwycenie CO₂ z atmosfery i jego skoncentrowanie pochłonie energię. Zgodnie z prawami fizyki trzeba będzie zużyć co najmniej 0,2 kWh energii na każdy kg CO₂ (tabela 31.5) Zważywszy, że sprawność rzeczywistych procesów zazwyczaj nie przekracza 35%, zdziwiłbym się, gdyby koszt energetyczny wychwyty węgla kiedykolwiek spadł poniżej 0,55 kWh na kg.

Wyobraźmy sobie teraz, że chcemy zneutralizować emisje CO₂ przeciętnego Europejczyka, wynoszące 11 ton rocznie, czyli 30 kg na osobę dziennie. Koszt energetyczny, przy założeniu 0,55 kWh na kg CO₂, wyniesie **16,5 kWh na osobę dziennie**. Dokładnie tyle wynosi **zużycie prądu w Wielkiej Brytanii**. Zasilanie olbrzymiego odkurzacza zmusi nas do podwojenia produkcji energii elektrycznej (lub też sprowadzenia skądś tej dodatkowej energii).

Być może nasze gigantyczne odkurzacze mogą pożerać mniej prądu. Cudownie! Biermy się do roboty! Niestety żadne pieniądze na badania i rozwój nie oszukają praw fizyki, które mówią, że wychwyty CO₂ z powietrza i jego skoncentrowanie do cieplego CO₂ wymaga co najmniej 0,2 kWh na kg CO₂. Ale do rzeczy! Co najlepiej wychwyty CO₂ z atmosfery? Omówię cztery technologie wielkich odkurzaczy:

- A. pompy chemiczne;
- B. drzewa;
- C. wspomagane wietrzenie skał;
- D. użyźnianie oceanu.

A. Chemiczne technologie wychwytu węgla

W przypadku technologii chemicznych dwutlenek węgla jest zazwyczaj poddawany dwóm procesom:



Po pierwsze, koncentruje się CO_2 , które w atmosferze występuje w niskich stężeniach. Następnie spręża się, zmniejszając jego objętość, co ułatwia zapakowanie do dziury w ziemi albo w głębiny oceaniczne. Każda z tych faz pochłania energię. Koszty energetyczne wynikające z praw fizyki pokazano w tabeli 31.5.

W 2005 roku najlepsze znane metody wychwytu CO_2 z powietrza były raczej nieefektywne – zużycie energii wynosiło około 3,3 kWh na kg, przy koszcie finansowym rzędu 140 USD za tonę CO_2 . Przy takim koszcie energetycznym wychwycenie europejskich 30 kg dziennie pochłaniałoby **100 kWh dziennie** – prawie tyle, ile wynosi zużycie energii w Europie (125 kWh dziennie). Zużywanie całości energii spalanych paliw kopalnych na wychwyt powstającego przy ich spalaniu CO_2 wydaje się cokolwiek bez sensu. Może więc można zaprojektować lepsze odkurzacze?

Niedawno klimatolog Wallace Broecker, „jeden z najlepszych specjalistów na świecie w zakresie funkcjonowania Ziemi jako systemu biologicznego, chemicznego i fizycznego”, promował jeszcze nieupubliczną technologię wychwytu CO_2 z atmosfery, autorstwa fizyka Klause Lacknera. Broecker wyobraża sobie, że świat mógłby nadal spalać paliwa kopalne w takim tempie jak dziś, a odkurzaniem CO_2 zajmie się 60 mln płuczek (każda wielkości kontenera transportowego). Ile energii pochłaniają płuczki Lacknera? W czerwcu 2007 roku Lackner mówił, że w laboratorium wychodziło mu 1,3 kWh na kg, ale od tamtej pory opracował nową metodę, opartą na żywicy, która w stanie suchym absorbuje CO_2 , a w stanie mokrym je uwalnia. W czerwcu 2008 roku Lackner mówił mi, że w suchym klimacie udało mu się obniżyć koszt energetyczny koncentrowania do 0,18–0,37 kWh ciepła niskotemperaturowego na kg CO_2 . Sprężanie pochłania 0,11 kWh na kg. Stąd też całkowity koszt energetyczny procesu Lacknera wynosi 0,48 kWh na kg lub nawet mniej. Przy europejskiej emisji rzędu 30 kg CO_2 dziennie wciąż oznacza to około **14 kWh dziennie**, z czego **3,3 kWh dziennie** stanowiłby prąd, a resztę – ciepło.

Wiwat postęp techniczny! Nie myśl jednak, że to mało. Uruchomienie odkurzaczy wymagałoby zwiększenia produkcji energii na świecie o jakieś 20%. No i coś z tym nowym CO_2 trzeba by jeszcze zrobić...

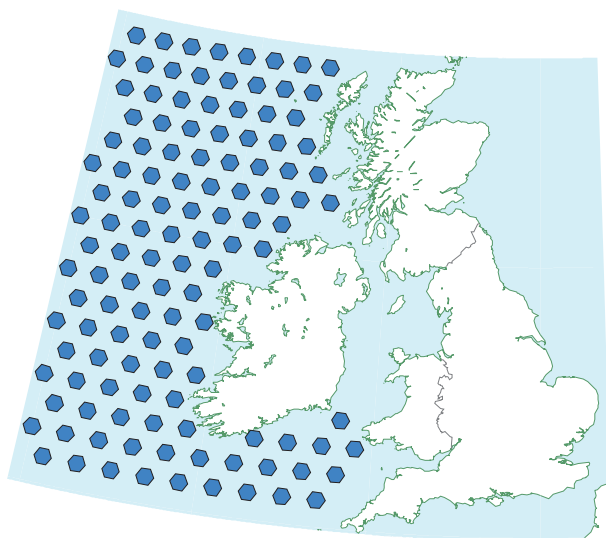
B. A co z drzewami?

Drzewa to naturalne systemy wychwytyjące węgiel. Wysysają CO_2 z powietrza i nie łamią żadnych praw fizyki. To urządzenia typu dwa w jednym: instalacje wychwytu CO_2 zasilane wewnętrznymi elektrowniami słonecznymi. Wychwytyją węgiel przy użyciu energii pozyskanej ze Słońca. Paliwa kopalne, które spalamy, też kiedyś powstały w tym procesie. Nasuwa się więc sugestia – a gdyby tak wykorzystać odwrotność spalania? Gdyby tak tworzyć drewno, grzebać je w dziurze w ziemi, podczas gdy zaraz obok ludzkość nadal wydobywa drewno kopalne i je spala? Idiotyczny pomysł – grzebanie lasów i jednocześnie wykopywanie pogrzebanych lasów. Tak czy owak, policzmy, jaki areal trzeba by obsadzić lasem, by rozwiązać problem zmian klimatu.

koszt energetyczny (kWh/kg)	
koncentrowanie	0,13
sprężanie	0,07
razem	0,20

Tabela 31.5. Nieunikniony koszt energetyczny koncentrowania i sprężania CO_2 wychwyconego z atmosfery





Rys. 31.6. 120 stref na Atlantyku, każda wielkości 900 km². Taką powierzchnię oceanu należałoby użyźnić, by kompensować brytyjskie emisje CO₂.

W niektórych regionach świata brakuje żywności. Gdzieś brakuje ryb z uwagi na nadmierne połowy na przestrzeni ostatnich 50 lat. Użyźnienie oceanu polegałoby na nawożeniu wód, co wsparłoby podstawę łańcucha pokarmowego, stymulowało przyrost roślinności i populacji ryb, a przy okazji zwiększyło pochłanianie węgla. Inżynierowie zajmujący się użyźnianiem oceanu, pod kierownictwem Australijczyka Iana Jonesa, chcieliby wpompować nawóz azotowy (np. mocznik) w rejony oceanu ubogie w ryby.

Twierdzą, że użyźnienie 900 km² oceanu pozwoli wychwycić około 5 Mt CO₂/rok. Jones z zespołem utrzymuje, że nawozić można każdy rejon oceanu ubogi w azot. Taka jest większość Północnego Atlantyku. Pokażmy to na mapie. Brytyjskie emisje wynoszą około 600 Mt CO₂/rocznie. Całkowita neutralizacja tych emisji wymagałaby 120 takich obszarów na oceanie. Na mapie na rys. 31.6 mamy te strefy w skali mapy, rozmieszczone wzdłuż Wysp Brytyjskich. Jak zwykle plan, który jest całościowy, wymaga instalacji wielkości kraju! A przecież nie wiemy jeszcze, skąd wziąć potrzebny mocznik.

Mimo, że to pomysł niesprawdzony i obecnie niezgodny z prawem, wydaje mi się interesujący. W przeciwieństwie do geologicznego składowania dwutlenku węgla ta technologia mogłaby się rozwinąć nawet bez międzynarodowo uzgodnionej wysokiej ceny za posprzątanie CO₂. Rybacy użyźnialiby oceany tylko po to, by zwiększyć połowy.

Można się spodziewać, że wielu komentatorów sprzeciwi się manipulacjom przy oceanie, skupiając się na zagrożeniach, a nie na potencjalnych korzyściach. Odwołają się do społecznego lęku przed nieznanym. Ludzie są skłonni pasywnie akceptować eskalację tego, co już jest (na przykład wyrzucanie CO₂ do atmosfery), a obawiają się innowacji, które mogą dać im lepszą przyszłość. Niewspółmiernie mocno boją się ryzyka.

Ian Jones

Najlepsze „fabryki” w Europie wychwytyją dwutlenek węgla w tempie około 10 ton suchego drewna na hektar rocznie, co odpowiada około 15 tonom CO₂ na hektar rocznie.

By skompensować europejskie emisje rzędu 11 ton CO₂ rocznie, potrzebujemy 7500 metrów kwadratowych lasu na osobę. Owe 7500 metrów kwadratowych na osobę to dwukrotność powierzchni Wielkiej Brytanii na osobę. Poza tym trzeba by znaleźć miejsce na trwałe składowanie 7,5 ton drewna na osobę rocznie! Przy gęstości drewna rzędu 500 kg/m³ drewno każdego Europejczyka zajmowałoby 15 m³ rocznie. Drewno na całe życie (które, pamiętajmy, musi być bezpiecznie zmagazynowane i nigdy nie może pójść z dymem) zajęłoby 1000 m³. To pięciokrotność powierzchni całkowitej przeciętnego domu. Ktokolwiek chce leczyć klimat drzewami, musi zdać sobie sprawę, że potrzeba ogromnych połaci lasu. Nie wiem, czy to w ogóle możliwe [przy okazji tego projektu, zabierając biomasa z lasu, zamiast pozwolić powrócić jej do obiegu biologicznego, doprowadzilibyśmy do wyjałowienia ziemi – red.]

C. Przyspieszanie wietrzenia skał

Czy jest jakiś sprytny sposób, by wymigać się od wysokich kosztów energetycznych chemicznego wychwytu CO₂? Oto ciekawy pomysł – proszkowanie skał zdolnych absorbować CO₂ i wystawianie ich na świeże powietrze. Coś jakby przyspieszanie naturalnych procesów geologicznych. Wyjaśnijmy to sobie.

Na rys. 31.3 pominąłem dwa przepływy węgla – ze skał do oceanów, związany z naturalnym wietrzeniem skał i naturalne strącanie się węgla w osadach oceanicznych, które później zamieniają się w skały. Te przepływy są relatywnie niewielkie, wynoszą około 0,2 Gt C rocznie (0,7 Gt CO₂ rocznie). To drobiazg w porównaniu z dzisiejszymi antropogenicznymi emisjami, które są 40 razy większe. Zwolennicy wspomaganego wietrzenia skał twierdzą, że można by złagodzić zmiany klimatu, przyspieszając tempo, w jakim skały się rozpadają i absorbują CO₂. Do kruszenia nadają się powszechnie występujące oliwiny lub krzemiany magnezu. Skały pozyskiwano by w miejscach otoczonych dużym obszarem, gdzie można by je rozsiać po rozdrobnieniu. Można by je też sypać bezpośrednio do oceanu. Tak czy inaczej, skały absorbowałyby CO₂ i przekształcały je w węglany. Węglany z kolei byłyby spłukiwane do oceanów. Sproszkowanie skał do ziaren takiej wielkości, by zaszła reakcja z CO₂, wymaga zaledwie 0,04 kWh na kg wychwyconego CO₂. Chwila, chwila... Przecież to mniej niż 0,20 kWh na kg wynikające z praw fizyki! To prawda, jednak wszystko się zgadza – same skały są źródłem brakującej energii. Krzemiany zawierają więcej energii niż węglany, stąd też skały płacą koszt energetyczny wychwytu CO₂ z atmosfery.

Podoba mi się niski koszt energetyczny tego schematu, pozostaje jednak trudne pytanie, kto zgodzi się wysypać swój kraj sproszkowaną skałą?

1 hektar = 10 000 m²

D. Użyźnianie oceanu

Z metodami chemicznymi, sadzeniem lasów i proszkowaniem skał wiąże się istotny problem – wymagają masy pracy i nikt nie ma w tym interesu (chyba że w ramach międzynarodowych porozumień zacznie się płacić za wychwyty dwutlenku węgla). Dzisiaj ceny dwutlenku węgla są zbyt niskie.

Z ostatnią metodą wychwytu CO₂ nie ma tego problemu. Chodzi o to, by przekonać ocean do nieco szybszego wychwytu węgla, jednocześnie hodując ryby.

My, jako ludzkość, nie możemy uwolnić do atmosfery całego CO₂ zawartego w paliwach kopalnych (ani nawet większej jego części). Jeżeli to uczynimy, gwarantujemy sobie drastyczne zmiany klimatu. A to już będzie inna planeta...

J. Hansen i in. (2007)

„Uniknięcie niebezpiecznych zmian klimatu” jest niemożliwe – niebezpieczne zmiany klimatu już mają miejsce. Pytanie brzmi: czy możemy uniknąć katastrofalnych zmian klimatu?

David King, główny doradca naukowy brytyjskiego rządu, 2007

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 256 ... pytanie: „Czy zmiany klimatu mają miejsce?” budzi kontrowersje. Wciąż istnieje „ziewająca przepaść między głównym nurtem opinii o zmianach klimatu między środowiskiem naukowym a rozumieniem problemu przez społeczeństwa Europy i Stanów Zjednoczonych” [voxbz].
- 257 Gdzie jest ten węgiel? – Źródła: Schellnhuber i in. (2006), Davidson i Janssens (2006).
- 258 Tempo spalania paliw kopalnych... – Źródło: Marland i in. (2007).
- Ostatnie badania wskazują, że tempo pochłaniania węgla przez oceany może spadać. www.timesonline.co.uk/tol/news/uk/science/article1805870.ece, www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1136188, [yofchc], Le Quéré i in. (2007).
 - ... mniej więcej połowa emisji węgla zostaje w atmosferze. Potrzeba 2,1 mld t węgla w atmosferze (7,5 Gt CO₂), by stężenie CO₂ w atmosferze wzrosło o jedną cząstkę na milion (1 ppm). Gdyby całe CO₂ pompowane przez nas do atmosfery tam zostawało, stężenie rosłoby o ponad 3 ppm rocznie. W rzeczywistości rośnie o zaledwie 1,5 ppm rocznie.
- Niestety już 2 ppm rocznie: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Węgiel radioaktywny (...) spenetrował oceany zaledwie na głębokość 400 m. Średnia głębokość penetracji izotopu węgla 14C dla wszystkich stacji obserwacyjnych pod koniec lat 70. wyniosła 390±39 m (Broecker i in., 1995). Z [3e28ed].
- 260 Globalne ocieplenie większe niż o 1°C może spowodować topnienie hydratów metanu. Źródło: Hansen i in. (2007, str. 1942).
- Zapakowanie CO₂ do dziury w ziemi albo w głębinie oceaniczne. Więcej w: Williams (2000). „By większość wprowadzonego CO₂ pozostała w oceanach, trzeba je wstrzykiwać na wielkie głębokości. Kształtuje się konsensus, że w krótkiej perspektywie najlepiej wprowadzać CO₂ na głębokość 1000–1500 metrów, co da się zrobić przy obecnym zaawansowaniu technologicznym”.
- Więcej na ten temat również w raporcie specjalnym IPCC: www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.
- 261 Tabela 31.5. Nieunikniony koszt energetyczny koncentrowania i sprężania CO₂ wychwyconego z atmosfery. Niezbędne nakłady energetyczne pozwalające skoncentrować CO₂ z 0,03% do 100% pod ciśnieniem atmosferycznym wynoszą kT ln 100/0,03 na molekułę, a to 0,13 kWh na kg. Najniższy możliwy koszt energetyczny sprężania CO₂ do 110 bar (ciśnienie podawane dla składowania geologicznego) wynosi 0,067 kWh/kg. Stąd też najniższy możliwy koszt energetyczny wychwytu i kompresji CO₂ wynosi 0,2 kWh/kg. Wg specjalnego raportu IPCC nt. wychwytu i składowania CO₂ koszt rzeczywisty fazy drugiej, czyli kompresji CO₂ do 110 bar wynosi 0,11 kWh na kg (0,4 GJ na t CO₂; 18 kJ na mol CO₂; 7 kT na molekułę).
- W 2005 roku najlepsze znane metody wychwytu CO₂ z powietrza były raczej nieefektywne – zużycie energii wynosiło około 3,3 kWh na kg przy koszcie finansowym rzędu 140 USD za tonę CO₂. Źródła: Keith i in. (2005), Lackner i in. (2001), Herzog (2003), Herzog (2001), David i Herzog (2000).
 - klimatolog Wallace Broecker... www.af-info.or.jp/eng/honor/hot/enbro.html
Jego książka promująca sztuczne drzewa: Broecker i Kunzig (2008).
- 246 Najlepsze „fabryki” w Europie wychwytyją dwutlenek węgla w tempie około 10 ton suchego drewna na hektar rocznie. Źródło: Specjalna Komisja ds. Nauki i Technologii przy Brytyjskiej Izbie Lordów.
- Wspomagane wietrzenie skał. Więcej w: Schuiling i Krijgsman (2006).
- 247 Użyźnianie oceanu. Więcej w: Judd i in. (2008); Chisholm i in. (2001). Zagrożenia związane z użyźnianiem oceanu są dyskutowane w: Jones (2008).

32 *Mówimy: „Tak”*

W chwili obecnej Wielka Brytania pozyskuje 90% energii z paliw kopalnych. Nic dziwnego, że odejście od paliw kopalnych wymaga ogromnych zmian – fundamentalnego przekształcenia floty transportowej, gruntownych zmian w systemach ogrzewania i 10- lub 20-krotnego wzrostu dostaw mocy ze źródeł odnawialnych.

Widząc ogólnospołeczną tendencję do sprzeciwiania się wszystkiemu, co nie jest oparte na paliwach kopalnych – „nie” dla farm wiatrowych, „nie” dla atomu, „nie” dla zapór pływowych – obawiam się, że nie porzucimy paliw kopalnych na czas. W zamian wybierzemy półśrodki – nieco bardziej efektywne elektrownie na węgiel i gaz, samochody i systemy ogrzewania, listek figowy systemu handlu emisjami, tu i ówdzie farmy wiatrowe i niewystarczającą liczbę elektrowni jądrowych.

Musimy wybrać plan, który się domyka. Taki plan istnieje, ale nie będzie łatwy.

Musimy przestać mówić: „Nie” i zacząć mówić: „Tak”. Musimy przestać się wyklócać i zacząć budować.

Jeżeli zależy Ci na uczciwej, realistycznej, spójnej polityce energetycznej, powiedz o tym swoim politykom i kandydatom w wyborach!

A Samochody

Oszacowaliśmy, że przejechanie 100 km samochodem pochłania około 80 kWh energii.

Gdzie się ta energia podziewa? Jak jej zużycie zależy od właściwości samochodu? Czy można produkować samochody sto razy bardziej efektywne energetycznie? By wyjaśnić, co się dzieje z energią, stworzymy prosty model jazdy samochodem. Energia w typowym samochodzie z silnikiem spalinowym wykorzystywana jest na cztery sposoby, omówione w dalszej części:

1. przyspieszanie i zwalnianie przy użyciu hamulców;
2. opór powietrza;
3. opór toczenia;
4. ciepło – 75% energii marnuje się w postaci ciepła, ponieważ łańcuch konwersji energii jest nieefektywny.

Chwilowo w naszym szkicu pominiemy opór toczenia. Dorzucimy go w dalszej części rozdziału.

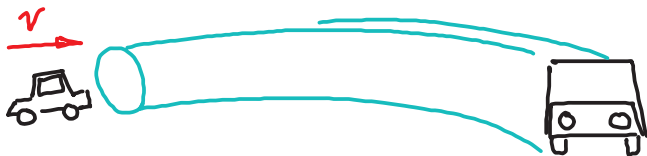
Załóżmy, że kierowca przyspiesza dynamicznie do prędkości podróżnej v i utrzymuje tę prędkość na dystansie d , który to dystans dzieli go od sygnalizacji świetlnej, znaku stopu lub korka. W tym punkcie naciska na hamulec i przekształca całą energię kinetyczną wozu na ciepło w hamulcach (ten samochód nie jest wyposażony w wypasione hamowanie odzyskowe). Kiedy może ruszać, znów przyspiesza do swojej prędkości podróżnej v . Przyspieszanie daje pojazdowi energię kinetyczną, hamowanie ją pochłania.

Nie tylko hamowanie pożera energię. Samochód, przemieszczając się, wprawia powietrze w wirowanie. Pozostawia za sobą kanał wirującego powietrza, poruszającego się z prędkością zbliżoną do v . Której energii jest więcej – energii kinetycznej wirującego powietrza czy ciepła w hamulcach? Policzmy to.

- Samochód przyspiesza i zwalnia jeden raz w przedziale d/v . Tempo zużywania energii na hamowanie wynosi:

$$\frac{\text{energia kinetyczna}}{\text{czas pomiędzy hamowaniami}} = \frac{\frac{1}{2}m_c v^2}{d/v} = \frac{1}{2}m_c \frac{v^3}{d} \quad (\text{A.1})$$

gdzie m_c oznacza masę auta.



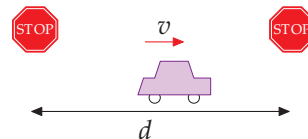
Fot. A.1. Peugeot 206 ma współczynnik oporu powietrza 0,33
Fot. Christopher Batt

Wzór leżący u podstaw większości rachunków w tej książeczce:

$$\text{energia kinetyczna} = \frac{1}{2}mv^2$$

Np. samochód o masie $m = 1000$ kg poruszający się z prędkością 100 km na godzinę lub $v = 28$ m/s ma energię

$$\frac{1}{2}mv^2 \approx 390\,000 \text{ J} \approx 0,1 \text{ kWh}$$



Rys. A.2. Nasz model jazdy – samochód porusza się z prędkością v między przystankami odległymi od siebie o dystans d .

Rys. A.3. Samochód poruszający się z prędkością v wytwarza za sobą kanał wirującego powietrza. Powierzchnia przekroju poprzecznego tego kanału jest zbliżona do powierzchni czołowej samochodu, a prędkość z jaką wiruje powietrze w tubie wynosi mniej więcej v .

- Kanał wirującego powietrza wytworzony w czasie t ma objętość Avt , gdzie A to powierzchnia przekroju poprzecznego tuby, zbliżona do powierzchni przodu samochodu. (W przypadku samochodu o opływowych kształtach A jest zazwyczaj nieco mniejsze niż powierzchnia czołowa samochodu A_{auto} , a stosunek efektywnej powierzchni przekroju poprzecznego kanału do powierzchni samochodu jest nazywany współczynnikiem oporu powietrza c_o . Na użytek kolejnych równań A oznaczać będzie efektywną powierzchnię samochodu $c_o A_{\text{auto}}$). Tuba ma masę $m_{\text{powietrze}} = \rho Avt$ (gdzie ρ oznacza gęstość powietrza) i wiruje z prędkością v , stąd też jej prędkość kinetyczna wynosi:

$$\frac{1}{2} m_{\text{powietrze}} v^2 = \frac{1}{2} \rho Avt v^2$$

a tempo przekazywania energii kinetycznej wirującemu powietrzu wynosi:

$$\frac{\frac{1}{2} \rho Avt v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho Av^3$$

Stąd też całkowite tempo, w jakim samochód traci energię, wynosi:

$$= \frac{1}{2} m_a v^3 / d + \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (\text{A.2})$$

Energia oddana hamulcom + energia oddana wirującemu powietrzu (wzór A.2)

Obie formy rozpraszania energii są proporcjonalne do sześcianu prędkości (v^3). Zgodnie z naszym szkiecem kierowca zmniejszający o połowę prędkość v obniża zużycie energii 8-krotnie. Jeżeli przejedzie ten sam dystans, zajmie mu to dwa razy dłużej, ale całkowite zużycie energii będzie czterokrotnie niższe.

Na co traci się więcej energii – na hamowanie, czy na przewyżczenie oporów powietrza? Zależy to od stosunku

$$(m_a / d) / (\rho A)$$

Jeżeli ten stosunek jest znacznie większy od 1 – więcej energii pochłania hamowanie. Jeżeli jest mniejszy – więcej energii pochłania wirujące powietrze. Przekształcając ten wzór, stwierdzamy, że stosunek ten jest większy od 1, jeżeli:

$$m_a > \rho Ad$$

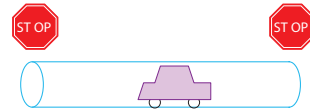
Ad to objętość kanału powietrza zamiecionego pomiędzy jednym a drugim przystankiem, a ρAd to masa tuby. Sytuacja jest prosta. Jeżeli masa samochodu jest *większa* niż masa tuby powietrza wytworzonej pomiędzy dwoma przystankami, przeważa rozpraszanie energii typu „energia kinetyczna na hamowanie”. Jeżeli masa samochodu jest *mniejsza*, przeważa dyssypacja energii związana z wprawianiem powietrza w ruch wirowy (rys. A.4).

Określmy dystans d^* pomiędzy przystankami, poniżej którego dyssypacja jest zdominowana przez hamowanie i powyżej którego jest zdominowana przez wirowanie (inaczej: zdominowana przez opór powietrza).

Używam następującego wzoru:

masa = gęstość \times objętość

Symbol ρ (grecka litera „ro”) oznacza gęstość.



Rys. A.4. By dowiedzieć się, czy zużycie energii jest zdominowane przez hamowanie czy przez wirowanie powietrza, porównujemy masę samochodu z masą kanału powietrza pomiędzy przystankami.



Fot. A.5. Moc zużywana przez samochód jest proporcjonalna do powierzchni jego przekroju podczas jazdy autostradowej i do jego masy podczas jazdy miejskiej. Zgadnij, co pali mniej na 100 km – VW po lewej czy statek kosmiczny?

Jeżeli powierzchnia czołowa samochodu wynosi:

$$A_{\text{auto}} = 2 \text{ m szerokości} \times 1,5 \text{ m wysokości} = 3 \text{ m}^2$$

współczynnik oporu powietrza wynosi $c_o = 1/3$, a masa $m_a = 1000 \text{ kg}$, wówczas ten specjalny dystans wyniesie:

$$d^* = \frac{m_a}{\rho c_o A_{\text{auto}}} = \frac{1000 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1}{3} \times 3 \text{ m}^2} = 750 \text{ m}$$

Tak więc rozpraszanie energii w trybie miejskim jest zdominowane przez energię kinetyczną i hamowanie, jeżeli dystans pomiędzy przystankami jest mniejszy niż 750 m. W takiej sytuacji dobrym sposobem na oszczędzanie energii będzie:

1. zmniejszenie masy samochodu,
2. wyposażenie go w hamowanie odzyskowe (które mniej więcej o połowę zmniejsza straty energii przy hamowaniu – patrz rozdział 20), oraz
3. wolniejsza jazda.

Jeżeli przystanki dzieli znacznie więcej niż 750 m, rozpraszanie energii będzie zdominowane przez opór powietrza. W takiej sytuacji nieważne, ile waży samochód. Rozpraszanie energii będzie podobne, niezależnie czy samochód wiezie jedną osobę czy sześć. Rozpraszanie energii przez opór powietrza można zmniejszyć poprzez:

1. zmniejszenie współczynnika oporu powietrza samochodu,
2. zmniejszenie powierzchni przekroju poprzecznego samochodu lub
3. wolniejszą jazdę.

Rzeczywiste zużycie energii samochodu określa rozpraszanie energii z równania (A.2), pomnożone przez współczynnik związany z nieefektywnością silnika i napędu. Typowe silniki spalinowe mają sprawność około 25%. Marnuje się trzy czwarte energii chemicznej, która jest wchłaniana przez samochód i podgrzewa silnik i chłodnicę. Zaledwie jedna czwarta przekształca się w energię użyteczną:

$$\text{całkowita moc auta} \approx 4 \left[\frac{1}{2} m_a v^3 / d + \frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

Wypróbujmy naszą teorię, podstawiając do wzoru rzeczywiste wartości związane z podróżami autostradą. Niech: $v = 110 \text{ km/h} = 31 \text{ m/s}$ i $A = c_o A_{\text{auto}} = 1 \text{ m}^2$. Energia zużyta przez silnik powinna wynieść mniej więcej:

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3 = 2 \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ m}^2 \times (31 \text{ m/s})^3 = 80 \text{ kW}$$

Jeżeli prowadzisz samochód z tą prędkością przez godzinę dziennie, przebywasz 110 km i zużywasz **80 kWh** energii dziennie. Gdybyś zamiast tego jechał dwa razy wolniej i przez dwie godziny dziennie, przejechałbyś ten sam dystans, ale zużył **20 kWh** energii. Ta prosta teoria pozostaje w zgodzie z charakterystykami zużycia paliwa samochodów, cytowanymi w rozdziale 3. Co więcej, teoria ta pozwala ustalić, jak ograniczyć zużycie energii w Twoim samochodzie. Teoria ma też kilka wad, ale o tym za chwilę.

ENERGIA NA JEDNOSTKĘ DROGI	
Samochód przy 110 km/h	↔ 80 kWh/(100 km)
Rower przy 21 km/h	↔ 2,4 kWh/(100 km)
SAMOLOTY PRZY 900 KM/H	
A380	27 kWh/100 p-km

Tabela A.6. Warto pamiętać – zużycie energii samochodów.

Czy można wyprodukować samochód zużywający 100 razy mniej energii i wciąż rozpędzający się do 110 km/h? **Nie**. Nie, jeżeli samochód ma taki sam kształt. Na autostradzie, przy 110 km/h, energia jest wykorzystywana głównie na wprawianie powietrza w ruch wirowy. Nie zmienia tego wymiana tworzywa w samochodzie. Cudowne usprawnienia silników spalinowych mogą podnieść ich efektywność z 25% do 50%, obniżając zużycie energii do około 40 kWh na 100 km.

Pojazdy elektryczne mają przewagę w kilku aspektach – wprawdzie waga akumulatora (przypadająca na zmagazynowany użyteczny kWh) jest około 25 razy większa niż w przypadku benzyny, ale za to silnik elektryczny może ważyć około 8 razy mniej niż spalinowy. Co więcej, łańcuch konwersji energii w samochodzie elektrycznym jest znacznie bardziej efektywny – sprawność silnika elektrycznego może wynosić 90%.

Do samochodów elektrycznych powrócimy pod koniec rozdziału.

Rower i zabawa skalowaniem

Pytanie natury rozrywkowej: „Jakie jest zużycie energii roweru w kWh na 100 km”? Przemieszczanie się na rowerze pochłania energię z tej samej przyczyny co w samochodzie – wprawiasz w ruch powietrze. Moglibyśmy w równaniach zastąpić liczby samochodowe rowerowymi. Istnieje jednak prosty trik, który pozwoli nam wysnuć wnioski dla rowerów w oparciu o wnioski dla samochodów. Zużycie energii przez samochód na przebyty dystans, to energia zużyta na wprawienie powietrza w ruch wirowy,

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$$

dzielona przez prędkość v ; stąd też:

$$\text{energia na odległość} = 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2$$

Cyfra „4” oznacza nieefektywność silnika; ρ to gęstość powietrza; powierzchnia $A = c_o A_{\text{auto}}$ to efektywna powierzchnia czołowa samochodu, a v to jego prędkość.

Możemy teraz porównać rower z samochodem, dzieląc $4 \times 1/2 \rho A v^2$ dla roweru przez $4 \times 1/2 \rho A v^2$ dla samochodu. Znoszą się wszystkie ułamki i ρ , o ile sprawność energetyczna rowerzysty napędzanego węglem (w postaci pożywienia) jest zbliżona do sprawności silnika zasilanego węglem (w postaci benzyny). I tak jest w istocie. Stosunek wynosi:

$$\frac{\text{energia na odległość (rower)}}{\text{energia na odległość (auto)}} = \frac{c_o^{\text{rower}} A_{\text{rower}} v_{\text{rower}}^2}{c_o^{\text{auto}} A_{\text{auto}} v_{\text{auto}}^2}$$

Użyjemy teraz triku zwanego „skalowaniem”. Jeżeli wiemy, jak proporcjonalnie zmienia się zużycie energii wraz ze zmianą prędkości i powierzchni przedniej, możemy przewidzieć zużycie energii obiektów o odmiennych prędkościach i rozmiarach. Załóżmy, że interesujący nas stosunek powierzchni wynosi

$$\frac{A_{\text{rower}}}{A_{\text{auto}}} = \frac{1}{4}$$

WSPÓLCZYNNIKI OPORU POWIETRZA

SAMOCHODY	
Honda Insight	0,25
Prius	0,26
Renault 25	0,28
Honda Civic (2006)	0,31
VW Polo GTi	0,32
Peugeot 206	0,33
Ford Sierra	0,34
Audi TT	0,35
Honda Civic	0,36
Citroën 2CV	0,51
Rowerzysta	0,9
Autobus dalekobieżny	0,425
SAMOLOTY	
Cessna	0,027
Learjet	0,022
Boeing 747	0,031
POWIERZCHNIE OPORU (m ²)	
Land Rover Discovery	1,6
Volvo 740	0,81
Typowy samochód	0,8
Honda Civic	0,68
VW Polo GTi	0,65
Honda Insight	0,47

Tabela A.7. Współczynniki oporu powietrza i powierzchnie oporu.

(czterech rowerzystów może usiąść ramię w ramię na przedniej masce jednego samochodu).

Założmy, że rower nie ma specjalnie opływowych kształtów:

$$\frac{c_o^{\text{rower}}}{c_o^{\text{auto}}} = \frac{1}{3}$$

Założmy również, że prędkość roweru wynosi 22 km/h, tak więc

$$\frac{v_{\text{rower}}}{v_{\text{auto}}} = \frac{1}{5}$$

Wówczas

$$\begin{aligned} \frac{\text{energia na odległość (rower)}}{\text{energia na odległość (auto)}} &= \left(\frac{c_o^{\text{rower}}}{c_o^{\text{auto}}} \frac{A_{\text{rower}}}{A_{\text{auto}}} \right) \left(\frac{v_{\text{rower}}}{v_{\text{auto}}} \right)^2 \\ &= \left(\frac{3}{4} \right) \times \left(\frac{1}{5} \right)^2 \\ &= \frac{3}{100} \end{aligned}$$

A zatem rowerzysta przy prędkości 21 km/h pożytkuje na kilometr około 3% energii zużytej przez samochód wiozący autostradą tylko kierowcę – około **2,4 kWh na 100 km**.

Szukasz pojazdu, który wykorzysta paliwo 30 razy efektywniej niż samochód? Nic prostszego – przesiądź się na rower.

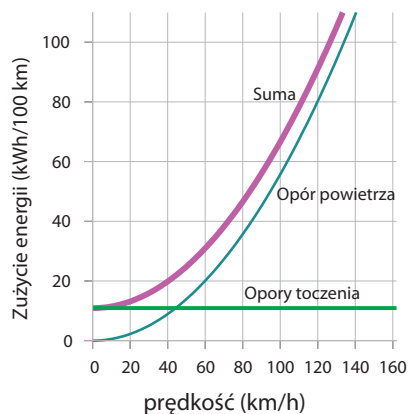
A co z oporem toczenia?

Jak dotychczas kompletnie zignorowaliśmy energię zużywaną przez opony i łożyska, przejawiającą się w hałasie kół na asfalcie, ścieraniu gumy z opon i drzeniu ziemi pod ciężarem samochodu. Wszystkie te formy zużycia energii noszą wspólne miano oporu toczenia. W standardowym modelu oporu toczenia siła oporu toczenia jest wprost proporcjonalna do wagi pojazdu niezależnie od prędkości. Współczynnik proporcjonalności nazywany jest współczynnikiem oporu toczenia C_{ot} . W tabeli A.8 podajemy kilka typowych wartości.

Współczynnik oporu toczenia samochodu wynosi około 0,01. Pokonywać opór toczenia to tak, jakby stale wjeżdżać na wzgórze o 1-stopniowym nachyleniu. Stąd też tarcie toczone wynosi około 100 newtonów na tonę niezależnie od prędkości. Możesz się o tym przekonać popychając przeciętny jednotonowy samochód po płaskiej drodze. Kiedy już ruszy, utrzymasz go w ruchu jedną ręką (100 newtonów waży tyle ile 100 jabłek). Tak więc przy

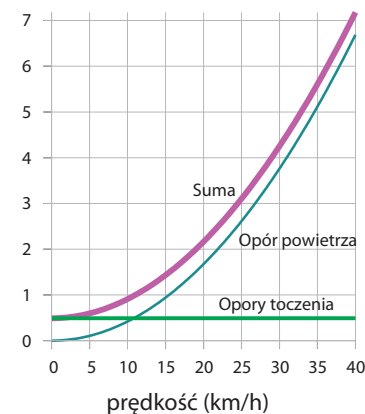
koło	C_{ot}
pociąg (stal na stali)	0,002
opona roweru	0,005
opony ciężarówki	0,007
opony samochodu	0,010

Tabela A.8. Opór toczenia to masa pomnożona przez współczynnik oporu toczenia C_{ot} . Na opór toczenia składa się siła wynikająca z uginania się kół, straty związane z tarciem w łożyskach, trzęsieniem i wibracjami zarówno drogi, jak i pojazdu (włączając energię absorbowaną przez amortyzatory pojazdu) i ślizganie się kół na drodze lub szynach. Współczynnik oporu toczenia zależy od jakości drogi, materiału, z jakiego zrobione jest koło i temperatury. Podane liczby dotyczą dróg gładkich. [2bhu35]

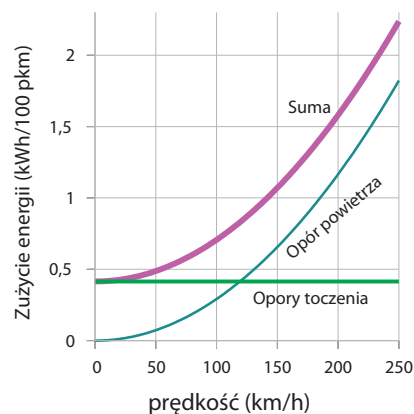


Rys. A.9. Prosta teoria zużycia energii przez samochód (energia na jednostkę drogi) przy stałej prędkości.

Założenia: silnik pojazdu zużywa energię ze sprawnością 0,25 niezależnie od prędkości;
 $c_o A_{\text{auto}} = 1 \text{ m}^2$
 $m_{\text{auto}} = 1000 \text{ kg}$ i $C_{\text{ot}} = 0,01$



Rys. A.10. Prosta teoria zużycia energii przez rowerzystę (energia na jednostkę drogi). Pionowa oś to zużycie energii w kWh na 100 km. Założenia: silnik roweru (to Ty!) zużywa energię ze sprawnością 0,25; powierzchnia oporu rowerzysty wynosi $0,75 \text{ m}^2$; masa rowerzysty i roweru łącznie wynosi 90 kg a $C_{\text{ot}} = 0,005$



Rys. A.11. Prosta teoria zużycia energii pociągu (na pasażera) dla pociągu z ośmioma wagonami wiozącego 584 osób. Pionowa oś to zużycie energii w kWh na 100 pasażerokilometrów.

Założenia: silnik pociągu zużywa energię ze sprawnością 0,90;
 $c_o A_{\text{pociąg}} = 11 \text{ m}^2$;
 $m_{\text{pociąg}} = 400\,000 \text{ kg}$ i $C_{\text{ot}} = 0,002$

prędkości 31 m/s (110 km/h) moc niezbędna do przewyciężenia oporu tocznienia przez jednotonowy samochód wynosi

$$\text{siła} \times \text{prędkość} = (100 \text{ newtonów}) \times (31 \text{ m/s}) = 3100 \text{ W}$$

co wymaga przy sprawności silnika rzędu 25% zasilania go mocą 12 kW. Tymczasem moc konieczną do przewyciężenia oporu powietrza oszacowaliśmy na 80 kW (str. 256). Wynika stąd, że przy dużej prędkości około 15% energii trzeba przeznaczyć na przewyciężenie oporu tocznienia.

Rys. A.9 ilustruje teorię zużycia paliwa (energia na jednostkę odległości) jako funkcję prędkości (dla jazdy ze stałą prędkością) po uwzględnieniu oporu powietrza i oporu tocznienia.

Prędkość, przy której opór tocznienia równa się oporowi powietrza samochodu, wynika z równania

$$C_{\text{ot}} m_a g = \frac{1}{2} \rho c_o A v^2$$

czyli

$$v = \sqrt{2 \frac{C_{\text{ot}} m_a g}{\rho c_o A}} = 13 \text{ m/s} = 58 \text{ km/h}$$

Rowery

W przypadku rowerów ($m = 90 \text{ kg}$, $A = 0,75 \text{ m}^2$) przeskok od pedałowania zdominowanego przez opór tocznienia do pedałowania zdominowanego przez opór powietrza ma miejsce przy prędkości około 12 km/h. Przy stałej prędkości 20 km/h jazda na rowerze pochłania około 2,2 kWh na 100 km. Przyjmując pozycję aerodynamiczną, możemy zmniejszyć powierzchnię oporu i ograniczyć zużycie energii do około 1,6 kWh na 100 km.

Pociągi

W przypadku pociągu z ośmioma wagonami, pokazanego na fot. 20.4 ($m = 400\,000\text{ kg}$, $A = 11\text{ m}^2$) prędkość, przy której opór powietrza przewyższa opór toczenia, wynosi:

$$v = 33\text{ m/s} = 119\text{ km/h}$$

Dla pociągu z jednym wagonem ($m = 50\,000\text{ kg}$, $A = 11\text{ m}^2$) prędkość, przy której opór powietrza przewyższa opór toczenia, wynosi:

$$v = 12\text{ m/s} = 42\text{ km/h}$$

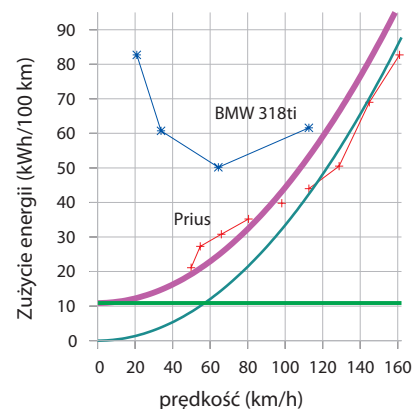
Zależność mocy od prędkości

Kiedy mówię, że zmniejszenie prędkości o połowę powinno obniżyć zużycie energii (w litrach na 100 km) do jednej czwartej obecnego zużycia, nie wszyscy mi wierzą. Argumentują: większość silników ma optymalną prędkość obrotową i wybór biegów determinuje zakres prędkości, przy których silnik pracuje z maksymalną sprawnością. Jeżeli ograniczenie prędkości o połowę sprawi, że spadnie ona poniżej zaprojektowanego zakresu, zużycie paliwa wcale nie musi spaść aż czterokrotnie. Poczyniłem ciche założenie, że sprawność silnika jest taka sama dla wszystkich prędkości i ładunków, stąd mój wniosek, że zawsze warto jeździć wolniej (w kategoriach litrów na 100 km). Jeżeli jednak sprawność silnika spada przy niższych prędkościach, wówczas najbardziej efektywna paliwowo prędkość byłaby kompromisem pomiędzy wolną jazdą a utrzymaniem sprawności silnika. Na przykład w BMW 318ti z rys. A.12 prędkość optymalna wyniesie jakieś 60 km/h. Gdyby jednak społeczeństwo chciało ograniczenia prędkości pojazdów, nic nie stoi na przeszkodzie, by zaprojektować takie silniki i biegi, by maksymalna sprawność silnika przypadała na właściwą prędkość. Kolejnym dowodem na to, że wymagana moc rzeczywiście rośnie z sześcianiem prędkości, jest rys. A.13 ilustrujący moc silnika w stosunku do prędkości maksymalnej wybranych modeli samochodów. Linia pokazuje związek „moc proporcjonalna do v^3 ”.

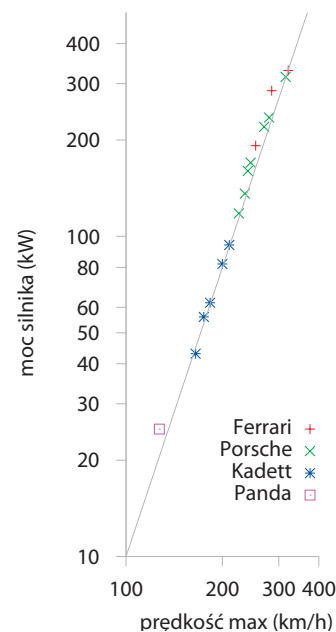
Samochody elektryczne – czy zasięg jest problemem?

Często słyszy się, że zasięg samochodów elektrycznych jest niewystarczający. Zwolennicy samochodów elektrycznych twierdzą: „To nie problem, możemy zwiększyć liczbę akumulatorów”. I mają rację, ale trzeba zbadać, jak te dodatkowe akumulatory przełożą się na zużycie energii. Odpowiedź w dużym stopniu zależy od gęstości energetycznej akumulatorów – w przypadku gęstości energetycznej 40 Wh/kg (typowej dla baterii ołowio-kwasowych) trudno będzie zwiększyć zasięg powyżej 200 lub 300 km; jednak dla gęstości energetycznej 120 Wh/kg (typowej dla różnego rodzaju baterii litowych) łatwo osiągnąć zasięg 500 km.

Założmy, że waga pojazdu i podróży wynosi 740 kg, bez akumulatorów. Stopniowo dodamy 100 kg, 200 kg, 500 kg, a może i 1000 kg akumulatorów. Założmy typową prędkość rzędu 50 km/h; powierzchnię oporu 0,8 m²; opór toczenia 0,01; odległość między przystankami 500 m sprawność



Rys. A.12. Zużycie paliwa w dzisiejszych samochodach nie zmienia się wraz z kwadratem prędkości. Dane dla Priusa pochodzą od B. Z. Wilsona; dane dla BMW – od Phila C. Stuarta. Łagodna krzywa ilustruje, jak wyglądałaby krzywa kwadratu prędkości przy założeniu powierzchni oporu 0,6 m².



Rys. A.13. Moc samochodów (kW) w stosunku do ich prędkości maksymalnej (km/h). Obie skale logarytmiczne. Moc rośnie z sześcianiem prędkości. Dwa razy szybsza jazda wymaga ośmiokrotnego wzrostu mocy silnika. Na podstawie: Tennekes (1997).

silnika 85%. Zakładamy, że w trakcie hamowania i ruszania hamowanie odzyskowe przejmuje połowę energii kinetycznej samochodu i że samochód pobiera prąd z sieci ze sprawnością 85%. Rys. A.14 pokazuje koszty energetyczne samochodu w odniesieniu do zasięgu przy różnej wadze akumulatorów. Wyższa krzywa pokazuje wyniki dla baterii o gęstości energetycznej 40 Wh/kg (przestarzałe baterie ołowiowo-kwasowe). Zwiększanie zasięgu osiąga granicę przy około 500 km. By zbliżyć się do tego maksymalnego zasięgu, musimy zainstalować komicznie wielkie akumulatory – np. dla zasięgu 400 km potrzeba 2000 kg akumulatorów, a koszt energetyczny wynosi ponad 25 kWh na 100 km. Jeżeli wystarczy nam zasięg 180 km, wystarczy 500 kg akumulatorów. Sprawa ma się dużo lepiej, kiedy przestawimy się na lżejsze akumulatory litowo-jonowe. Przy gęstości energetycznej 120 Wh/kg samochody elektryczne z 500 kg akumulatorów mogą z łatwością osiągnąć zasięg 500 km. Koszt energetyczny wyniesie około 13 kWh na 100 km.

Wydaje się więc, że problem zasięgu zniknął z nastaniem nowoczesnych akumulatorów. Akumulatory mogłyby być jeszcze lepsze, ale gęstość energetyczna 120 Wh na kg jest satysfakcjonująca, o ile nie przeszkadza nam, że akumulatory ważą pół tony.

Jak sądzę, wielu ludziom wystarczy zasięg 300 km, do czego wystarczy 250 kg akumulatorów. Gdyby te akumulatory podzielić na dziesięć 25-kilogramowych modułów, ładowanych oddzielnie, wówczas użytkownik mógłby zakładać w samochodzie jedynie cztery z dziesięciu modułów w trakcie codziennych podróży (100 kg daje zasięg 140 km) i dokładać dodatkowe sześć na stacji ładowania akumulatorów, kiedy wybiera się w dalszą podróż. W trakcie dalekich podróży stawałby na stacji wymiany akumulatorów mniej więcej co 300 km.

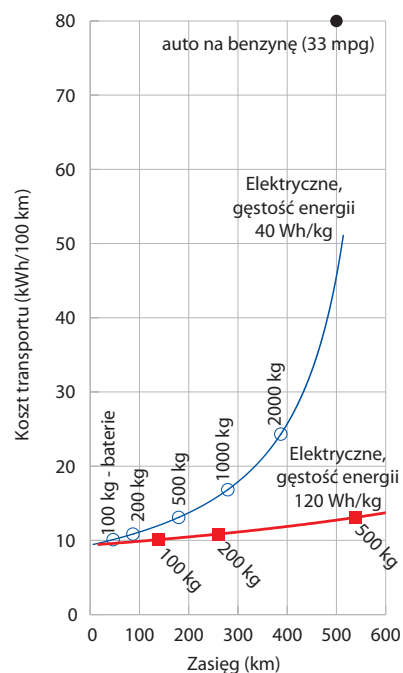
Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

273 **Typowe silniki spalinowe mają sprawność około 25%.** Encarta [6by8x] stwierdza: „Sprawności dobrego nowoczesnego silnika pracującego w cyklu Otto wahają się pomiędzy 20 a 25%”. Silnik benzynowy Toyoty Prius, uważanej za jeden z najbardziej efektywnych energetycznie samochodów, pracuje w cyklu Atkinsona, nie w cyklu Otto. Szczytowa moc wyjściowa wynosi 52 kW, a sprawność wynosi 34% przy mocy 10 kW. [348whs]. Najbardziej efektywny silnik dieslowski ma sprawność 52%, ale nie nadaje się do samochodów, bo waży 2300 ton. Silnik diesla z turbodoładowaniem Wartsila-Sulzer RTA96-C (fot. A.15) jest przeznaczony dla kontenerowców i ma moc wyjściową 80 MW.

- **Hamowanie odzyskowe mniej więcej o połowę zmniejsza straty energii przy hamowaniu.** – Źródło: E4tech (2007).
- **Silnik elektryczny może ważyć około 8 razy mniej niż spalinowy.**
Czterosuwowy silnik benzynowy ma stosunek mocy do masy około 0,75 kW/kg. Najlepsze silniki elektryczne mają sprawność rzędu 90% i stosunek mocy do masy 6 kW/kg. Stąd też zastąpienie 75-kilowatowego silnika benzynowego 75-kilowatowym silnikiem elektrycznym pozwala oszczędzić na wadze 85 kg. Niestety stosunek mocy do masy akumulatorów wynosi około 1 kW na kg. Co pojazd elektryczny zyskuje na silniku, traci na akumulatorach.

274 **Silnik roweru zużywa energię ze sprawnością 0,25.** To i inne założenia odnośnie jazdy rowerem znajdują potwierdzenie u di Prampero i innych (1979).



Rys. A.14. Teoria zasięgu samochodów elektrycznych (oś pozioma) i koszty energetyczne (oś pionowa) jako funkcja wagi akumulatorów dla dwóch technologii akumulatorów. Samochód wyposażony w 500 kg starych baterii o gęstości energetycznej 40 Wh na kg ma zasięg 180 km. W przypadku ważących tyle samo nowoczesnych akumulatorów, dostarczających 120 Wh na kg samochód elektryczny ma zasięg ponad 500 km. Oba samochody będą miały koszt energetyczny rzędu 13 kWh na 100 km. Sprawność ładowania akumulatorów wynosi 85%.

Powierzchnia oporu rowerzysty w pozycji wyścigowej wynosi $c_d A = 0,3 \text{ m}^2$.
Opór toczenia rowerzysty w trakcie jazdy wyścigowej (waga całkowita 73 kg) wynosi 3,2 N.

276 Rys. A.12.

Dane dotyczące Priusa pochodzą od B. Z. Wilsona [home.hiwaay.net/~bzwilson/prius/]. Dane dotyczące BMW – od Phila C. Stuarta [www.randomuseless.info/318ti/economy.html].

Zalecana literatura: Gabrielli i von Kármán (1950).

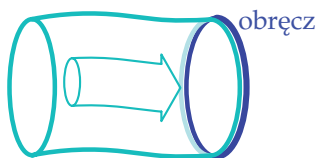


Fot. A.15. 14-cylindrowy, dwusuwowy silnik diesla Wartsila-Sulzer RTA96-C. Długość 27 m, wysokość 13,5 m.
www.wartsila.com

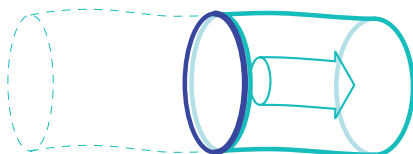
B Wiatr

Fizyka energii z wiatru

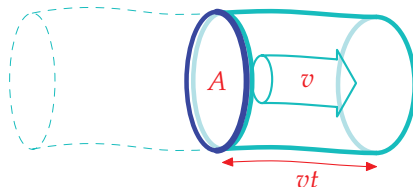
By oszacować potencjał energetyczny wiatru, wyobraźmy sobie, że obręcz o powierzchni A wystawiamy na wiatr o prędkości v . Rozważmy, jaka masa powietrza przemieści się przez obręcz w ciągu sekundy. Oto ilustracja masy powietrza na chwilę przed przepłynięciem przez obręcz:



A oto ilustracja tej samej masy powietrza sekundę później:



Masa tego wycinka powietrza jest iloczynem jego gęstości ρ , powierzchni A i długości, którą otrzymujemy, mnożąc v przez t , gdzie $t = 1$ sekunda.



Energia kinetyczna tego wycinka powietrza wynosi:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avtv^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3 \quad (\text{B.1})$$

Stąd też moc wiatru przypadająca na powierzchnię A , czyli energia kinetyczna przepływająca przez tę przestrzeń na jednostkę czasu, wynosi:

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (\text{B.2})$$

To równanie wygląda dziwnie znajomo – taki sam wzór wyprowadziliśmy na str. 271, kiedy omawialiśmy wymogi energetyczne samochodu w ruchu.

Jaka jest typowa prędkość wiatru? W dni wietrzne rowerzysta rzeczywiście odczuwa kierunek wiatru – kiedy wieje w plecy, może przemieszczać się znacznie szybciej niż zazwyczaj. Prędkość takiego wiatru jest więc porównywalna z przeciętną prędkością rowerzysty, która wynosi mniej

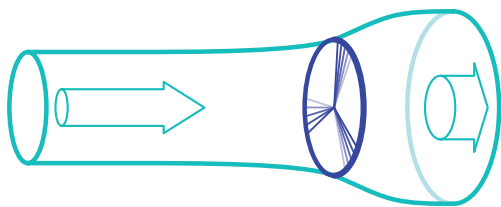


Znów posługuję się wzorem:

masa = gęstość \times objętość

mile/ godzina	km/h	m/s	skala Beauforta
2,2	3,6	1	siła 1
7	11	3	siła 2
11	18	5	siła 3
13	21	6	siła 4
16	25	7	siła 5
22	36	10	siła 5
29	47	13	siła 6
36	58	16	siła 7
42	68	19	siła 8
49	79	22	siła 9
60	97	27	siła 10
69	112	31	siła 11
78	126	35	siła 12

Tabela B.1. Prędkości



Rys. B.2. Przepływ powietrza przez wiatrak. Wiatrak spowalnia pęd powietrza i je rozprasza.

więcej 21 km na godzinę (6 metrów na sekundę). W Cambridge rzadko wieje tak mocno. Niemniej jednak przyjmijmy to jako wartość typową dla Wielkiej Brytanii (mając na uwadze, że może być konieczne zrewidowanie tych rachunków).

Gęstość powietrza wynosi około $1,3 \text{ kg/m}^3$ (zazwyczaj zaokrąglam to do 1 kg/m^3 , co łatwiej zapamiętać, ale tutaj tego nie robię). Stąd typowa moc wiatru na metr kwadratowy obręczy wynosi:

$$\frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} 1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.3})$$

Wiatrak nie może wychwycić całej tej energii. Wprawdzie niezgorzej spowalnia ruch powietrza, ale musi zostawić powietrzu nieco energii kinetycznej. W przeciwnym razie owo spowolnione powietrze stanęłoby i zahamowało pracę wiatraka. Rys. B.2 ilustruje faktyczny przepływ powietrza przez wirnik wiatraka. Maksymalny odsetek energii wchodzącej, który może pochwytać wirnik w kształcie dysku, został obliczony przez niemieckiego fizyka Alberta Betza w 1919 roku. Jeżeli prędkość wiatru wychodzącego wynosi $1/3$ prędkości wiatru wchodzącego, to wychwycona moc wynosi $16/27$ całkowitej mocy wiatru. $16/27$ to $0,59$. Załóżmy, że wiatraki mogą mieć sprawność 50% . W rzeczywistości wiatraki są projektowane do określonych prędkości wiatru – jeżeli prędkość wiatru znacznie przekracza prędkość idealną, turbinę trzeba wyłączyć.

Dla przykładu przyjmijmy średnicę wiatraka $d = 25 \text{ m}$ i wysokość piasty 32 m , co w zasadzie odpowiada rozmiarom samotnego wiatraka górującego nad Wellington w Nowej Zelandii (fot. B.3). Moc pojedynczego wiatraka wynosi:

współcz. efektywności \times moc na jedn. powierzchni \times powierzchnia

$$= 50\% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{B.4})$$

$$= 50\% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4} (25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW} \quad (\text{B.6})$$

Kiedy oglądałem ten wiatrak pewnego bardzo wietrznego dnia, faktyczna produkcja wynosiła 60 kW .

By oszacować, na ile energii z wiatru możemy liczyć, musimy zdecydować, jak duże mają być nasze wiatraki i jak blisko siebie staną.

Jak gęsto da się rozmieścić wiatraki? Jeśli staną zbyt gęsto, to wiatraki na nawietrznej pozbawią wiatru wiatraki na zawietrznej. Eksperci twierdzą, że wiatraki powinny dzielić co najmniej pięciokrotność ich średnicy, inaczej znacznie stracą na mocy.



Fot. B.3. Wiatrak Brooklyn powyżej Wellington w Nowej Zelandii, z ludźmi u podnóża dla pokazania skali. W wietrzne dni wiatrak produkuje 60 kW (1400 kWh dziennie).

Fot. Philip Banks

Przy takim rozmieszczeniu, moc generowana przez wiatraki na jednostkę powierzchni wyniesie:

$$\frac{\text{moc na wiatrak (B.4)}}{\text{powierzchnia terenu na wiatrak}} = \frac{\frac{1}{2}\rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \quad (\text{B.7})$$

$$= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{B.8})$$

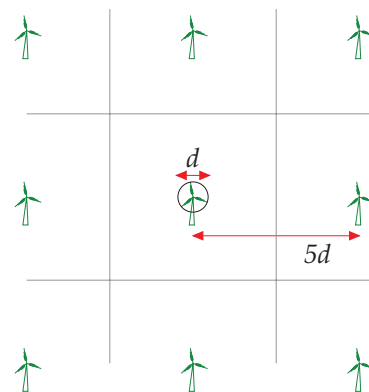
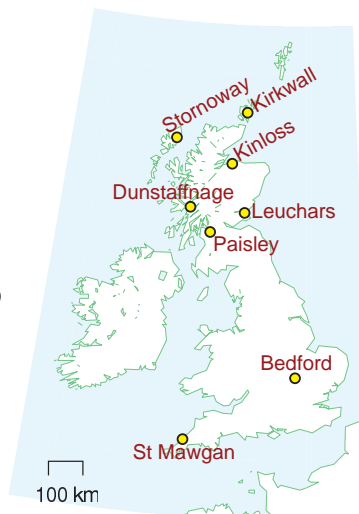
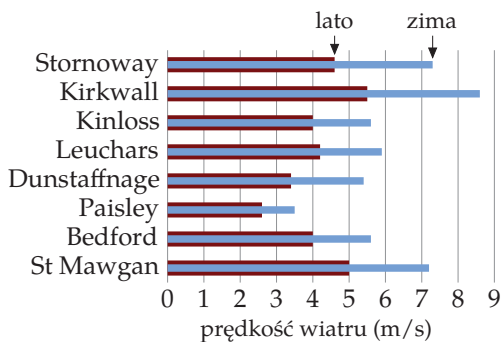
$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.9})$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.10})$$

Warto zapamiętać tę liczbę – farma wiatrowa przy prędkości wiatru 6 m/s wytwarza 2 W mocy na 1 m² powierzchni łądu. Zauważ, że nasz wynik nie zależy od średnicy wiatraka. Wartości d się zniosły, ponieważ większe wiatraki muszą być stawiane dalej od siebie. Większe wiatraki to może dobry pomysł, bo pochwyć większe prędkości wiatru (im wyższy wiatrak, z tym większą prędkością wiatru ma do czynienia) lub z uwagi na ekonomię skali. To jednak jedyne powody, by preferować duże wiatraki.

Nasze szacunki w istotnym stopniu zależą od założonych prędkości wiatru. Czy słusznie zakładamy 6 m/s jako długookresową typową prędkość wiatru w wietrznych rejonach Wielkiej Brytanii? Rysunki 4.1 i 4.2 ilustrowały prędkości wiatru w Cambridge i Cairngorm. Rys. B.6 pokazuje średnie prędkości wiatru zimą i latem w ośmiu innych miejscach w Wielkiej Brytanii. Obawiam się, że wartość 6 m/s jest przeszacowana dla większości kraju. Jeżeli zastąpimy 6 m/s przez 4 m/s notowane w Bedford, musimy obniżyć nasze szacunki, mnożąc je przez $(4/6)^3 \approx 0,3$ (pamiętajmy, że moc z wiatru rośnie proporcjonalnie do sześcianu prędkości wiatru).

Z drugiej strony, by oszacować typową moc, nie powinniśmy podnosić do sześcianu średniej prędkości, ale wyznaczyć średni sześcian prędkości wiatru. Średni sześcian jest większy niż sześcian ze średniej. Jeżeli jednak wdamy się w szczegóły, pojawią się komplikacje, bo prawdziwe turbiny wcale nie dostarczają mocy proporcjonalnej do sześcianu prędkości.



Rys. B.4. Rozplanowanie farmy wiatrowej

MOC NA JEDN. POWIERZCHNI	
farma wiatrowa	2 W/m ²
(prędkość 6 m/s)	

Tabela B.5. Warto zapamiętać! Farmy wiatrowe w liczbach

Rys. B.6. Średnie prędkości wiatru latem (ciemny pasek) i zimą (jasny pasek) w ośmiu miejscach w Wielkiej Brytanii. Prędkości mierzone na standardowej dla pomiarów meteorologicznych wysokości 10 metrów. Średnie obejmują lata 1971–2000.

Zazwyczaj mają zakres prędkości wiatru, w ramach którego dostarczają optymalnej mocy. Przy prędkościach wyższych lub niższych zmniejsza się moc dostarczona.

Zmiany prędkości wiatru wraz z wysokością

Wyższe wiatraki są wystawione na działanie wiatru o większej prędkości. Sposób, w jaki prędkość wiatru rośnie wraz z wysokością, nie jest prosty i zależy od ukształtowania (szorstkości) terenu i pory dnia. By dać pewne wyobrażenie, założmy, że podwojenie wysokości zazwyczaj wiąże się ze wzrostem prędkości wiatru o 10% i wzrostem mocy z wiatru o 30%.

Standardowe wzory opisujące prędkość v jako funkcję wysokości z są następujące:

1. Zgodnie ze wzorem gradientu (ścianania) wiatru Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnej NREL [ydt7uk], prędkość jest funkcją potęgi wysokości:

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha$$

gdzie v_{10} oznacza prędkość na 10 m, a wartość typowa wykładnika potęgi α wynosi 0,143 lub $1/7$. Prawo jednej siódmej ($v(z)$ jest proporcjonalne do $z^{1/7}$) i jest stosowane np. przez Elliotta i innych (1991).

2. Wzór gradientu wiatru Duńskiego Stowarzyszenia Przemysłu Wiatrowego (Danish Wind Industry Association) wygląda następująco [yaooanz]:

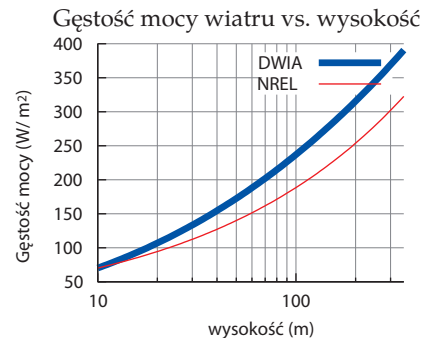
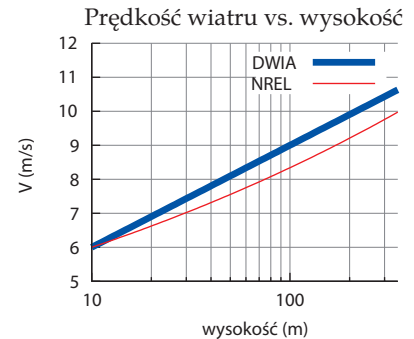
$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)}$$

gdzie z_0 to parametr zwany współczynnikiem szorstkości terenu, a v_{ref} to prędkość na wysokości referencyjnej z_{ref} , np. 10 m. Współczynnik szorstkości terenu dla typowego krajobrazu (obszar rolniczy z domostwami i zalesieniami śródpolnymi w półkilometrowych odstępach – klasa szorstkości 2) wynosi $z_0 = 0,1$ m.

W praktyce oba wzory gradientu wiatru dają zbliżony wynik. Nie oznacza to, że jest on zawsze prawidłowy. Van den Berg (2004) sugeruje, że nocą często mamy do czynienia z innymi profilami wiatru.

Standardowe właściwości wiatraków

W typowym współczesnym wiatraku wirnik o średnicy około 54 metrów jest osadzony na wysokości 80 metrów. Taka maszyna ma moc zainstalowaną 1 MW. Moc zainstalowana lub moc szczytowa to *maksymalna* produkcja energii w optymalnych warunkach. Zazwyczaj projektuje się wiatraki, które zaczynają się kręcić przy prędkościach wiatru między 3 a 5 m/s i stają w trakcie wichury (25 m/s). Rzeczywista generowana moc to moc zainstalowana pomnożona przez współczynnik opisujący ułamek czasu, kiedy warunki są zbliżone do optymalnych. Ten współczynnik, czasami nazy-



Rys. B.7. Góra: dwa modele obliczania prędkości i mocy wiatru jako funkcji wysokości. DWIA = Danish Wind Industry Association; NREL = National Renewable Energy Laboratory. W obu modelach na wysokości 10 m założono prędkość 6 m/s. W przypadku modelu duńskiego współczynnik szorstkości terenu ustalono na $z_0 = 0,1$ m. Dół: gęstość energetyczna (moc na jednostkę powierzchni pionowej) według poszczególnych modeli.



wany współczynnikiem obciążenia lub współczynnikiem wykorzystania mocy zainstalowanej, zależy od lokalizacji. Typowy współczynnik obciążenia dla dobrej lokalizacji w Wielkiej Brytanii wynosi 30%. W Holandii to 22%, a w Niemczech – 19%.

Fot. B.8. Turbina QR5 [quietrevolution.co.uk] nie wygląda jak typowy wiatrak.

Inne szacunki dotyczące mocy farm wiatrowych na jednostkę powierzchni

W analizie rządowej szacującej brytyjskie zasoby wiatru na lądzie [www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf] założono, że moc farm wiatrowych na jednostkę powierzchni wynosi góra 9 W/m^2 (moc zainstalowana, nie średnia produkcja). Jeżeli współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej wynosi 33%, wówczas średnia produkcja nie przekroczy 3 W/m^2 . Dla współczynnika 20% będzie to niecałe 2 W/m^2 .

London Array to farma wiatrowa na morzu planowana u ujścia Tamizy. Przy mocy zainstalowanej 1 GW ma to być największa farma *offshore* na świecie. Farma kosztująca 1,5 mld funtów składać się będzie z 271 turbin wiatrowych na obszarze 245 km^2 [6086ec] i będzie dostarczać średnio 3100 GWh energii rocznie (350 MW). Oznacza to moc na jednostkę powierzchni $350 \text{ MW}/245 \text{ km}^2 = 1,4 \text{ W/m}^2$. To mniej niż w przypadku innych farm na morzu – zapewne dlatego, że lokalizacja obejmuje wielki kanał (Knock Deep), który jest zbyt głęboki (około 20 m), by opłacało się stawiać tam turbiny.

Bardziej obawiam się tego, jak te plany [budowy London Array] zmienią nasz krajobraz i styl życia niż obawiałem się inwazji nazistów na nasze wybrzeża.

Bill Boggia, mieszkaniec Graveney,
gdzie będą wychodzić na ląd podwodne kable farmy wiatrowej.

Pytania i wątpliwości

A co z mikrogeneracją? Jeśli wrzucę sobie miniturbinę na dach, ile dostarczy energii?

Zakładając prędkość wiatru rzędu 6 m/s (a to, jak już wspominaliśmy, więcej niż średnia dla większości kraju) i średnicę 1 m , uzyskamy 50 W mocy. To $1,3 \text{ kWh}$ dziennie. Nie za dużo. W rzeczywistości na typowym terenie zurbanizowanym w Anglii mikroturbina dostarcza zaledwie $0,2 \text{ kWh}$ dziennie: patrz str. 76.

Bodaj najgorsze wiatraki na świecie stoją w japońskim Tsukuba – pożerają więcej energii niż produkują. Ich konstruktorzy zawstydzeni tym, że wiatraki nie pracują, napędzali je importowaną energią! [6bkvbn].

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 280 **Maksymalny odsetek energii wchodzącej, który może pochwytać wirnik w kształcie dysku...** Ciekawy opis znajdziemy na stronie Danish Wind Industry Association. [yekdaa].
- 282 **Zazwyczaj projektuje się wiatraki, które zaczynają się kręcić przy prędkościach wiatru między 3 a 5 m/s.** [ymfbsn].
- 283 **typowy współczynnik obciążenia dla dobrej lokalizacji wynosi 30%.** W 2005 roku średni współczynnik obciążenia dla wszystkich dużych farm wiatrowych w Wielkiej Brytanii wyniósł 28% [ypvbvd]. Współczynnik obciążenia zmieniał się na przestrzeni roku i spadł do 17% w czerwcu i lipcu. W regionie o najlepszych warunkach wiatrowych – w Caithness, na Orkadach i Szetlandach – wyniósł 33%. Dla dwóch farm na morzu działających w 2005 roku wyniósł: 36% dla North Hoyle (wybrzeże Północnej Walii) i 29% dla Scroby Sands (okolice Great Yarmouth). Średni współczynnik obciążenia w 2006 roku dla dziesięciu regionów wynosił: Kornwalia 25%; Środkowa Walia 27%; Cambridgeshire i Norfolk 25%; Cumbria 25%; Durham 16%; Południowa Szkocja 28%; wyspy Orkady i Szetlandy 35%; pn.-wsch. Szkocja 26%; Irlandia Północna 31%; *offshore* 29%. [wbd8o].

Watson i in. (2002) twierdzi, że dla zapewnienia finansowej samowystarczalności energetyki wiatrowej wiatr musi mieć minimalną średnią prędkość roczną rzędu 7,0 m/s. Około 33% powierzchni Wielkiej Brytanii ma takie wiatry.



Fot. B.9. Mikroturbina Ampair o mocy zainstalowanej 600 W. Średnia energia generowana przez tą mikroturbinę w Leamington Spa wynosi 0,037 kWh dziennie (co odpowiada mocy 1,5 W).



Fot. B.10. Turbina Iskra o mocy 5 kW i rednicy 5,5 m [www.iskrawind.com] w trakcie dorocznego przeglądu. Ta turbina postawiona w Hertfordshire (a nie jest to najbardziej wietrzny zakątek Wielkiej Brytanii), o wysokości 12 m, ma średnią produkcję 11 kWh dziennie. Farma wiatrowa składająca się z wiatraków o takich osiąгах, rozstawionych na kwadratach 30 m na 30 m, miałyby moc na jednostkę powierzchni rzędu 0,5 W/m².

C Samoloty

Powinniśmy sprawić, żeby podróże lotnicze stały się bardziej efektywne energetycznie i pojawiły się nowe paliwa, które pozwolą nam zużywać mniej energii i mniej emitować.

Tony Blair

Nadzieja, że wszystko będzie dobrze, to nie polityka. To uluda.

Emily Armistead, Greenpeace

Jakie fundamentalne ograniczenia wiążą się z lataniem? Czy z fizyki latania wynika, że istnieją nieuniknione koszty energetyczne na tonę, na przeleciany kilometr? Jaki dystans maksymalny może pokonać 300-tonowy Boeing 747? A ważący kilogram szlamnik lub stugramowa rybitwa popielata?

Tak jak rozdział 3 (gdzie oszacowaliśmy zużycie energii samochodów) został uzupełniony przez rozdział A (zawierający model zużycia energii w samochodzie), niniejszy rozdział dopełnia rozdział 5. Omówimy, gdzie się podziewa energia zużywana przez samoloty. Z fizyki potrzebujemy jedynie zasad dynamiki Newtona, które opiszę w stosownej chwili.

Spróbujemy sobie odpowiedzieć na pytania typu: „Czy latanie może pochłaniać mniej energii, jeżeli przesiądziemy się na wolniejsze samoloty śmigłowe?” Przed nami wiele równań. Baw się dobrze!

Jak latać

Samoloty (i ptaki) przecinają powietrze, więc zupełnie tak jak samochody i pociągi doświadczają siły oporu. Spora część energii zużywanej przez samolot wykorzystywana jest do pokonywania tej siły. Dodatkowo, w przeciwieństwie do samochodów i pociągów, samoloty muszą zużywać energię, *by utrzymać się w górze*.

Samoloty utrzymują się w górze, odrzucając powietrze w dół. Kiedy samolot napiera w dół na powietrze, powietrze napiera w górę na samolot (bo tak mu każe trzecia zasada dynamiki Newtona). Jak długo to wypychanie, zwane siłą nośną, jest wystarczająco duże, by zrównoważyć ciężącą ku dołowi wagę samolotu, samolot nie spada.

Kiedy samolot odrzuca powietrze w dół, nadaje mu energię kinetyczną. Wytworzenie siły nośnej pochłania energię. Całkowita wymagana moc to suma mocy koniecznej do wytworzenia siły nośnej i mocy wymaganej do przewyciężenia oporu powietrza.

By zbudować teorię latania, potrzebujemy dwóch równań. To druga zasada dynamiki Newtona:

siła wypadkowa działająca na ciało = tempo zmiany pędu ciała (C.1)

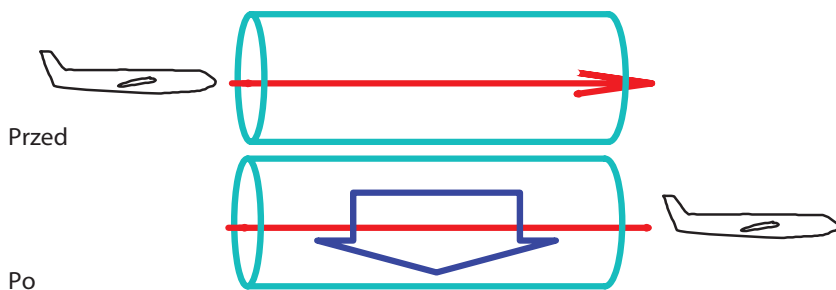
i trzecia zasada dynamiki Newtona, którą dopiero co przywołałem:

siła wywierana przez A na B = – siła wywierana przez B na A (C.2)

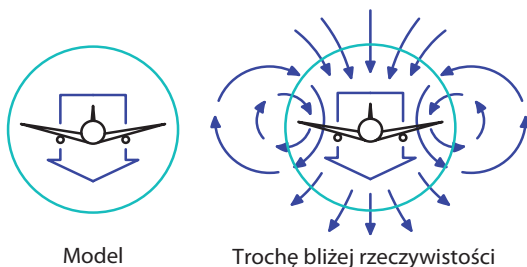
Jeżeli nie lubisz równań, od razu przejdę do *puenty* – dowiemy się jeszcze, że moc konieczna do wytworzenia siły nośnej musi być *równa* mocy



Fot. C.1. Ptaki: dwie rybitwy popielate, szlamnik i Boeing 747



Rys. C.2. Samolot napotyka nieruchomą tubę powietrza. Przechodząc przez tubę, odrzuca powietrze do dołu. Siły wywarłej przez samolot na powietrze (mającej zepchnąć je w dół) przeciwstawia się siła wywierana przez powietrze na samolot o takiej samej wartości, ale przeciwnym zwrocie.



Rys. C.3. W naszym modelu zakładamy, że samolot zostawia za sobą kielbasę powietrza kierującą się ku dołowi. W rzeczywistości mamy do czynienia z bardziej złożonym ruchem wirowym. Takim jak na fot. C.4.

niezbędnej do przewyciężenia oporu powietrza. Samo utrzymanie się w górze *podwaja* zapotrzebowanie na moc.

Naszkujejmy model siły nośnej samolotu poruszającego się z prędkością v . W czasie t samolot pokonuje dystans vt i pozostawia za sobą „kielbasę” powietrza kierującego się do dołu (rys. C.2). Powierzchnię przekroju poprzecznego tej kielbasy nazwiemy A_k . Średnica kielbasy mniej więcej odpowiada rozpiętości skrzydeł r (w większej kielbasie znajduje się mniejsza kielbaska wirującego, turbulenta powietrza o powierzchni przekroju poprzecznego zbliżonej do czoła kadłuba samolotu). W rzeczywistości przepływ powietrza jest znacznie bardziej interesujący niż na naszym kielbasianym obrazku – końcówka każdego skrzydła pozostawia za sobą wir, przy czym powietrze pomiędzy końcówkami skrzydeł szybko wiruje ku dołowi, a powietrze na zewnątrz końcówek porusza się ku górze (rys. C.3 i C.4). Ten ruch wznoszący powietrza jest wykorzystywany przez ptaki lecące w formacji. Zaraz za koniuszkiem skrzydła ptaka wytwarza się przyjemny prąd wznoszący. Ale wróćmy do naszej kielbasy.

Masa kielbasy wynosi:

$$m_{\text{kielbasa}} = \text{gęstość} \times \text{objętość} = \rho vt A_k \quad (\text{C.3})$$

Założmy, że cała kielbasa przemieszcza się ku dołowi z prędkością u i obliczmy, jakie musi być u , żeby na samolot działała siła nośna równa jego masie mg . Pęd kielbasy skierowany ku dołowi wytworzony w czasie t wynosi:

$$\text{masa} \times \text{prędkość} = m_{\text{kielbasau}} = \rho vt A_k u \quad (\text{C.4})$$

Zgodnie z zasadami Newtona musi to być równe pędowi przekazywanemu przez ciężar samolotu w czasie t , czyli:

$$mgt \quad (\text{C.5})$$



Fot. C.4. Zawirowania powietrza za samolotem
Fot. NASA Langley Research Center

Po przeformułowaniu tego równania:

$$\rho v t A_k u = m g t \quad (\text{C.6})$$

możemy obliczyć wymaganą prędkość opadania kielbasy:

$$u = \frac{m g}{\rho v A_k}$$

A to ciekawe! Prędkość kielbasy jest odwrotnie proporcjonalna do prędkości samolotu v . Wolniejszy samolot musi odrzucać powietrze mocniej niż szybszy, bo napotyka mniej powietrza na jednostkę czasu. To dlatego samoloty zwalnijące przy podejściu do lądowania muszą otwierać kłapy – skrzydła stają się większe, stromo nachylone i odchylają w dół więcej powietrza.

Jaki jest koszt energetyczny spychania kielbasy w dół z wymaganą prędkością u ? Wymagana moc wyniesie:

$$P_{\text{nośna}} = \frac{\text{energia kinetyczna kielbasy}}{\text{czas}} \quad (\text{C.7})$$

$$= \frac{1}{t} \frac{1}{2} m_{\text{kielbasa}} u^2 \quad (\text{C.8})$$

$$= \frac{1}{2t} \rho v t A_k \left(\frac{m g}{\rho v A_k} \right)^2 \quad (\text{C.9})$$

$$= \frac{1}{2} \frac{(m g)^2}{\rho v A_k} \quad (\text{C.10})$$

Całkowita moc konieczna do utrzymania samolotu w ruchu to suma mocy oporu (mocy potrzebnej do przezwyciężenia oporu powietrza) i mocy siły nośnej:

$$P_{\text{suma}} = P_{\text{nośna}} + P_{\text{opór}} \quad (\text{C.11})$$

$$= \frac{1}{2} c_o \rho A_s v^3 + \frac{1}{2} \frac{(m g)^2}{\rho v A_k} \quad (\text{C.12})$$

gdzie A_s to czoło samolotu a c_o to współczynnik oporu powietrza (tak jak w rozdziale A).

Efektywność zużycia paliwa samolotu, wyrażona jako energia na przebyty dystans, wyniosłaby:

$$\frac{\text{energia}}{\text{dystans}} \Big|_{\text{ideal.}} = \frac{P_{\text{suma}}}{v} = \frac{1}{2} c_o \rho A_s v^2 + \frac{1}{2} \frac{(m g)^2}{\rho v^2 A_k} \quad (\text{C.13})$$

gdyby samolot przekształcał moc zawartą w paliwie na moc oporu i moc siły nośnej ze stuprocentową sprawnością. Nawiasem mówiąc, „energia na przebyty dystans” to inaczej „siła”, stąd w równaniu mamy siłę oporu powietrza $1/2 c_o \rho A_s v^2$ oraz siłę nośną $1/2 (m g)^2 / (\rho v^2 A_k)$. Sumą jest siła lub „ciąg”, który określa, jak mocno muszą pracować silniki.

W rzeczywistości silniki odrzutowe mają sprawność około $\epsilon = 1/3$, stąd też wartość energii na dystans samolotu podróżującego z prędkością v wynosi:

$$\frac{\text{energia}}{\text{dystans}} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} c_o \rho A_s v^2 + \frac{1}{2} \frac{(m g)^2}{\rho v^2 A_k} \right) \quad (\text{C.14})$$

Równanie energia na dystans jest dość skomplikowane, ale ulega znacznemu uproszczeniu, jeżeli założymy, że samolot został zaprojektowany, by latać z prędkością *minimalizującą* wartość energii na dystans. Tak się składa, że energia na dystans ma swój punkt optymalny będący funkcją v (rys. C.5). Suma dwóch wartości $1/2c_o\rho A_s v^2$ oraz $1/2(mg)^2/(\rho v^2 A_k)$ jest najmniejsza, kiedy te liczby są sobie równe. To zjawisko jest rozkosznie częste w fizyce i inżynierii – dwie wartości, które niekoniecznie *muszą być* równe, faktycznie są równe lub jedna jest najwyżej dwa razy większa od drugiej.

Zgodnie z tą zasadą równości przy prędkości optymalnej mamy:

$$c_o \rho A_s v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_k} \quad (C.15)$$

czyli

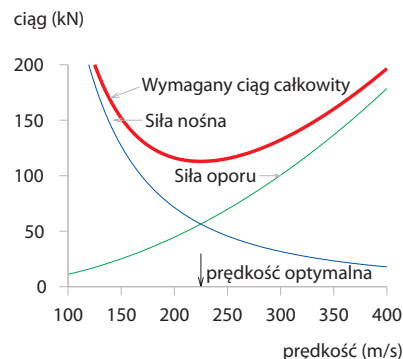
$$\rho v_{\text{opt}}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_d A_s A_k}} \quad (C.16)$$

To równanie definiuje prędkość optymalną, o ile nasz model latania jest prawdziwy. Model pójdzie do kosza, jeżeli sprawność silnika ϵ w dużym stopniu zależy od prędkości lub jeżeli samolot leci z prędkością naddźwiękową (ponad 330 m/s). Powyżej prędkości dźwięku potrzebowałibyśmy innego modelu oporu powietrza i siły nośnej.

Wypróbujmy nasz model, szacując prędkości optymalne dla Boeinga 747 i albatrosa. Musimy przyjąć prawidłowe gęstości powietrza – szacując optymalną prędkość przelotową dla 747 na wysokości 9000 metrów, musimy pamiętać, że gęstość powietrza spada wykładniczo wraz ze wzrostem wysokości z , zgodnie z równaniem $\exp(-mgz/kT)$, gdzie m to masa molekuł azotu lub tlenu, a kT to energia termiczna (stała Boltzmanna razy temperatura bezwzględna). Gęstość powietrza jest około 3 razy niższa na tej wysokości.

Przewidywane prędkości optymalne (yabela C.6) są bliższe prawdy niż mogliśmy oczekiwać! Prędkość optymalna 747 ma wynieść 792 km/h, a albatrosa – 51 km/h, co jest zbliżone do rzeczywistych prędkości przelotowych naszych ptaszków (odpowiednio 900 km/h i 47–88 km/h).

PTAK		747	Albatros
Projektant		Boeing	selekcja naturalna
Masa (pełny ładunek) m		363 000 kg	8 kg
Rozpiętość skrzydeł w		64,4 m	3,3 m
Powierzchnia* A_s		180 m ²	0,09 m ²
Gęstość ρ		0,4 kg/m ³	1,2 kg/m ³
Współczynnik oporu powietrza c_o		0,03	0,1
Prędkość optymalna v_{opt}		220 m/s = 792 km/h	14 m/s = 51 km/h



Rys. C.5. Siła konieczna do przemieszczania samolotu w powietrzu jako funkcja jego prędkości v jest sumą zwykłej siły oporu $1/2c_o\rho A_s v^2$ (która rośnie wraz z prędkością) oraz siły nośnej:

$$\frac{1 (mg)^2}{2 \rho v^2 A_k}$$

(która maleje wraz ze wzrostem prędkości). Istnieje prędkość idealna, v_{opt} , przy której wymagana jest najmniejsza siła. Siła to energia na przebyty dystans, stąd też zmniejszenie siły zmniejsza zużycie paliwa na przebyty dystans. By zoptymalizować efektywność zużycia paliwa, lataj z prędkością v_{opt} . Diagram odzwierciedla nasze modelowe obliczenia niezbędnej siły ciągu, w kilonewtonach, dla Boeinga 747 o masie 319 t, rozpiętości skrzydeł 64,4 m, współczynnika oporu powietrza 0,03 i powierzchni czołowej 180 m², lecącego w powietrzu o gęstości $\rho = 0,41 \text{ kg/m}^3$ (gęstość na wysokości 10 km), jako funkcji jego prędkości v w m/s. W naszym modelu prędkość optymalna wynosi $v_{\text{opt}} = 220 \text{ m/s}$ (792 km/h).

Jak na model oparty na kielbaskach to całkiem bliskie rzeczywistości!

Tabela C.6. Optymalne prędkości dla jumbo jeta i albatrosa.

* Powierzchnia czołowa 747 to iloczyn szerokości kabiny (6,1 m) i wysokości kadłuba (10 m), podwojona w celu uwzględnienia powierzchni czołowej silników, skrzydeł i ogona; w przypadku albatrosa powierzchnia czołowa oszacowana na podstawie fotografii.

Sprawdźmy kilka innych wartości z naszego modelu. Możemy oszacować, czy siła (C.13) jest zgodna ze znaną siłą ciągu 747. Pamiętając, że przy prędkości optymalnej te siły są równe, potrzebujemy jedynie wybrać jedną i ją podwoić:

$$\text{siła} = \frac{\text{energia}}{\text{dystans}} \Big|_{\text{ideal.}} = \frac{1}{2} c_o \rho A_s v^2 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v^2 A_k} \quad (\text{C.17})$$

$$= c_o \rho A_s v_{\text{opt}}^2 \quad (\text{C.18})$$

$$= c_o \rho A_s \frac{mg}{\rho (c_o A_s A_k)^{1/2}} \quad (\text{C.19})$$

$$= \left(\frac{c_o A_s}{A_k} \right)^{1/2} mg \quad (\text{C.20})$$

Zdefiniujmy współczynnik wypełnienia f_A jako współczynnik powierzchni:

$$f_A = \frac{A_s}{A_k} \quad (\text{C.21})$$

(Wyobraźmy sobie f_A jako ułamek kwadratu zajmowanego przez samolot na rys. C.7). Wówczas:

$$\text{siła} = (c f_A)^{1/2} (mg) \quad (\text{C.22})$$

Ciekawe! Niezależnie od gęstości płynu, przez który przedziera się samolot, wymagana siła ciągu (dla samolotu lecącego z prędkością optymalną) jest bezwymiarową stałą $(c f_A)^{1/2}$, pomnożoną przez masę samolotu. Tak przy okazji, owa stała jest znana jako doskonałość aerodynamiczna (inaczej doskonałość statku powietrznego lub efektywność aerodynamiczna – typowe wartości podane są w tabeli C.8).

Posługując się liczbami dla jumbo jeta, $c_o \approx 0,03$ i $f_A \approx 0,04$, dowiadujemy się, że wymagana siła ciągu wynosi:

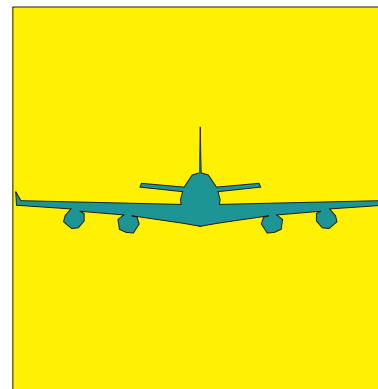
$$(c f_A)^{1/2} mg = 0,036 mg = 130 \text{ kN (kilonewtonów)} \quad (\text{C.23})$$

Jak to się ma do specyfikacji Boeinga 747? W rzeczywistości każdy z czterech silników ma maksymalny ciąg około 250 kN, ale wykorzystuje go tylko przy starcie. W trakcie lotu ciąg jest znacznie niższy – dla Boeinga 747 wynosi 200 kN, zaledwie 50% więcej niż wynika z naszego modelu. Model mija się trochę z rzeczywistością, bo założyliśmy nieco zbyt niską doskonałość aerodynamiczną.

Z siły ciągu można bezpośrednio wyprowadzić efektywność transportową samolotu. Możemy obliczyć dwa rodzaje efektywności transportowej – koszt energetyczny przemieszczania ciężaru, mierzony w kWh na tonokilometr, oraz koszt energetyczny przewozu ludzi, mierzony w kWh na 100 pasażerokilometrów.

Sprawność przemieszczania ciężaru

Siła ciągu to moc, a siła to energia na jednostkę odległości. Całkowita energia zużyta na jednostkę drogi jest większa o czynnik $(1/\epsilon)$, gdzie ϵ to sprawność silnika, którą ustalamy na $1/3$.



Rys. C.7. Widok z przodu Boeinga 747, który posłużył do oszacowania powierzchni czołowej samolotu A_s . Kwadrat ma powierzchnię A_k (kwadrat rozpiętości skrzydeł).

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Rybitwa	12
Albatros	20

Tabela C.8. Doskonałości aerodynamiczne

Oto koszt transportowy brutto, zdefiniowany jako energia na jednostkę ciężaru (całego samolotu) na jednostkę odległości:

$$\text{koszt transportu} = \frac{1 \text{ siła}}{\epsilon \text{ masa}} \quad (\text{C.24})$$

$$= \frac{1 (c_o f_A)^{1/2} m g}{\epsilon m} \quad (\text{C.25})$$

$$= \frac{(c_o f_A)^{1/2}}{\epsilon} g \quad (\text{C.26})$$

Stąd też koszt transportowy jest liczbą bezwymiarową związaną z kształtem samolotu i sprawnością silnika), pomnożoną przez g – przyspieszenie ziemskie. Warto zauważyć, że ten koszt energetyczny brutto dotyczy każdego samolotu, ale zależy jedynie od trzech prostych jego cech: współczynnika oporu powietrza, kształtu samolotu i sprawności silnika. Nie zależy ani od wielkości samolotu, ani jego wagi, ani od gęstości powietrza. Jeżeli założymy $\epsilon = 1/3$ i oskonołość aerodynamiczną 20, z naszego modelu wyniknie, że koszt transportowy brutto *każdego* samolotu wyniesie

$$0,15 g$$

lub też

$$0,4 \text{ kWh/tonokilometr}$$

Czy można ulepszyć samoloty?

Jeżeli sprawność silnika można podwyższyć już tylko odrobinę, a kształt samolotu został już istotnie udoskonalony, niewiele da się zrobić w zakresie liczby bezwymiarowej. Sprawność transportowa jest bliska swojej fizycznej granicy. Specjaliści od aerodynamiki twierdzą, że kształt samolotu można jeszcze odrobinę udoskonalic, projektując maszyny w kształcie płaszczy (blended-wing body) i że można nieco poprawić współczynnik oporu powietrza dzięki kontroli przepływu laminarnego – technologii redukcji turbulencji nad skrzydłem – dzięki otwórkom na powierzchni skrzydła wsysającym powietrze (Braslow, 1999). Wyposażenie istniejących samolotów w system kontroli przepływu laminarnego poprawiłoby współczynnik oporu powietrza o 15%. Budowa samolotów w kształcie płaszczy ma poprawić ten współczynnik o około 18% (Green, 2006). Zgodnie z równaniem (C.26) koszt energetyczny jest proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego współczynnika oporu powietrza, stąd też poprawa o 15% czy 18% obniżyłaby koszt transportowy o odpowiednio 7,5% i 9%.

Ten koszt transportowy brutto to koszt energetyczny przemieszczania ciężaru, w tym ciężaru samego samolotu. By obliczyć, ile energii potrzeba do przemieszczenia ładunku, na jednostkę ciężaru ładunku, musimy ten koszt podzielić przez odsetek, jaki stanowi towar. Dla przykładu, jeżeli ładunek stanowi około 1/3 ciężaru w pełni załadowanego frachtowca 747, wówczas koszt transportowy wynosi

$$0,45 g$$

albo około 1,2 kWh/tonokilometr. To tylko nieco więcej niż koszt transportowy ciężarówki, wynoszący 1 kWh/ tonokilometr.



Fot. C.9. Cessna 310N: 60 kWh na 100 pasażerokilometrów. Cessna 310 Turbo przewozi 6 pasażerów (w tym 1 pilota) z prędkością 370 km/h.

Fot. Adrian Pingstone

Sprawność przemieszczania ciał

W podobny sposób możemy ocenić sprawność przemieszczania pasażerów w Boeingu 747:

$$\begin{aligned} & \text{Efektywność transportu (pasażerokilometry na litr paliwa)} \\ & = \text{liczba pasażerów} \quad \times \quad \frac{\text{energia na litr}}{\text{siła ciągu}} \quad (C.27) \end{aligned}$$

$$= \text{liczba pasażerów} \quad \times \quad \frac{\epsilon \times \text{energia na litr}}{\text{siła ciągu}} \quad (C.28)$$

$$= 400 \times \frac{1}{3} \frac{38 \text{ MJ/litr}}{200\,000 \text{ N}} \quad (C.29)$$

$$= 25 \text{ pasażerokilometry na litr} \quad (C.30)$$

To nieco lepsza sprawność niż w przypadku przeciętnego samochodu wiozącego tylko kierowcę (12 km na litrze). Stąd też podróżowanie samolotem jest bardziej efektywne energetycznie niż samochodem, jeżeli w samochodzie jest jedna lub dwie osoby – oczywiście przy założeniu, że samolot wiezie komplet pasażerów. Przy trzech i więcej osobach w aucie, to samochód jest bardziej efektywny.

Kluczowe kwestie

No, poruszyliśmy sporo zagadnień! Zreasumujmy to co najważniejsze. Połowę energii samolot zużywa, by *utrzymać się w powietrzu*, drugą połowę, by się *przemieszczać*. Efektywność zużycia paliwa przy prędkości optymalnej, wyrażona jako energia na przebyty dystans, wynikała ze wzoru na siłę (C.22) i była wprost proporcjonalna do wagi samolotu. Współczynnik proporcjonalności to doskonałość aerodynamiczna, determinowana kształtem samolotu. O ile obniżenie limitów prędkości dla samochodów zredukowałoby zużycie energii na przebyty dystans, rozważanie takich limitów dla samolotów mija się z celem. Samoloty mają zdefiniowane optymalne prędkości (inne dla każdego typu, zależne od wagi) i tam, w górze, lecą z tą optymalną prędkością. Jeżeli zarządzisz, by samoloty latały wolniej, zużycie energii *wzrośnie*. Jedyny sposób, by samolot zużywał paliwo bardziej efektywnie, to trzymanie go na ziemi. Samoloty już zostały fantastycznie zoptymalizowane i nie ma widoków na znaczącą poprawę ich efektywności (na str. 46 i 144 dyskutujemy twierdzenie, że nowe superdrzutowce są „znacznie sprawniejsze” niż stare jumbo jety, a na str. 35 twierdzenie, że turbośmigłowce są „znacznie sprawniejsze” niż odrzutowce).

Zasięg

Możemy jeszcze oszacować, jaki jest zasięg samolotu lub ptaka – największa odległość, którą pokona bez tankowania. Ktoś mógłby pomyśleć, że im większy samolot, tym większy zasięg, ale przewidywania naszego modelu dają porażająco prosty wynik. Zasięg samolotu (maksymalna dystans, który pokona na jednym tankowaniu) jest wprost proporcjonalny do jego



Fot. C.10. „Proszę zapiąć spinki do mankietów”. Bombardier Learjet 60XR przewożący 8 pasażerów z prędkością 780 km/h ma koszt transportowy rzędu **150 kWh na 100 pasażerokilometrów**. Fot. Adrian Pingstone

prędkości i całkowitej energii zawartej w paliwie i odwrotnie proporcjonalny do tempa, w jakim to paliwo spala:

$$\text{zasięg} = v_{\text{opt}} \frac{\text{energia}}{\text{moc}} = \frac{\text{energia} \times \epsilon}{\text{siła}} \quad (\text{C.31})$$

I dalej, całkowita energia zawarta w paliwie to wartość kaloryczna paliwa C (w dżulach na kilogram) razy jego masa; natomiast masa paliwa to określony odsetek f_{paliwo} całkowitej masy samolotu.

Tak więc:

$$\text{zasięg} = \frac{\text{energia} \epsilon}{\text{siła}} = \frac{C m \epsilon f_{\text{paliwo}}}{(c_o f_A)^{1/2} (m g)} = \frac{\epsilon f_{\text{paliwo}} C}{(c_o f_A)^{1/2} g} \quad (\text{C.32})$$

Trudniej wyobrazić sobie prostsze obliczenie: zasięg każdego ptaka czy samolotu to iloczyn bezwymiarowego czynnika $\epsilon f_{\text{paliwo}} / (c_o f_A)^{1/2}$ (który uwzględnia sprawność silnika, współczynnik oporu powietrza i geometrię ptaszka) i podstawowej wielkości,

$$\frac{C}{g}$$

która zależy jedynie od paliwa i grawitacji. Nie zależy od wielkości, ciężaru, szerokości ani długości ptaka, nie zależy od gęstości płynu.

Jaka jest więc ta magiczna wielkość? Mówimy o tej samej wielkości, niezależnie czy paliwem jest gęsie sadło, czy paliwo odrzutowe – oba te tłuszcze to w gruncie rzeczy węglowodory $(\text{CH}_2)_n$. Paliwo odrzutowe ma wartość kaloryczną $C = 40 \text{ MJ}$ na kg. Dla paliwa odrzutowego wielkość ta wyniesie więc:

$$d_{\text{paliwo}} = \frac{C}{g} = 4000 \text{ km} \quad (\text{C.33})$$

Aby określić maksymalny dystans, wielkość tę (4000 km) pomnożymy przez czynnik $\epsilon f_{\text{paliwo}} / (c_o f_A)^{1/2}$. Zarówno dla ptaka, jak i jumbo jeta sprawność silnika wynosi $\epsilon = 1/3$, doskonałość aerodynamiczna $(c_o f_A)^{1/2} \approx 1/20$, a niemal połowa ciężaru ptaka to paliwo (stanowiące 46% w pełni załadowanego 747), to okazuje się, że wszystkie ptaki i samoloty, niezależnie od wielkości, mają taki sam zasięg równy mniej więcej trzykrotności 4000 km, czyli z grubsza 13 000 km.

To kolejna nasza liczba, która jest bliska rzeczywistości – rekord zasięgu 747 (ustanowiony nocą z 23 na 24 marca 1989 roku) wyniósł 16 560 km.

Twierdzenie, że zasięg nie jest zależny od wielkości ptaszka, jest poparte obserwacjami. Ptaki różnych rozmiarów – od wielkich gęsi po drobne jaskółki i rybitwy popielate – migrują na wielkie, międzykontynentalne dystanse. Najdłuższy nieprzerwany ptasi lot, na odległość 11 000 km, zarejestrowano dla szlamika.

Jak daleko zaleciał Steve Fossett w specjalnie zaprojektowanym Scaled Composites Model 311 Virgin Atlantic GlobalFlyer? Pokonał 41 467 km. [33ptcg]. To niezwykły samolot – 83% jego masy startowej wynosiło paliwo, w czasie lotu skorzystał z prądu strumieniowego, by zwiększyć przebyty dystans. Był delikatny, więc nie obyło się bez kilku awarii po drodze.

Z naszego modelu wynika ciekawa kwestia. Pytając, jaka jest optymalna gęstość powietrza, dowiadujemy się, że wymagany *ciąg* (C.20) przy prędkości



Fot. C.11. Boeing 737-700:
30 kWh na 100 pasażerokilometrów
Fot. © Tom Collins

optymalnej nie zależy od gęstości powietrza. Nasz modelowy samolot czułby się dobrze na każdej wysokości i na każdej wypaliłby tyle samo paliwa przez godzinę lotu. Z drugiej strony, od gęstości powietrza zależy optymalna *prędkość* ($v^2 \sim 1/\rho$, równanie C.16). A zatem, pozostawiając bez zmiany pozostałe parametry, stwierdzamy, że nasz modelowy samolot leciałby najkrócej w powietrzu o najniższej możliwej gęstości. Skoro wypalanie paliwa odchudza samolot, przy danej gęstości powietrza spadnie jego prędkość optymalna ($v^2 \sim mg/(\rho(c_o A_s A_k)^{1/2})$). Stąd też samolot, tracąc na wadze w powietrzu o stałej gęstości, powinien trochę zwolnić. Niemniej jednak samolot może jednocześnie lecieć z *prędkością stałą* i wciąż lecieć z *prędkością optymalną*, o ile wzniesie się wyżej, gdzie powietrze jest rzadsze. Lecąc następnym razem na długim dystansie' zaobserwuj, czy pilot pod koniec lotu zwiększa wysokość przelotową z, dajmy na to, 9 500 m do 12 000 m.

Jak poradziłby sobie samolot na wodór?

Stwierdziliśmy już, że sprawność lotu w kategoriach zużycia energii na tonokilometr to prosta bezwymiarowa liczba pomnożona przez g . Zmiana paliwa nie wpłynie na tę podstawową tezę. Samoloty na wodór to gra warta świeczki, o ile pozwolą nam ograniczyć emisję gazów cieplarnianych. Mogą też mieć lepszy zasięg. Jednak nie ma co oczekiwać, że będą znacznie bardziej efektywne energetycznie.

Inne sposoby usprawnienia lotów

Formacja lecąca w kluczu, tak jak to robią gęsi, miałyby o 10% większą efektywność zużycia paliwa (bo doskonałość aerodynamiczna takiej formacji jest większa niż pojedynczego samolotu). Niestety powodzenie triku zależy od tego, czy nasze gęsi chcą migrować w tym samym kierunku i w tym samym czasie.

Można zoptymalizować długości odcinków między lądowaniami. Samoloty dalekiego zasięgu (powiedzmy 15 000 km) nie są tak efektywne paliwowo, jak samoloty niższych zasięgów, bo muszą przewozić dodatkowe paliwo kosztem ładunku i pasażerów. Latanie w samolotach o mniejszych zasięgach byłoby bardziej efektywne energetycznie. Jeżeli optymalna długość lotu bez międzylądowań wynosi około 5000 km, typowa podróż na dużą odległość wymagałby jednego lub dwóch międzylądowań z tankowaniem (Green, 2006). Takie latanie na długie dystanse z międzylądowaniami mogłoby być około 15% bardziej efektywne paliwowo, aczkolwiek wiązałoby się z innymi kosztami.

Ekologiczne samoloty

Raz na jakiś czas słyszy się o prototypach ekologicznych samolotów. Jednak jak stwierdziliśmy w tym rozdziale, koszt transportowy *każdego* samolotu wynosi mniej więcej

$$0,4 \text{ kWh/tonokilometr.}$$

Zgodnie z naszym modelem jedyny sposób na znaczną poprawę tego wyniku to ograniczenie oporu powietrza (może za pomocą jakichś wymyślnych

d_{paliwo} to odległość, na którą wystrzeliłoby się paliwo, gdyby gwałtownie przekształciło całą swoją energię chemiczną w kinetyczną i wyrzuciło się po torze parabolicznym, bez oporu powietrza (gwoździ precyzji – odległość osiągnięta po optymalnej paraboli to dwukrotność C/g). Ta odległość to również wysokość, na jaką *pionowo* mogłoby się wystrzelić paliwo, gdyby nie było oporów powietrza. C_o zabawne, wartość kaloryczna paliwa C , którą podaję w dżulach na kilogram, to jednocześnie kwadrat prędkości (tak samo jak stosunek energii do masy E/m w równaniu Einsteina $E = mc^2$ to kwadrat prędkości c^2): 40×10^6 J na kg to $(6000 \text{ m/s})^2$. W tym świetle „tłuszcz to 6000 metrów na sekundę”. Jeżeli chcesz schudnąć dzięki bieganiu, biegaj z prędkością 6000 m/s (22 000 km/h), a zrzucisz cały tłuszcz błyskawicznie.

odkurzaczy na skrzydłach) lub zmiana geometrii samolotu (na coś w rodzaju szybowca, z ogromnymi w stosunku do kadłuba skrzydłami lub coś w ogóle bez kadłuba).

Przyjrzyjmy się najnowszej odsłonie opowieści o „lataniu przyjaznemu środowisku” i sprawdźmy, czy taki samolot przebije nasze 0,4 kWh/tonokilometr. Jeżeli tak, to uznamy, że nasz model jest wybrakowany.

Electra, jednoosobowy samolot z drewna i płótna, przeleciał w 48 minut 50 km nad południowymi Alpami [6r32hf]. Electra ma skrzydła o rozpiętości 9 m, 18 kW silnik elektryczny zasilany z 47 kg akumulatorów litowopolimerowych. Masa startowa samolotu wynosi 265 kg (134 kg samolotu, 47 kg akumulatorów i 84 kg człowieka). 23 grudnia 2007 roku samolot przeleciał 50 km. Zakładając, że gęstość energetyczna akumulatorów wynosiła 130 Wh/kg i że w trakcie lotu wykorzystano 90% energii zgromadzonej w akumulatorach (5,5 kWh), koszt transportowy wyniósł mniej więcej:

$$0,4 \text{ kWh/tonokilometr,}$$

czyli dokładnie tyle, ile w naszym modelu. Ten elektryczny samolot wcale nie ssie mniej energii niż typowy zasysacz paliw kopalnych.

Nie oznacza to bynajmniej, że samoloty elektryczne wypadają z gry. Można przecież zastąpić tradycyjne samoloty alternatywami o takim samym zużyciu energii, ale za to nieemitującymi dwutlenku węgla. Co więcej, jako środek transportu pasażerskiego Electra szczydzi się imponującym wynikiem **11 kWh na 100 pkm**, a to wartość zbliżona do samochodu elektrycznego z wykresu transportowego na str. 140. Niemniej jednak w tej książce skupiamy się przede wszystkim na kwestii „skąd wziąć tę całą energię”.

Niektóre łodzie to też ptaki

Kiedy już stworzyłem mój model latania, zdałem sobie sprawę, że ma on zastosowanie nie tylko do ptaszków powietrznych, ale też do hydroplanów i innych jednostek pływających – wszystkich tych, które w trakcie ruchu unoszą się nad wodą.

Rys. C.13 ilustruje zasady działania hydroplanu. Ciężar łodzi jest podtrzymywany przez podwodne, ruchome skrzydło, często niewielkie w stosunku do samej łodzi. Skrzydło generuje siłę nośną, odrzucając płyn do dołu, podobnie jak samolot na rys. C.2. Zakładając, że dominuje opór na skrzydle i że zoptymalizowano rozmiary skrzydła i prędkość łodzi pod kątem zużycia energii na jednostkę odległości, wówczas najniższy możliwy koszt transportowy, wyrażony jako energia na tonokilometr, będzie taki sam jak w równaniu (C.26):

$$\frac{(c_0 f_A)^{1/2}}{\epsilon} g \quad (\text{C.34})$$

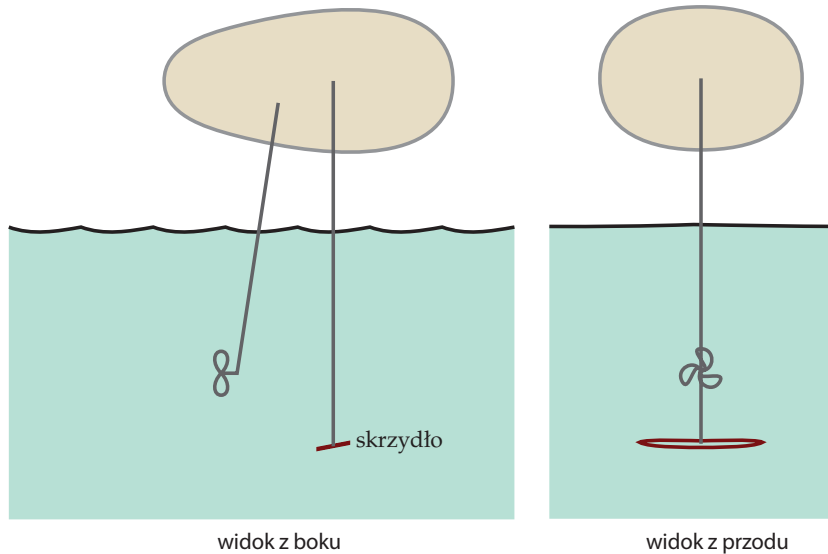
gdzie c_0 to współczynnik oporu dla podwodnego skrzydła, f_A to wcześniej zdefiniowany bezwymiarowy współczynnik powierzchni, ϵ to sprawność silnika i g to przyspieszenie ziemskie.

Zapewne c_0 i f_A nie są dokładnie takie same jak w zoptymalizowanym samolocie. Nasza teoria ma jednak niezwykłą cechę – nie zależy od gęstości



Fot. C.12. Electra F-WMDJ: 11 kWh na 100 pkm

Fot. Jean-Bernard Gache. www.apame.eu



Fot. C.13. Hydropląt
Fot. Georgios Pazios

pływu, przez który przedziera się skrzydło. Dlatego też przewidujemy, że koszt transportowy hydropląta (energia na jednostkę odległości na jednostkę ciężaru, włączając ciężar pojazdu) jest *taki sam* jak koszt transportowy samolotu! Czyli mniej więcej 0,4 kWh/tkm.

W przypadku jednostek, które prześlizgują się po powierzchni wody, takich jak szybkie katamarany i narciarze wodni dokładny model powinien uwzględniać energię pożytkowaną na wytworzenie fal. Przypuszczałbym jednak, że nasza teoria hydropląta i tu jest z grubsza prawidłowa.

Nie trafiłem do tej pory na dane dotyczące kosztów transportowych hydroplątu, jednakże liczby dotyczące katamaranu pasażerskiego płynącego z prędkością 41 km/h wydają się zgadzać – zużywa on około 1 kWh na tonokilometr.

Jestem nieco zaskoczony faktem, że delikwent przeskakujący z wyspy na wyspę samolotem, a nie łodzią, nie tylko robi to szybciej, ale prawdopodobnie mniejszym nakładem energetycznym.

Inne sposoby na utrzymanie się w powietrzu

Sterowce

Jak podkreślaliśmy w tym rozdziale, wolniejsze samoloty nie będą bardziej efektywne energetycznie, bo wszelkie zyski związane z mniejszym oporem powietrza zostaną zniwelowane przez konieczność mocniejszego odrzucania powietrza. Czy można rozwiązać ten problem przez zmianę strategii i zamiast spychać w dół powietrze, uczynić samolot lekkim jak powietrze? Sterowiec, zeppelin, używa olbrzymiego balonu wypełnionego lżejszym od powietrza helem, by zrównoważyć wagę swojej niewielkiej kabiny. Wadą tej strategii jest fakt, że olbrzymi balon istotnie zwiększa opór powietrza.

Sposobem na utrzymanie niskiego kosztu energetycznego sterowca (na jednostkę ciężaru i odległości) jest mała prędkość, rybi kształt i rozmiary

– powinien być wielki i długi. Stwórzmy model kosztu energetycznego naszego hipotetycznego sterowca.

Założę, że balon ma kształt elipsy o powierzchni przekroju poprzecznego A i długości L . Jego objętość wynosi $V = 2/3 AL$. Jeżeli sterowiec płynie stabilnie w powietrzu o gęstości ρ , całkowita jego masa, włączając ładunek i hel, musi wynosić $m_{\text{całkowita}} = \rho V$. Jeżeli porusza się z prędkością v , siła oporu powietrza wynosi:

$$F = \frac{1}{2} c_o A \rho v^2 \quad (\text{C.35})$$

gdzie c_o to współczynnik oporu powietrza, który analogicznie do samolotów powinien wynosić 0,03. Energia wydatkowana na jednostkę odległości równa jest F dzielonemu przez sprawność silników ϵ . Stąd też koszt transportowy brutto – energia zużyta na jednostkę odległości na jednostkę ciężaru – wynosi:

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{suma}}} = \frac{\frac{1}{2} c_o A \rho v^2}{\epsilon \rho \frac{2}{3} AL} \quad (\text{C.36})$$

$$= \frac{3}{4\epsilon} c_o \frac{v^2}{L} \quad (\text{C.37})$$

To całkiem miły wynik! Koszt transportowy brutto tego hipotetycznego sterowca zależy tylko od prędkości v i długości L , a nie od gęstości powietrza ρ czy powierzchni czołowej sterowca A .

Ten model można w niezmienionej formie zastosować do łodzi podwodnych. Koszt transportowy brutto sterowca (w kWh na tonokilometr) jest taki sam jak koszt transportowy brutto łodzi podwodnej o takiej samej długości i prędkości. Łódź podwodna będzie ważyć tysiącrotnie więcej (bo woda jest tysiąc razy gęstsza niż powietrze), a w związku z tym trzeba będzie tysiąc razy więcej energii, żeby ją przemieścić. Jedyna różnica między sterowcem i łodzią podwodną to przychody z reklam na pojeździe.

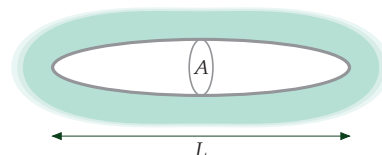
Podstawmy do wzoru kilka liczb. Załóżmy, że chcemy podróżować z prędkością 80 km/h (wówczas przelot nad Atlantykiem zajmie nam 3 dni). W jednostkach układu SI to 22 m/s. Załóżmy sprawność $\epsilon = 1/4$. By maksymalnie obniżyć koszt transportowy, potrzebujemy jak najdłuższego sterowca. Hindenburg miał 245 m długości. Zakładając $L = 400$ m, dowiadujemy się, że koszt transportowy wynosi:

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{suma}}} = 3 \times 0,03 \frac{(22 \text{ m/s})^2}{400 \text{ m}} = 0,1 \text{ m/s}^2 = 0,03 \text{ kWh/t-km}$$

Gdyby ładunek stanowił połowę masy pojazdu, koszt transportowy netto tego monstrualnego sterowca wyniósłby 0,06 kWh/tkm. Podobnie jak w przypadku kolei.



Fot. C.14. 239-metrowy USS Akron (ZRS-4) przelatujący nad Manhattanem. Ważył 100 t, zabierał 83 t ładunku. Całkowita moc silników wynosiła 3,4 MW. Przewoził 89 członków załogi i ładunek broni z prędkością 93 km/h. Służył również jako powietrzny lotniskowiec.



Rys. C.15. Sterowiec w kształcie elipsy

Ekranoplany

Ekranoplan to poduszkowiec poruszający się blisko powierzchni wody. Unosi się w powietrzu nie poprzez odrzucanie do dołu powietrza (jak samolot) lub wody (jak hydroplan lub motorówka), ale siedząc nad poduszkę sprężonego powietrza rozplaszczoną pomiędzy jego skrzydłami a powierzchnią wody. Utrzymanie tej poduszki powietrznej wymaga bardzo niewiele energii, stąd też ekranoplan w kategoriach zużycia energii, można porównać do samochodu niepoddanego oporom toczenia. Najwięcej energii pochłania tu pokonywanie oporu powietrza. Pamiętajmy, że w przypadku samolotu lecącego z prędkością optymalną połowa energii jest wydatkowana na zwalczanie oporu powietrza, a połowa na spychanie powietrza w dół.

W Związku Radzieckim, w epoce Chruszczowa, zaprojektowano ekranoplany, które służyły jako pojazdy wojskowe i wyrzutnie rakiet. Ekranoplan Łuń rozwijał prędkość 500 km/h, a sumaryczny ciąg jego ośmiu silników wynosił 1000 kN, aczkolwiek pełny ciąg wykorzystywany był tylko do wzbicia się ponad wodę. Załóżmy, że ciąg w warunkach przelotowych wynosił jedną czwartą wartości maksymalnej, że silniki miały sprawność 30% i że z 400 ton wagi 100 ton stanowił ładunek. Koszt transportu towarowego netto wynosił więc **2 kWh na tonokilometr**. Przypuszczam, że udoskonalony dla potrzeb cywilnego transportu towarowego ekranoplan mógłby mieć koszt energetyczny o połowę niższy niż zwykły samolot.

Mity

Samolot i tak by poleciał, więc mój lot był neutralny energetycznie.

To twierdzenie jest fałszywe z dwóch względów. Po pierwsze, ważysz – by utrzymać Cię w powietrzu, samolot potrzebuje więcej energii. Po drugie, linie lotnicze odpowiadają na zapotrzebowanie, uruchamiając nowe połączenia.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 285 **Boeing 747**. Współczynnik siły oporu dla 747 pochodzi ze strony www.aerospaceweb.org. Inne dane dotyczące 747 pochodzą z: [2af5gw]. Informacje nt. albatrosa: [32judd].
- 286 **W rzeczywistości silniki odrzutowe mają sprawność $\epsilon \approx 1/3$** . Sprawności typowych silników wahają się między 23% a 36% [adg.stanford.edu/aa241/propulsion/sfc.html]. W przypadku przeciętnego samolotu całkowita sprawność silnika waha się w zakresie 20 – 40%. Najlepsze silniki dwuprzepływowe mają sprawność 30–37% w fazie lotu [www.grida.no/climate/ipcc/aviation/097.htm]. Niemniej jednak najsprawniejszy silnik nie znaczy najlepszy – jeżeli jest cięższy (ma większą masę na jednostkę siły ciągu), spada całkowita efektywność samolotu.
- 292 **Najdłuższy nieprzerwany ptasi lot...** „The Scientist” 2492. „Szlamnik jest królem przestworzy”. 26 marca 2005. 11 września 2007: Szlamnik przelatuje jednym rzutem 11 500 km z Alaski na Nową Zelandię. [2qbqv].
- 293 **Można zoptymalizować długości odcinków między lądowaniami: optymalny odcinek ma około 5000 km.** – Źródło: Green (2006).
- 295 **Liczby dotyczące katamaranu pasażerskiego.** Dane wzięte z: [5h6xph]; wyporność (pełny ładunek) 26,3 t. W czasie rejsu na odległość 1050 mil morskich zużywa jedynie 4780 litrów paliwa. Oznacza to koszt transportowy masy statku rzędu 0,93 kWh na tonokilometr. Nawiasem mówiąc, liczę tutaj całkowitą masę jednostki. Efektywność przewozu pasażerów tym samym statkiem wynosi około 35 kWh na 100 pkm.
- 297 **Ekranoplan Łuń.** – Źródła: www.fas.org [4p3yco], Taylor (2002a).

Zalecana literatura: Tennekes (1997), Shyy i in. (1999).



Fot. C.16. Ekranoplan Łuń – nieco dłuższy i cięższy niż Boeing 747
Fot. A. Belyaev

D Energia słoneczna

Na stronie 51 wymienialiśmy cztery sposoby pozyskiwania energii z zasilanych słońcem systemów biologicznych:

1. substytucja węgla,
2. substytucja ropy,
3. żywność dla ludzi i zwierząt,
4. spalanie produktów ubocznych działalności rolniczej.

Teraz oszacujemy potencjał tych procesów. W praktyce część z nich wymaga tak dużego *wkładu* energetycznego, że dostarcza niewiele energii netto (rys. 6.14). Jednak poniżej zignoruję koszt szarej energii związanej z produkcją i przetwarzaniem surowca.

Rośliny energetyczne jako substytut węgla

Jeżeli uprawiamy w Wielkiej Brytanii rośliny energetyczne takie, jak: wierzba, miskant lub topola (o średniej mocy 0,5 W na metr kwadratowy powierzchni) i pakujemy je do pieca w elektrowni o sprawności 40%, otrzymujemy moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,2 \text{ W/m}^2$. Gdyby obsadzić wierzbą jedną ósmą Wielkiej Brytanii (500 m² na osobę), dysponowalibyśmy mocą $2,5 \text{ kWh/d/o}$.

Obsianie wierzbą jednej ósmej Polski (1000 m² na osobę), dałoby moc 5 kWh/d/o .

Substytucja ropy

Istnieje kilka metod przekształcania roślin w paliwa płynne. Potencjał każdej z tych metod wyrażę w kategoriach mocy na jednostkę powierzchni (tak jak na rys. 6.11).

Rzepak – najważniejsze źródło brytyjskiego biodiesla

Zazwyczaj rzepak sieje się we wrześniu, a zbiera w kwietniu. Obecnie w Wielkiej Brytanii rzepakiem obsiewa się 450 000 hektarów rocznie (to 2% powierzchni kraju). Produkcja biodiesla wynosi 1200 litrów z hektara rocznie, litr biodiesla zawiera 9,8 kWh energii. Daje to moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,13 \text{ W/m}^2$.

Gdybyśmy 25% powierzchni kraju obsiali rzepakiem, otrzymalibyśmy biodiesel o zawartości energetycznej rzędu $3,1 \text{ kWh na osobę dziennie}$.

Obsianie rzepakiem 25% powierzchni Polski (2000 m² na osobę) dałoby moc rzędu 6 kWh/d/o .



Fot. D.1. Drzewa



Fot. D.2. Rzepak. Spożytkowany do produkcji biodiesla dostarcza $0,13 \text{ W/m}^2$ mocy na jednostkę powierzchni.
Fot. Tim Dunne

Etanol z buraka cukrowego

Burak cukrowy daje w Wielkiej Brytanii imponujące plony 53 t z hektara rocznie. Z jednej tony buraka cukrowego pozyskuje się 108 litrów bioetanolu. Bioetanol charakteryzuje się gęstością energetyczną rzędu 6 kWh na litr, co daje moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,4 \text{ W/m}^2$. W rachunku pomijamy wysokie nakłady energetyczne ponoszone w procesie produkcji etanolu.

Bioetanol z trzciny cukrowej

Tam, gdzie da się uprawiać trzcinę cukrową (np. w Brazylii), plony wynoszą 80 ton z hektara rocznie, co daje 17 600 litrów etanolu. Bioetanol ma gęstością energetyczną rzędu 6 kWh na litr, co daje moc na jednostkę powierzchni rzędu $1,2 \text{ W/m}^2$.

Bioetanol z kukurydzy w Stanach Zjednoczonych

Moc na jednostkę powierzchni w przypadku etanolu z kukurydzy jest zadziwiająco niska. Dla zabawy najpierw posłużymy się archaiczną miarką. Z jednego akra otrzymujemy 122 buszle kukurydzy rocznie, a to $122 \times 2,6$ galonów amerykańskich etanolu, co przy 84 000 BTU na galon [mówiąc po polsku – $4,3 \text{ m}^3$ kukurydzy rocznie, 462 litry etanolu, $6,5 \text{ kWh}$ na litr – red.] oznacza moc na jednostkę powierzchni rzędu zaledwie $0,2 \text{ W/m}^2$. Jednakże nakłady energetyczne konieczne do przetworzenia kukurydzy w etanol wynoszą nawet 83,000 BTU na galon. 99% wyprodukowanej energii jest pożytkowane na przetwarzanie surowca. Moc na jednostkę powierzchni netto wynosi zaledwie $0,002 \text{ W/m}^2$. Jedy-nym sposobem na to, by proces przekształcania kukurydzy na etanol przyniósł istotny zysk energetyczny netto, jest wykorzystanie wszystkich jego produktów ubocznych. Po uwzględnieniu energii zawartej w produktach ubocznych moc netto na jednostkę powierzchni wyniesie około $0,05 \text{ W/m}^2$.

Etanol celulozowy z prosa różgowego

Czy etanol celulozowy jest cudownym biopaliwem „nowej generacji”? Zespół Schmer i in. (2008) podaje, że energia netto uzyskana z prosa różgowego uprawianego przez pięć lat na glebach marginalnych 10 gospodarstw rolnych w środkowych Stanach wyniosła 60 GJ z hektara rocznie. To $0,2 \text{ W/m}^2$. „To obliczenia wyjściowe, opierające się na materiale genetycznym oraz technologiach upraw prosa różgowego dostępnych w latach 2000 i 2001, kiedy rośliny były sadzone. Modyfikacje genetyczne i poprawa technologii upraw mogą dalej poprawiać bilans energetyczny i produkcję biopaliw z prosa różgowego”.

Jatrofa też daje małą moc na jednostkę powierzchni

Jatrofa to roślina oleista lubiąca suche tropiki (opady roczne rzędu 300–1000 mm). Preferuje temperatury pomiędzy 20 a 28 °C. Spodziewany plon w gorących regionach, na dobrych glebach, wynosi 1600 litrów

gęstość energetyczna (kWh/kg)	
drewno miękkie	
– suszone na powietrzu	4,4
– suszone w suszarni	5,5
drewno twarde	
– suszone na powietrzu	3,75
– suszone w suszarni	5,0
biały papier biurowy	4,0
papier kredowy	4,1
gazeta	4,9
karton	4,5
węgiel	8
słoma	4,2
kurze odchody	2,4
odpady przemysłowe	4,4
odpady medyczne	3,9
odpady komunalne stałe	2,6
odpady komunalne na paliwo (typu RDF)	5,1
opony	8,9

Tabela D.3. Wartość kaloryczna drewna i jemu podobnych. Źródła: Yaros (1997); Ucuncu (1993), *Digest of UK Energy Statistics 2005*



Fot. D.4. SELCHP – Twoje śmieci to ich interes

biodiesla z hektara rocznie. To moc na jednostkę powierzchni rzędu $0,18 \text{ W/m}^2$. Na nieużytkach plon wynosi 583 litrów z hektara rocznie. To $0,065 \text{ W/m}^2$. Gdybyśmy przeznaczyli 10% powierzchni Afryki pod uprawy dostarczające $0,065 \text{ W/m}^2$, a potem podzielili to między sześć miliardów ludzi, ile by nam przypadło? **0,8 kWh na osobę dziennie**. Dla porównania światowe zużycie ropy wynosi 80 mln baryłek dziennie, co podzielone na 6 mld ludzi daje **23 kWh/d/os.** Nawet gdybyśmy całą Afrykę (z Saharą włącznie) obsadzili jatrofą, uzyskana moc zastąpiłaby jedynie jedną trzecią światowego zużycia ropy.

To może algi?

Algi to rośliny, więc wszystko powyższe stosuje się do alg. Śluzowate podwodne roślinki wcale nie mają sprawniejszej fotosyntezy niż ich lądowi kuzyni. Nie wspominałem jednak o zabiegu, powszechnie stosowanym przez producentów biodiesla z alg – wodę w zbiornikach z algami nawozi się dwutlenkiem węgla odebrany z elektrowni lub fabryk. Algom znacznie łatwiej przeprowadzić fotosyntezę, jeżeli ktoś za nie skoncentruje dwutlenek węgla. Według Rona Putta z Uniwersytetu w Auburn w tym słonecznym zakątku Stanów Zjednoczonych, w stawach nawożonych dwutlenkiem węgla (skoncentrowanym do poziomu 10%) algi mogą narastać w tempie 30 g na metr kwadratowy dziennie, produkując 0,01 litra biodiesla na m^2 dziennie. Oznacza to moc na jednostkę powierzchni 4 W/m^2 – zbliżoną do mocy bawarskiej farmy fotowoltaicznej. By przejechać 50 km dziennie w typowym samochodzie (spalającym 8l/100 km), potrzebowalibyś **420 metrów kwadratowych** pracujących dla Ciebie stawów algowych. Dla porównania powierzchnia na osobę w Wielkiej Brytanii wynosi 4000 m^2 , z czego 69 m^2 stanowi woda (rys. 6.8). Nie zapominajmy, że kluczowe jest nakarmienie alg skoncentrowanym dwutlenkiem węgla. Zastosowanie tej technologii byłoby więc ograniczone zarówno przez dostępność powierzchni pod stawy algowe, jak i dostęp do skoncentrowanego CO_2 , którego wychwycenie miałoby swój koszt energetyczny (co rozważaliśmy w rozdziałach: 23 i 31). Przyjrzyjmy się granicom wykorzystania skoncentrowanego CO_2 . Przyrost alg rzędu 30 g na m^2 dziennie wymagałby co najmniej 60 g CO_2 na m^2 dziennie (ponieważ cząsteczka CO_2 ma większą masę na atom węgla niż cząsteczki w algach). Gdyby wychwycić całe CO_2 ze wszystkich brytyjskich elektrowni (około $2\frac{1}{2}$ tony na osobę rocznie), wystarczyłoby to na użyżenie **230 metrów kwadratowych** stawów algowych na osobę – to jakieś 6% powierzchni kraju.

Przypadająca na Polaka emisja CO_2 związana z produkcją elektryczności wynosi 3,8 tony rocznie. Wystarczyłoby to na użyżenie **350 metrów kwadratowych** stawów algowych na osobę – to trochę ponad 4% powierzchni Polski.

Z tego obszaru da się pozyskać biodiesel o mocy 24 kWh na osobę dziennie, zakładając, że dane dotyczące słonecznej Ameryki znajdą u nas zastosowanie. Realistyczna wizja? A może wystarczy jedna dziesiąta tego obszaru? Sam zdecyduj.

To może algi morskie?

Jak właśnie napisałem, producenci biodiesla z alg zawsze karmią algi skoncentrowanym CO₂. Jeżeli wyprawimy się z tym na morze, pompowanie CO₂ nie zda egzaminu. A bez skoncentrowanego CO₂ produktywność alg spada stukrotnie. By algi morskie poprawiły bilans energetyczny, konieczne byłyby hodowle wielkości kraju.

To może algi produkujące wodór?

Nakłonienie alg do produkcji wodoru przy użyciu światła słonecznego to sprytny pomysł, bo eliminuje szereg chemicznych procesów, zazwyczaj związanych z przemysłową produkcją węglowodanów. Każda dodatkowa faza chemiczna zmniejsza przecież efektywność procesu. Wodór można produkować bezpośrednio w procesie fotosyntezy, przestając na pierwszym etapie. Naukowcy z Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnych w Kolorado przewidują, że reaktor wypełniony genetycznie zmodyfikowanymi algami zielonymi, zajmujący 11 ha na pustyni w Arizonie, może produkować 300 kg wodoru dziennie. Wodór zawiera 39 kWh na kg, stąd też instalacja produkcji wodoru z alg dostarczyłaby moc na jednostkę powierzchni rzędu 4,4 W/m². Uwzględniając prąd zużywany przez instalację, moc dostarczona netto spadłaby do 3,6 W/m². To całkiem obiecujący wynik – choćby w porównaniu z bawarską farmą fotowoltaiczną (5 W/m²).

Żywność dla ludzi i zwierząt

Uprawy zbóż takich, jak: pszenica, żyto, jęczmień i kukurydza mają gęstość energetyczną rzędu 4 kWh/kg. W Wielkiej Brytanii przeciętne plony pszenicy wynoszą 7,7 t z hektara rocznie. Jeżeli tą pszenicą nakarmi się zwierzę, moc na jednostkę powierzchni wyniesie 0,34 W/m². Gdyby na takie uprawy przeznaczyć 2800 m² na osobę (to całość obszarów rolniczych Wielkiej Brytanii), produkcja energii chemicznej wyniosłaby około 24 kWh na osobę dziennie.

Średnie plony pszenicy w Polsce to blisko 4 t z hektara. Gdyby na takie uprawy przeznaczyć 4500 m² na osobę (całość polskich terenów rolniczych), to produkcja energii chemicznej wyniosłaby 20 kWh na osobę dziennie.

Spalanie odpadów rolnych

Dowiedzieliśmy się wcześniej, że w elektrowni na biomasę spalającej najlepsze rośliny energetyczne moc na jednostkę powierzchni wynosi 0,2 W/m². Załóżmy, że w to miejsce posadzimy uprawy żywnościowe i włożymy do pieca niejadalne odpady albo że tym zbożem nakarmimy kurczaki, a do pieca wrzucimy to, co kury pozostawią po sobie. Ile mocy na jednostkę powierzchni upraw nam to dostarczy? Oszacujemy to w przybliżeniu, a potem porównamy z rzeczywistością. Załóżmy nieco obłudnie, że zgarniamy odpady z połowy Wielkiej Brytanii (2000 m² na osobę) i wieziemy ciężarówkami do

elektrowni. Przyjmijmy, że odpady rolne dostarczają 1/10 mocy, którą na jednostkę powierzchni dostarczają najlepsze uprawy energetyczne, czyli $0,02 \text{ W/m}^2$. Mnożąc to przez 2000 m^2 , otrzymujemy **1 kWh na osobę dziennie**.

Czy w moich obłędnych założeniach skrzywdziłem odpady rolne? Pownownie oszacujemy możliwą produkcję energii z rolniczych odpadków, w oparciu o prototypową instalację na słomie w Elean we Wschodniej Anglii. Elean, przy mocy wyjściowej 36 MW rocznie, zużywa 200 000 ton słomy zebranej w promieniu 80 km. Zakładając podobną gęstość energetyczną na terenie całego kraju, instalacje typu Elean mogą dostarczyć $0,002 \text{ W/m}^2$. Przy 4000 m^2 na osobę to 8 W na osobę lub też 0,2 kWh na osobę dziennie.

Policzmy to jeszcze inaczej. Produkcja słomy w Wielkiej Brytanii wynosi 10 mln ton rocznie lub $0,46 \text{ kg}$ na osobę dziennie. Przy $4,2 \text{ kWh/kg}$ słoma zawiera energię chemiczną rzędu 2 kWh na osobę dziennie. Gdyby całą tę słomę spalić w elektrowni o sprawności 30% – co raczej nie spodoba się bydłu hodowlanemu, robiącemu ze słomy inny użytek – produkcja prądu wyniosłaby 0,6 kWh na osobę dziennie.

Produkcja słomy w Polsce wynosi 30 mln ton rocznie. Gdyby całą tą słomę spalić w elektrowni o sprawności 30%, to produkcja prądu wyniosłaby **2,7 kWh na osobę dziennie**.

Metan z wysypisk śmieci

Obecnie większość metanu ulatniającego się z wysypisk pochodzi z odpadów organicznych, przede wszystkim z resztek żywności. Jak długo będziemy wyrzucać do śmieci jedzenie i gazety, gaz z wysypisk zapewni nam trwały dopływ energii. Co więcej, spalanie tego metanu będzie dobre dla klimatu, bo to gaz cieplarniany mocniejszy od CO_2 . Wysypisko przyjmujące rocznie 7,5 mln ton odpadów z gospodarstw domowych może produkować $50\,000 \text{ m}^3$ metanu na godzinę.

W roku 1994 emisję metanu z wysypisk szacowano na $0,05 \text{ m}^3$ na osobę dziennie, co przekładało się na energię chemiczną rzędu 0,5 kWh na osobę dziennie i mogło dostarczyć **0,2 kWh prądu na osobę dziennie** przy 40-procentowej sprawności konwersji. Dzięki odpowiedniemu prawodawstwu emisje gazów z wysypisk w Wielkiej Brytanii spadają i teraz są mniej więcej o połowę mniejsze.

Spalanie odpadów bytowych

SELCHP, elektrociepłownia południowo-wschodniego Londynu [www.selchp.com], to jednostka o mocy 35 MW spalająca rocznie 420 tysięcy ton niesegregowanych odpadów z Londynu i okolic. Pakują do pieca wszystko, jak leci, bez sortowania. Już po spaleniu metale żelazne są oddzielane do recyklingu, odpady toksyczne są filtrowane i wysyłane na specjalne składowisko, a pozostały popiół, oddany do ponownego przetworzenia, kończy jako materiał do budowy dróg i budynków. Wartość kaloryczna odpadów wynosi $2,5 \text{ kWh/kg}$ a sprawność cieplna instalacji – 21%, stąd też każdy kilogram odpadów zamienia się w $0,5 \text{ kWh}$ prądu. Emisje dwutlenku węgla wynoszą



Fot. D.4. SELCHP – Twoje śmieci to ich interes

około 1000 g CO₂ na kWh. Z produkowanych 35 MW około 4 MW zużywa sama instalacja do napędu urządzeń i filtracji.

Patrząc szerzej, gdyby każda gmina miała taki SELCHP i gdyby każdy wysyłał tam 1 kg odpadów dziennie, spalanie śmieci dostarczyłoby nam **0,5 kWh_{el} na osobę dziennie**.

To wartość zbliżona do szacunków dla metanu z wysypisk. Niestety – albo jedno, albo drugie. Im więcej śmieci spalimy, tym mniej metanu wycieknie z wysypisk. Więcej informacji dotyczących spalania można znaleźć na rys. 27.2 (str. 216) i rys. 27.3 (str. 217).

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

288 **Moc na jednostkę powierzchni dla produkcji prądu z wierzy, miskanta lub topoli wynosi 0,2 W/m².** – Źródło: Select Committee on Science and Technology Research Council [www.publications.parliament.uk/pa/ld200304/ldselect/ldsctech/126/4032413.htm].

„Przeciętnie w Europie Północnej można w sposób zrównoważony produkować 10 ton suchej biomasy drzewnej z hektara rocznie (...). Stąd też z 1 km² można uzyskać 1000 ton suchej masy rocznie. To wystarczy do zasilenia jednostki o mocy wyjściowej 150 kW_{el} przy niskiej sprawnościach konwersji lub też 300 kW_{el} przy wysokiej sprawności konwersji”. Oznacza to 0,15–0,3 W_{el}/m². Więcej w: Layzell i in. (2006). [3ap7lc].

– **Rzepak.** – Źródła: Bayer Crop Science (2003), Evans (2007), www.defra.gov.uk

299 **Burak cukrowy.** – Źródło: statistics.defra.gov.uk/esg/default.asp

– **Bioetanol z kukurydzy.** – Źródło: Shapouri i in. (1995).

– **Bioetanol z celulozy.** Więcej w: Mabee i in. (2006).

– **Jatrofa.** – Źródła: Francis i in. (2005), Asselbergs i in. (2006).

300 **W Stanach Zjednoczonych, w stawach nawożonych skoncentrowanym CO₂, algi mogą narastać w tempie 30 g na metr kwadratowy dziennie, produkując 0,01 litra biodiesla na m² dziennie.** – Źródło: Putt (2007). W tym rachunku nie uwzględniono kosztów energetycznych utrzymania stawów algowych i przetwarzania alg na biodiesel. Putt oblicza bilans energetyczny dla projektu 40-hektarowej farmy algowej, zasilanej metanem z biofermentatora na gnojowicę. Opisywana farma w rzeczywistości produkowałaby mniej energii niż dostarczałby metan. Zużywałaby 2600 kW metanu, co odpowiada gęstości energetycznej na wejściu rzędu 6,4 W/m². Reasumując, gęstość energetyczna na wyjściu, w formie biodiesla, wynosiłaby zaledwie 4,2 W/m². Na wszystkie metody produkcji biopaliw należy spojrzeć krytycznym okiem!

301 **Naukowcy z Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnych w Kolorado przewidują, że reaktor wypełniony genetycznie zmodyfikowanymi algami zielonymi, zajmujący 11 ha, może produkować 300 kg wodoru dziennie.** – Źródło: Amos (2004).

302 **Instalacja Elean.** – Źródło: Rządowa biała księga (2003). Elean (36 MW) – pierwsza brytyjska instalacja na słomę. Produkcja słomy: www.biomassenergycentre.org.uk

– **Gaz wysypiskowy.** – Źródła: Matthew Chester, City University, London, wystąpienie własne; Meadows (1996); Aitchison (1996); Alan Rosevear, przedstawiciel Wielkiej Brytanii w Podkomitecie ds. Gazu Wysypiskowego Methane to Markets, maj 2005. [4hamks].



E Ogrzewanie

Perfekcyjnie uszczelniony i ocieplony budynek trzymałby ciepło w nie-skończoność i nie potrzebowałby ogrzewania. Dwie główne przyczyny utraty ciepła przez budynki to:

1. **przewodzenie (przenikanie) ciepła** – ciepło przesącza się bezpośrednio przez ściany, okna i drzwi;
2. **wentylacja** – ciepło przesącza się przez szpary i otwory, ale też przez niezbędne przewody wentylacyjne.

W standardowym modelu strat ciepła oba te przepływy ciepła są proporcjonalne do różnicy temperatur w środku domu i na zewnątrz. W przypadku przeciętnego brytyjskiego domu, większość strat wiąże się z przewodnictwem ciepła, o czym przekonamy się w dalszej części rozdziału.

Strata ciepła przez przenikanie

Tempo przenikania ciepła przez ściany, sufit, podłogę lub okno to iloczyn trzech czynników: powierzchni ściany, współczynnika przenikania ciepła przez przegrody (zwanego w handlu wartością U lub przenikalnością cieplną) i różnicy temperatur:

straty ciepła = powierzchnia $\times U \times$ różnica temperatur.

Wartość U jest najczęściej mierzona w $W/m^2/K$ (jeden stopień Kelwina ($1^\circ K$) = jeden stopień Celsjusza ($1^\circ C$)). Większe wartości U przekładają się na większe straty energii. Im grubszy mur, tym niższa wartość U . Okna z podwójnymi szybami prawie dorównują porządkiem murowi z cegieł (patrz: tabela E.2.)

Wartości U elementów stanowiących „serię”, takich jak mur i jego wewnętrzne obmurowanie, mogą być łączone, tak jak w przypadku przewodnictwa elektrycznego:

$$u_{\text{ułożenie szeregowe}} = 1 \left/ \left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right) \right.$$

Konkretne liczby do tego wzoru podstawiamy na str. 296.

Straty ciepła w wentylacji

By oszacować, ile ciepła potrzebujemy do ogrzania wsączającego się zimnego powietrza, musimy znać pojemność cieplną powietrza. Wynosi ona $1,2 \text{ kJ/m}^3/K$.

W budownictwie zazwyczaj opisuje się straty energii związane z wentylacją danej przestrzeni jako iloczyn ilości wymian powietrza N na godzinę, objętości przestrzeni w metrach sześciennych V , pojemności cieplnej C i różnicy temperatur ΔT pomiędzy wewnątrz a otoczeniem budynku.



kuchnia	2
łazienka	2
salon	1
sypialnia	0,5

Tabela E.1. Wymiana powietrza w ciągu godziny: typowe wartości N dla szczelnych pomieszczeń.

Najbardziej nieszczelne pomieszczenie miałyby $N = 3$ (liczba wymian powietrza przez godzinę). Rekomendowane minimalne tempo wymiany na godzinę wynosi między 0,5 i 1,0, co dostarcza ilość świeżego powietrza korzystną dla zdrowia ludzkiego, wystarczającą do spalania paliw i zapobiegającą zawilgoceniu konstrukcji budowlanej (EST 2003).

	Wartości U (W/m ² /K)		
	stare budynki	obecne standardy	najlepsze praktyki
Mury		0,45 – 0,6	0,12
lity mur z kamienia	2,4		
ściana zewnętrzna obmurowana cegłą pełną, 23 cm	2,2		
ściana szczelinowa z bloczków ceramicznych, niewypełniona materiałem termoizolacyjnym, 28 cm	1,0		
ściana szczelinowa z bloczków ceramicznych, wypełniona materiałem termoizolacyjnym, 28 cm	0,6		
Podłogi		0,45	0,14
podłoga drewniana na legarach	0,7		
podłoga z betonu	0,8		
Dachy		0,25	0,12
płaski z izolacją 25 mm	0,9		
stromy z izolacją 100 mm	0,3		
Okna			1,5
z jedną szybą	5,0		
z dwiema szybami	2,9		
dwuszybowe, przestrzeń międzyszybowa 20 mm	1,7		
trzyszybowe	0,7 – 0,9		

Tabela E.2. Wartości U ścian, podłóg, dachów i okien

$$\text{moc (waty)} = C \frac{N}{1 \text{ h}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.1})$$

$$= (1,2 \text{ kJ/m}^3/\text{K}) \frac{N}{3600 \text{ s}} V(\text{m}^3) \Delta T(\text{K}) \quad (\text{E.2})$$

$$= \frac{1}{3} NV \Delta T \quad (\text{E.3})$$

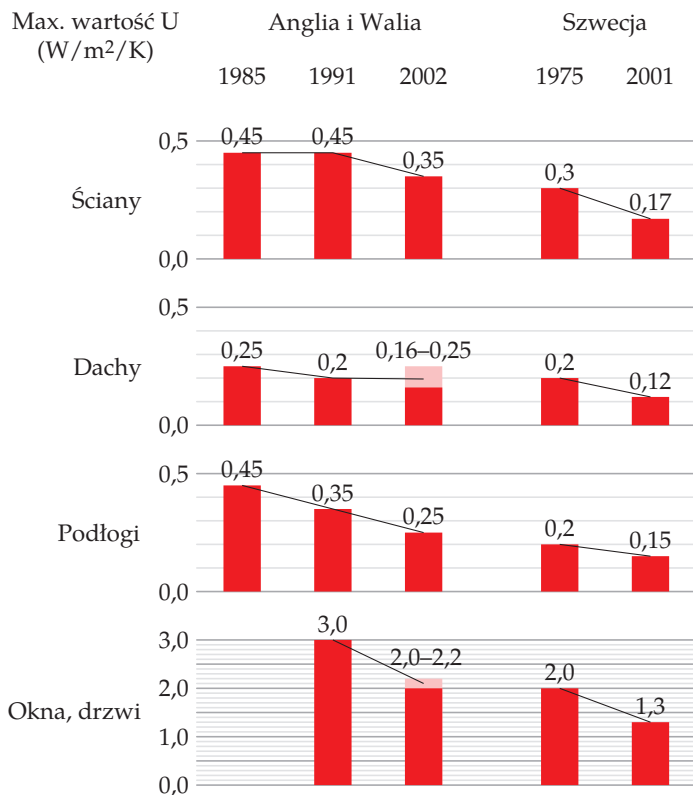
Straty energii i zapotrzebowanie na temperaturę
(w stopniach dziennie)

Skoro energia to moc × czas, straty energii związane z przewodzeniem ciepła przez powierzchnię przegrody, w krótkim czasie, można wyrazić jako:

$$\text{straty energii} = \text{powierzchnia} \times U \times (\Delta T \times \text{okres trwania}),$$

a straty energii związane z wentylacją jako:

$$\frac{1}{3} NV \times (\Delta T \times \text{okres trwania})$$



Rys. E.3. Wartości U wymagane przez brytyjskie i szwedzkie kodeksy budowlane

Oba te rodzaje strat przyjmują formę:

$$\text{coś} \times (\Delta T \times \text{okres trwania}),$$

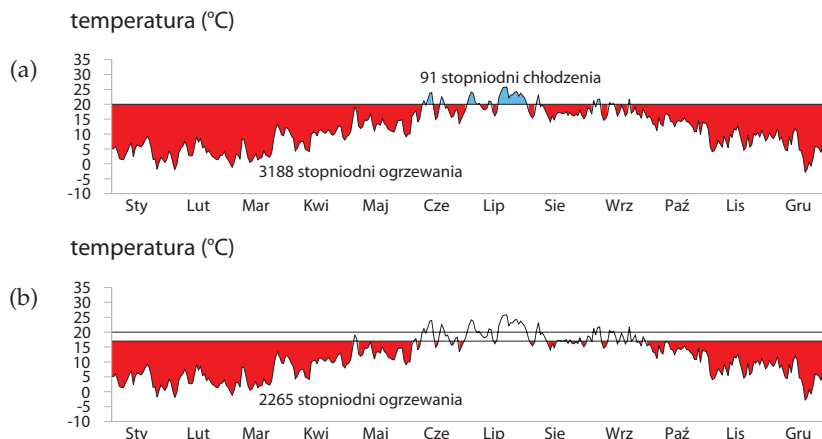
gdzie *coś* mierzy się w watach na °C. Gdy dzień przechodzi w noc, gdy zmieniają się pory roku, zmienia się też różnica temperatur ΔT ; długi okres można podzielić na masę małych okresów, kiedy to różnica temperatur jest mniej więcej stała. Różnica temperatur zmienia się zależnie od okresu, ale nie zmieniają się *cosie*. By przewidzieć całkowite straty energii związane z przenikaniem i wentylacją w długim okresie, musimy przemnożyć dwie rzeczy:

1. sumę wszystkich *cosiów* (sumując *powierzchnię* \times *U* dla wszystkich ścian, dachów, podłóg, drzwi i okien oraz $\frac{1}{3} NV$ dla objętości) i
2. sumę wszystkich współczynników różnica temperatur \times okres trwania (dla wszystkich okresów trwania).

Pierwszy parametr to własność budynku mierzona w watach na °C. Nazwę to *współczynnikiem strat ciepła budynku* (lub *współczynnikiem nieuszczelności*). Drugi parametr to własność pogody i często jest wyrażany jako ilość „stopniodni”, jako że różnicę temperatur mierzy się w stopniach, a dni są wygodną jednostką mierzenia okresów trwania. Dla przykładu, jeżeli przez tydzień temperatura wewnątrz twojego domu wynosi 18 °C, a na zewnątrz 8 °C, wówczas suma ($\Delta T \times$ okres trwania) powiększy się

o $10 \times 7 = 70$ stopniodni. Sumę wszystkich współczynników ($\Delta T \times$ okres trwania) nazwę *zapotrzebowaniem na temperaturę* w okresie.

straty energii = współczynnik strat ciepła \times zapotrzebowanie na temperaturę



Możemy ograniczyć straty ciepła, obniżając albo współczynnik strat ciepła, albo zapotrzebowanie na temperaturę, albo robiąc jedno i drugie. Poniżej przyglądamy się bliżej tym dwóm czynnikom na przykładzie pewnego domu w Cambridge.

Istnieje jeszcze trzeci czynnik, którego nie wolno nam pominąć. Utraconą energię rekompensuje system ogrzewania budynku i inne źródła energii takie, jak: mieszkańcy, ich gadżety i kuchenki oraz słońce. W przypadku systemu grzewczego energia *dostarczona* przez system nie jest taka sama, jak energia *spożytkowana* przez grzejniki. Jest to warunkowane *współczynnikiem wydajności* systemu grzewczego.

energia spożytkowana = energia dostarczona / współczynnik wydajności

Na przykład kondensacyjny kocioł gazowy ma współczynnik wydajności 90%, bo 10% energii umyka kominem.

Reasumując, możemy ograniczyć zużycie energii w budynkach na trzy sposoby:

1. zmniejszając zapotrzebowanie na temperaturę,
2. obniżając współczynnik strat ciepła lub
3. podnosząc współczynnik wydajności.

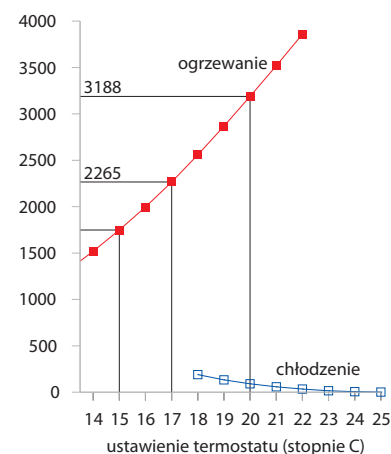
Teraz potencjał tych trzech rozwiązań wyrazimy w liczbach (dobry jest też czwarty sposób – podwyższenie absorpcji ciepła ze źródeł innych niż system grzewczy, a szczególnie ze słońca – ale tutaj pominię go).

Zapotrzebowanie na temperaturę

Zapotrzebowanie na temperaturę dokładnie pokazuje wykres temperatur za oknem na przestrzeni czasu (rys. E.4). W przypadku budynku o temperaturze wewnętrznej 20 °C całkowite zapotrzebowanie na temperaturę to

Rys. E.4. Zapotrzebowanie na temperaturę w Cambridge w roku 2006 pokazane jako wypełnione kolorem obszary na wykresie średnich temperatur dziennych. (a) termostat ustawiony na 20 °C, z uwzględnieniem chłodzenia latem; (b) termostat (tylko ogrzewanie) ustawiony na 17 °C.

zapotrzebowanie temperaturowe (stopniodni na rok)



Rys. E.5. Zapotrzebowanie na temperaturę w Cambridge w stopniodniach rocznie jako funkcja ustawień termostatu (°C). Przykręcenie termostatu w porze zimnej z 20 °C do 17 °C zmniejsza zapotrzebowanie na temperaturę w formie ciepła o 30%, z 3188 do 2265 stopniodni. Podkręcenie termostatu w porze letniej z 20 °C do 23 °C zmniejsza zapotrzebowanie na temperaturę w formie chłodu o 82%, z 91 do 16 stopniodni.

obszar pomiędzy poziomą linią na wysokości 20 °C i zewnętrzną temperaturą. Na rys. E.4a widzimy, że utrzymanie temperatury przez cały rok na poziomie 20 °C wiąże się z zapotrzebowaniem na temperaturę w wysokości 3188 stopniodni w ogrzewaniu i 91 stopniodni w klimatyzacji. Dzięki tym wykresom łatwo nam będzie oszacować efekty przykręcenia termostatu i życia bez klimatyzacji. Przykręcamy termostat w sezonie grzewczym do 17 °C i zapotrzebowanie na temperaturę w ogrzewaniu spada z 3188 do 2265 stopniodni (rys. E.4b), co przekłada się na 30-procentową redukcję zapotrzebowania na ciepło. Przykręcenie termostatu do 15 °C zmniejsza zapotrzebowanie na temperaturę z 3188 do 1748 stopniodni, a to redukcja 45-procentowa.

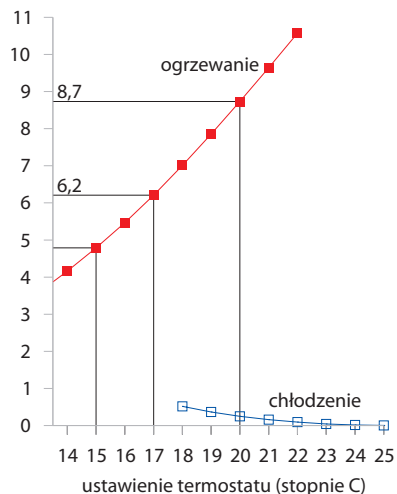
Takie obliczenia dadzą nam ogólny obraz zalet przykręcania termostatu, ale staną się precyzyjne tylko po uwzględnieniu dwóch czynników. Po pierwsze, budynki naturalnie absorbują energię słoneczną, sprawiając, że temperatura wewnątrz jest wyższa niż na zewnątrz i to nawet bez ogrzewania. Po drugie, mieszkańcy i ich ukochane gadzety emitują ciepło, jeszcze bardziej zmniejszając zapotrzebowanie na ciepło.

Zapotrzebowanie na temperaturę danego miejsca, wyrażane w stopniodniach, jest mało poręczną wartością. Trudno zapamiętać liczby typu „3500 stopniodni”. Również anglojęzycznym akademikom może być trudno zaakceptować stopniodni, bo dla nich to słowo już coś znaczy (ubieranie togi i biretu na wręczenie dyplomów, zwane „degree days”). Możemy przybliżyć tę liczbę, i pewnie ułatwić jej wykorzystanie, dzieląc ją przez 365 (liczbę dni w roku). Otrzymamy zapotrzebowanie na temperaturę w „stopniodniach dziennie”, albo jak kto woli w zwyczajnych stopniach. Rys. E.6 pokazuje takie przeformułowane zapotrzebowanie na temperaturę. Wyrażone w ten sposób zapotrzebowanie na temperaturę jest po prostu *średnią* różnicą temperatur w domu i za oknem. Z wykresu wynika, że przy ustawieniu termostatu na 20 °C średnia różnica temperatury w domu i na zewnątrz wynosi 8,7 °C, przy obniżeniu temperatury do 17 °C różnica spada do 6,2 °C, a przy przykręceniu termostatu do 15 °C, średnia różnica temperatury w domu i na zewnątrz maleje do 4,8 °C.

Współczynnik strat ciepła na przykładzie mojego domu

Mój dom to bliźniak z trzema sypialniami zbudowany około 1940 roku (fot. E.7). Do roku 2006 poszerzyłem nieco kuchnię i wstawiłem nowe dwuszybowe okna. Drzwi frontowe i tylne wciąż miały szklenie pojedyncze.

Metodę liczenia współczynnika strat ciepła w 2006 roku pokazują w tabeli E.8. Łączny współczynnik strat ciepła domu wyniósł 322 W/°C (lub też 7,7 kWh/dzień/°C), przy czym nieszczelność związana z przewodnictwem odpowiadała za 72%, a związana z wentylacją – za 28% wartości całkowitej. Za straty ciepła na przewodnictwo mniej więcej po równo odpowiadały trzy elementy: okna, ściany oraz podłogi i sufity.



Rys. E.6. Zapotrzebowanie na temperaturę w Cambridge w 2006 roku, wyrażone w stopniodniach dziennie, inaczej w stopniach. W tym ujęciu zapotrzebowanie na temperaturę to po prostu średnia różnica temperatur pomiędzy wnętrzem a otoczeniem.



Fot. E.7. Mój dom

Nieszczelność związana z przewodzeniem	powierzchnia (m ²)	wartość U (W/m ² /°C)	współczynnik strat ciepła (W/°C)
Powierzchnie poziome			
dach stromy	48	0,6	28,8
dach płaski	1,6	3	4,8
podłoga	50	0,8	40
Powierzchnie pionowe			
ściany przybudówki	24,1	0,6	14,5
główne mury	50	1	50
cienka ściana (13 cm)	2	3	6
drzwi i okna z pojedynczą szybą	7,35	5	36,7
okna dwuszybowe	17,8	2,9	51,6
Łączny współczynnik strat ciepła przez przenikanie			232,4

Nieszczelność związana z wentylacją	powierzchnia (m ³)	N (wielokrotność wymian powietrza na godzinę)	współczynnik strat ciepła (W/°C)
sypialnie	80	0,5	13,3
kuchnia	36	2	24
hall	27	3	27
inne pomieszczenia	77	1	25,7
Łączny współczynnik strat ciepła na wentylację			90

Tabela E.8. Rozkład strat ciepła przez przenikanie i wentylację w moim domu przed rokiem 2006. Ścianę środkową, łączącą dwie części bliźniaka, potraktowałem jako doskonałą ścianę izolującą. Może się to mijać z prawdą, jeśli szczelina pomiędzy przylegającymi domami jest dobrze wentylowana. Parametry, które zmieniłem po 2006 roku, wymieniam w dalszej części tekstu

By porównać nieszczelności dwóch budynków o różnych powierzchniach użytkowych, wystarczy podzielić współczynnik strat ciepła przez powierzchnię użytkową. Otrzymujemy wówczas *parametr strat ciepła budynku* (HLP) mierzony w W/°C/m². Parametr strat ciepła mojego domu (całkowita powierzchnia użytkowa 88 m²) wynosi:

$$3,7 \text{ W/°C/m}^2$$

Liczba ta posłuży nam do oszacowania dziennego zapotrzebowania na energię tego domu w mroźny zimowy dzień i na przestrzeni całego roku.

W zimowy dzień, gdy na zewnątrz jest -1 °C, a wewnątrz 19 °C, różnica temperatur wynosi $\Delta T = 20$ °C. Jeżeli ta różnica utrzymuje się przez 6 godzin dziennie, wówczas dzienne straty energii wynoszą:

$$322 \text{ W/°C} \times 120 \text{ stopniodni} \approx 39 \text{ kWh}$$

Jeżeli przez 24 godziny na dobę utrzymujemy w domu temperaturę 19 °C, dzienne straty energii wyniosą:

$$155 \text{ kWh/d}$$

By policzyć całoroczne straty ciepła, posłużymy się zapotrzebowaniem na temperaturę w Cambridge z rys. E.5. Przy ustawieniu termostatu na 19 °C zapotrzebowanie na temperaturę w 2006 roku wyniosło 2866 stopniodni. Średnie tempo ucieczki ciepła, przy stałej temperaturze 19 °C, wynosi wówczas:

$$7,7 \text{ kWh/dzień/}^\circ\text{C} \times 2866 \text{ stopniodni /rok/} (365 \text{ dni/rok}) = 61 \text{ kWh/d}$$

Po przykręceniu termostatu do 17 °C, średnie tempo ucieczki ciepła spada do 48 kWh/d. Podkręcenie termostatu do tropikalnej temperatury 21 °C przekłada się na średnie tempo ucieczki ciepła rzędu 75 kWh/d.

Skutki docieplenia budynku

W 2007 roku wykonałem w moim domu następujące prace modernizacyjne:

1. dociepliłem ściany dwuwarstwowe (główne mury aż się o to prosiły) – fot. 21.5,
2. dociepliłem poddasze,
3. do starych drzwi frontowych dołożyłem na zewnątrz nowe – fot. 21.6,
4. tylne drzwi zastąpiłem drzwiami z szybą podwójną,
5. ostatnie okno z jedną szybą wymieniłem na dwuszybowe.

O ile zmniejszą się straty ciepła?

Łączny współczynnik strat ciepła przed termomodernizacją wynosił 322 W/°C.

Docieplenie ściany dwuwarstwowej (nowa wartość U to 0,6) w murach głównych obniża współczynnik strat ciepła o 20 W/°C. Docieplenie poddasza (nowa wartość U: 0,3) powinno obniżyć ten współczynnik o 14 W/°C. Nowe szklenie (nowa wartość U: 1,6 – 1,8) powinno ograniczyć współczynnik strat ciepła przez przenikanie o jakieś 23 W/°C, a współczynnik strat ciepła na wentylację o jakieś 24 W/°C. To w sumie 25-procentowe zmniejszenie współczynnika strat ciepła z około 320 do 240 W/°C (7,7 do 6 kWh/dzień/°C). Tabela E.9. ilustruje spodziewane oszczędności na energii wynikające z modernizacji.

Parametr utraty ciepła tego domu (całkowita powierzchnia użytkowa 88 m²) najpewniej spadnie o 25%, z 3,7 do 2,7 W/°C/m² (a to wciąż sporo w stosunku do 1,1 W/°C/m² wymaganych dla domu niskoenergetycznego, zapisanych w nowym kodeksie budowlanym).

– Docieplenie ścian dwuwarstwowych (przeprowadzone na 2/3 powierzchni murów)	4,8 kWh/d
– Docieplenie poddasza	3,5 kWh/d
– Ograniczenie strat ciepła dzięki dodatkowym szybom dla dvojga drzwi i jednego okna	1,9 kWh/d
– Ograniczenie strat ciepła na wentylację w hallu i kuchni dzięki uszczelnieniu drzwi i okien	2,9 kWh/d

Tabela E.9. Rozkład przewidywanych redukcji strat ciepła w moim domu w mroźny zimowy dzień

To frustrujące, jak trudno ograniczyć straty ciepła w domu już wybudowanym! Jak już wiemy, znacznie skuteczniejszym sposobem jest przykręcenie termostatu. Obniżenie temperatury z 20 do 17 °C daje 30-procentową redukcję strat ciepła.

Uwzględniając oba te działania – modernizację i zabawy z termostatem – przewidujemy, że straty ciepła spadną niemal o połowę. Jako że nieco ciepła dostarcza domowi słońce, sprzęty i ludzie, zużycie gazu powinno spaść o ponad połowę.

Po dokonaniu tych zmian co tydzień sprawdzałem stan licznika. Potwierdzam, że rachunki za ogrzewanie rzeczywiście spadły o ponad połowę. Jak wskazywał rys. 21.4, zużycie gazu spadło u mnie z 40 kWh/d do 13 kWh/d – a jest to redukcja o 67%.

Zmniejszenie strat ciepła dzięki dociepleniu ścian od wewnątrz

Czy można ograniczyć współczynnik strat ciepła, docieplając ściany od wewnątrz? Owszem, ale jest pewien szkopuł. Po pierwsze, możemy potrzebować nadspodziewanie grubej izolacji. By ocieplić istniejący, mierzący 23 cm ceglany mur (wartość U : 2,2 W/m²/K) do przyzwoitej wartości 0,30 W/m²/K, potrzeba około 6 cm płyty izolacyjnej [65h3cb]. Po drugie, na wewnętrznej stronie płyt izolacyjnych może się skraplać para wodna, co doprowadzi do ich zawilgocenia.

Jeżeli nie zależy Ci na tak dużej redukcji strat ciepła, możesz poprzestać na cieńszej, wewnętrznej izolacji. Dla przykładu, możesz kupić 1,8-centymetrowe płyty izolacyjne o współczynniku U 1,7 W/m²/K. Po ich zamontowaniu na istniejących murach wartość U spadłaby z 2,2 W/m²/K do:

$$1 / \left(\frac{1}{2,2} + \frac{1}{1,7} \right) \approx 1 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

To jest gra zdecydowanie warta świeczki.

Wymiana powietrza

Kiedy już naprawdę porządnie ocieplimy budynek, straty ciepła będą się wiązać głównie z wentylacją (wymianą powietrza), a nie z przenikaniem. Straty ciepła na wentylację można ograniczyć przez transfer ciepła z ulatującego powietrza do powietrza wlatującego. Co istotne, większość tego ciepła można przekazać bez dodatkowych nakładów energetycznych. Trik polega na użyciu „nosa” jak w procesie doboru naturalnego. Nos ogrzewa wdychane powietrze poprzez oziębienie powietrza wydychanego.

W różnych częściach nosa panują różne temperatury – ścianki nosa stają się zimniejsze blisko nozdrzy. Im dłuższy nos, tym lepiej sprawdza się jako przeciwprądowy wymiennik ciepła. W nosach stworzonych przez naturę powietrze płynie na przemian w jedną i w drugą stronę. Innym sposobem skonstruowania nosa są dwa kanały przepływu powietrza – jeden na powietrze wlatujące, drugi na wylatujące – oddzielające powietrze, ale z łatwością wymieniające ciepło. Tak właśnie działają „nosy” w budynkach. Zazwyczaj nazywamy je wymiennikami ciepła albo rekuperatorami.



Rys. E.10. Heatkeeper Serrekunda

Dom efektywny energetycznie

W roku 1984 doradca energetyczny Alan Foster zbudował w okolicach Cambridge dom efektywny energetycznie. Był tak uprzejmy, że podzielił się ze mną dokładnymi pomiarami. Dom to bungalow o drewnianej konstrukcji szkieletowej, opartej na skandynawskim projekcie „Heatkeeper Serrekunda” (rys. E.10), o powierzchni użytkowej 140 m², z trzema sypialniami, gabinetem, dwiema łazienkami, salonem, kuchnią i przedpokojem. Drewniane ściany zewnętrzne, montowane na miejscu, dostarczyła szkocka firma, a postawienie głównej konstrukcji zajęło zaledwie kilka dni.

Ściany mają grubość 30 cm i wartość $U = 0,28 \text{ W/m}^2/\text{°C}$. Patrząc od środka, składają się z 13 mm płyt gipsowo-kartonowych, 27 mm szczeliny powietrznej, folii paroizolacyjnej, 8 mm sklejk, 90 mm wełny mineralnej, 12 mm płyt pilśniowych *impregnowanych* bitumem, 50 mm pustki powietrznej i 103 mm cegły. Podobnie skonstruowano dach, z 100 – 200 mm izolacji wełną mineralną. Sufit ma współczynnik $U = 0,27 \text{ W/m}^2/\text{°C}$, a podłoga $0,22 \text{ W/m}^2/\text{°C}$. Okna są dwuszybowe (wartość $U = 2 \text{ W/m}^2/\text{°C}$), a szyba od strony pomieszczenia jest powleczone powłoką refleksyjną *ograniczającą* ucieczkę ciepła drogą *promieniowania*. *Okna są tak rozmieszczone, by maksymalnie chwytać promienie słoneczne i ogrzewają dom w około 30%.*

Dom jest szczelny, wszystkie drzwi i okna wyposażono w uszczelki neoprenowe. Dom jest ogrzewany przez ciepłe powietrze wpompowywane przez kratki podłogowe. Zimą pompy usuwają „zużyte” powietrze z pomieszczeń, wyrzucając je na zewnątrz i pobierają powietrze z poddasza. Powietrze wchodzące i wychodzące przechodzi przez wymiennik ciepła (fot. E.11), co pozwala oszczędzić 60% ciepła zawartego w powietrzu. Wymiennik ciepła to urządzenie pasywne i nie pobiera energii. To taki wielki metalowy nos, ogrzewający powietrze wchodzące za pomocą powietrza wychodzącego. Mroźnego zimowego dnia powietrze na zewnątrz miało temperaturę -8 °C , pobrane na poddaszu 0 °C , a wychodzące z wymiennika ciepła $+8 \text{ °C}$.

Przez pierwsze 10 lat ciepło dystrybuowały grzejniki elektryczne dzięki 700-litrowemu zasobnikowi ciepłej wody, korzystającemu z tańszej taryfy nocnej. Niedawno doprowadzono gaz i teraz dom ogrzewa kocioł kondensacyjny.

Współczynnik strat ciepła przez przenikanie i wentylację wynosi 4,2 kWh/dzień/°C. *Parametr strat ciepła* (współczynnik strat ciepła na metr powierzchni użytkowej) wynosi $1,25 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ (a w moim domu $2,7 \text{ W/°C/m}^2$).



Fot. E.11. Wymiennik ciepła w Heatkeeperze.

Kiedy dom zamieszkiwały dwie osoby, średnie zużycie energii cieplnej, przy termostacie ustawionym w ciągu dnia na 19–20 °C, wynosiło 8100 kWh rocznie lub 22 kWh dziennie. Łączne zużycie energii na wszystkie potrzeby wyniosło jakieś 15 000 kWh rocznie lub 40 kWh dziennie. W kategoriach mocy na jednostkę powierzchni to **12,2 W/m²**.

Na rys. E.12 porównuję zużycie energii na jednostkę powierzchni domu Heatkeeper z moim domem (przed i po wykonaniu prac modernizacyjnych) i ze średnią europejską. Zużycie energii w moim domu po modernizacji jest zbliżone do zużycia Heatkeepera, a to dzięki przykręceniu termostatu.

Standardy dla domów i biurowców

Zgodnie z niemieckim standardem domów pasywnych *Passivhaus* zużycie energii na ogrzewanie i chłodzenie nie może być wyższe niż 15 kWh/m²/rok lub **1,7 W/m²**. Łączne zużycie energii nie może przekroczyć 120 kWh/m²/rok lub **13,7 W/m²**.

Średnie zużycie energii na jednostkę powierzchni w sektorze usług w Wielkiej Brytanii wynosi 30 W/m².

Biuro efektywne energetycznie

Narodowa Fundacja Energii (The National Energy Foundation) zbudowała sobie niskokosztową, niskoenergetyczną siedzibę. Budynek wyposażony jest w kolektory słoneczne, moduły fotowoltaiczne (PV) produkujące do 6,5 kW prądu i jest ogrzewany przez 14-kilowatową gruntową pompę ciepła, a sporadycznie – przez kominiek na drewno. Powierzchnia użytkowa wynosi 400 m² i służy około 30 osobom. To budynek jednokondygnacyjny. Ściany zawierają 30-centymetrową warstwę wełny mineralnej. Współczynnik wydajności pompy ciepła zimą wynosił 2,5. Zużywana jest energia 65 kWh na metr kwadratowy powierzchni użytkowej rocznie (**7,4 W/m²**). System fotowoltaiczny zapewnia prawie 20% tej energii.

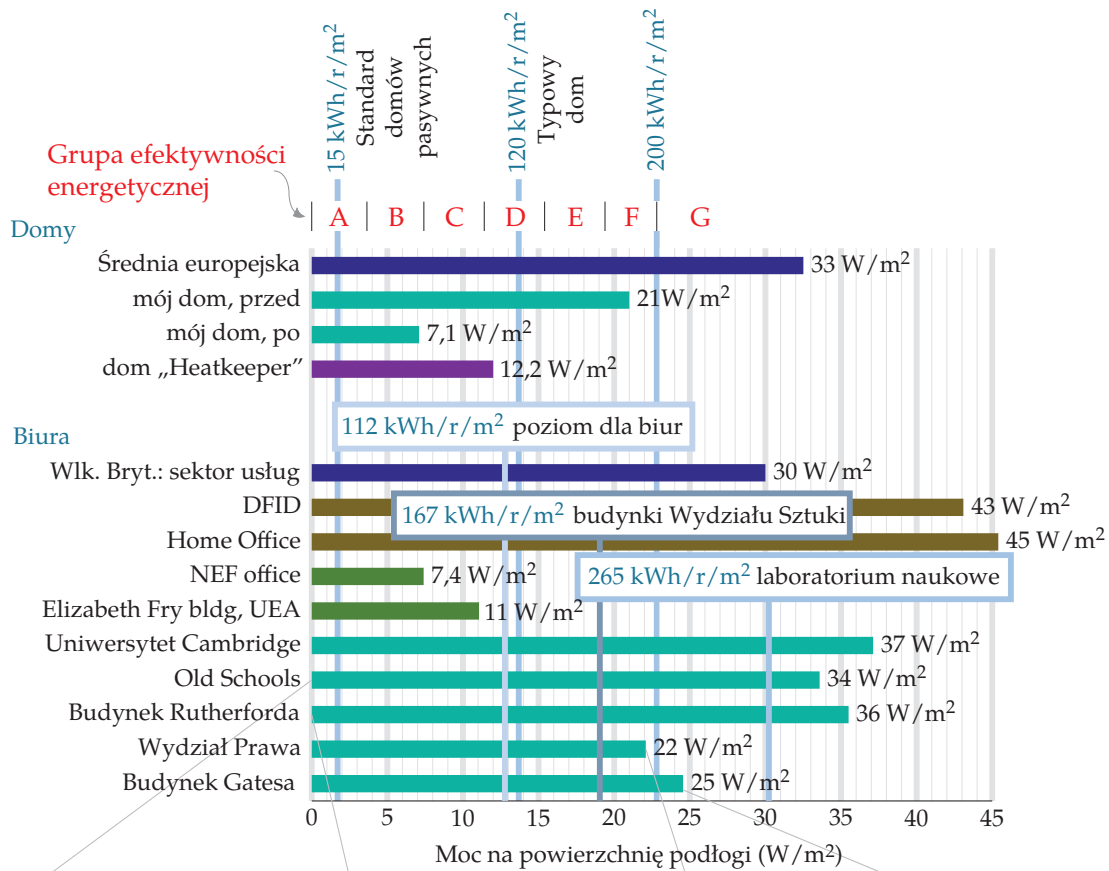
Współczesne biurowce

O nowych biurowcach często trąbi się, że są takie przyjazne środowisku. Przyjrzyjmy się liczbom.

W budynku William Gates na Uniwersytecie Cambridge mieści się Instytut Informatyki, administracja i kafejka. Budynek ma 11 110 m² powierzchni i zużycie energii na poziomie 2392 MWh rocznie. Daje to moc na jednostkę powierzchni 215 kWh/m²/rok lub też **25 W/m²**. W 2001 roku budynek uzyskał nagrodę RIBA (Królewskiego Instytutu Architektów Brytyjskich) za przewidywane parametry energetyczne. „Architekci ujęli w projekcie wiele przyjaznych środowisku rozwiązań”. [5dhups].

Czy to rzeczywiście taki wyczyn? Zaraz obok stoi budynek Rutherford, postawiony w latach 70. bez żadnych ekologicznych pretensji, nawet bez podwójnych szyb w oknach. Ma powierzchnię 4998 m² i zużycie energii na poziomie 1557 MWh rocznie. To 0,85 kWh/dzień/m² lub 36 W/m².

Rys. E.12. Budowlane punkty odniesienia. Moc pożytkowana na jednostkę powierzchni w różnych domach i biurach.



Old Schools



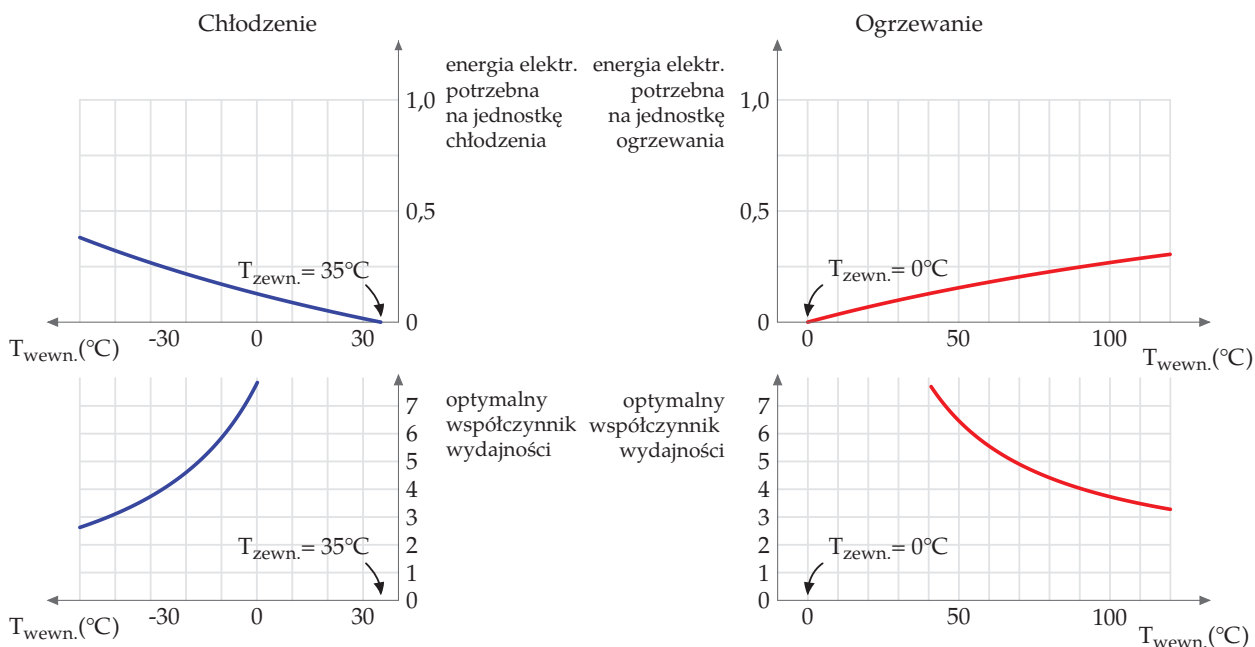
Budynek Rutherforda



Wydział Prawa



Budynek Gatesa



Tak więc medalista RIBA ma tylko 30% niższe zużycie mocy na jednostkę po powierzchni niż jego skromny kuzyn z lat 70. Na rys. E.12 porównujemy te dwa budynki i inny nowy budynek (Wydziału Prawa) z Old Schools – zabytkową kamienicą mieszczącą biura, zbudowaną przed rokiem 1890. Postęp jest godny pochwały, a jednak różnica między starym i nowym rozczarowuje!

Zauważmy, że zużycie energii w budynkach (na jednostkę powierzchni użytkowej) wyrażamy w tych samych jednostkach (W/m^2), co produkcję energii ze źródeł odnawialnych na jednostkę powierzchni (co poruszaliśmy na str. 52, 56 i 186). Porównanie liczb dotyczących zużycia i produkcji uzmysławia nam, jak trudno będzie zasilić współczesne budynki tylko za pomocą lokalnych źródeł odnawialnych. Moc na jednostkę powierzchni w przypadku biopaliw (rys. 6.11., str. 52) wynosi $0,5 \text{ W}/\text{m}^2$, farm wiatrowych – $2 \text{ W}/\text{m}^2$, ogniw fotowoltaicznych – $20 \text{ W}/\text{m}^2$ (rys. 6.18, str. 56). Jedynie kolektory słoneczne mogą sprostać zapotrzebowaniu na moc na jednostkę powierzchni, oferując $53 \text{ W}/\text{m}^2$ (rys. 6.3, str. 46).

Poprawiamy współczynnik wydajności

Można pomyśleć, że trudno przebić współczynnik wydajności kotła kondensacyjnego rzędu 90%. A jednak można go poprawić, a to dzięki pompom ciepła. Podczas gdy kocioł kondensacyjny pobiera energię chemiczną i z tego 90% przekształca w ciepło użytkowe, pompa ciepła pobiera nieco energii elektrycznej, by *przenieść* ciepło z miejsca na miejsce (np. z otoczenia budynku do jego wnętrza). Zazwyczaj ilość dostarczonego ciepła użytkowego znacznie przewyższa ilość pobranego prądu. Współczynnik wydajności pompy ciepła wynosi najczęściej 3 lub 4.

Rys. E.13. Idealne sprawności pomp ciepła. U góry po lewej: idealne zużycie energii elektrycznej, z uwzględnieniem ograniczeń termodynamicznych na *wypompowanie* ciepła z pomieszczenia (temperatura $T_{wewn.}$) na zewnątrz (temperatura $T_{zewn.} = 35^{\circ}\text{C}$). U góry po prawej: idealne zużycie energii elektrycznej na *wpompowanie* ciepła do pomieszczenia (temperatura $T_{wewn.}$) z zewnątrz (temperatura $T_{zewn.} = 0^{\circ}\text{C}$). Dolne wykresy: sprawność zwykle wyrażana jest za pomocą „współczynnika wydajności”, określającego ilość ciepła pompowanego na jednostkę energii elektrycznej. Według mojej wiedzy prawidłowo zainstalowane gruntowe pompy ciepła i najlepsze powietrzne pompy ciepła zazwyczaj mają współczynnik wydajności na poziomie 3–4. Niemniej jednak dzięki rządowym regulacjom Japończycy zdołali uzyskać współczynnik wydajności 6,6.

Teoria pomp ciepła

Oto wzory opisujące idealną sprawność pompy ciepła, czyli minimalną ilość energii elektrycznej wymaganą na jednostkę wpompowanego ciepła. Jeżeli pompujemy z zewnątrz ciepło o temperaturze T_1 w miejsce o wyższej temperaturze T_2 , przy czym obie temperatury wyrażamy w odniesieniu do zera absolutnego (tzn. T_2 w kelwinach jest – w odniesieniu do temperatury w stopniach Celsjusza $T_{\text{zewnątrz}}' - \text{sumą } 273.15 + T_{\text{zewnątrz}}$), to sprawność idealna wynosi:

$$\text{sprawność} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Jeżeli wypompowujemy ciepło z pomieszczenia o temperaturze T_1 na zewnątrz, gdzie panuje wyższa temperatura T_2 , sprawność idealna wyniesie:

$$\text{sprawność} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Owe granice teoretyczne mógłby osiągnąć tylko system pompujący ciepło nieskończenie powoli. Zauważmy: im mniejsza różnica między temperaturą wewnętrzną T_2 i zewnętrzną T_1 , tym wyższa sprawność idealna.

Teoretycznie gruntowe pompy ciepła powinny mieć wyższą wydajność niż powietrzne, ponieważ temperatura gruntu jest zazwyczaj bliższa temperaturze pomieszczeń niż temperatura powietrza. W praktyce to pompy powietrzne mogą być najlepszą i najprostszą opcją. Można się obawiać, że w miastach sprawność pomp gruntowych będzie niższa – im więcej osób ich używa, tym chłodniejszy grunt. Problem „odpadów ciepłych” może się pojawić również latem, kiedy zbyt wiele miejskich budynków używa gruntowych pomp ciepła jako klimatyzatorów.

Ogrzewanie i grunt

W tym miejscu zrobimy ciekawe obliczenie. Wyobraź sobie, że montujesz na dachu kolektory słoneczne. Kiedy tylko temperatura wody w kolektorach wzrośnie powyżej 50°C , pompujesz wodę przez wielką skałę pod domem. Kiedy nadciąga pora ciemna, zimna i ponura, możesz użyć ciepła zgromadzonego w skałe do ogrzania domu. Jak duża musiałaby być ta skała o temperaturze 50°C , by ogrzać dom przez cały miesiąc? Załóżmy, że potrzebujemy 24 kWh dziennie przez 30 dni i że w domu utrzymujemy temperaturę 16°C . Pojemność cieplna granitu wynosi $0,195 \times 4200\text{ J/kg/K} = 820\text{ J/kg/K}$. Wymagana masa granitu wynosi:

$$\begin{aligned} \text{masa} &= \frac{\text{energia}}{\text{pojemność cieplna} \times \text{różnica temperatur}} \\ &= \frac{24 \times 30 \times 3,6\text{ MJ}}{(820\text{ J/kg/}^\circ\text{C}) (50^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C})} \\ &= 100\,000\text{ kg} \end{aligned}$$

100 ton, co odpowiada prostopadłościanowi wielkości $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 1\text{ m}$.

Pojemność cieplna	$C = 820\text{ J/kg/K}$
Przewodność cieplna:	$\kappa = 2,1\text{ W/m/K}$
Gęstość:	$\rho = 2750\text{ kg/m}^3$
Pojemność cieplna na jednostkę objętości	$C_v = 2,3\text{ MJ/m}^3/\text{K}$

Tabela E.14. Podstawowe charakterystyki granitu (używam go jako przykładu typowej skały).

Magazynowanie ciepła w gruncie, i to bez ścian

No dobrze, ustaliliśmy rozmiary podziemnego magazynu ciepła. Czy bylibyśmy w stanie utrzymać w nim ciepło? Czy trzeba opatulić nasz skalny prostopadłościan grubą warstwą izolacji? Okazuje się, że sam grunt jest całkiem niezłym izolatorem. Strumień ciepła wpuszczony w dziurę w ziemi rozprzestrzeni się jako:

$$\frac{1}{\sqrt{4\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4(\kappa/(C\rho))t}\right)$$

gdzie κ to przewodność cieplna gruntu, C to jego pojemność cieplna, a ρ to jego gęstość. To równanie opisuje krzywą dzwonową (Gausa) o szerokości:

$$\sqrt{2\frac{\kappa}{C\rho}t}$$

Dla przykładu, po 6 miesiącach ($t = 1,6 \times 10^7$ s), przyjmując wartości dla granitu ($C = 0,82$ kJ/kg/K, $\rho = 2500$ kg/m³, $\kappa = 2,1$ W/m/K), szerokość wyniesie 6 m.

Przyjmując wartości dla wody ($C = 4,2$ kJ/kg/K, $\rho = 1000$ kg/m³, $\kappa = 0,6$ W/m/K), szerokość wyniesie 2 m.

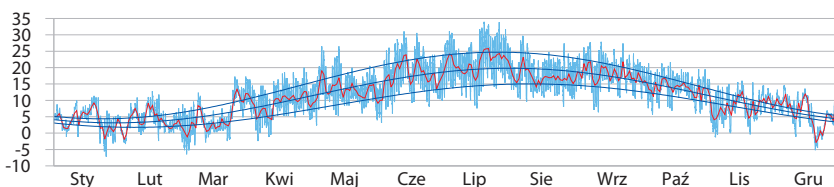
Wynika z tego, że jeżeli obszar magazynowania jest większy niż 20 m × 20 m × 20 m, wówczas większość zgromadzonego ciepła pozostanie w nim przez następne 6 miesięcy (ponieważ 20 m to znacznie więcej niż 6 m i 2 m).

Ograniczenia gruntowych pomp ciepła

Niska przewodność cieplna gruntu to broń obosieczna. To dzięki niej grunt bardzo długo utrzymuje ciepło. Z drugiej strony, niska przewodność utrudnia szybkie zapakowanie i wyciągnięcie ciepła z gruntu. Policzmy teraz, jak bardzo ta niska przewodność ogranicza stosowanie gruntowych pomp ciepła.

Weźmy na warsztat mocno zaludnioną okolicę. Czy *wszyscy* będą mogli używać gruntowych pomp ciepła bez aktywnego dogrzewania gruntu latem (co dyskutowaliśmy na str. 162)? Istnieje obawa, że kiedy wyssiemy naraz całe ciepło, grunt może skuć się lodem. Zmierzymy się z tym problemem za pomocą dwóch rachunków. Najpierw obliczę naturalne przepływy energii do gruntu i z gruntu, latem oraz zimą.

temperatura (°C)



	(W/m/K)
woda	0,6
kwarc	8
granit	2,1
skorupa ziemska	1,7
sucha gleba	0,14

Tabela E.15. Przewodności cieplne. Więcej na ten temat w tabeli E.18 na stronie 319

Rys. E.16. Temperatury w Cambridge, w roku 2006. Wykres wskazuje, że temperatura to złożenie rocznego sinusoidalnego przebiegu temperatur w przedziale 3 °C–20 °C oraz dziennego sinusoidalnego przebiegu temperatur o amplitudzie do 10,3 °C. Średnia temperatura wynosi 11,5 °C.

Jeżeli potrzebujemy wyssać z gruntu znacznie więcej ciepła niż zapewniają te naturalne przepływy, wyraźnie zmieniają się temperatury gruntu. To mija się z celem. Dla potrzeb naszych obliczeń założę, że temperatura gruntu zaraz pod powierzchnią (dzięki połączonym wpływom słońca, powietrza, chmur i nocnego nieba) na przestrzeni roku waha się nieznacznie w górę i w dół (rys. E.16).

Odpowiedź na wahania temperatur zewnętrznych

By policzyć, jak zachowują się temperatury gruntu i ile energii wpływa do gruntu i z niego wypływa, odwołamy się do zaawansowanej matematyki, którą zamykam w ramce E.19 (str. 321)

Na kanwie tych obliczeń powstał całkiem urodziwy wykres (rys. E.17) pokazujący, jak zmienia się temperatura w czasie i na różnych głębokościach. Wykres daje odpowiedź dla każdego rodzaju substancji, w kategoriach *charakterystycznej skali długości* (tutaj: *głębokości*) z_0 ; równanie E.7, zależnej od przewodności cieplnej κ , *pojemności cieplnej* C_V substancji i od częstotliwości wahań temperatur zewnętrznych ω (w oparciu o tą samą teorię, możemy przyjrzeć się i wahaniom dziennym, i rocznym). Na głębokości $2z_0$ wahania temperatur stanowią 1/7 wahań na powierzchni i są do nich opóźnione mniej więcej o 1/3 cyklu (rys. E.17). Na głębokości $3z_0$ wahania temperatur stanowią 1/20 wahań na powierzchni i są do nich opóźnione o połowę cyklu.

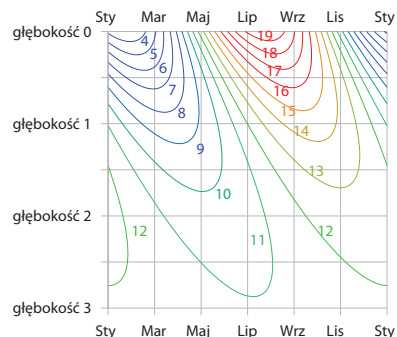
W przypadku wahań dziennych i twardego granitu, charakterystyczna skala długości wynosi $z_0 = 0,16$ m (stąd też potrzeba 32 cm skały, by uniezależnić się od oscylacji temperatur zewnętrznych). W przypadku wahań rocznych i granitu, charakterystyczna skala długości wynosi $z_0 = 3$ m.

Skupmy się teraz na wahaniami rocznych i przedyskutujmy kilka innych substancji. Charakterystyczne skale długości dla różnych substancji znajdują się w tabeli E.18. W przypadku wilgotnej gleby piaszczystej lub betonu, charakterystyczna skala długości z_0 jest podobna, jak dla granitu – około 2,6 m. Dla gleb suchych lub torfowych skala długości jest mniejsza i wynosi około 1,3 m. To chyba dobre wieści – oznaczają bowiem, że nie musisz drążyć zbyt głęboko, by dokopać się do gruntu o stabilnej temperaturze. Niestety są i złe wieści – naturalne przepływy są niższe w glebach suchych.

Naturalne strumienie zmieniają się na przestrzeni roku i mają swoją wartość maksymalną (równanie E.9) – tym niższą, im niższa jest przewodność cieplna gruntu.

W przypadku twardego granitu maksymalny strumień wynosi 8 W/m^2 . W przypadku gleb suchych waha się między $0,7 \text{ W/m}^2$ a $2,3 \text{ W/m}^2$. W przypadku gleb wilgotnych, oscyluje między 3 W/m^2 a 8 W/m^2 .

Co to oznacza? Przyjmijmy wartość uśrednioną, 5 W/m^2 , jako wygodny punkt odniesienia, wskazówkę odnośnie ilości energii, którą da się pozyskać na jednostkę powierzchni dzięki gruntowej pompie ciepła. Jeżeli wyssiemy strumień znacznie poniżej 5 W/m^2 , zaburzenia naturalnych przepływów będą niewielkie. Jeżeli jednak wyssiemy znacznie więcej niż



Rys. E.17. Temperatura (w °C) w odniesieniu do głębokości i czasu. Głębokość wyrażono w jednostkach charakterystycznej skali głębokości z_0 , która dla granitu i wahań rocznych wynosi 3 m.

Na „głębokości 2” (6 m) temperatura zawsze wynosi około 11–12 °C [dla Polski jest to ok. 10 °C – red.]
Na „głębokości 1” (3 m) waha się między 8 a 15 °C.

5 W/m², możemy się spodziewać znacznych odstępstw od temperatur naturalnych gruntu, co uniemożliwi pozyskanie aż tak dużych strumieni.

Gęstość zaludnienia typowego angielskiego przedmieścia to 160 m² na osobę (szeregi bliźniaków, o powierzchni około 400 m² na dom, włączając chodniki i ulice). Przy takim zagęszczeniu w dzielnicach mieszkalnych maksymalny pułap energii z pomp ciepła wyniesie w przybliżeniu:

$$5 \text{ W/m}^2 \times 160 \text{ m}^2 = 800 \text{ W} = 19 \text{ kWh na osobę dziennie.}$$

To dalece niewystarczające, by zaspokoić zimowy popyt – szczytowe zapotrzebowanie na ogrzewanie pomieszczeń i wody użytkowej w takim starym domu, jak mój, może wynieść nawet 40 kWh na osobę dziennie.

Zgodnie z tym obliczeniem, *nie każdy mieszkaniec typowego przedmieścia może zainstalować pompę ciepła*, chyba że wszyscy będą skrupulatnie dogrzewać grunt latem.

Czas na drugie oszacowanie. Policzmy, ile energii da się stabilnie wysać dzięki podziemnej pętli na głębokości $h = 2$ m. Załóżmy, że ssąc, obniżamy temperaturę w pętli o $\Delta T = 5$ °C w stosunku do średniej temperatury na powierzchni i że temperatura na powierzchni jest stała. Możemy wówczas obliczyć strumień ciepła napływającego z powierzchni. Zakładając przewodność cieplną 1,2 W/m/K (typową dla wilgotnych gleb gliniastych),

	przewodność cieplna κ (W/m/K)	pojemność cieplna C_V (MJ/m ³ /K)	skala długości z_0 (m)	strumień $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$ (W/m ²)
powietrze	0,02	0,0012		
woda	0,57	4,18	1,2	5,7
granit	2,1	2,3	3,0	8,1
beton	1,28	1,94	2,6	5,8
<i>Gleba piaszczysta</i>				
sucha	0,30	1,28	1,5	2,3
50% nasycona	1,80	2,12	2,9	7,2
100% nasycona	2,20	2,96	2,7	9,5
<i>Gleba gliniasta</i>				
sucha	0,25	1,42	1,3	2,2
50% nasycona	1,18	2,25	2,3	6,0
100% nasycona	1,58	3,10	2,3	8,2
<i>Gleba torfowa</i>				
sucha	0,06	0,58	1,0	0,7
50% nasycona	0,29	2,31	1,1	3,0
100% nasycona	0,50	4,02	1,1	5,3

Tabela E.18. Przewodność cieplna i pojemność cieplna różnych substancji i typów gleb oraz wyprowadzone stąd: charakterystyczna skala długości $z_0 = \sqrt{2\kappa/(C_V\omega)}$ i strumień maksymalny $A\sqrt{C_V\kappa\omega}$, związane z rocznymi wahaniami temperatur o amplitudzie $A = 8,3$ °C. [Anglia ma klimat oceaniczny, w Polsce wahania temperatury pomiędzy zimą i latem są na poziomie 18 °C – red.] Porowatość gleb piaszczystych i gliniastych wynosi 0,4, porowatość gleb torfowych – 0,8.

$$\text{Strumień} = \kappa \times \frac{\Delta T}{h} = 3 \text{ W/m}^2$$

Ponownie założmy gęstość zaludnienia rzędu 160 m² na osobę. Gdyby każdy w sąsiedztwie miał własną pompę, maksymalna moc na osobę dostarczona przez gruntową pompę ciepła, wyniosłaby 480 W, czyli 12 kWh na osobę dziennie.

I znów dochodzimy do wniosku, że na typowych przedmieściach, upstrzonych słabo zaizolowanymi domostwami, *nie każdy może mieć pompę ciepła*, chyba że wszyscy będą aktywnie dogrzewać grunt latem. W samych miastach, jeszcze gęściej zaludnionych, gruntowe pompy ciepła raczej nie zdadzą egzaminu.

W tym kontekście, większości osób sugerowałbym zakup powietrznej pompy ciepła.

Masa termiczna

Czy zwiększenie masy termicznej budynku pozwoli obniżyć rachunki za ogrzewanie i chłodzenie? To zależy. Temperatura na zewnątrz może w ciągu dnia zmieniać się o około 10 °C. Budynek o dużej masie termicznej – np. o grubych kamiennych murach – w naturalny sposób ignoruje te wahania. Bez ogrzewania lub chłodzenia utrzyma temperaturę bliską średniej temperaturze zewnętrznej. Takie budynki w Wielkiej Brytanii przez większą część roku nie potrzebują ani ogrzewania, ani chłodzenia. Inaczej ma się sprawa z budynkami słabo zaizolowanymi, o niskiej masie termicznej. Za dnia jest w nich za ciepło, a nocą zbyt zimno, co przekłada się na wysokie rachunki za grzanie i chłodzenie.

A jednak duża masa termiczna nie zawsze jest błogosławieństwem. Założmy, że zimą pomieszczenie jest wykorzystywane tylko przez kilka godzin dziennie (np. sala wykładowa). Koszt energetyczny zapewnienia przyjemnych temperatur będzie wyższy dla pomieszczenia o dużej masie termicznej. To dodatkowo zainwestowane ciepło pozostanie dłużej w pomieszczeniu, ale jeżeli nie będzie w nim ludzi do ogrzania, będzie to ciepło stracone. Stąd też pomieszczenia wykorzystywane nieregularnie powinny mieć niższą masę termiczną. Wówczas można grzać tę mniejszą masę szybciej, w miarę zapotrzebowania.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

319 Tabela E.18. – Źródła: Bonan (2002),

www.hukseflux.com/thermalScience/thermalConductivity.html

Założmy, że grunt składa się z litego, jednorodnego materiału skalnego o przewodności cieplnej κ i pojemności cieplnej C_V . Wówczas temperatura na głębokości z , w czasie t , reaguje na temperaturę na powierzchni zgodnie z równaniem dyfuzji:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_V} \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \quad (\text{E.5})$$

Przy sinusoidalnym przebiegu temperatur zewnętrznych o częstotliwości ω i amplitudzie A , na głębokości $z = 0$,

$$T(0, t) = T_{\text{powierzchnia}}(t) = T_{\text{średnia}} + A \cos(\omega t) \quad (\text{E.5})$$

wynikła stąd temperatura na głębokości z , w czasie t , to opadająca i oscylująca funkcja:

$$T(z, t) = T_{\text{średnia}}(t) + A e^{-z/z_0} \cos(\omega t - z/z_0) \quad (\text{E.6})$$

gdzie z_0 to charakterystyczna skala długości zarówno opadania, jak i oscylacji:

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\kappa}{C_V \omega}} \quad (\text{E.7})$$

Strumień ciepła (moc na jednostkę powierzchni) na głębokości z to:

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = \kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} e^{-z/z_0} \sin(\omega t - z/z_0 - \pi/4) \quad (\text{E.8})$$

Dla przykładu, na powierzchni maksymalny strumień wynosi

$$\kappa \frac{A}{z_0} \sqrt{2} = A \sqrt{C_V \kappa \omega} \quad (\text{E.9})$$

Ramka E.19. Oszacowanie naturalnego strumienia ciepła, warunkowanego sinusoidalnym przebiegiem temperatur

F Fale

Fizyka fali głębokowodnej

Fale zawierają dwa rodzaje energii: potencjalną i kinetyczną. Energia potencjalna to energia konieczna do przemieszczenia masy wody z doliny do grzbietu fali. Energia kinetyczna jest związana z kolisto-kołyszącym ruchem wody.

Niektórym wydaje się, że kiedy grzbiet fali przemieszcza się z prędkością 50 km na godzinę, woda w tym grzbiecie również podróżuje z prędkością 50 km/h, i to w tym samym kierunku. Nic z tych rzeczy. To tak, jak z meksykańską falą na stadionach. Kiedy fala przemieszcza się wzdłuż trybun, kibice lekko unoszą się i opadają, ale pozostają w miejscu. Podobnie zachowuje się woda w morzu. Jeśli przyjrzy się wodorostom na wodzie poruszonym falą, zobaczysz, że kołyszają się w górę i w dół, ale też wędrują nieco z falą, po czym się cofają. Tak samo zachowują się kibice tworzący falę, podobni do myjących okna, którzy okrągłym ruchem polerują wielką tafłę szkła. Fala zawiera energię potencjalną, bo grzbiet fali wznosi się ponad jej dolinę. I ma energię kinetyczną, zawartą w małych ruchach wody, kołyszącej się kolisto w górę i w dół.

Nasze zgrubne oszacowanie mocy fal morskich wymagać będzie trzech składowych: okresu fali T (dystansu czasowego dzielącego jeden grzbiet od kolejnego), wysokości fal h i wzoru fizycznego określającego, jak obliczyć prędkość fali v na podstawie okresu fali.

Długość fali λ oraz okres fali (odpowiednio: odległość i czas między następującymi po sobie falami) zależą od prędkości wiatru wywołującego fale, co pokazano na rys. F.1. Wysokość fal nie zależy od prędkości wiatru, ale od tego, jak długo wiatr omiata powierzchnię wody.

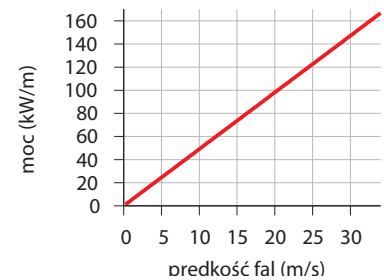
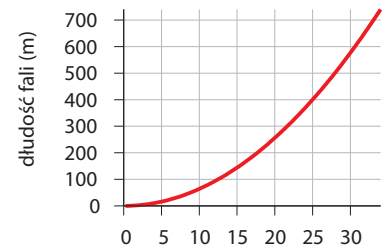
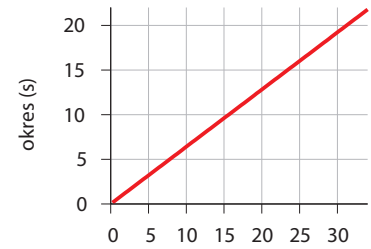
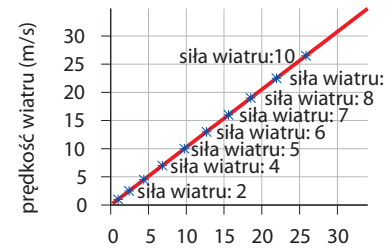
Możemy oszacować okres fal obserwując, jak często fale dobijają do morskiej plaży. Załóżmy, że co 10 sekund. Dla wysokości fal ustalmy amplitudę 1 m, co oznacza 2-metrową różnicę wysokości pomiędzy doliną fali a jej grzbietem. Przy tak wysokich falach, człowiek w szalupie, w dolinie fali, nie jest w stanie wyrzucić ponad grzbiet najbliższej fali. To chyba ponadprzeciętnie wysoka fala, możemy jednak wrócić do tych rachunków, jeżeli uznamy to za stosowne. Prędkość fal głębokowodnych zależy od czasu T dzielącego grzbiety fal, zgodnie z wzorem fizycznym (więcej w: Faber (1995), (str. 170):

$$v = \frac{gT}{2\pi}$$

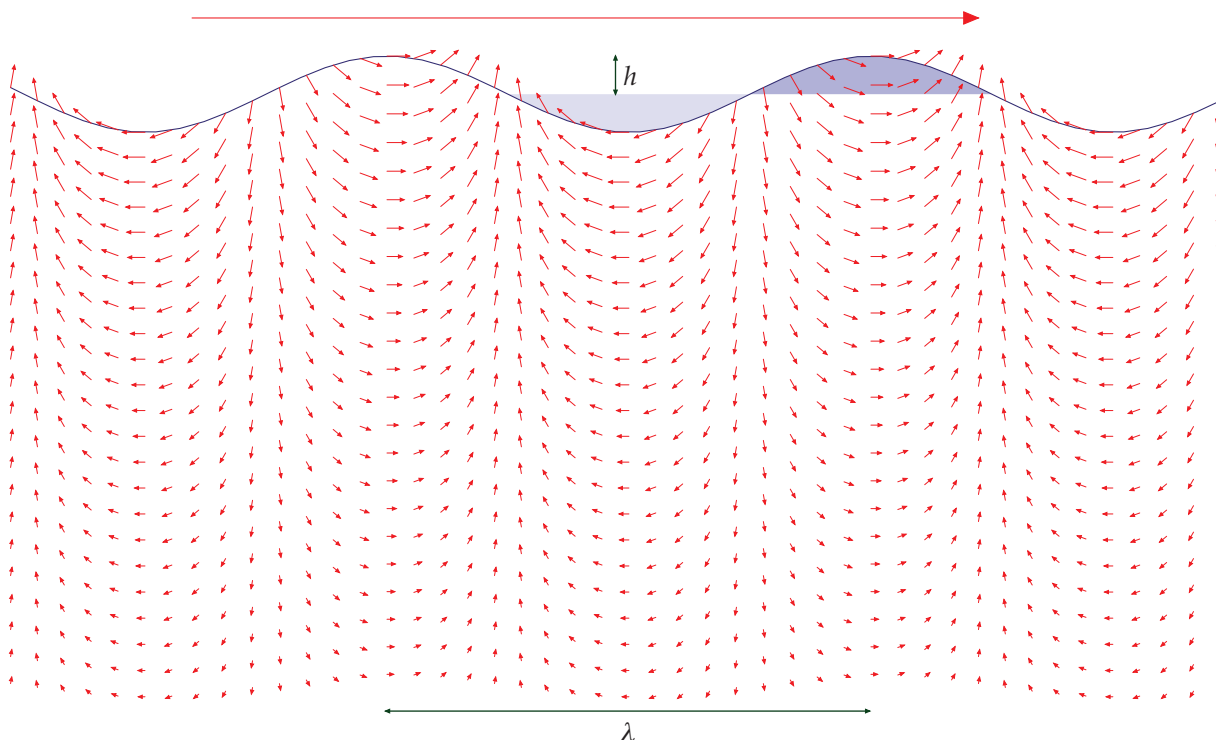
gdzie g to przyspieszenie ziemskie ($9,8 \text{ m/s}^2$). Dla przykładu, jeżeli $T = 10$ sekund, wówczas $v = 16 \text{ m/s}$. Długość takiej fali (odległość między grzbiecami) wynosi $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$.

W przypadku fali o długości λ i okresie T , o ile wysokość każdego grzbietu i głębokość każdej doliny wynosi $h = 1 \text{ m}$, energia potencjalna przepływająca na jednostkę czasu, na jednostkę długości, wynosi:

$$P_{\text{potencjalna}} \approx m^* g \bar{h} / T \tag{F.1}$$



Rys. F.1. Co nieco o falach głębokowodnych. Na wszystkich czterech wykresach oś pozioma określa prędkość fali w m/s. Poczynając od góry, wykresy ilustrują: prędkość wiatru (w m/s) konieczną do wzbudzenia fali o określonej prędkości; okres fali (w sekundach); długość fali (w metrach) i gęstość mocy (w kW/m) dla fali o amplitudzie 1 m.



gdzie m^* to masa na jednostkę długości, wynosząca mniej więcej $\frac{1}{2}\rho h(\lambda/2)$ (po przybliżeniu zacięzionego grzbietu na rys. F.2 powierzchnią trójkąta), a h to zmiana wysokości środka masy układu (tutaj: wznoszącej się masy wodnej), z grubszą równającą się h . Stąd też:

$$P_{\text{potencjalna}} \approx \frac{1}{2}\rho h \frac{\lambda}{2} gh/T \quad (\text{F.2})$$

(Wyznaczając energię kinetyczną zgodnie z regułami, powinniśmy dokonać całkowania, jednakże wynik byłby taki sam). Teraz λ/T to po prostu prędkość, z jaką podróżuje fala v , stąd też:

$$P_{\text{potencjalna}} \approx \frac{1}{4}\rho gh^2v \quad (\text{F.3})$$

Fale zawierają zarówno energię kinetyczną, jak i potencjalną. Co niezwykle, obie te energie są sobie dokładnie równe, aczkolwiek nie będę tego tutaj obliczał. Stąd też całkowita moc fal to dwukrotność mocy potencjalnej.

$$P_{\text{suma}} \approx \frac{1}{2}\rho gh^2v \quad (\text{F.4})$$

Jest tylko jeden szkopuł. Nasze obliczenia są zbyt hojne, bo nie uwzględniają pewnej dziwnej właściwości, związanej z dyspersją fal. Energia w fali nie podróżuje z tą samą prędkością, co grzbiet; przemieszcza się z tzw. prędkością grupową, która dla fal głębokowodnych wynosi *połowę* prędkości v . Kto chce zobaczyć, że energia podróżuje wolniej, niech wrzuci kamyk do

Rys. F.2. Fala zawiera energię w dwóch postaciach: potencjalną (związaną z podnoszeniem wody z jasno pokolorowanych dolin do ciemno pokolorowanych grzbietów) oraz energię kinetyczną całej wody do głębokości kilku długości fal od powierzchni wody – prędkość wody zaznaczono przy pomocy małych strzałek. Prędkość fali, podróżującej z lewa na prawo, zaznaczono za pomocą znacznie większej strzałki na górze.

stawu i uważnie obserwuje rozchodzące się fale. Oznacza to, że równanie (F.4) jest nieprawidłowe i musimy podzielić je na pół. Prawidłowy wzór na moc na jednostkę długości czoła fali będzie następujący:

$$P_{\text{suma}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v \quad (\text{F.5})$$

Podstawiając do wzoru $v = 16 \text{ m/s}$ i $h = 1 \text{ m}$, dowiadujemy się, że:

$$P_{\text{suma}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m} \quad (\text{F.6})$$

To zgrubne oszacowanie zgadza się z rzeczywistymi pomiarami na Atlantyku (Mollison, 1986). (Więcej na str. 83).

Straty związane z lepkością są minimalne – fala o okresie 9 sekund musiałaby trzykrotnie opłynąć Ziemię, by stracić 10% amplitudy.

Istniejące elektrownie falowe

Generatory głębokowodne

Jaka jest sprawność pozyskiwania energii fal w istniejących urządzeniach? Dużo wiemy o „kaczce” Stephena Saltera: rząd kaczek o średnicy 16 m, żywiących się falami Atlantyku o średniej mocy 45 kW/m, dostarczyłby 19 kW/m, z uwzględnieniem przesyłu do Szkocji centralnej (Mollison, 1986).

Instalacja Pelamis, stworzona przez Ocean Power Delivery, przejęła od kaczki Saltera prowadzenie w segmencie pływających głębokowodnych elektrowni falowych. Urządzenie w kształcie węża ma 130 m długości i składa się z łańcucha czterech odcinków, o średnicy 3,5 m każdy. Maksymalna moc wyjściowa wynosi 750 kW. Pelamisy cumuje się na głębokości około 50 m. Na farmie falowej 39 urządzeń w trzech rzędach stawiałoby czoła falom, zajmując obszar oceanu długi na 400 m i szeroki na 2,5 km (powierzchnia 1 km²). Według producenta taka farma falowa dostarczy około 10 kW/m.

Generatory płytkowodne

Wraz ze zmniejszeniem głębokości ze 100 do 15 m, przeciętnie 70% energii fal morskich jest tracone na tarcie denne. Stąd też średnia moc fal na jednostkę długości wybrzeża na wodach płytkich spada do około 12 kW/m. Urządzenie zwane Ostrygą (Oyster), stworzone w Queen’s University w Belfaście oraz Aquamarine Power Ltd [www.aquamarinepower.com], to ruchoma platforma, wsparta na silnikach hydraulicznych, wysoka na 12 m, z przeznaczeniem na wody o głębokości 12 m, o średniej mocy nadciągających fal przekraczającej 15 kW/m. Moc szczytowa wynosi 600 kW. Pojedyncze urządzenie ma produkować około 270 kW przy falach wyższych niż 3,5 m. Przewiduje się, że Ostryga będzie oferować większą moc na jednostkę masy urządzenia niż Pelamis.

Ostryga może bezpośrednio zasilać instalacje odsalania wody w procesie odwróconej osmozy. „Szczytowa produkcja wody pitnej odsalarki Ostrygi wynosi między 2000 a 6000 m³ dziennie”. Wartość tej produkcji, uzyskanej w instalacji w Jersey (zużywającej 8 kWh na m³), to równowartość 600–2000 kW prądu.

G Pływy

Gęstość mocy basenów pływowych

Jak oszacować moc sztucznego basenu pływowego? Wyobraźmy sobie, że w trakcie przyptywu basen szybko wypełnia się wodą, a w trakcie odpływu – szybko opróżnia. Do wytwarzania energii wykorzystuje się zarówno przyptyw, jak i odpływ (co zowie się produkcją bądź generacją dwukierunkową). Zmiana energii potencjalnej wody, na przestrzeni 6 godzin, wynosi mgh , gdzie h to zmiana wysokości środka masy układu (wody), równa połowie wysokości pływów (wysokość pływu to różnica wysokości pomiędzy przyptywem a odpływem; rys. G.1). Masa na jednostkę powierzchni basenu pływowego wynosi $\rho \times (2h)$, gdzie ρ to gęstość wody (1000 kg/m^3). Stąd też moc generowana na jednostkę powierzchni basenu pływowego wyniesie:

$$\frac{2 \rho gh}{6 \text{ godzin}}$$

przy założeniu, że generatory mają doskonałą sprawność. Zakładając, że $h = 2 \text{ m}$ (czyli wysokość pływu wynosi 4 m), otrzymujemy moc na jednostkę powierzchni basenu pływowego $3,6 \text{ W/m}^2$. Przyjmując, że energia ta jest zamieniana w elektryczność ze sprawnością 90% , dowiadujemy się, że:

$$\text{moc na jednostkę powierzchni basenu pływowego} \approx 3 \text{ W/m}^2$$

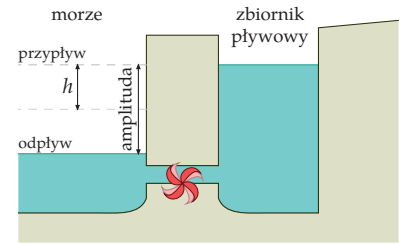
By wygenerować średnio 1 GW mocy, potrzebujemy basenu pływowego o powierzchni około 300 km^2 . Mógłby to być okrągły basen o średnicy 20 km (dla porównania, powierzchnia ujścia Severn za planowaną zaporą wynosi około 550 km^2 , a powierzchnia estuarium Wash – ponad 400 km^2).

Jeżeli basen pływowy produkuje prąd tylko w jednym kierunku, moc na jednostkę powierzchni spada o połowę. Średnia gęstość mocy zapory pływowej La Rance (o przeciętnej wysokości pływu wynoszącej $10,9 \text{ m}$) przez dziesięciolecia wynosiła $2,7 \text{ W/m}^2$ (str. 95).

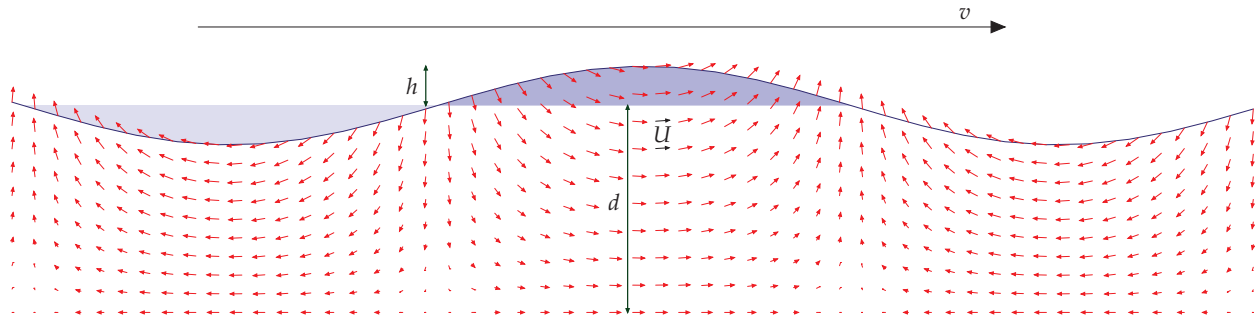
Zasoby pływowe

Pływy wokół Wielkiej Brytanii to naturalne fale pływowe (fale tsunami, zwane „falami pływowymi” nie mają z pływami nic wspólnego – powodowane są podwodnymi obsunięciami i trzęsieniami ziemi). Fala przyptywu (grzbiet fali pływowej) przemieszcza się znacznie szybciej niż prąd pływowy – np. z prędkością 150 km/h , podczas gdy sama woda porusza się z prędkością $1,5 \text{ km/h}$.

Energia, którą da się pozyskać z pływów przy pomocy basenów lub farm pływowych, nigdy nie będzie większa niż energia fal pływowych oceanu. Całkowitą moc wielkich atlantyckich fal pływowych obliczamy tak samo, jak moc zwykłych fal wywołanych wiatrem. W następnym akapicie prezentujemy standardowy model liczenia mocy zawartej w nadpływających falach w wodzie o głębokości d , płytkiej w stosunku do długości fal (rys. G.2).



Rys. G.1. Przekrój poprzeczny basenu pływowego. Basen napełnił się w trakcie przyptywu, a teraz mamy odpływ. Spuszczamy wodę przez generator, który przekształca energię potencjalną wody w elektryczność.



Moc na jednostkę długości grzbietu fali na wodach płytkich wynosi:

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2 \quad (G.1)$$

W tabeli G.3. obliczamy moc na jednostkę długości grzbietu fali dla różnych wartości h . Jeżeli $d = 100$ m, a $h = 1$ lub 2 m, moc na jednostkę długości grzbietu fali wynosi odpowiednio 150 kW/m lub 600 kW/m. To imponujący wynik w stosunku do mocy na jednostkę długości zwykłej fali, na wodach głębokich Atlantyku, wynoszącej 40 kW/m (rozdział F). Fale i pływy na Atlantyku mają podobne amplitudy pionowe (około 1 m), ale moc zawarta w pływach jest około 10 razy większa niż moc fal wywoływanych wiatrem.

Taylor (1920) opracował bardziej szczegółowy model mocy pływów, uwzględniający istotne czynniki, takie jak efekt Coriolisa (wywołany dziennym ruchem obrotowym Ziemi), istnienie fal pływowych poruszających się w odwrotnym kierunku i bezpośredni wpływ Księżyca na przepływy energii w Morzu Irlandzkim. Od tamtej pory dzięki eksperymentalnym pomiarom i modelom komputerowym zweryfikowano i poszerzono analizę Taylora. Flather (1976) zbudował szczegółowy model numeryczny pływów morskich, krojąc szelf kontynentalny wokół Wysp Brytyjskich na około 1000 komórek w kształcie kwadratu. Flather oszacował, że całkowita średnia moc docierająca na ten obszar wynosi 215 GW. Zgodnie z tym modelem, 180 GW dociera na obszar pomiędzy Francją a Irlandią. Do rejonu między Irlandią Północną a Szetlandami dociera 49 GW. Pomiędzy Szetlandami a Norwegią dochodzi do straty netto rzędu 5 GW. Jak zilustrowano na rys. G.4, Cartwright i in. (1980) dowiedli, że średnia transmisja mocy pomiędzy Malin Head (Irlandia) and Florø (Norwegia) wynosiła 60 GW, a pomiędzy Valentia (Irlandia) a wybrzeżem brytyjskim w pobliżu Ouessant 190 GW. Obliczono, że moc docierająca na Morze Irlandzkie wynosi 45 GW, a docierająca na Morze Północne przez Cieśninę Kaletańską – $16,7$ GW.

Moc fal pływowych

W tym ustępie (który można bezpiecznie pominąć) uszczegóławiam wzór na moc pływową podany w poprzednim akapicie. Robię to, bo większość rządowych analiz dotyczących brytyjskich zasobów pływowych oparto na modelu, który uważam za błędny.

Rys. G.2. Fala płytkowodna. Podobnie jak fala głębokowodna, zawiera energię w dwóch formach: energię potencjalną związaną z wyniesieniem wody z jasnofioletowych dolin do ciemnofioletowych grzbietów oraz energię kinetyczną całej wody przemieszczającej się tak, jak wskazują małe strzałki. Prędkość fali, podróżującej z prawa na lewo, określa duża strzałka na górze. W przypadku fal pływowych typowa głębokość może wynosić 100 m, prędkość grzbietów 30 m/s, pionowa amplituda na powierzchni 1 lub 2 m, a amplituda prędkości wody $0,3$ lub $0,6$ m/s.

h (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2$ (kW/m)
0,9	125
1,0	155
1,2	220
1,5	345
1,75	470
2,0	600
2,25	780

Tabela G.3. Przepływy mocy (moc na jednostkę długości grzbietu fali) na głębokości $d = 100$ m

Rys. G.2 ilustruje fale pływowe podróżujące po stosunkowo płytkich wodach. To szkic, który może ilustrować na przykład grzbiety fal przemieszczające się na północ kanałem La Manche lub na południe Morzem Północnym. Trzeba odróżnić prędkość U , z jaką przemieszcza się sama woda (np. 1,5 km/h) od prędkości v , z jaką podróżuje przyływ, wynoszącej zazwyczaj 150 lub 300 km/h.

Woda ma głębokość d . Grzbiety i doliny fal pływowych są wstrzykiwane po lewej przez 12-godzinne pływy oceaniczne. Grzbiety i doliny przemieszczają się z prędkością:

$$v = \sqrt{gd} \quad (\text{G.2})$$

Zakładamy, że długość fal jest znacznie większa niż głębokość. Pomijamy detale w rodzaju sił Coriolisa i różnic gęstości wody. Pionową amplitudę pływów nazwiemy h . Zgodnie ze standardowym założeniem, że wirowanie wody niemal nie oddziałuje na przepływ, pozioma prędkość wody nie zależy od głębokości i jest prawie stała. Pozioma prędkość U jest wprost proporcjonalna do prędkości wody na powierzchni i można ją wyprowadzić z prawa zachowania masy:

$$U = vh/d \quad (\text{G.3})$$

Wraz ze spadkiem głębokości, spada prędkość fal v (równanie G.2). Dla naszych potrzeb założymy stałą głębokość. Energia płynie z lewa na prawo w określonym tempie. Jak oszacować tę całkowitą moc pływów? Jaką moc *maksymalną* da się z tego pozyskać?

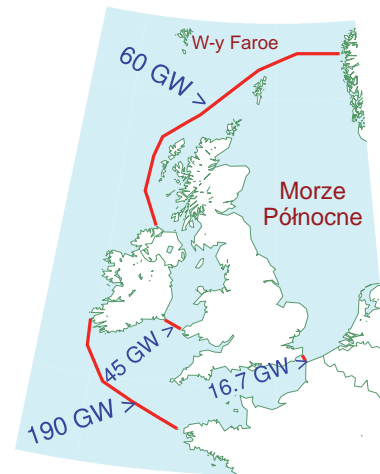
Można posłużyć się przekrojem poprzecznym i oszacować średni *strumień energii kinetycznej* na tym obszarze, a potem twierdzić, że tyle właśnie mocy da się uzyskać. Metodą strumienia energii kinetycznej posłużyli się konsultanci Black and Veatch dla oszacowania brytyjskich zasobów pływowych. W naszym szkicu wyprowadzimy moc całkowitą w inny sposób. Udowodnimy, że metoda strumienia energii kinetycznej daje wynik zaniżony.

Szczytowy strumień energii kinetycznej w każdym sektorze wynosi:

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (\text{G.4})$$

gdzie A to pole przekroju poprzecznego (to wzór na strumień energii kinetycznej, który napotkaliśmy w rozdziale B).

Rzeczywista całkowita moc napływająca nie jest równa strumieniowi energii kinetycznej. Rzeczywistą całkowitą moc napływającą na płytkich wodach obliczamy standardowym, podręcznikowym wzorem – należy określić całkowitą energię zawartą w jednej długości fali i podzielić ją przez jej okres. Całkowita energia w długości fali jest sumą energii potencjalnej i kinetycznej. Energia kinetyczna i potencjalna często są sobie równe (to typowe dla niemalże wszystkich obiektów, które się chyboczą – nieważne, czy to ciężarki na sprężynie, czy dzieci na huśtawce). By oszacować energię całkowitą wystarczy policzyć jedną z nich (albo energię potencjalną jednej długości fali, albo jej energię kinetyczną), a potem ją podwoić. Energia



Rys. G.4. Średnie moce pływów zmierzone przez Cartwrighta i in. (1980)

potencjalna fali (na długość fali i na jednostkę szerokości czoła fali), wypro-
wadzona poprzez całkowanie, wynosi:

$$\frac{1}{4}\rho gh^2\lambda \quad (\text{G.5})$$

Stąd też, po podwojeniu i podzieleniu przez okres, rzeczywista moc naszej
modelowej płytkowodnej fali pływowej wynosi:

$$\text{moc} = \frac{1}{2}(\rho gh^2\lambda) \times \omega/T = \frac{1}{2}\rho gh^2v \times w \quad (\text{G.6})$$

gdzie ω to szerokość czoła fali. Zastępując $v = \sqrt{gd}$,

$$\text{moc} = \rho gh^2 \sqrt{gd} \times w/2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w/2 \quad (\text{G.7})$$

Porównajmy tę moc ze strumieniem energii kinetycznej K_{BV} . Uderza fakt,
że te dwa równania inaczej reagują na zmianę amplitudy h . Posługując się
równaniami G.2 i G.3, oraz związkiem $A = \omega d$, możemy wyrazić strumień
energii kinetycznej jako:

$$K_{\text{BV}} = \frac{1}{2}\rho AU^3 = \frac{1}{2}\rho wd(vh/d)^3 = \rho \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3 \times w/2 \quad (\text{G.8})$$

A zatem metoda strumienia energii kinetycznej sugeruje, że całkowita moc
fal płytkowodnych rośnie jako *sześcian* amplitudy (równanie (G.8)); niemniej
jednak zgodnie z prawidłowym wzorem moc rośnie wraz z *kwadratem*
amplitudy (równanie (G.7)).

Stosunek jest następujący:

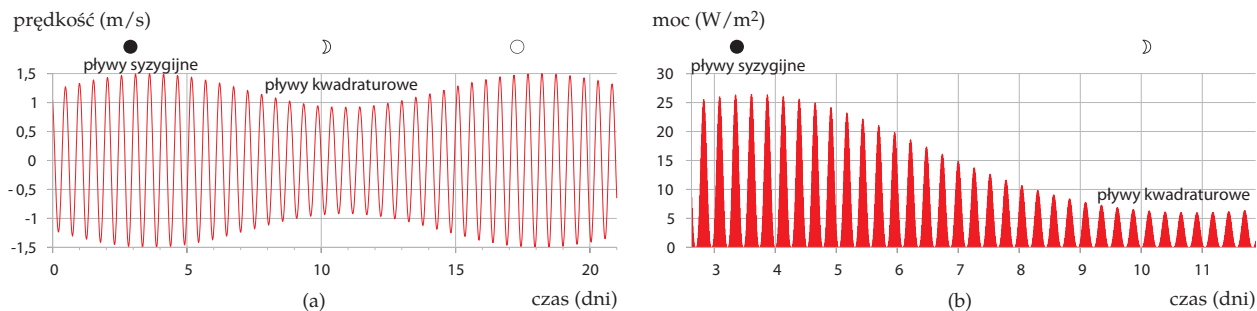
$$\frac{K_{\text{BV}}}{\text{moc}} = \frac{\rho w \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d} \quad (\text{G.9})$$

Z uwagi na to, że h jest zazwyczaj znacznie mniejsze niż d (h najczęściej
wynosi 1 lub 2 m, a d to 100 lub 10 m), szacunki odnośnie zasobów mocy
pływów oparte na metodzie strumienia energii kinetycznej mogą być
znacznie niedoszacowane. Przynajmniej w tych miejscach, do których pasuje
nasz szkic płytkowodnych fal pływowych.

Co więcej, w oszacowaniach opartych na metodzie strumienia energii
kinetycznej twierdzi się mylnie, że całkowita moc dostępna w trakcie pły-
wu maksymalnego (syzygijnego) jest osiem razy większa niż w przypadku
pływu minimalnego (kwadraturowego). Zakłada się, że stosunek amplitud
pływów wysokich do niskich wynosi dwa do jednego, tymczasem praw-
dziwe jest twierdzenie, że całkowita dostępna moc podróżującej fali rośnie
wraz z kwadratem jej amplitudy, stąd też stosunek całkowitej mocy napły-
wającej dla pływów wysokich i niskich wynosi cztery do jednego.

Wpływ opadania dna morskiego i siły Coriolisa

Jeżeli głębokość d zwiększa się stopniowo, a szerokość zbiornika pozostaje
stała, wówczas napływająca moc zostanie odbita lub zaabsorbowana tylko
minimalnie i moc fali będzie stała. Oznacza to, że $\sqrt{d}h^2$ jest stałą, stąd też
wysokość pływu rośnie wraz z głębokością jako $[h \sim 1/d^{1/4}]$.



To bardzo ogólny model, pomijający efekt Coriolisa. Siła Coriolisa sprawia, że grzbiety i doliny fal preferują ruch prawostronny – na przykład wędrując w górę kanału La Manche, przyływy są wyższe, a odpływy niższe po francuskiej stronie kanału. Pomijając ten efekt, mogłem do oszacowań wprowadzić pewien błąd.

Gęstość mocy farm pływowych

Wyobraźmy sobie, że wbijamy w dno morskie podwodne wiatraki. Porusza je strumień wody. Ponieważ woda jest około 1000 razy gęstsza niż powietrze, moc strumienia wody jest 1000 razy większa niż moc wiatru o tej samej prędkości.

Ile mocy mogą wychwycić farmy pływowe? Kluczowe jest, czy da się zsumować produkcję energii z farm pływowych na *przylegających* fragmentach dna morskiego. W przypadku wiatru, to całkiem możliwe – dopóki turbiny są rozmieszczone w odpowiedniej odległości od siebie, całkowita moc dostarczona przez 10 sąsiadujących farm wiatrowych jest sumą mocy dostarczonych przez pojedyncze farmy.

Czy tak samo będzie z farmami pływowymi? A może podwodne wiatraki wpływają jakoś na pozyskiwanie mocy u sąsiada? O ile mi wiadomo, odpowiedzi na to pytanie jeszcze nie ma. Możemy za to poczynić dwa alternatywne założenia i stworzyć modelowe sytuacje, w których te założenia będą prawdziwe. Zgodnie z założeniem „pływy są jak wiatr” możemy rozrzucić turbiny pływowe po całym dnie morskim, w odstępach około 5 średnic, i nie będą na siebie wzajemnie wpływać. Niezależnie od tego, jak duży obszar dna morskiego pokryjemy takimi farmami pływowymi.

Zgodnie z założeniem „może być tylko jeden rząd” jest wręcz przeciwnie – maksymalna moc możliwa do pozyskania w regionie to moc dostarczona przez *pojedynczy* rząd turbin wystawionych na pływy. To założenie jest prawdziwe w specjalnym przypadku zapory z hydroelektrownią – jeżeli woda przepływa przez pojedynczą, prawidłowo zaprojektowaną turbinę, nie ma sensu stawiać za nią kolejnych. Nie da się uzyskać stukrotnie więcej mocy stawiając jeszcze 99 turbin poniżej tej pierwszej. Miodek (czyli moc) jest spijany przez pierwszą turbinę i nie ma już więcej miodku dla pozostałych. Założenie „może być tylko jeden rząd” jest prawidłowe, jeżeli szacujemy potencjał mocy w miejscu, w którym woda przepływa przez wąski kanał ze zbiornika na górze, z wodą niemalże stojącą, do innego zbiornika na dole (przypadek zanalizowany przez Garretta i Cummins (2005, 2007)).

Rys. G.5. (a) Prąd pływowy na przestrzeni 21 dni w miejscu, gdzie maksymalny prąd w trakcie pływy syzygijskiej wynosi 2,9 węzła (1,5 m/s), a maksymalny prąd w trakcie pływy kwadraturowego – 1,8 węzła (0,9 m/s).

(b) Moc na jednostkę powierzchni dna morskiego na przestrzeni 9 dni obejmujących pływy syzygijskie i kwadraturowe. Szczyt mocy ma miejsce 4 razy dziennie, a jego wartość maksymalna to około 27 W/m². Średnia moc farmy pływowej wynosi 6,4 W/m².

Czas na deklarację. Uważam, że w wielu miejscach u wybrzeży Wielkiej Brytanii „pływy są z grubsza jak wiatr”. Zapewne jest też kilka miejsc o cechach wąskiego kanału i dla nich moje szacunki będą zawyżone.

Założmy, że zasady stawiania sensownej farmy pływowej i wiatrowej są zbliżone i że sprawność wiatraków pływowych będzie taka sama, jak najlepszych turbin wiatrowych, czyli około ½. Możemy podkraść wzór na moc farmy wiatrowej (na jednostkę powierzchni gruntu) ze str. 281. Moc na jednostkę powierzchni dna morskiego wynosi

$$\frac{\text{moc na wiatrak pływowy}}{\text{powierzchnia na wiatrak pływowy}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (\text{G.10})$$

Stosując ten wzór, w tabeli G.6 prezentujemy moc farm pływowych dla prądów pływowych o kilku prędkościach.

No dobrze, a jakie są typowe prądy pływowe? Wykresy pływów zazwyczaj podają prądy związane z pływami o największej amplitudzie (zwane pływami syzygijnymi) i o najmniejszej amplitudzie (zwane kwadraturowymi). Pływy syzygijne mają miejsce krótko po pełni i krótko po nowiu księżyca. Pływy kwadraturowe mają miejsce krótko po pierwszej i trzeciej kwadrze księżyca. Moc farmy pływowej zmieniałaby się w ciągu dnia w całkowicie przewidywalny sposób. Rys. G.5 ilustruje zmiany gęstości mocy farmy pływowej o maksymalnym prądzie rzędu 1,5 m/s. Średnia gęstość mocy tej farmy wyniosłaby 6,4 W/m². W wielu miejscach u wybrzeży Wielkiej Brytanii moc na jednostkę powierzchni farmy pływowej wyniosłaby 6 W/m² i więcej. To gęstość mocy podobna, jak w naszych szacunkach gęstości mocy farm wiatrowych (2–3 W/m²) i farm fotowoltaicznych (5–10 W/m²).

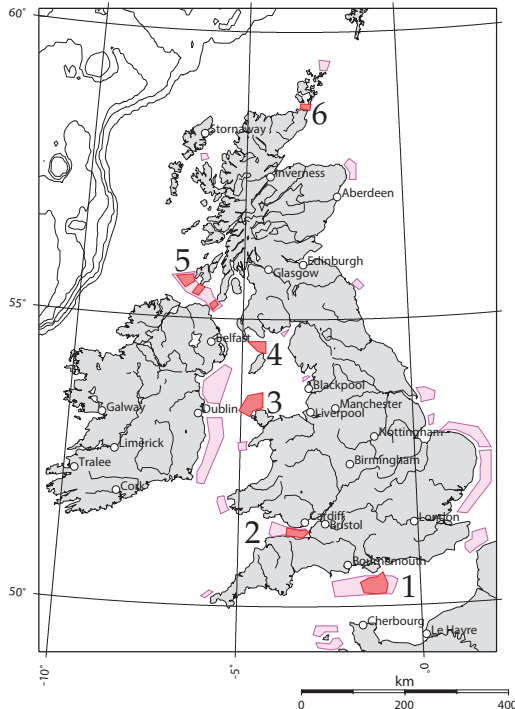
Teraz posłużymy się teorią „farmy pływowe są jak farmy wiatrowe”, by oszacować potencjał pozyskania mocy ze strumieni pływowych w dobrze rokujących akwenach wokół Wysp Brytyjskich. Kontrolnie oszacujemy moc całkowitą pływów obserwowanych w tych regionach. W oparciu o „teorię fal pływowych” sprawdzimy, czy moc naszej farmy pływowej nie jest przypadkiem większa niż całkowita dostępna moc. Miejsca o dużych pływach u wybrzeży Wysp Brytyjskich pokazano na rys. G.7.

Typowy prąd szczytowy w sześciu lokalizacjach o silnych pływach oszacowałem na podstawie wykresów z *Almanachu żeglugi Reeda* (margines błędu w moich szacunkach może wynosić nawet 30%). A może przeszacowałem lub niedoszacowałem powierzchnię tych obszarów? Nie badałem dna morskiego, nie wiem więc, czy nie ma tam jakichś przeszkód – gdzieś może być za płytko, za głęboko lub zbyt niebezpiecznie, by posadowić tam elektrownię.

Uznając te obszary niepewności, całkowitą moc z farm pływowych szacuję na **9 kWh na osobę dziennie**. To 9% mocy napływającej, wzmiankowanej na str. 91, a wynoszącej 100 kWh na osobę dziennie (pozyskiwanie 1,1 kWh/d/o w Kanale Bristolskim, w obszarze 2, mogłoby się kłócić z produkcją energii na zaporze Severn; zależałoby to od tego, czy farma pływowa znacząco zwiększa naturalne tarcie w kanale czy też je zastępuje).

U (m/s)	U (węzły)	farma pływowa moc (W/m ²)
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabela G.6. Gęstość mocy farmy pływowej (w watach na metr kwadratowy dna morskiego) w funkcji prędkości przepływu U (1 węzeł = 1 mila morska na godzinę = 0,514 m/s.) Gęstość mocy obliczamy przy pomocy wzoru $(\pi/200)^{1/2} \rho U^3$ (równanie (G.10)).



Rys. G.7. Obszary wokół Wysp Brytyjskich, gdzie szczytowe pływy przekraczają 1 m/s. Sześć obszarów zaznaczonych na ciemnoczerwono opisujemy w tabeli G.8:

kanał La Manche (na południe od Wyspy Wight);

1. Kanał Bristolki;
2. na pn. od Anglesey;
3. na pn. od Wyspy Man;
4. pomiędzy Irlandią Pn, Mull of Kintyre i wyspą Islay;
5. cieśnina Pentland Firth (między Orkadami i Szkocją) i sam archipelag Orkadów.

Potężne pływy charakteryzują również okolice Wysp Normandzkich, ale te nie są częścią Zjednoczonego Królestwa. Drugie miejsce zajmują regiony na Morzu Północnym, od ujścia Tamizy (Londyn) po Wash (Kings Lynn). Bładoróżowe obszary wyznaczają wody głębsze niż 100 m. Dane dotyczące pływów pochodzą z Almanachu żeglugi Reeda i Atlasu DTI Brytyjskich Zasobów Morskiej Energii Odnawialnej (2004).

Region	U (węzły)		gęstość powierzchni mocy (W/m ²)	powierzchnia średnia (km ²)	moc średnia (kWh/d/o)	moc napływająca			
	PK	PS				d (m)	w (km)	PK (kWh/d/o)	PS (kWh/d/o)
1	1,7	3,1	7	400	1,1	30	30	2,3	7,8
2	1,8	3,2	8	350	1,1	30	17	1,5	4,7
3	1,3	2,3	2,9	1000	1,2	50	30	3,0	9,3
4	1,7	3,4	9	400	1,4	30	20	1,5	6,3
5	1,7	3,1	7	300	0,8	40	10	1,2	4,0
6	5,0	9,0	170	50	3,5	70	10	24	78
Suma					9				

(a)

(b)

Tabela G.8.

(a) Oszacowania mocy pływów przy założeniu, że farmy pływowe działają podobnie, jak wiatrowe.

Gęstość mocy to średnia moc na jednostkę powierzchni dna morskiego. Sześć regionów wymieniono na rys. G.7

PK = pływy kwadraturowe.

PS = pływy syzygijne.

(b) Dla porównania, tabela podaje moc docierającą, oszacowaną przy pomocy równania (G.1) (str. 326).

v (m/s)	v (węzły)	gęstość mocy tarcia (W/m ²)		gęstość mocy farmy pływowej (W/m ²)
		R ₁ = 0,01	R ₁ = 0,003	
0,51	1	1,25	0,4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1250	375	1000

Tabela G.9. Gęstość mocy tarcia R_{1pt}^3 (w watach na metr kwadratowy dna morskiego) w funkcji prędkości przepływu, przy założeniu $R_1 = 0,01$ lub $0,003$. Flather (1976) zakłada $R_1 = 0,0025-0,003$; Taylor (1920) przyjmuje $0,002$. (1 węzeł = 1 mila morska na godzinę = $0,514$ m/s.) Ostatnia kolumna przypominia moce farmy pływowej oszacowane w tabeli G.6.

Więcej na ten temat w: Kowalik (2004), Sleath (1984).

Szacowanie zasobów pływowych na podstawie tarcia przydenne

Można oszacować dostępną moc pływów sprawdzając, ile mocy już zostało rozproszone na tarcie na dnie morza. Warstwa turbin rozmieszczonych tuż przy dnie może stanowić dno zastępcze, stawiając przepływającej wodzie podobny opór, jaki wcześniej stawiało dno i pozyskując moc zbliżoną do mocy wcześniej rozpraszanej na opór, nie zmieniając istotnie pływów.

Jaka jest więc ta moc rozproszona na tarcie przydenne? Niestety, nie istnieje prosty model tarcia przydenne. Zależy ono od szorstkości dna i materiału, z jakiego się składa. Nawet kiedy znamy te parametry, nie dysponujemy dobrym wzorem. Według powszechnie stosowanego modelu, wielkość naprężenia (siły na jednostkę powierzchni) wynosi $R_1 \rho U^2$, gdzie U to średnia prędkość przepływu, a R_1 to bezwymiarowa wartość zwana współczynnikiem tarcia. Moc rozproszoną na jednostkę powierzchni otrzymamy mnożąc naprężenie przez prędkość. Tabela G.9 prezentuje moc rozproszoną na tarcie, $R_1 \rho U^3$, przy założeniu, że $R_1 = 0,01$ lub $R_1 = 0,003$. Przy takich wartościach współczynnika tarcia, moc tarcia jest bardzo zbliżona do oczekiwanej mocy farmy pływowej. To dobra wiadomość, oznacza bowiem, że obsadzenia dna morskiego lasem podwodnych wiatraków, rozmieszczonych co 5 średnic, nie zmieni istotnie przepływu. Naturalne tarcie działa przecież podobnie.

Baseny pływowe z dopompowaniem

Trik z pompowaniem sztucznie podwyższa amplitudę pływów w basenie, co zwiększa pozyskiwaną moc. Koszt energetyczny *wpompowania* dodatkowej ilości wody w trakcie przyływu zwraca się z nawiązką, kiedy wypuści się tę wodę w czasie odpływu. Podobnie, dodatkowe ilości wody można *wypompować* w trakcie odpływu, a potem wpuścić je z przyływem. Triku z pompowaniem używa się czasem w instalacji La Rance, podnosząc moc generowaną netto o jakieś 10% (Wilson i Balls, 1990). Wypracujmy teoretyczne wartości graniczne dla tej technologii.

amplituda pływów (pół wysokości) h (m)	optymalne podniesienie wysokości b (m)	moc z dopompowa- niem (W/m ²)	moc bez dopompo- wania (W/m ²)
1,0	6,5	3,5	0,8
2,0	13	14	3,3
3,0	20	31	7,4
4,0	26	56	13

Tabela G.10. Teoretyczna gęstość mocy elektrowni pływowej z dopompowaniem, przy braku ograniczeń co do wysokości ścian basenu.

Zakładam, że sprawność generacji wynosi $\epsilon_g = 0,9$, a sprawność pompowania $\epsilon_p = 0,85$. Przyjmijmy, że wysokość pływu wynosi $2h$. W uproszczeniu założymy, że ceny zakupu i sprzedaży prądu są stałe, stąd też optymalne podniesienie wysokości lustra wody b powyżej linii naturalnego przyływu

wynika z równania (koszt marginalny pompowania = marginalny zwrot na dodatkowych ilościach wody):

$$b/\epsilon_p = \epsilon_g (b+2h)$$

Definiując sprawność generacji w obie strony $\epsilon = \epsilon_g \epsilon_p$, dowiadujemy się, że:

$$b = 2h \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}$$

Dla przykładu, przy wysokości pływu $2h = 4$ m, i sprawności w obie strony $\epsilon = 76\%$, optymalne podniesienie wysokości wynosi $b = 13$ m. To maksymalne podwyższenie uzasadnione kosztowo, o ile cena prądu jest stała.

Założmy, że taki trick stosujemy również w trakcie odpływu (oznacza to, że basen musi mieć w pionie 30 m!). Moc dostarczona na jednostkę powierzchni wyniesie wówczas:

$$\left(\frac{1}{2} \rho g \epsilon_g (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\epsilon_p} b^2 \right) / T$$

gdzie T to czas pomiędzy przyływem i odpływem. Możemy to wyrazić jako maksymalną możliwą gęstość mocy bez pompowania, $\epsilon_g 2\rho g h^2 / T$, pomnożoną przez współczynnik podniesienia wysokości:

$$\left(\frac{1}{1 - \epsilon} \right)$$

wynoszący w przybliżeniu 4. Tabela G.10 wskazuje, jaką teoretyczną gęstość mocy można uzyskać dzięki pompowaniu. Niestety, potencjał pompowania rzadko można w pełni wykorzystać, z uwagi na koszty budowy basenu. Pełna eksploatacja pomp wymaga basenu 4-krotnie przewyższającego wysokość pływu i zwiększa moc dostarczoną czterokrotnie. Niestety ilość materiału do wybudowania przegrody w morzu o wysokości H rośnie jako H^2 , stąd też koszt wybudowania ściany czterokrotnie wyższej wzrośnie bardziej niż czterokrotnie. Zapewne lepiej przeznaczyć te pieniądze na powiększenie basenu w poziomie niż w pionie.

Niemniej jednak z triku z pompowaniem można skorzystać za darmo zawsze wtedy, gdy wysokość naturalnych pływów jest mniejsza od maksymalnej – wówczas wodę w czasie przyływu można dopompować do poziomu maksymalnego.

amplituda pływów (połowa wys.) h (m)	optymalne podniesienie wysokości b (m)	moc z dopompowaniem (W/m ²)	moc bez dopompowania (W/m ²)
1,0	1,0	1,6	0,8
2,0	2,0	6,3	3,3
3,0	3,0	14	7,4
4,0	4,0	25	13

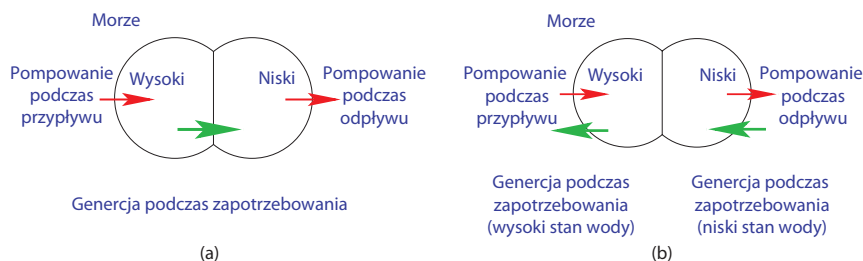
Tabela G.11. Gęstość mocy systemu z dopompowaniem, przy ograniczeniu wysokości do maksymalnej wysokości pływów (syzygijnych). Sprawdza się to np. w trakcie pływów kwadraturowych, kiedy dopompowanie zwiększa wysokość pływu do wysokości pływu syzygijnego.

Tabela G.11 pokazuje, ile mocy dostarczy basen, gdzie podwyższenie wysokości wynosi h , czyli wysokość pływów w basenie to zaledwie dwukrotność wysokości na zewnątrz. Podwojenie wysokości jest łatwe przy pływach kwadraturowych, jako że najczęściej są one o połowę niższe niż syzygijne. Dopompowywanie wody w trakcie pływu kwadraturowego do wysokości pływu syzygijnego sprawia, że pływ kwadraturowy dostarcza aż dwa razy więcej mocy niż bez pompowania. Taki system z dopompowaniem, w cyklu dwutygodniowym, dawałby różnice w produkcji mocy nie cztero-, lecz dwukrotne.

Nieprzerwana produkcja dzięki dwóm basenom

Oto zgrabny pomysł: budujemy dwa baseny, z których jeden jest „pełny”, a drugi „pusty”. Z każdym przyplływem basen „pełny” jest dopełniany, z każdym odpływem basen „pusty” jest opróżniany. Tego dopełniania i opróżniania można dokonywać albo pasywnie za pomocą śluz, albo aktywnie, za pomocą pomp (stosując opisany powyżej trik). Kiedy tylko pojawia się zapotrzebowanie na moc, woda płynie z basenu pełnego do basenu pustego lub też (co daje lepsze wykorzystanie energii) między jednym z basenów a morzem. Koszty inwestycyjne takiej instalacji dwubasenowej mogą być wyższe, bo trzeba zbudować więcej ścian, ale za to moc jest dostępna bez przerwy i podaż energii podąża za popytem.

Możemy wykorzystać energię wyprodukowaną w pustym basenie na wypompowanie wody do basenu pełnego w trakcie przyplwywu. Podobnie w czasie odpływu możemy przy pomocy energii z pełnego basenu wypompować wodę z basenu pustego. To samopompowanie mogłoby zwiększyć moc dostarczoną bez konieczności zakupu energii z sieci. Instalacja dwubasenowa ma pewną rozkoszną cechę. Otóż przyplływ, który jest optymalnym momentem na *dopompowanie* wody do basenu wyższego, jest jednocześnie optymalnym momentem *produkcji* energii w basenie niższym. Analogicznie, odpływ jest idealnym momentem na wypompowanie wody z basenu niższego i produkcję prądu w basenie wyższym. Z prostego rachunku wychodzi mi, że dwulagunowy system zlokalizowany w miejscu o naturalnej wysokości pływu 4 m może – przy właściwym schemacie pompowania – dostarczać *stabilnej* mocy rzędu $4,5 \text{ W/m}^2$ (MacKay, 2007a). W jednej z lagun poziom wody jest stale utrzymywany powyżej średniego poziomu morza, w drugiej – zawsze poniżej. Gęstość mocy $4,5 \text{ W/m}^2$ jest o 50% większa niż maksymalna średnia gęstość mocy zwykłego basenu pływowego w tym samym miejscu (3 W/m^2). Stabilna moc dostarczona przez system lagun miałaby większą wartość niż niestabilna i mniej elastyczna moc ze zwykłego basenu pływowego.



Rys. G.12. Różne sposoby na dopompowanie. Dwa baseny ulokowane są na poziomie morza. (a) Prostą metodą ich wykorzystania jest przeznaczenie jednego na basen „wysoki”, a drugiego na „niski”. Kiedy zbliża się pora przyplwywu, wpuszcza się lub wypompowuje (przy użyciu prądu ze źródeł zewnętrznych) wodę do basenu wysokiego. Kiedy zbliża się odpływ, z basenu niskiego wodę wypuszcza się lub wypompowuje. Kiedy tylko energia jest wystarczająco droga, można generować moc na zawołanie, wypuszczając wodę z basenu wysokiego do niskiego. (b) Inne rozwiązanie, które może dostarczyć więcej mocy na jednostkę powierzchni, nie przewiduje przepływu wody między basenami. Kiedy jeden basen napełnia się po brzegi lub zupełnie opróżnia przy pomocy pompy, drugi basen dostarcza prąd sieci stabilnej, podążającej za zapotrzebowaniem mocy. Pompy może zasilać energia ze źródeł niestabilnych (takich jak wiatr), zbędna moc z sieci (np. z elektrowni jądrowych) lub też energia z drugiej części instalacji – prąd z jednego basenu pozwala dopompować lub wypompować wodę z drugiego basenu.

System dwubasenowy mógłby również służyć jako szczytowo-pompo-
wy magazyn energii.

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 325 **Sprawność turbin pływowych 90%...** Turbiny osiągają sprawność 90% i wyższą dla głowic 3,7 m lub większych. Baker i in. (2006).
- 334 **Nieprzerwana produkcja dzięki dwóm basenom.** Dwubasenową elektrownię pływową zbudowano w Chinach, w Haishan na wyspie Maoyan. Pojedynczy generator umieszczony między basenami – co pokazuje rys. G.12(a) – dostarcza moc nieprzerwanie i generuje średnio 39 kW. [2bqap].

Zalecana lektura: Shaw i Watson (2003b); Blunden i Bahaj (2007); Charlier (2003a,b). Więcej nt. tarcia przydennego i zmian przepływów wraz z głębokością w: Sleath (1984). Więcej nt. oszacowań zasobów pływowych w Wielkiej Brytanii w: MacKay (2007b). Więcej nt. lagun pływowych w: MacKay (2007a).

H Wytwarzanie rzeczy

Energia w dobrach z importu

Dieter Helm z zespołem oszacował ślad emisyjny każdego funta wydanego na produkty importowane z kraju X, posługując się wskaźnikiem intensywności emisyjnej gospodarki kraju X (czyli stosunkiem emisji dwutlenku węgla do produktu krajowego brutto). Doszedł do wniosku, że emisje zawarte w dobrach importowanych przez Wielką Brytanię wynoszą około 16 ton CO₂e na osobę rocznie (i prawdopodobnie powinny zostać dodane do oficjalnego brytyjskiego śladu emisyjnego wynoszącego 11 ton CO₂e na osobę rocznie). Bardziej szczegółowa analiza, zamówiona później przez rządową agencję DEFRA szacowała, że emisje zawarte w towarach z importu są niższe, ale wciąż znaczące – około 6,2 tony CO₂e na osobę rocznie. W kategoriach energetycznych, 6 ton CO₂e rocznie to blisko 60 kWh dziennie.

Zobaczymy, czy uda się odtworzyć te wnioski w inny sposób, na podstawie wagi towarów z importu.

Rys. H.2 pokazuje brytyjski import w roku 2006 w trzech zestawieniach. Po lewej całkowita *wartość* importu została rozbита na kraje pochodzenia. W środku tą samą wartość finansową rozbito na typy towarów, zgodnie z kategoriami urzędu skarbowego i celnego. Po prawej, import Wielkiej Brytanii został sklasyfikowany według *wagi* i podzielony na kategorie Departamentu Transportu, którego nie interesuje, czy towaram są wyroby skórzane, czy tytoń, ale ile to waży, czy jest stałe czy płynne oraz czy przybyło w kontenerze, czy w ciężarówce.

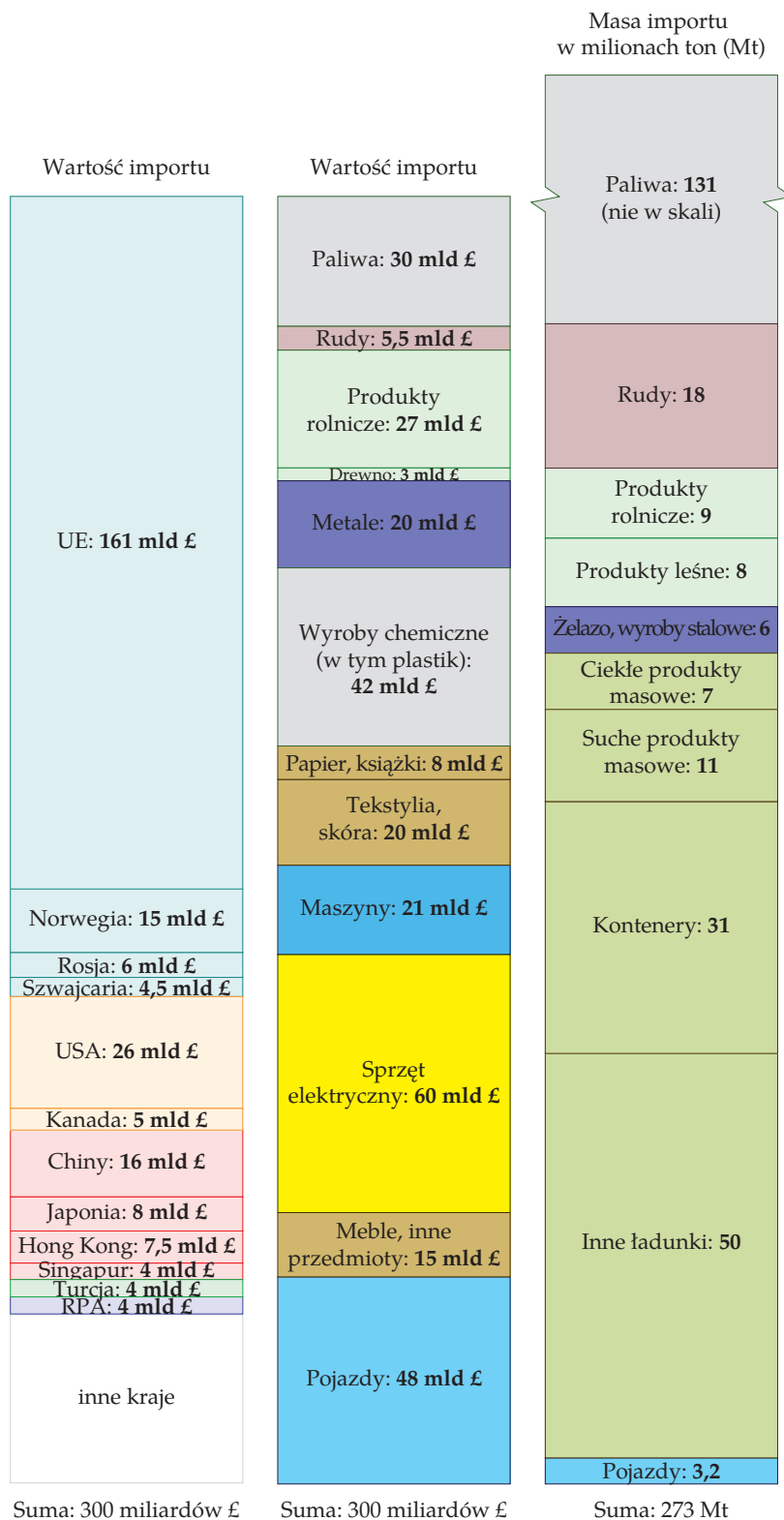
Koszt energetyczny importowanych paliw (na samej górze po prawej) *jest* uwzględniany w standardowych obliczeniach zużycia energii w Wielkiej Brytanii. Koszty energetyczne pozostałych dóbr nie znajdują się w tych obliczeniach. W większości przypadków, energia szara na jednostkę wagi jest większa lub równa 10 kWh na kg – tyle wynosi energia na jednostkę wagi paliw kopalnych. Tak jest w przypadku wszystkich metali i stopów metali, wszystkich polimerów i kompozytów, większości produktów papierniczych i wielu ceramicznych. Wyjątek stanowią surowce (np. rudy), ceramika porowata (taka jak beton), cegła i porcelana (których koszt energetyczny jest dziesięciokrotnie niższy), drewno i niektóre gumy oraz szkło (którego koszt energetyczny jest nieco mniejszy niż 10 kWh na kg). [r22oz].

Możemy więc z grubsza oszacować ślad energetyczny naszego importu na podstawie wagi towarów, jeżeli wyłączymy dobra w rodzaju rud i drewna. Dysponujemy danymi ogólnymi, stąd też zapewne przeszarżujemy i mimowolnie włączymy jakieś towary z drewna, czy szkła. Można mieć nadzieję, że zostanie to zrównoważone przez niedoszacowania energii zawartej w większości metali i plastików oraz bardziej złożonych dóbr, z których wiele zawiera nie 10, ale 30 kWh na kg, a może i więcej.

Na potrzeby naszych obliczeń wezmę z prawej kolumny na rys. H.2 produkty z żelaza i stali, ładunki masowe suche, transport towarowy kontenerowy i „inny transport towarowy”, w sumie ważące 98 mln ton rocznie. Na razie pomijam samochody. Odejmę od tego jakieś 25 mln ton produktów



Fot. H.1. Nieprzerwany wytop stali w Korea Iron and Steel Company



Rys. H.2. Import dóbr w Wielkiej Brytanii, rok 2006

Suma: 300 miliardów £

Suma: 300 miliardów £

Suma: 273 Mt

żywnościowych, które zapewne schowały się w kategorii „inny transport towarowy” (w roku 2006 sprowadziliśmy 34 mln ton żywności). Zostaje nam 73 mln ton.

Konwertujemy owe 73 mln ton na energię, przy użyciu wskaźnika przeliczeniowego zasugerowanego powyżej i dzielimy to przez 60 mln ludzi. Wychodzi nam, że brytyjski import zawiera energię szarą w wysokości 33 kWh na osobę dziennie.

Co do samochodów, stać nas na bardziej precyzyjne obliczenia, bo i wiemy nieco więcej: w roku 2006 sprowadziliśmy 2,4 mln pojazdów. Przy założeniu, że energia szara na samochód wynosi 76 000 kWh (patrz: str. 98), samochody z importu zawierają energię rzędu 8 kWh na osobę dziennie.

Wyłączyłem z rachunków „ładunki masowe płynne”, bo nie do końca wiem, co to jest. Jeżeli są to płynne chemikalia, to energia w nich zawarta może być znaczna.

Wychodzi nam, że całkowita energia zawarta w imporcie wynosi 41 kWh na osobę dziennie – co zgadza się z zasadzie mniej więcej z obliczeniami Dietera Helma i spółki.

Podejrzewam, że 41 kWh na osobę dziennie jest wartością niedoszacowaną, bo założona przez nas intensywność emisyjna (10 kWh na kg) jest niższa niż intensywność większości produktów przemysłowych, takich jak maszyny, czy urządzenia elektryczne. Bez znajomości wagi wszystkich kategorii importu, to najlepsze obliczenie, na jakie mnie stać.

Analiza cyklu życiowego budynków

Tabele H.4 i H.5 podają zapotrzebowanie na energię w procesie produkcji materiałów i konstrukcji budowlanych. Uwzględnia ono energię spożytkowaną na przetransportowanie surowców do fabryki, ale nie liczy energii zużytej w transporcie wyrobów na plac budowy.

W tabeli H.6 korzystamy z tych liczb do obliczenia energii w procesie budowy domu z trzema sypialniami. Wyższe jest *zapotrzebowanie na energię brutto*, uwzględniające np. energię szarą infrastruktury miejskiej oraz maszyn do produkcji surowców. Zgrubnym sposobem oszacowania zapotrzebowania na energię brutto budynku jest podwojenie zapotrzebowania na energię w procesie [3kmcks].

Jeżeli rozłożymy 42 000 kWh na 100 lat i podwoimy to, uzyskując koszt energetyczny brutto, całkowita energia szara domu wyniesie około 2,3 kWh/d. To koszt energetyczny tylko samej *konstrukcji* – cegieł, dachówek, więźby dachowej.



Fot. H.3. Kopalnia odkrywkowa rud niobu, Brazylia

Materiał	Energia zawarta (MJ/kg) (kWh/kg)	
drewno miękkie piłowane, suszone w suszarni	3,4	0,94
drewno twarde piłowane, suszone w suszarni	2,0	0,56
drewno twarde piłowane, suszone na powietrzu	0,5	0,14
płyta pilśniowa	24,2	6,7
płyta wiórowa	8,0	2,2
płyta MDF	11,3	3,1
sklejka	10,4	2,9
klejone drewno laminowane	11	3,0
laminowana fornirowana belka	11	3,0
słoma	0,24	0,07
stabilizowane bloki z ziemi	0,7	0,19
importowany granit budowlany	13,9	3,9
miejscowy granit budowlany	5,9	1,6
gips	2,9	0,8
płyta gipsowa	4,4	1,2
cement włóknisty	4,8	1,3
cement	5,6	1,6
beton produkowany na budowie	1,9	0,53
beton prefabrykowany, po obróbce termicznej	2,0	0,56
prefabrykowane ściany betonowe	1,9	0,53
cegły z gliny	2,5	0,69
błoczki betonowe	1,5	0,42
autoklawizowany beton komórkowy	3,6	1,0
plastiki – ogólnie	90	25
PCW	80	22
kauczuk syntetyczny	110	30
farba akrylowa	61,5	17
szkło	12,7	3,5
włókno szklane (wełna szklana)	28	7,8
aluminium	170	47
miedź	100	28
stal galwanizowana	38	10,6
stal nierdzewna	51,5	14,3

Tabela H.4. Energia zawarta w materiałach budowlanych (przy założeniu, że materiały są nowe, a nie z recyklingu). (Kamień budowlany to wyselekcjonowana naturalna skała, cięta do odpowiednich kształtów i rozmiarów).
Źródła: [3kmcks], Lawson (1996)



	Energia zawarta (kWh/m ²)
Ściany	
konstr. drewniana, drewniany siding, obicie z płyty gipsowej	52
konstr. drewniana, obłożona cegłą glinianą, obicie z płyty gips.	156
konstr. drewniana, siding aluminiowy, obicie z płyty gipsowej	112
konstr. stalowa, obłożona cegłą glinianą, obicie z płyty gipsowej	168
podwójna cegła gliniana, obita płytą gipsową	252
bloki z ubitej ziemi stabilizowane cementem	104
Podłogi	
podłoga podniesiona drewniana	81
110 mm płyta betonowa od spodu	179
200 mm belka/wypełnienie z betonu prefabrykowanego typu T	179
Dachy	
konstr. drewniana, dachówka betonowa, sufit z płyt gipsowych	70
konstr. drewniana, dachówka z terakoty, sufit z płyt gipsowych	75
konstr. drewniana, blacha stalowa, sufit z płyt gipsowych	92

Tabela H.5. Energia zawarta w różnych rodzajach ścian, podłóg i dachów

Źródła: [3kmcks], Lawson (1996)

	Powierzchnia (m ²)	×	gęstość energetyczna (kWh/m ²)	=	(kWh)
Podłogi	100	×	81	=	8100
Dachy	75	×	75	=	5600
Ściany zewnętrzne	75	×	252	=	19 000
Ściany wewnętrzne	75	×	125	=	9400
W sumie					42 000

Tabela H.6. Energia zawarta w procesie budowy domu z trzema sypialniami

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

336 Bardziej szczegółowa analiza, zamówiona później przez rządową agencję DEFRA szacowała, że emisje zawarte w towarach z importu wynoszą około 6,2 tony CO₂e na osobę rocznie. Wiedmann i in. (2008).

Dalsza lektura: www.greenbooklive.com – tutaj znaleźć można oszacowania cyklu życia materiałów budowlanych.

Przydatne uwagi odnośnie analizy cyklu życia: www.gdrc.org/uem/lca/life-cycle.html

Polecamy również: <http://www.epa.gov/nrmrl/lcaccess/resources.html>



Fot. H.7. Millau Viaduct we Francji, najwyższy most świata. Konstrukcja stalowo-betonowa, dł. 2,5 km, wys. 353 m

I Szybkie odnośniki

Jednostki układu SI

Wat. Ta jednostka układu SI została nazwana na cześć Jamesa Watta. Tak jak w przypadku wszystkich innych jednostek SI, których nazwy wywodzą się od nazwisk, symbolem jest duża, pierwsza litera tego nazwiska (W). Pisząc całą nazwę, należy zaczynać od małej litery (wat). Wyjątkiem są „stopnie Celsjusza”.

Wikipedia

SI to skrót of Système Internationale (z franc. Międzynarodowy Układ Jednostek Miar). Jednostek systemu SI powinni używać wszyscy projektanci statków kosmicznych, jeżeli chcą, by to coś latało.

Jednostki układu SI			przedrostek						
energia	jeden dżul	1 J	symbol	k	M	G	T	P	E
moc	jeden wat	1 W	mnożnik	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}
siła	jeden newton	1 N	-----						
długość	jeden metr	1 m	przedrostek	centy	mili	mikro	nano	piko	femto
czas	jedna sekunda	1 s	symbol	c	m	μ	n	p	f
temperatura	jeden kelwin	1 K	mnożnik	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

Tabela 1.1. Jednostki układu SI i przedrostki

Moje ulubione miary sprawności energetycznej, transportowej i sprawności mocy

Moje ulubione jednostki, wyrażone w SI			
energia	jedna kilowatogodzina	1 kWh	3 600 000 J
moc	jedna kilowatogodzina dziennie	1 kWh/d	$(1000/24) W \approx 40 W$
siła	jedna kilowatogodzina na 100 km	1 kWh/100 km	36 N
czas	jedna godzina	1 h	3600 s
	jeden dzień	1 d	$24 \times 3600 s \approx 10^5 s$
	jeden rok	1 r	$365,25 \times 24 \times 3600 s \approx \pi \times 10^7 s$
stos. siły do masy	kilowatogodzina na tonokilometr	1 kWh/t-km	$3,6 m/s^2 (\approx 0,37g)$

Inne jednostki i symbole

Co mierzymy?	nazwa jednostki	symbol	wartość
ludzie	osoba	o	
masa	tona	t	1t = 1000 kg
	gigatona	Gt	1 Gt = $10^9 \times 1000 \text{ kg} = 1 \text{ Pg}$
transport	pasażerokilometr	p-km	
transport	tonokilometr	t-km	
objętość	litr	l	1 l = 0,001 m ³
powierzchnia	kilometr kwadratowy	km ²	1 km ² = 10 ⁶ m ²
	hektar	ha	1 ha = 10 ⁴ m ²
	Walia		1 Walia = 21 000 km ²
	London (obszar adm. Wielkiego Londynu)		1 London = 1580 km ²
energia	elektrownia wodna Dinorwig		1 Dinorwig = 9 GWh

Miliardy, miliony i obce przedrostki

Miliard (1 mld) to 10⁹ lub tysiąc milionów. Bilion to 10¹². Standardowym przedrostkiem określającym miliard (10⁹) jest giga.

Dla oznaczenia miliona zazwyczaj stosujemy mln, ale np. w przypadku miliona ton ekwiwalentu ropy będzie to Mtoe, a dla miliona ton dwutlenku węgla MtCO₂.

Jednostki irytujące

W powszechnym obiegu jest wiele jednostek, które z różnych względów irytują. Wyobraziłem sobie, co mogą oznaczać. Wyliczam je tutaj, by ułatwić Ci zrozumienie różnorodnych doniesień medialnych.

Domy

Miara zwana „domem” powszechnie pojawia się w opisach odnawialnych źródeł energii. Czytamy np. że „Warta 300 mln funtów farma wiatrowa Whitelee, wyposażona w 140 turbin, będzie produkować 322 MW mocy, co zasili w prąd 200 000 domów”. Brytyjskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej definiuje „dom” w kategoriach mocy – to **4700 kWh rocznie** [www.bwea.com/ukwed/operational.asp]. To 0,54 kW lub **13 kWh dziennie**. Inne organizacje podają 4000 kWh/r na gospodarstwo domowe.

Miara zwana „domem” wyprowadza mnie z równowagi. Obawiam się, że ludzie rozumieją przez to *całą energię zużywaną przez domowników*. Tymczasem ta ostatnia jest jakieś 24 razy większa niż 13 kWh/d. Pod hasłem „dom” kryje się tylko i wyłącznie przeciętne zużycie prądu w gospodarstwie domowym. Nie ma tam ogrzewania. Ani miejsca pracy. Ani transportu. Ani wszystkich energożernych produktów i usług, które dostarcza domownikom społeczeństwo.

Kiedy natomiast mowa o emisjach CO₂ tego „domu”, zazwyczaj podaje się wartość 4 ton CO₂ na dom rocznie. Nie mam pojęcia, dlaczego.

Elektrownie

Pomysły na oszczędzanie energii czasem opisuje się w kategoriach elektrowni. Według raportu BBC, dotyczącego instalacji nowych praktycznie niezniszczalnych diod LED w systemach sygnalizacji świetlnej „dałoby to ogromne oszczędności energii – zasilenie brytyjskiej sygnalizacji świetlnej wymaga pracy dwóch średniej wielkości elektrowni”.

news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/specials/sheffield_99/449368.stm

Jaka jest ta elektrownia średniej wielkości? Ma 10 MW mocy? 50 MW? 100 MW? 500 MW? Nie mam pojęcia. Co na to wyszukiwarka Google? Niektórzy uważają, że to 30 MW, inni, że 250 MW, kolejni, że 500 MW (to najpowszechniej), a jeszcze inni, że 800 MW. Co za bezużyteczna miara!

A nie lepiej wyrazić owe oszczędności w procentach? “Zasilenie brytyjskiej sygnalizacji świetlnej wymaga 11 MW energii elektrycznej, a to 0,03% krajowego zużycia prądu”. To by ujawniło, jak „ogromne” są te oszczędności.

Na rysunku I.2 wymieniamy moce 19 brytyjskich elektrowni węglowych.

Samochody zdjęte z dróg

W niektórych reklamach redukcję ilości CO₂ wyraża się „liczbą samochodów zdjętych z dróg”. Np. Richard Branson, właściciel kolei Virgin Trains, twierdzi, że gdyby jego nowe pociągi Voyager przestawić na 20% biodiesla... (Swoją drogą, czyż nie jest skandalem nazywanie pociągu „zielonym i napędzany biodieslem”, kiedy zużywa 80% paliw kopalnych, a tylko 20% biodiesla? – przepraszam, nieco się rozkojarzyłem). No więc Branson twierdzi, że *gdyby* jego nowe pociągi Voyager przestawić na 20% biodiesla ... (podkreślam słówko „*gdyby*”, bo ludzie pokroju Bransona zawsze przykuwają uwagę mediów, anonsując, że coś zrobią, po czym część tych roz reklamowanych inicjatyw po cichu wygasa – tak jak holowanie samolotów na płycie lotniska, co ograniczyłoby emisje spalin. – Przepraszam, znów się uniosłem). Tak więc Branson twierdzi, że gdyby jego nowe pociągi Voyager przestawić na 20% biodiesla, przelożyłoby się to na redukcję 34 500 ton CO₂ rocznie, co odpowiada „23 000 samochodów zdjętych z dróg”. Z tej wypowiedzi wynika że:

„Jeden samochód zdjęty z drogi” to – 1,5 t CO₂ rocznie

Kalorie

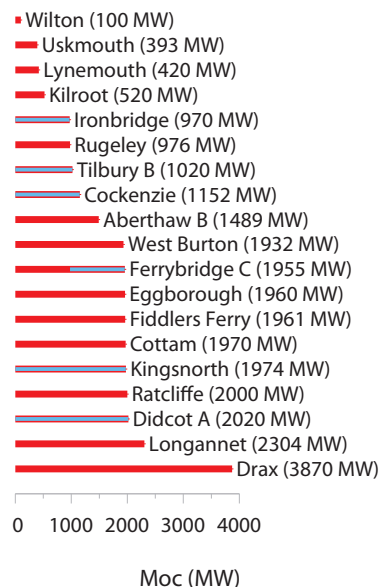
Kalorie irytują, bo społeczność odchudzających się nazywa kalorią to, co jest kilokalorią. 1 taka kaloria w diecie = 1000 kalorii.

$$2500 \text{ kcal} = 3 \text{ kWh} = 10\,000 \text{ kJ} = 10 \text{ MJ}$$

Baryłki

To irytująca jednostka ukochana przez społeczność naftową, podobnie jak tona ropy. Dlaczego nie zdecydują się na jedną miarę? Baryłka ropy to 6,1 GJ lub 1700 kWh.

Baryłki irytują w dwójnasób, bo mają wiele definicji opartych na różnych objętościach.



Rys. I.2. Moce zainstalowane w brytyjskich elektrowniach węglowych. Na niebiesko oznaczyłem 8 GW mocy w instalacjach, które zostaną zamknięte do 2015 roku. 2500 MW w skali kraju odpowiada 1 kWh na osobę dziennie.

Oto wszystko, co musisz wiedzieć o baryłkach ropy. Jedna baryłka to 42 galony amerykańskie albo 159 litrów. Jedna baryłka to 0,1364 ton ropy. Jedna baryłka surowej ropy naftowej zawiera 5,75 GJ energii. Jedna baryłka ropy waży 136 kg. Jedna tona surowej ropy naftowej to 7,33 baryłek i 2,1 GJ. Emisyjność surowej ropy wynosi 400 kg CO₂ na baryłkę (www.chemlink.com.au/conversions.htm). Oznacza to, że jeżeli cena ropy wynosi 100 USD za baryłkę, to energia ropy kosztuje 6 centów za kWh. Gdyby jednak nałożyć na paliwa kopalne podatek emisyjny w wysokości 250 dolarów za tonę CO₂, cena ropy skoczyłaby o dodatkowe 100 USD.

Galony

Galony byłyby miłą i przyjazną człowiekowi miarą, gdyby Jankesi tego nie skopali, definiując galon inaczej niż wszyscy (co powtórzyli z pintą i kwartą). Wszystkie miary amerykańskie stanowią mniej więcej pięć szóstych miar prawidłowych.

1 galon amerykański = 3,785 l.

Tony

Tony są irytujące, bo istnieją tony długie, krótkie i metryczne. Są do siebie tak zbliżone, że ich tutaj nie różnicuję. 1 krótka tona = 907 kg; 1 długa tona = 1016 kg; 1 tona metryczna (lub po prostu tona) = 1000 kg.

BTU i quady

Brytyjskie jednostki termiczne (BTU) są dość denerwujące, bo ani nie należą do systemu SI, ani nie mają szczególnie użytecznej wielkości. Podobnie, jak bezużyteczny dżul, są zbyt małe, trzeba więc dokładać do nich durne przedrostki, jak „kwadrylion” [wg skali krótkiej, używanej m.in. w krajach anglosaskich jest to 10¹⁵, co odpowiada polskiemu biliardowi – *red.*], aby był z nich jakiś praktyczny pożytek.

1 kJ to 0,947 BTU. 1 kWh to 3409 BTU.

Jednostki zabawne

Filiżanki herbaty

Czy to ma uatrakcyjnić panele słoneczne? „Po zainstalowaniu 7000 modułów fotowoltaicznych ma produkować 180 000 jednostek odnawialnego prądu rocznie, co wystarczy do przygotowania **dziewięciu milionów filiżanek herbaty**”. Wynika stąd, że 1 kWh odpowiada 50 filiżankom herbaty.

Jako jednostka objętości 1 filiżanka amerykańska (1 US cup) oficjalnie mieści 0,24 l, ale filiżanka herbaty lub kawy zazwyczaj ma 0,18 l. Podniesienie temperatury 50 filiżanek wody, o objętości 0,18 l, z 15 °C do 100 °C, wymaga 1 kWh.

Stąd też „dziewięć milionów filiżanek herbaty rocznie” to inaczej „20 kW”.

Piętury, sale koncertowe i stadiony

„Gdyby docieplić wszystkie ściany w Wielkiej Brytanii, emisje dwutlenku węgla spadłyby o imponujące 7 milionów ton. Te emisje zajęłyby niemalże 40 milionów autobusów piętrowych, a nowy stadion Wembley wypełniłyby 900 razy!”

Z czego wynika bardzo pożyteczna informacja, że Wembley pomieści 44 000 piętрусów. Swoją drogą Wembley ma 1 140 000 m³.

„Gdyby w każdym domu zainstalować tylko jedną świetlówkę energooszczędną, zaoszczędzony w ten sposób dwutlenek węgla wypełniłby salę Royal Albert Hall 1980 razy!” (Albert Hall ma 100 000 m³).

Wyrażanie CO₂ w kategoriach objętości, a nie masy, świetnie rozdmuchuje jego rozmiary. Jeżeli „1 kg CO₂ dziennie” brzmi zbyt skromnie, zamień to na „200 000 litrów CO₂ rocznie”!

Więcej objętości

Kontener ma 2,4 m szerokości na 2,6 m wysokości na 6,1 lub 12,2 metrów długości (6,1 dla pojemności kontenerowej TEU, 12,2 dla pojemności FEU).

Jeden TEU to pojemnościowy ekwiwalent kontenera dwudziestostopowego o pojemności wnętrza około 33 m³. Obecnie większość kontenerów to kontenery czterdziestostopowe, o wielkości 2 TEU. 40-stopowy kontener waży 4 tony i mieści 26 ton ładunku; jego pojemność to 67,5 m³.

Basen pływacki ma pojemność około 3000 m³.

Autobus piętrowy ma objętość 100 m³.

Balon na gorące powietrze ma 2500 m³.

Wielka piramida w Gizie ma objętość 2 500 000 metrów sześciennych.

Powierzchnie

Powierzchnia Ziemi wynosi 500 × 106 km²; powierzchnia lądu to 150 × 106 km².

Mój typowy brytyjski dom z trzema sypialniami ma powierzchnię użytkową 88 m². W Stanach typowy dom jednorodzinny ma 2330 stóp kwadratowych (216 m²).

Moce

Przyrostek „el” przy wartościach mocy oznacza, że mówimy o energii elektrycznej. Stąd też elektrownia może produkować 1 GW_{el} zużywając 2,5 GW energii chemicznej. Analogicznie przyrostek „c” oznacza, że mamy do czynienia z energią cieplną. Przyrostków tych można używać, podając ilości energii. „Mój dom zużywa 2 Wh_{el} dziennie”.

Dodając przyrostek „s” do wartości mocy, wskazujemy, że chodzi o moc „szczytową”. I tak 10 m² paneli może mieć 1 kW_s mocy szczytowej.

1 kWh/d = 1/24 kW.

1 toe/r = 1,33 kW.

Benzyna wypływa z pompy na stacji w tempie około pół litra na sekundę. To 5 kWh na sekundę albo 18 MW.

Moc samochodu wyścigowego Formuły 1 to 560 kW.

waga CO ₂ ↔ objętość
2 kg CO ₂ ↔ 1 m ³
1 kg CO ₂ ↔ 500 litrów
44 g CO ₂ ↔ 2 litry
2 g CO ₂ ↔ 1 litr

Tabela I.3. Przelicznik wag na objętości



Fot. I.4. Kontener dwudziestostopowy (1 TEU)

hektar	= 10000 m ²
akr	= 4050 m ²
mila kwadr.	= 2,6 km ²
stopa kwadr.	= 0,093 m ²
jard kwadr.	= 0,84 m ²

Tabela I.5. Powierzchnie

Zużycie prądu w Wielkiej Brytanii wynosi 17 kWh na osobę dziennie lub 42,5 GW w skali kraju.

Użytkowanie terenu	powierzchnia na osobę (m ²)	odsetek
– budynki mieszkalne	30	1,1
– ogrody przydomowe	114	4,3
– inne budynki	18	0,66
– drogi	60	2,2
– koleje	3,6	0,13
– ścieżki	2,9	0,11
– tereny zielone	2335	87,5
– woda	69	2,6
– inne	37	1,4
W sumie	2670	100

Tabela I.6. Powierzchnie lądowe Anglii o różnym przeznaczeniu. Źródło: Rocznik Statystyczny w Zakresie Użytkowania Terenu dla Anglii, 2005 [3b7zdf]

Światowe zużycie energii

Światowa konsumpcja energii wynosi 15 TW. Z tego 2 TW to prąd.

1 MJ	=	0,2778 kWh
1 GJ	=	277,8 kWh
1 toe (tona ekwiwalentu ropy)	=	11630 kWh
1 kcal	=	$1,163 \times 10^{-3}$ kWh
1 kWh	=	$3,6 \times 10^{-6}$ MJ
		$859,7$ kcal

Ramka I.7. Inne jednostki energii i mocy w przeliczeniu na kilowatogodziny i kilowatogodziny dziennie.

Czytanie liczników

A oto, jak możesz przeliczyć odczyty licznika gazowego na kilowatogodziny: wartość w **metrach sześciennych** pomnóż przez **11,42**, a **otrzymasz zużycie gazu w kWh**.

Wartości opałowe paliw

Surowa ropa naftowa: 37 MJ/l; 10,3 kWh/l.

Gaz ziemny: 38 MJ/m³ (metan ma gęstość 1,819 kg/m³); 10,6 kWh/m³.

1 tona węgla: 29,3 GJ; 8000 kWh.

Energia syntezy zwykłej wody: 1800 kWh na litr.

Więcej w tabeli 26.14 na str. 208 oraz tabeli D.3, str. 299.

Pojemności ciepłe

Pojemność cieplna powietrza wynosi 1 kJ/kg/°C, inaczej 29 J/mol/°C.

Gęstość powietrza to 1,2 kg/m³. Stąd też pojemność cieplna powietrza na jednostkę objętości wynosi 1,2 kJ/m³/°C.

Utajone ciepło parowania wody: 2257,92 kJ/kg. Pojemność cieplna pary wodnej: 1,87 kJ/kg/°C. Pojemność cieplna wody to 4,2 kJ/l/°C.

Gęstość pary wodnej to 0,590 kg/m³.

Ciśnienie

Ciśnienie atmosferyczne: 1 bar \cong 1 atmosfera \cong 10⁵ Pa (paskali). Ciśnienie wywierane przez 1000 m wody to 100 bar.

Pieniądze

Obliczając kwoty, przyjąłem następujący kurs: 1 EUR = 1,26 USD; 1 GBP = 1,85 USD. Kursy walut z połowy 2006 roku.

Współczynniki przeliczeniowe dla gazów cieplarnianych

Francja	83
Szwecja	87
Kanada	220
Austria	250
Belgia	335
Unia Europejska	353
Finlandia	399
Hiszpania	408
Japonia	483
Portugalia	525
Wielka Brytania	580
Luksemburg	590
Niemcy	601
USA	613
Holandia	652
Włochy	667
Irlandia	784
Grecja	864
Dania	881

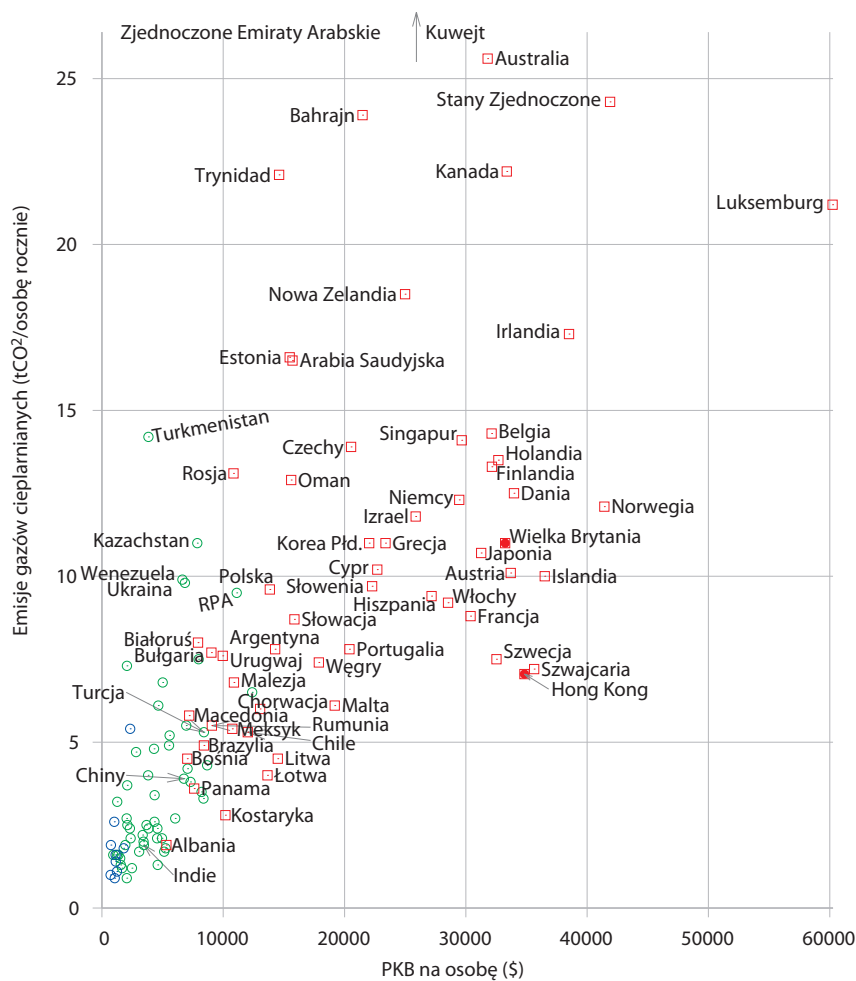
Tabela I.9. Intensywność emisyjna produkcji energii elektrycznej (g CO₂ na kWh prądu)

Rodzaj paliwa	emisje (g CO ₂ na kWh energii chemicznej)
gaz ziemny	190
gaz rafineryjny	200
etan	200
LPG	210
nafta lotnicza (kerozyna)	240
benzyna	240
olej napędowy/diesel	250
ciężki olej opałowy (mazut)	260
ropa naftowa	260
węgiel koksujący	300
węgiel	300
koks naftowy	340

	kWh/t-km
wodny śródlądowy	0,083
kolejowy	0,083
drogowy	0,75
lotniczy	2,8
rurociąg naftowy	0,056
rurociąg gazowy	0,47
morski: kontenerowiec	0,056
morski: masowiec	0,056
morski: tankowiec	0,028

Tabela I.8. Intensywność energetyczna różnych środków transportu w USA
Źródło: Weber i Matthews (2008)

Tabela I.10. Emisje związane ze spalaniem paliwa
Źródło: Wytyczne do raportu środowiskowego dla przedsiębiorstw raportujących emisje gazów cieplarnianych, opublikowane przez DEFRA



Rys. I.11. Emisje gazów cieplarnianych na głowę mieszkańca, w stosunku do PKB *per capita*, mierzonego parytetem siły nabywczej dolara amerykańskiego. Kwadraty oznaczają kraje o wysokim „wskaźniku rozwoju społecznego”, koła – o średnim lub niskim. Więcej na rys. 30.1 (str. 248) oraz rys. 18.4 (str. 115). Źródło: UNDP Human Development Report, 2007 [3av4s9]



Rys. I.12. Emisje gazów cieplarnianych na głowę mieszkańca w stosunku do siły nabywczej *per capita*. Linie wyznaczają intensywności emisyjne węgla i gazu ziemnego. Kwadraty oznaczają kraje o wysokim „wskaźniku rozwoju społecznego”, koła – o średnim lub niskim. Więcej na rys. 30.1 (str. 248) oraz rys. 18.4 (str. 115). – Źródło: UNDP Human Development Report, 2007.

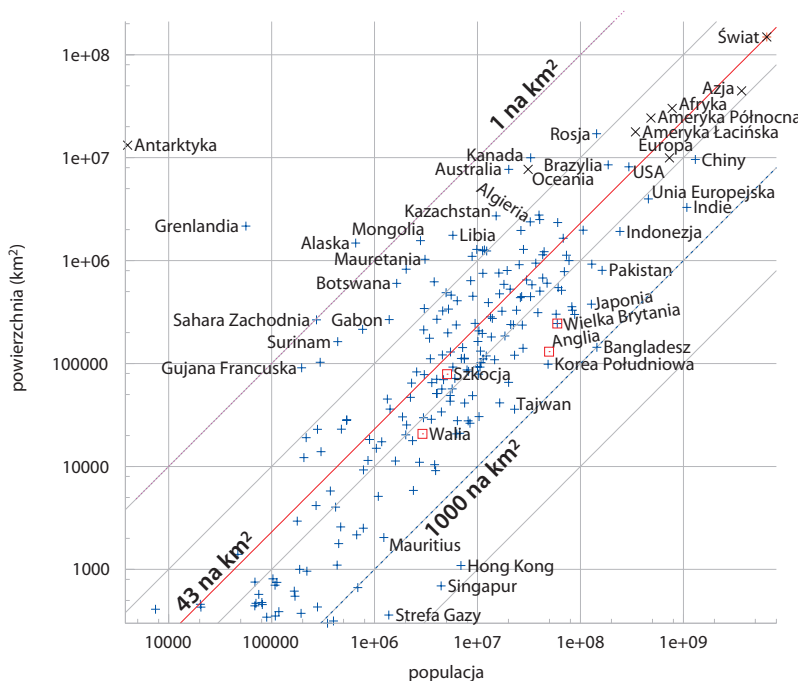
J Ludność i powierzchnie

Gęstość zaludnienia

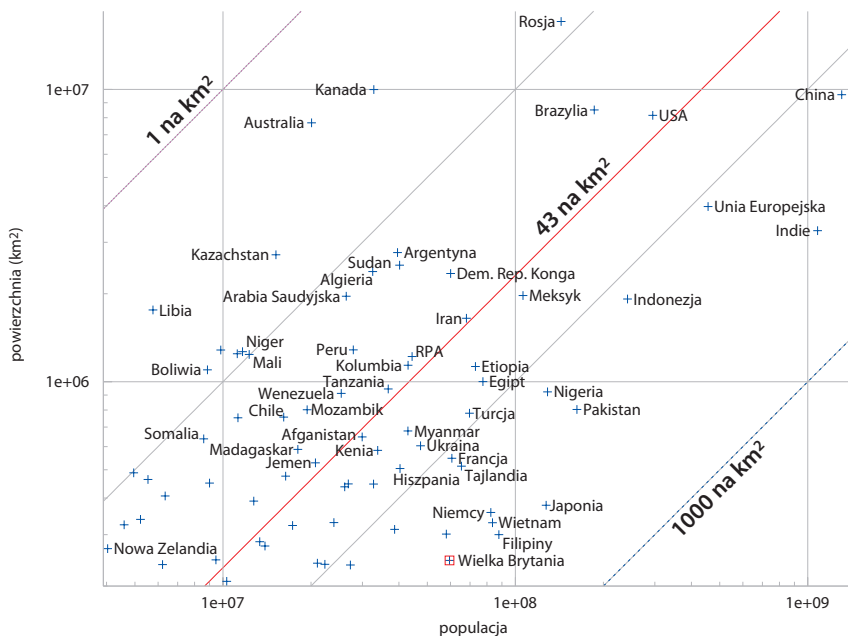
Rys. J.1 ilustruje powierzchnie różnych krajów i regionów w stosunku do ich liczby ludności. Linie przekątne oznaczają konkretne, stałe gęstości zaludnienia. Gęstość zaludnienia w Bangladeszu (linia druga od prawej) wynosi 1000 osób na kilometr kwadratowy. W Indiach, Anglii, Holandii i Japonii to jedna trzecia tej wartości, około 350 na km². W wielu krajach europejskich to około 100 na km². Dla Polski jest to 121 osób na km². Na drugim krańcu spektrum gęstość zaludnienia w Kanadzie, Australii i Libii wynosi około 3 osoby na km². Przekątna w środku wskazuje światową gęstość zaludnienia: 43 osoby na kilometr kwadratowy. USA nie odstają od tej średniej: mniej więcej tyle wynosi gęstość zaludnienia w 48 stanach (oprócz Hawajów i Alaski). Regiony o dużych powierzchniach i gęstości zaludnienia poniżej średniej światowej to Rosja, Kanada, Ameryka Łacińska, Sudan, Algieria i Arabia Saudyjska.

Niektóre z tych bogatych w powierzchnię krajów leżą stosunkowo blisko Wielkiej Brytanii (i dlatego Wielka Brytania mogłaby się z nimi zaprzyjaźnić). To Kazachstan, Libia, Arabia Saudyjska, Algieria i Sudan.

Te same dane zawiera tabela na str. 354.



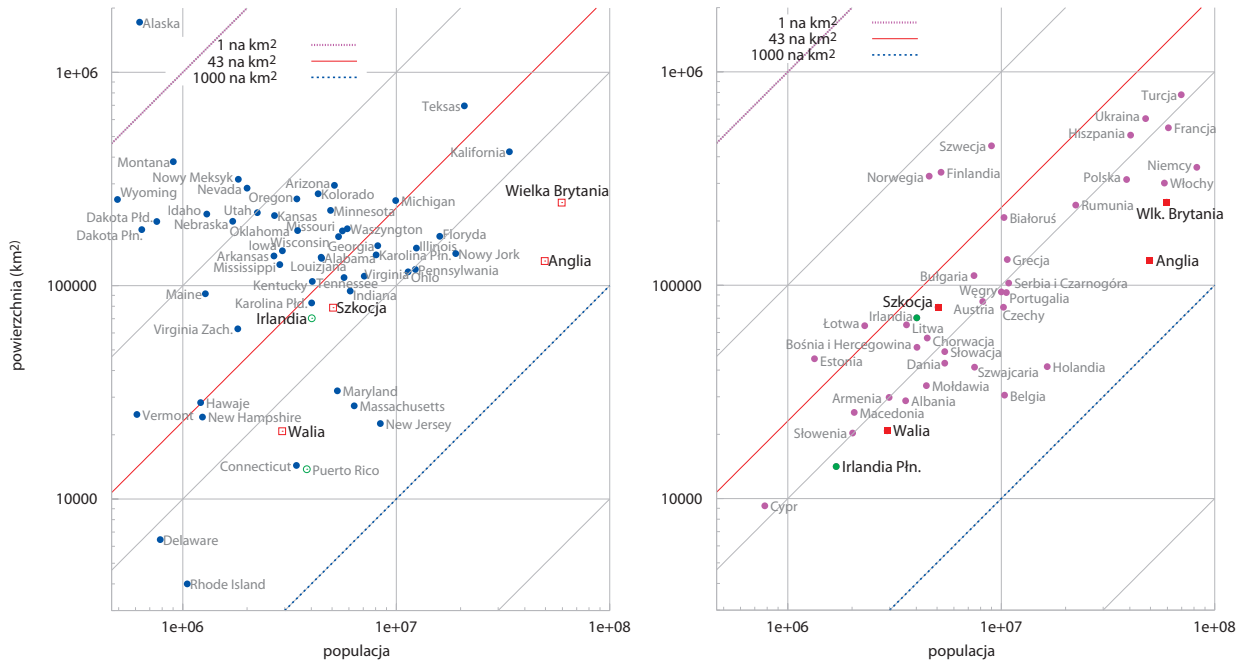
Rys. J.1. Liczba ludności oraz powierzchnie krajów i regionów na świecie. Obie skale są logarytmiczne. Każda linia ukośna wskazuje określoną gęstość zaludnienia; kraje o najwyższej gęstości zaludnienia mieszczą się nisko i na prawo, kraje o niższej gęstości zaludnienia – wyżej i na lewo.



Rys. J.2. Liczba ludności oraz powierzchnie krajów i regionów na świecie. Obie skale są logarytmiczne. Linie ukośne wyznaczają stałą gęstość zaludnienia. Rys. pokazuje więcej szczegółów fragmentu rys. J.1 (str. 351).

Region	Liczba ludności	Powierzchnia lądowa (km ²)	Osób na km ²	Powierzchnia na osobę (m ²)
Świat	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Azja	3 670 000 000	44 000 000	82	12 100
Afryka	778 000 000	30 000 000	26	38 600
Europa	732 000 000	9 930 000	74	13 500
Ameryka Płn.	483 000 000	24 200 000	20	50 200
Ameryka Łac.	342 000 000	17 800 000	19	52 100
Oceania	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Antarktyka	4 000	13 200 000		

Tabela J.3. Gęstości zaludnienia na poszczególnych kontynentach, ujęte graficznie na rys. J.1 i rys. J.2. Dane pochodzą z 2005 roku



Rys. J.4. Liczba ludności i powierzchnie stanów amerykańskich oraz krajów europejskich

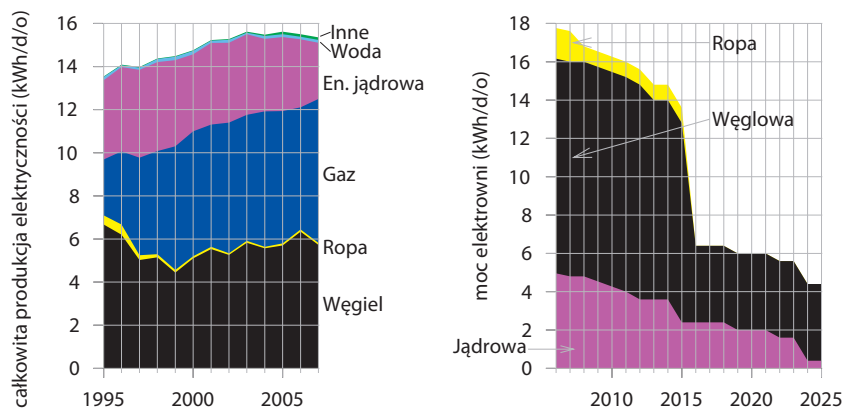
Region	Liczba ludności	Powierzchnia lądowa (km ²)	Osób na km ²	Powierzchnia na osobę (m ²)	Region	Liczba ludności	Powierzchnia lądowa (km ²)	Osób na km ²	Powierzchnia na osobę (m ²)
Afganistan	29 900 000	647 000	46	21 600	Litwa	3 590 000	65 200	55	18 100
Afryka	778 000 000	30 000 000	26	38 600	Lotwa	2 290 000	64 500	35	28 200
Alaska	655 000	1 480 000	0,44	2 260 000	Madagaskar	18 000 000	587 000	31	32 500
Albania	3 560 000	28 700	123	8 060	Mali	12 200 000	1 240 000	10	100 000
Algeria	32 500 000	2 380 000	14	73 200	Malta	398 000	316	1 260	792
Ameryka Łacińska	342 000 000	17 800 000	19	52 100	Mauretania	3 080 000	1 030 000	3	333 000
Ameryka Północna	483 000 000	24 200 000	20	50 200	Meksyk	106 000 000	1 970 000	54	18 500
Anglia	49 600 000	130 000	380	2 630	Moldawia	4 450 000	33 800	131	7 590
Angola	11 100 000	1 240 000	9	111 000	Mongolia	2 790 000	1 560 000	1,8	560 000
Antarktyda	4 000	13 200 000			Mozambik	19 400 000	801 000	24	41 300
Arabia Saudyjska	26 400 000	1 960 000	13	74 200	Myanmar	42 900 000	678 000	63	15 800
Argentyna	39 500 000	2 760 000	14	69 900	Namibia	2 030 000	825 000	2,5	406 000
Australia	20 000 000	7 680 000	2,6	382 000	Niemcy	82 400 000	357 000	230	4 330
Austria	8 180 000	83 800	98	10 200	Niger	11 600 000	1 260 000	9	108 000
Azja	3 670 000 000	44 500 000	82	12 100	Nigeria	128 000 000	923 000	139	7 170
Bangladesz	144 000 000	144 000	1 000	997	Norwegia	4 593 000	324 000	14	71 000
Belgia	10 000 000	31 000	340	2 945	Nowa Zelandia	4 030 000	268 000	15	66 500
Białoruś	10 300 000	207 000	50	20 100	Oceania	31 000 000	7 680 000	4	247 000
Boliwia	8 850 000	1 090 000	8	124 000	Pakistan	162 000 000	803 000	202	4 940
Bośnia i Hercegowina	4 020 000	51 100	79	12 700	Peru	27 900 000	1 280 000	22	46 000
Botswana	1 640 000	600 000	2,7	366 000	Polska	39 000 000	313 000	124	8 000
Brazylia	186 000 000	8 510 000	22	45 700	Portugalia	10 500 000	92 300	114	8 740
Bulgaria	7 450 000	110 000	67	14 800	Rep. Macedonii	2 040 000	25 300	81	12 300
Chile	16 100 000	756 000	21	46 900	Rep. Płd. Afryki	44 300 000	1 210 000	36	27 500
Chiny	1 300 000 000	9 590 000	136	7 340	Rep. Środkowoafrykańska	3 790 000	622 000	6	163 000
Chorwacja	4 490 000	56 500	80	12 500	Rosja	143 000 000	17 000 000	8	119 000
Czad	9 820 000	1 280 000	8	130 000	Rumunia	22 300 000	237 000	94	10 600
Czechy	10 200 000	78 800	129	7 700	Sahara Zachodnia	273 000	266 000	1	974 000
Dania	5 430 000	43 000	126	7 930	Serbia i Czarnogóra	10 800 000	102 000	105	9 450
Dem. Rep. Konga	60 000 000	2 340 000	26	39 000	Singapur	4 420 000	693	6 380	156
Egipt	77 500 000	1 000 000	77	12 900	Słowacja	5 430 000	48 800	111	8 990
Estonia	1 330 000	45 200	29	33 900	Słowenia	2 010 000	20 200	99	10 000
Etiopia	73 000 000	1 120 000	65	15 400	Somalia	8 590 000	637 000	13	74 200
Europa	732 000 000	9 930 000	74	13 500	Strefa Gazy	1 370 000	360	3 820	261
Filipiny	87 800 000	300 000	292	3 410	Sudan	40 100 000	2 500 000	16	62 300
Finlandia	5 220 000	338 000	15	64 700	Surinam	438 000	163 000	2,7	372 000
Francja	60 600 000	547 000	110	9 010	Szkocja	5 050 000	78 700	64	15 500
Grecja	10 600 000	131 000	81	12 300	Szwajcaria	7 480 000	41 200	181	5 510
Grenlandia	56 300	2 160 000	0,026	38 400 000	Szwecja	9 000 000	449 000	20	49 900
Hiszpania	40 300 000	504 000	80	12 500	Świat	6 440 000 000	148 000 000	43	23 100
Holandia	16 400 000	41 500	395	2 530	Tajlandia	65 400 000	514 000	127	7 850
Hong Kong	6 890 000	1 090	6 310	158	Tajwan	22 800 000	35 900	636	1 570
Indie	1 080 000 000	3 280 000	328	3 040	Tanzania	36 700 000	945 000	39	25 700
Indonezja	241 000 000	1 910 000	126	7 930	Turcja	69 600 000	780 000	89	11 200
Iran	68 000 000	1 640 000	41	24 200	Ukraina	47 400 000	603 000	78	12 700
Irlandia	4 010 000	70 200	57	17 500	Unia Europejska	496 000 000	4 330 000	115	8 720
Islandia	296 000	103 000	2,9	347 000	USA (bez Alaski)	295 000 000	8 150 000	36	27 600
Japonia	127 000 000	377 000	337	2 960	Walia	2 910 000	20 700	140	7 110
Jemen	20 700 000	527 000	39	25 400	Wenezuela	25 300 000	912 000	28	35 900
Kanada	32 800 000	9 980 000	3,3	304 000	Węgry	10 000 000	93 000	107	9 290
Kazachstan	15 100 000	2 710 000	6	178 000	Wietnam	83 500 000	329 000	253	3 940
Kenia	33 800 000	582 000	58	17 200	Włochy	58 100 000	301 000	192	5 180
Kolumbia	42 900 000	1 130 000	38	26 500	Zambia	11 200 000	752 000	15	66 800
Korea Południowa	48 400 000	98 400	491	2 030	Zjednoczone Królestwo	59 500 000	244 000	243	4 110
Libia	5 760 000	1 750 000	3,3	305 000					

Tabela J.5. Regiony i ich gęstości zaludnienia. Pogrubionym drukiem: obszary o ludności powyżej 50 milionów i wielkości powyżej 5 mln km². Te same dane wyrażono graficznie na rys. J.1 (str. 351). Dane pochodzą z 2005 roku

K Dzieje energii w Wielkiej Brytanii

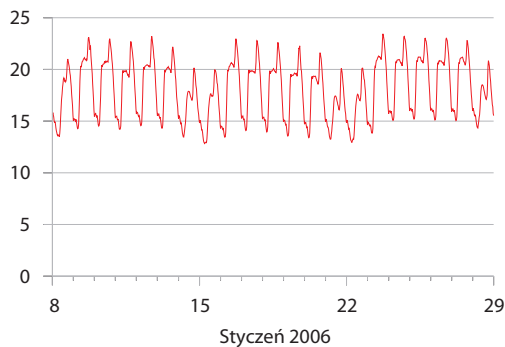
Paliwo pierwotne	kWh/o/d	kWh _{el} /o/d
Ropa	43	
Gaz ziemny	47	
Węgiel	20	
Atom	9	→ 3,4
Energetyka wodna		0,2
Inne źródła odnawialne		0,8

Tabela K.1. Pierwotne źródła energii w Wielkiej Brytanii (2004–2006)



Rys. K.2. Po lewej: podaż energii netto w Wielkiej Brytanii, w rozbięciu na źródła, w kWh na osobę dziennie (kolejne 0,9 kWh/d/o jest produkowane i zużywane przez same generatory).

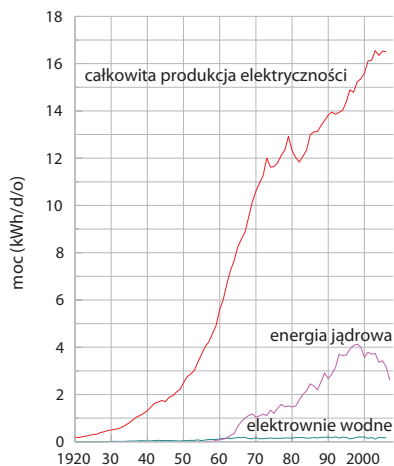
Po prawej: niedobory energii spowodowane zamknięciem brytyjskich elektrowni, według przewidywań koncernu energetycznego EDF. Wykres ilustruje przewidywaną moc elektrowni jądrowych, węglowych i na ropę naftową, w kilowatogodzinach na osobę dziennie. Moc to maksymalna możliwa produkcja źródeł.



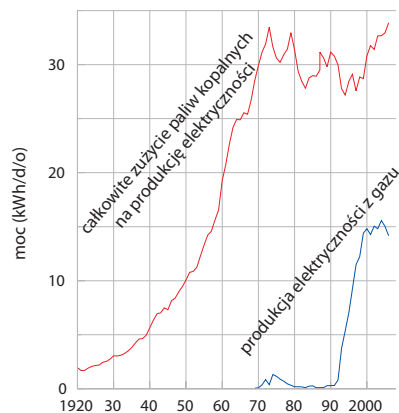
Rys. K.3. Zapotrzebowanie na prąd w Wielkiej Brytanii (w kWh na osobę dziennie) podczas dwóch zimowych tygodni 2006 roku. W styczniu szczyt zapotrzebowania przypada na godzinę 18 (jeżeli interesuje Cię krajowe zapotrzebowanie w GW, to szczytowe wartości wykresu, 24 kWh na osobę dziennie, odpowiadają 60 GW w skali całej Wielkiej Brytanii).

	2006	2007
„Zużycie początkowe” (pierwsze 2 kWh/d)	10,73 pensów /kWh	17,43 pensów /kWh
„Dalsze zużycie”	8,13 pensów /kWh	9,70 pensów /kWh

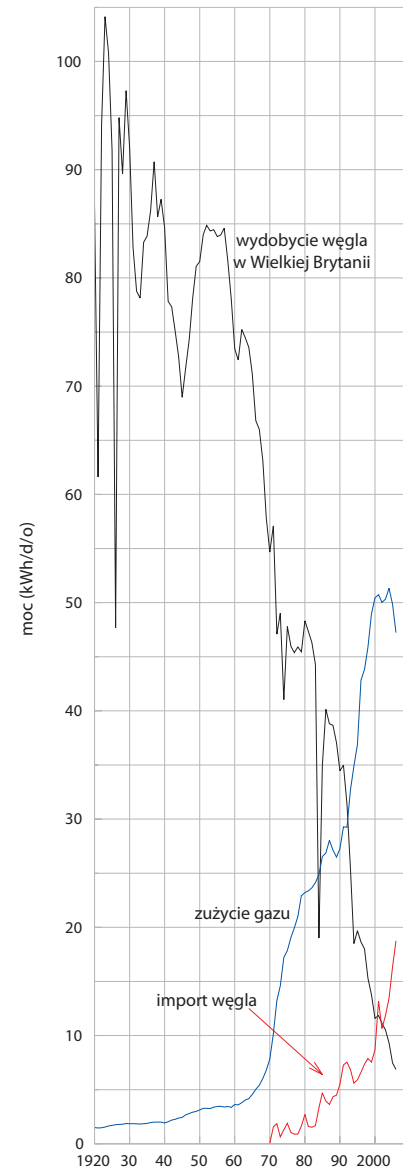
Tabela K.4. Opłaty za energię elektryczną klientów indywidualnych koncernu Powergen, z podatkiem włącznie (dla Cambridge, 2006, 2007)



Rys. K.5. Dzieje całkowitej produkcji prądu oraz produkcji prądu w elektrowniach wodnych i jądrowych w Wielkiej Brytanii. Moce wyrażono „na osobę”, dzieląc każdą przez 60 mln.



Rys. K.6. Dzieje brytyjskiego zużycia paliw kopalnych do produkcji prądu. Moce wyrażono „na osobę”, dzieląc każdą przez 60 mln.



Rys. K.7. Wydobycie i import węgla oraz zużycie gazu w Wielkiej Brytanii. Moce wyrażono „na osobę”, dzieląc każdą przez 60 mln.

Bibliografia

- AITCHISON, E. (1996). Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource. *Energy Conversion and Management*, 37(6/8):1111–1116. doi: doi:10.1016/0196-8904(95)00306-1. www.ingentaconnect.com/content/els/01968904/1996/00000037/00000006/art00306.
- AMOS, W. A. (2004). *Updated cost analysis of photobiological hydrogen production from Chlamydomonas reinhardtii green algae – milestone completion report*. www.nrel.gov/docs/fy04osti/35593.pdf.
- ANDERSON, K., BOWS, A., MANDER, S., SHACKLEY, S., AGNOLUCCI, P., and EKINS, P. (2006). *Decarbonising modern societies: Integrated scenarios process and workshops*. Technical Report 48, Tyndall Centre. www.tyndall.ac.uk/research/theme2/final_reports/t3_24.pdf.
- ARCHER, M. D. and BARBER, J. (2004). Photosynthesis and photoconversion. In M. D. Archer and J. Barber, editors, *Molecular to Global Photosynthesis*. World Scientific. ISBN 978-1-86094-256-3. www.worldscibooks.com/lifesci/p218.html.
- ASHWORTH, W. and PEGG, M. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 5, 1946–1982: the nationalized industry*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282958.
- ASPLUND, G. (2004). Sustainable energy systems with HVDC transmission. In *Power Engineering Society General Meeting*, volume 2, pages 2299–2303. IEEE. doi: 10.1109/PES.2004.1373296. www.trec-uk.org.uk/reports/HVDC_Gunnar_Asplund_ABB.pdf.
- ASSELBERGS, B., BOKHORST, J., HARMS, R., VAN HEMERT, J., VAN DER NOORT, L., TEN VELDEN, C., VERVUURT, R., WIJNEN, L., and VAN ZON, L. (2006). *Size does matter – the possibilities of cultivating jatropha curcas for biofuel production in Cambodia*. environmental.scum.org/biofuel/jatropha/.
- BAER, P. and MASTRANDREA, M. (2006). *High stakes: Designing emissions pathways to reduce the risk of dangerous climate change*. www.ippr.org/publicationsandreports/.
- BAHRMAN, M. P. and JOHNSON, B. K. (2007). The ABCs of HVDC transmission technology. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(2).
- BAINES, J. A., NEWMAN, V. G., HANNA, I. W., DOUGLAS, T. H., CARLYLE, W. J., JONES, I. L., EATON, D. M., and ZERONIAN, G. (1983). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 74:635–718.
- BAINES, J. A., NEWMAN, V. G., HANNA, I. W., DOUGLAS, T. H., CARLYLE, W. J., JONES, I. L., EATON, D. M., and ZERONIAN, G. (1986). Dinorwig pumped storage scheme. *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 80:493–536.
- BAKER, C., WALBANCKE, J., and LEACH, P. (2006). *Tidal lagoon power generation scheme in Swansea Bay*. www.dti.gov.uk/files/file30617.pdf. A report on behalf of the Dept. of Trade and Industry and the Welsh Development Agency.
- BAYER CROP SCIENCE. (2003). *Potential of GM winter oilseed rape to reduce the environmental impact of farming whilst improving farmer incomes*. tinyurl.com/5j99df.
- BICKLEY, D. T. and RYRIE, S. C. (1982). A two-basin tidal power scheme for the Severn estuary. In *Conf. on new approaches to tidal power*.
- BINDER, M., FALTENBACHER, M., KENTZLER, M., and SCHUCKERT, M. (2006). *Clean urban transport for Europe*. Deliverable D8 final report. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- BLACK and VEATCH. (2005). The UK tidal stream resource and tidal stream technology. Report prepared for the Carbon Trust Marine Energy Challenge. www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/tidalstream.htm.
- BLUNDEN, L. S. and Bahaj, A. S. (2007). Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proc. IMechE*, 221 Part A: 137–146.
- BONAN, G. B. (2002). *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. Cambridge Univ. Press. ISBN 9780521804769.
- BOYER, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218 (4571):443–448. doi: 10.1126/science.218.4571.443.
- BRASLOW, A. L. (1999). *A history of suction-type laminar-flow control with emphasis on flight research*. Number 13, in *Monographs in Aerospace History*. NASA. www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88792mainLaminar.pdf.
- BROECKER, W. S. and KUNZIG, R. (2008). *Fixing Climate: What Past Climate Changes Reveal About the Current Threat—and How to Counter It*. Hill and Wang. ISBN 0809045028.
- BURNHAM, A., WANG, M., and WU, Y. (2007). *Development and applications of GREET 2.7 — the transportation vehicle-cycle model*. www.transportation.anl.gov/software/GREET/publications.html.
- CARBON TRUST. (2007). Micro-CHP accelerator – interim report. Technical Report CTC726. www.carbontrust.co.uk/publications/publicationdetail.htm?productid=CTC726.
- CARLSSON, L. (2002). „Classical” HVDC: still continuing to evolve. *Modern Power Systems*.
- CARTWRIGHT, D. E., EDDEN, A. C., SPENCER, R., and VASSIE, J. M. (1980). The tides of the northeast Atlantic Ocean. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 298(1436):87–139.
- CATLING, D. T. (1966). *Principles and practice of train performance applied to London Transport’s Victoria line*. Paper 8, Convention on Guided Land Transport (London, 27–28 October 1966).
- CHARLIER, R. H. (2003a). Sustainable co-generation from the tides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:187213.
- CHARLIER, R. H. (2003b). A „sleeper” awakes: tidal current power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7:515529.
- CHARNEY, J. G., ARAKAWA, A., BAKER, D. J., BOLIN, B., DICKINSON, R. E., GOODY, R. M., LEITH, C. E., STOMMEL, H. M., and WUNSCH, C. I. (1979). *Carbon dioxide and climate: A scientific assessment*. www.nap.edu/catalog.php?recordid=12181.
- CHISHOLM, S. W., FALKOWSKI, P. G., and CULLEN, J. J. (2001). *Discrediting ocean fertilisation*. *Science*, 294(5541):309–310.
- CHITRAKAR, R., KANO, H., MIYAI, Y., and Ooi, K. (2001). Recovery of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent (H_{1.6}Mn_{1.6}O₄) derived from Li_{1.6}Mn_{1.6}O₄. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40(9):2054–2058. pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/iecred/2001/140/09/abs/ie000911h.html.
- CHURCH, R. A., HALL, A., and KANEFSKY, J. (1986). *The history of the British coal industry. Vol. 3, 1830–1913: Victorian pre-eminence*. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282842.

- COHEN, B. L. (1983). Breeder reactors: A renewable energy source. *American Journal of Physics*, 51(1):75–76. sustainablenuclear.org/PADs/pad11983cohen.pdf.
- COLEY, D. (2001). Emission factors for walking and cycling. www.centres.ex.ac.uk/cee/publications/reports/91.html.
- COMMITTEE ON RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT. (2006). *Managing our radioactive waste safely*. www.corwm.org.uk/Pages/Current%20Publications/700%20-%20CoRWM%20July%202006%20Recommendations%20to%20Government.pdf.
- CUTE. (2006). *Clean urban transport for Europe. detailed summary of achievements*. www.fuel-cell-bus-club.com/.
- DAVID, J. and HERZOG, H. (2000). *The cost of carbon capture. sequestration.mit.edu/pdf/David and Herzog.pdf*. Presented at the Fifth International Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia, August 13 - August 16 (2000).
- DAVIDSON, E. A. and JANSSENS, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climatechange. *Nature*, 440:165–173. doi: doi:10.1038/nature04514. www.nature.com/nature/journal/v440/n7081/full/nature04514.html.
- DEFFEYES, K. S. and MACGREGOR, I. D. (1980). World uranium resources. *Scientific American*, pages 66–76.
- DENHOLM, P., KULCINSKI, G. L., and HOLLOWAY, T. (2005). Emissions and energy efficiency assessment of baseload wind energy systems. *Environ Sci Technol*, 39(6):1903–1911. ISSN 0013-936X. www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&listuids=15819254.
- DENISON, R. A. (1997). Life-cycle assessment for paper products. In E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, and P. Schulze, editors, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proc. a Symposium*. National Academy Press. ISBN 0309057450. books.nap.edu/openbook.php?recordid=5734.
- DENNIS, C. (2006). Solar energy: Radiation nation. *Nature*, 443:23–24. doi: 10.1038/443023a.
- DEPT. FOR TRANSPORT. (2007). *Transport statistics Great Britain*. www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/.
- DEPT. OF DEFENSE. (2008). *More fight – less fuel*. Report of the Defense Science Board Task Force on DoD Energy Strategy.
- DEPT. OF TRADE AND INDUSTRY. (2004). *DTI Atlas of UK marine renewable energy resources*. www.offshore-sea.org.uk/.
- DEPT. OF TRADE AND INDUSTRY. (2002a). *Energy consumption in the United Kingdom*. www.berr.gov.uk/files/file11250.pdf.
- DEPT. OF TRADE AND INDUSTRY. (2002b). *Future offshore*. www.berr.gov.uk/files/file22791.pdf.
- DEPT. OF TRADE AND INDUSTRY. (2007). *Impact of banding the renewables obligation – costs of electricity production*. www.berr.gov.uk/files/file39038.pdf.
- DESSLER, A. E. and PARSON, E. A. (2006). *The Science and Politics of Global Climate Change – A Guide to the Debate*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 9780521539418.
- DI PRAMPERO, P. E., CORTILI, G., MOGNONI, P., and SAIBENE, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *J. Appl. Physiology*, 47:201–206. jap.physiology.org/cgi/content/abstract/47/1/201.
- DIAMOND, J. (2004). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Penguin.
- E4TECH. (2007). *A review of the UK innovation system for low carbon road transport technologies*. www.dft.gov.uk/pgr/scienceresearch/technology/lctis/e4techlcpdf.
- ECKHART, D. (1995). Nuclear fuels for low-beta fusion reactors: Lithium resources revisited. *Journal of Fusion Energy*, 14(4):329–341. ISSN 0164-0313 (Print) 1572-9591 (Online). doi: 10.1007/BF02214511. www.springerlink.com/content/35470543rj8t2gk1/.
- EDDINGTON, R. (2006). *Transport's role in sustaining the UK's productivity and competitiveness*.
- EDEN, R. and BENDING, R. (1985). *Gas/electricity competition in the UK*. Technical Report 85/6, Cambridge Energy Research Group, Cambridge.
- ELLIOTT, D. L., WENDELL, L. L., and GOWER, G. L. (1991). *An assessment of windy land area and wind energy potential in the contiguous United States*. www.osti.gov/energycitations/servlet/purl/5252760-ccuOpk/.
- ENERGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT LTD. (2003). *English partnerships sustainable energy review*. www.englishpartnerships.co.uk.
- ERDINCLER, A. U. and VESILIND, P. A. (1993). Energy recovery from mixed waste paper. *Waste Management & Research*, 11(6):507–513. doi: 10.1177/0734242X9301100605.
- ETHERIDGE, D., STEELE, L., LANGENFELDS, R., FRANCEY, R., BARNOLA, J.-M., and MORGAN, V. (1998). Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html.
- EUROPEAN COMMISSION. (2007). *Concentrating solar power - from research to implementation*. www.solarpaces.org/Library/library.htm.
- EVANS, D. G. (2007). *Liquid transport biofuels – technology status report*. www.nnfcc.co.uk/.
- EVANS, R. K. (2008). *An abundance of lithium*. www.worldlithium.com.
- FABER, T. E. (1995). *Fluid dynamics for physicists*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- FAIMAN, D., RAVIV, D., and ROSENSTREICH, R. (2007). Using solar energy to arrest the increasing rate of fossil-fuel consumption: The southwestern states of the USA as case studies. *Energy Policy*, 35: 567576
- FIES, B., PETERSON, T., and POWICKI, C. (2007). *Solar photovoltaics – expanding electric generation options*. [mydocs.epri.com/docs/SEIG/1016279 Photovoltaic White Paper 1207.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/SEIG/1016279%20Photovoltaic%20White%20Paper%201207.pdf).
- FISHER, K., WALL'EN, E., LAENEN, P. P., and COLLINS, M. (2006). *Battery waste management life cycle assessment*. www.defra.gov.uk/environment/waste/topics/batteries/pdf/erm-lcareport0610.pdf.
- FLATHER, R. A. (1976). *A tidal model of the north-west European continental shelf*. *Memoires Société Royale des Sciences de Liège*, 10(6):141–164.
- FLINN, M. W. and STOKER, D. (1984). *The history of the British coal industry*. Vol. 2, 1700–1830: The Industrial Revolution. Clarendon, Oxford. ISBN 0198282834.
- FRANCIS, G., EDINGER, R., and BECKER, K. (2005). A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socioeconomic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations.

- Natural Resources Forum, 29(1):12–24. doi: 10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x.
- FRANKLIN, J. (2007). *Principles of cycle planning*. www.cyclenetwork.org.uk/papers/071119principles.pdf.
- FREESTON, D. H. (1996). *Direct uses of geothermal energy 1995*. geoheat.oit.edu/bulletin/bull17-1/art1.pdf.
- GABRIELLI, G. and VON K'ARM'AN, T. (1950). What price speed? *Mechanical Engineering*, 72(10).
- GARRETT, C. and CUMMINS, P. (2005). The power potential of tidal currents in channels. *Proc. Royal Society A*, 461(2060):2563–2572. dx.doi.org/10.1098/rspa.2005.1494.
- GARRETT, C. and CUMMINS, P. (2007). The efficiency of a turbine in a tidal channel. *J Fluid Mech*, 588:243–251. journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=1346064.
- GELLINGS, C. W. and PARMENTER, K. E. (2004). Energy efficiency in fertilizer production and use. In C. W. Gellings and K. Blok, editors, *Efficient Use and Conservation of Energy, Encyclopedia of Life Support Systems*. Eolss Publishers, Oxford, UK. www.eolss.net.
- GERMAN AEROSPACE CENTER (DLR) INSTITUTE OF TECHNICAL THERMODYNAMICS SECTION SYSTEMS ANALYSIS AND TECHNOLOGY ASSESSMENT. (2006). *Concentrating solar power for the Mediterranean region*. www.dlr.de/lt/med-csp. Study commissioned by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany.
- GOODSTEIN, D. (2004). *Out of Gas*. W. W. Norton and Company, New York. ISBN 0393058573.
- GREEN, J. E. (2006). Civil aviation and the environment – the next frontier for the aerodynamicist. *Aeronautical Journal*, 110(1110): 469–486.
- GRUBB, M. and NEWBERY, D. (2008). Pricing carbon for electricity generation: national and international dimensions. In M. Grubb, T. Jamash, and M. G. Pollitt, editors, *Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics and Policy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- GUMMER, J., GOLDSMITH, Z., PECK, J., EGGAR, T., HURD, N., MIRAJ, A., NORRIS, S., NORTHCOTE, B., OLIVER, T., STRONG, D., TWITCHEN, K., and WILKIE, K. (2007). *Blueprint for a green economy*. www.qualityoflifechallenge.com.
- HALKEMA, J. A. (2006). *Wind energy: Facts and fiction*. www.countryguardian.net/halkema-windenergyfactfiction.pdf.
- HAMMOND, G. and JONES, C. (2006). *Inventory of carbon & energy (ICE)*. www.bath.ac.uk/mech-eng/serf/embodied/. version 1.5a Beta.
- HAMMONS, T. J. (1993). *Tidal power*. Proc. IEEE, 8(3):419–433.
- HANSEN, J., SATO, M., KHARECHA, P., RUSSELL, G., LEA, D., and SIDDALL, M. (2007). Climate change and trace gases. *Phil. Trans. Royal. Soc. A*, 365:1925–1954. doi: 10.1098/rsta.2007.2052. pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2007/Hansen etal 2.html.
- HASTINGS, R. and WALL, M. (2006). *Sustainable Solar Housing: Strategies And Solutions*. Earthscan. ISBN 1844073254.
- HATCHER, J. (1993). *The History of the British Coal Industry: Towards the Age of Coal: Before 1700 Vol 1*. Clarendon Press.
- HEATON, E., VOIGT, T., and LONG, S. (2004). A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature, and water. *Biomass and Bioenergy*, 27:21–30.
- HELM, D., SMALE, R., and PHILLIPS, J. (2007). Too good to be true? *The UK's climate change record*. www.dieterhelm.co.uk/publications/Carbon record 2007.pdf.
- HELWEG-LARSEN, T. and BULL, J. (2007). Zero carbon Britain – alternative energy strategy. zerocarbonbritain.com/.
- HERRING, J. (2004). Uranium and thorium resource assessment. In C. J. Cleveland, editor, *Encyclopedia of Energy*. Boston Univ., Boston, USA. ISBN 0-12-176480-X.
- HERZOG, H. (2003). *Assessing the feasibility of capturing CO₂ from the air*. web.mit.edu/coal/working folder/pdfs/Air Capture Feasibility.pdf.
- HERZOG, H. (2001). What future for carbon capture and sequestration? *Environmental Science and Technology*, 35:148A–153A. sequestration.mit.edu/.
- HIRD, V., EMERSON, C., NOBLE, E., LONGFIELD, J., WILLIAMS, V., GOETZ, D., HOSKINS, R., PAXTON, A., and DUPEE, G. (1999). *Still on the road to ruin? An assessment of the debate over the unnecessary transport of food, five years on from the food miles report*.
- HODGSON, P. (1999). *Nuclear Power, Energy and the Environment*. Imperial College Press.
- HOPFIELD, J. J. and GOLLUB, J. (1978). Introduction to solar energy. www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/solar/HopfieldGollub78/scan.html.
- HORIE, H., TANJO, Y., MIYAMOTO, T., and KOGA, Y. (1997). Development of a lithium-ion battery pack system for EV. *JSAE Review*, 18 (3):295–300.
- HPTCJ. (2007). *Heat pumps: Long awaited way out of the global warming*. www.hptcj.or.jp/about e/contribution/index.html.
- INDERMUHLE, A., STOCKER, T., JOOS, F., FISCHER, H., SMITH, H., WAHLEN, M., DECK, B., MASTROIANNI, D., TSCHUMI, J., BLUNIER, T., MEYER, R., and STAUFFER, B. (1999). Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, 398:121–126.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2001). *Things that go blip in the night – standby power and how to limit it*. www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/blipinthenight01.pdf.
- JACKSON, P. and KERSHAW, S. (1996). Reducing long term methane emissions resulting from coal mining. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):801–806. doi: 10.1016/0196-8904(95)00259-6.
- JEVONS, W. S. (1866). *The Coal Question; An Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines*. Macmillan and Co., London, second edition. oll.libertyfund.org/.
- JONES, I. S. F. (2008). *The production of additional marine protein by nitrogen nourishment*. www.oceanourishment.com/files/Jc08.pdf.
- JONES, P. M. S. (1984). *Statistics and nuclear energy. The Statistician*, 33(1):91–102. www.jstor.org/pss/2987717.
- JUDD, B., HARRISON, D. P., and JONES, I. S. F. (2008). Engineering ocean nourishment. In *World Congress on Engineering WCE 2008*, pages 1315–1319. IAENG. ISBN 978-988-98671-9-5.
- JUNIPER, T. (2007). *How Many Lightbulbs does it take To Change a Planet?* Quercus, London.
- KAMMEN, D. M. and HASSENZAHL, D. M. (1999). *Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving*. Princeton Univ. Press.

- KANEKO, T., SHIMADA, M., KUJIRAOKA, S., and KOJIMA, T. (2004). Easymaintenance and environmentally-friendly train traction system. *Hitachi Review*, 53(1):15–19. www.hitachi.com/ICSFiles/afiedfile/2004/05/25/r2004_01_103.pdf.
- KEELING, C. and WHORF, T. (2005). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.
- KEITH, D. W., HA-DUONG, M., and STOLAROFF, J. K. (2005). Climate strategy with CO₂ capture from the air. *Climatic Change*. doi: 10.1007/s10584-005-9026-x. www.ucalgary.ca/~keith/papers/51.Keith.2005.ClimateStratWithAirCapture.e.pdf.
- KING, J. (2007). *The King review of low-carbon cars. Part I: the potential for CO₂ reduction*. hm-treasury.gov.uk/king.
- KING, J. (2008). *The King review of low-carbon cars. Part II: recommendations for action*. hm-treasury.gov.uk/king.
- KOOMEY, J. G. (2007). *Estimating total power consumption by servers in the US and the world*. blogs.business2.com/greenwombat/files/serverpowerusecomplete-v3.pdf.
- KOWALIK, Z. (2004). Tide distribution and tapping into tidal energy. *Oceanologia*, 46(3):291–331.
- KUEHR, R. (2003). *Computers and the Environment: Understanding and Managing their Impacts (Eco-Efficiency in Industry and Science)*. Springer. ISBN 1402016808.
- LACKNER, K. S., GRIMES, P., and ZIOCK, H.-J. (2001). Capturing carbon dioxide from air. www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbonseq/7b1.pdf. Presented at First National Conf. on Carbon Sequestration, Washington DC.
- LAWSON, B. (1996). Building materials, energy and the environment: Towards ecologically sustainable development. Layzell, D. B., Stephen, J., and Wood, S. M. (2006). *Exploring the potential for biomass power in Ontario*. www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf.
- LE QUÉRÉ, C., RÖDENBECK, C., BUITENHUIS, E., CONWAY, T. J., LANGENFELDS, R., GOMEZ, A., LABUSCHAGNE, C., RAMONET, M., NAKAZAWA, T., METZL, N., GILLET, N., and HEIMANN, M. (2007). Saturation of the southern ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science*, 316:1735–1738. doi: 10.1126/science.1136188. lgmacweb.env.uea.ac.uk/e415/publications.html.
- LEMOFOUET-GATSI, S. (2006). *Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors*. PhD thesis, EPFL. library.epfl.ch/theses/?nr=3628.
- LEMOFOUET-GATSI, S. and RUFER, A. (2005). *Hybrid energy systems based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking*. leiwwww.epfl.ch/publications/lemofouet_rufer_epe_05.pdf.
- LOMBORG, B. (2001). *The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 0-521-80447-7.
- MABEE, W. E., SADDLER, J. N., NIELSEN, C., HENRIK, L., and STEEN JENSEN, E. (2006). *Renewable-based fuels for transport*. www.risoe.dk/risupubl/Energy-report5/ris-r-1557_49-52.pdf. Riso Energy Report 5.
- MACDONALD, J. M. (2008). The economic organization of US broiler production. www.ers.usda.gov/Publications/EIB38/EIB38.pdf.
- Economic Information Bulletin No. 38. Economic Research Service, US Dept. of Agriculture.
- MACDONALD, P., STEDMAN, A., and SYMONS, G. (1992). The UK geothermal hot dry rock R&D programme. In *Seventeenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- MACKAY, D. J. C. (2007a). *Enhancing electrical supply by pumped storage in tidal lagoons*. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/Lagoons.html.
- MACKAY, D. J. C. (2007b). *Under-estimation of the UK tidal resource*. www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/abstracts/TideEstimate.html.
- MACLEAY, I., HARRIS, K., and MICHAELS, C. (2007). *Digest of United Kingdom energy statistics 2007*. www.berr.gov.uk.
- MALANIMA, P. (2006). Energy crisis and growth 1650–1850: the Europeandeviation in a comparative perspective. *Journal of Global History*, 1:101–121. doi: 10.1017/S1740022806000064.
- MARLAND, G., BODEN, T., and ANDRES, R. J. (2007). Global, regional, and national CO₂ emissions. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. (2006). *The future of geothermal energy*. geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf.
- MCBRIDE, J. P., MOORE, R. E., WITHERSPOON, J. P., and BLANCO, R. E. (1978). Radiological impact of airborne effluents of coal and nu clear plants. *Science*, 202(4372):1045–1050. doi: 10.1126/science.202.4372.1045.
- MEADOWS, M. (1996). Estimating landfill methane emissions. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8):1099–1104. doi: 10.1016/0196-8904(95)00304-5. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer, editors. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN 978-0-521-68551-1. www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm.
- MILLS, D. R. and LI ÈVRE, P. L. (2004). *Competitive solar electricity*. www.ausra.com/pdfs/PaperCompetitiveSolarElectricity.pdf.
- MILLS, D. R. and MORGAN, R. G. (2008). *Solar thermal electricity as the primary replacement for coal and oil in US generation andtransportation*. www.ausra.com/technology/reports.html.
- MILLS, D. R. and MORRISON, G. L. (2000). Compact Linear FresnelReflector solar thermal powerplants. *Solar Energy*, 68(3):263–283. doi: 10.1016/S0038-092X(99)00068-7.
- MILLS, D. R., LE LI ÈVRE, P., and MORRISON, G. L. (2004). *First results from Compact Linear Fresnel Reflector installation*. solarheatpower.veritel.com.au/MILLS_CLFR_ANZSES_FINAL.pdf.
- Mindl, P. (2003). Hybrid drive super-capacitor energy storage calculation. www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap6_EDPE.pdf.
- MOLLISON, D. (1986). Wave climate and the wave power resource. In D. Evans and A. de O. Falcao, editors, *Hydrodynamic of Ocean Wave-Energy Utilization*, pages 133–156, Berlin. Springer. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- MOLLISON, D. (1991). The UK wave power resource. In *Wave Energy (Institution of Mechanical Engineers – Seminar)*, pages 1–6. John Wiley & Sons. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.

- MOLLISON, D., BUNEMAN, O. P., and SALTER, S. H. (1976). Wave power availability in the NE Atlantic. *Nature*, 263(5574):223–226. www.ma.hw.ac.uk/~denis/wave.html.
- MONTEITH, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 281:277–294.
- NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH. (2001). NBER macrohistory database. www.nber.org/databases/macrophistory/contents/.
- NEFFEL, A., FRIEDLI, H., MOOR, E., LTSCHER, H., OESCHGER, H., SIEGENTHALER, U., and STAUFFER, B. (1994). Historical CO₂ record from the Siple station ice core. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Dept. of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. cdiac.ornl.gov/trends/co2/siple.htm.
- NETHERLANDS ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AGENCY. (2006). History database of the global environment. www.mnp.nl/hyde/.
- NICKOL, C. L. (2008). Silent Aircraft Initiative concept risk assessment. ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/200800124972008011089.pdf.
- NORRSTRÖM, H. (1980). Low waste technology in pulp and paper industries. *Pure & Appl. Chem.*, 52:1999–2004. www.iupac.org/publications/pac/1980/pdf/5208x1999.pdf.
- NUTTALL, W. J. (2004). *Nuclear Renaissance*. Institute of Physics Publishing.
- OECD Nuclear Energy Agency. (2006). *Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in perspective*. OECD Publishing. ISBN 9264028064. books.google.com/books?id=HIT1o985uKYC.
- ONGENA, J. and VAN OOST, G. (2006). Energy for future centuries. Will fusion be an inexhaustible, safe and clean energy source? www.fusie-energie.nl/artikelen/ongena.pdf.
- OSWALD, J., RAINE, M., and ASHRAF-BALL, H. (2008). Will British weather provide reliable electricity? *Energy Policy*, in press. doi: 10.1016/j.enpol.2008.04.03.
- PRICE, R. and BLAISE, J. (2002). Nuclear fuel resources: Enough to last? www.ingentaconnect.com/content/oecl/16059581/2002/00000020/0000002/6802021e.
- PUTT, R. (2007). Algae as a biodiesel feedstock: A feasibility assessment. www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/algae.pdf.
- QUAYLE, R. G. and CHANGERY, M. J. (1981). Estimates of coastal deepwater wave energy potential for the world. *Oceans*, 13:903–907. ieeexplore.ieee.org/iel6/8271/25889/01151590.pdf.
- RICE, T. and OWEN, P. (1999). *Decommissioning the Brent Spar*. Taylor and Francis.
- RICHARDS, B. S. and WATT, M. E. (2007). Permanently dispelling a myth of photovoltaics via the adoption of a new net energy indicator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(1):162172. www.sciencedirect.com/science/journal/13640321.
- RICHARDS, H. G., PARKER, R. H., GREEN, A. S. P., JONES, R. H., NICHOLLS, J. D. M., NICOL, D. A. C., RANDALL, M. M., RICHARDS, S., STEWART, R. C., and WILLIS-RICHARDS, J. (1994). The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985–1988). *Geothermics*, 23(2):73–109. ISSN 0375-6505.
- RIDLEY, T. M. and CATLING, D. T. (1982). *The energy implications of the design of mass transit railways*. Presented at Tunnelling '82 (Third International Symposium), Brighton.
- ROGNER, H.-H. (2000). Energy resources. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 5. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- ROSS, A. (2008). *The Loch Sloy hydro-electric scheme 1950*. www.arrocharheritage.com/LochSloyHydroElectricScheme.htm.
- ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION. (2004). *Biomass as a renewable energy source*. www.rcep.org.uk.
- ROYAL SOCIETY WORKING GROUP ON BIOFUELS. (2008). *Sustainable biofuels: prospects and challenges*. royalsociety.org. Policy document 01/08.
- RUBBIA, C., RUBIO, J., BUONO, S., CARMINATI, F., FIÉTIÉRI, N., GALVEZ, J., GELÈS, C., KADI, Y., KLAPISCH, R., MANDRILLON, P., REVOL, J., and ROCHE, C. (1995). *Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier*. Technical Report CERN/AT/95-44 (ET), European Organization for Nuclear Research. doc.cern.ch/archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf.
- RUDDLELL, A. (2003). *Investigation on storage technologies for intermittent renewable energies: Evaluation and recommended r&d strategy*. www.itpower.co.uk/investire/pdfs/flywheelrep.pdf.
- RYDH, C. J. and KARLSTRÖM, M. (2002). Life cycle inventory of recycling portable nickel-cadmium batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 34:289–309. homepage.te.hik.se/personal/tryca/battery/abstracts.htm.
- SALTER, S. H. (2005). *Possible under-estimation of the UK tidal resource*. www.berr.gov.uk/files/file31313.pdf. Submission for DTI Energy Review.
- SCHLEHNHUBER, H. J., CRAMER, W., NAKICENOVIC, N., WIGLEY, T., and YOHE, G. (2006). *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge Univ. Press. www.defra.gov.uk/environment/climatechange/intemat/pdf/avoid-dangercc.pdf.
- SCHIERMEIER, Q., TOLLEFSON, J., SCULLY, T., WITZE, A., and MORTON, O. (2008). Energy alternatives: Electricity without carbon. *Nature*, 454:816–823. doi: 10.1038/454816a.
- SCHLAICH, J., BERGERMANN, R., SCHIEL W, and WEINREBE G (2005). „Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems – Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation”. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(1):117–124. doi: 10.1115/1.1823493.
- SCHLAICH J, SCHIEL W. (2001), *Solar Chimneys*. in RA Meyers (ed), *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 3rd Edition, Academic Press, London. ISBN 0-12-227410-5. www.solarmillennium.de/pdf/SolarCh.pdf
- SCHUILING, R. and KRIJGSMAN, P. (2006). Enhanced weathering: an effective and cheap tool to sequester CO₂. *Climatic Change*, 74(1-3) 349–354.
- S. I. Schwartz, editor. (1998). *Atomic Audit: Costs and Consequences of US Nuclear Weapons Since 1940*. Brookings Institution Press, Washington, D.C. www.brook.edu/fp/projects/nucwcost/schwartz.htm.
- SEKO, N., KATAKAL, A., HASEGAWA, S., TAMADA, M., KASAI, N., TAKEDA, H., SUGO, T., and SAITO, K. (2003). Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system. *Nuclear Technology*, 144(2):274–278.
- SHAPOURI, H., DUFFIELD, J. A., and GRABOSKI, M. S. (1995). *Estimating the net energy balance of corn ethanol*. www.ethanol-gec.org/corn_eth.htm. United States Dept. of Agriculture Agricultural Economic Report Number 721.

- SHARMAN, H. (2005). Why wind power works for Denmark. *Proc. ICE Civil Engineering*, 158:6672. incoteco.com/upload/CIEN.158.2.66.pdf.
- SHAW, T. L. and WATSON, M. J. (2003a). The effects of pumping on the energy potential of a tidal power barrage. *Engineering Sustainability*, 156(2):111–117. ISSN 1478-4637. doi: 10.1680/ensu.156.2.111.37018.
- SHAW, T. L. and WATSON, M. J. (2006). *Flexible power generation from a Severn barrage*. www.dti.gov.uk/files/file31332.pdf.
- SHAW, T. L. and WATSON, M. J. (2003b). Flexible power generation from the tides. *Engineering Sustainability*, 156(2):119–123. ISSN 1478-4629.
- SHEPHERD, D. W. (2003). *Energy Studies*. Imperial College Press.
- SHOCKLEY, W. and QUEISSER, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p - n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3):510–519.
- SHYY, W., BERG, M., and LJUNGVIST, D. (1999). Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 35(5):455–505.
- SIEGENTHALER, U., MONNIN, E., KAWAMURA, K., SPAHNI, R., SCHWANDER, J., STAUFFER, B., STOCKER, T., BARNOLA, J.-M., and FISCHER, H. (2005). Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO₂ changes during the past millennium. *Tellus B*, 57(1):51–57. doi: 10.1111/j.1600-0889.2005.00131.x. [ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/maud/edml-co2-2005.xls](http://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/maud/edml-co2-2005.xls).
- SIMS, R., SCHOCK, R., ADEGBULULGBE, A., FENHANN, J., KONSTANTINAVICIUTE, I., MOOMAW, W., NIMIR, H., SCHLAMADINGER, B., TORRES-MARTINEZ, J., TURNER, C., UCHIYAMA, Y., VUORI, S., WAMUKONYA, N., and ZHANG, X. (2007). Energy supply. In B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, and L. Meyer, editors, *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter4.pdf.
- SINDEN, G. (2005). Variability of UK marine resources. Technical report, Oxford. www.carbontrust.co.uk/NR/rdonlyres/EC293061-611D-4BC8-A75C-9F84138184D3/0/variability_uk_marine_energy_resources.pdf.
- SLEATH, J. F. A. (1984). *Sea bed mechanics*. Wiley, New York. ISBN 047189091X.
- SOCOLOW, R. (2006). Stabilization wedges: An elaboration of the concept. In H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, and G. Yohe, editors, *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge Univ. Press.
- STEINBERG, M. and DANG, V. (1975). Preliminary design and analysis of a process for the extraction of lithium from seawater. Technical Report 20535-R, Brookhaven National Lab., Upton, N.Y. (USA). www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7351225. Presented at Symposium on United States lithium resources and requirements by the year 2000; 22 Jan 1976; Lakewood, CO, USA.
- STERN, N. (2007). *The Economics of Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- SUBCOMMITTEE ON POULTRY NUTRITION, NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1994). *Nutrient Requirements of Poultry*. National Academy Press, Washington, ninth revised edition. www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309048923.
- SUPPLE, B. (1987). *The history of the British coal industry. Vol. 4, 1913–1946: the political economy of decline*. Clarendon, Oxford. ISBN019828294X.
- TAYLOR, G. I. (1920). Tidal friction in the Irish Sea. *R. Soc. Lond. Ser. A*, 220:1–33. doi: 10.1098/rsta.1920.0001.
- TAYLOR, G. K. (2002a). *Are you missing the boat? The ekranoplan in the 21st century – its possibilities and limitations*. www.hypercraftassociates.com/areyoumissingtheboat2002.pdf. Presented at the 18th Fast Ferry Conf., Nice, France.
- TAYLOR, S. J. (2002b). *The Severn barrage – definition study for a new appraisal of the project*. www.dti.gov.uk/files/file15363.pdf. ETSU REPORT NO. T/09/00212/00/REP.
- TENNEKES, H. (1997). *The Simple Science of Flight*. MIT Press.
- THAKUR, P. C., LITTLE, H. G., and KARIS, W. G. (1996). *Global coalbed methane recovery and use*. Energy Conversion and Management, 37 (6/8):789–794.
- THE EARTHWORKS GROUP. (1989). *50 Simple things you can do to save the earth*. The Earthworks Press, Berkeley, California. ISBN 0-929634-06-3.
- TRELOAR, G. J., LOVE, P. E. D., and CRAWFORD, R. H. (2004). *Hybrid life-cycle inventory for road construction and use*. J. Constr. Engrg. and Mgmt., 130(1):43–49.
- TRIEB, F. and KNIES, G. (2004). *A renewable energy and development partnership EU-ME-NA for large scale solar thermal power and desalination in the Middle East and in North Africa*. www.gezen.nl/wordpress/wp-content/uploads/2006/09/sanaa-paper-and-annex_15-04-2004.pdf.
- TSURUTA, T. (2005). Removal and recovery of lithium using various microorganisms. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(5):562–566. www.jstage.jst.go.jp/article/jbb/100/5/100_562/article.
- TURKENBURG, W. C. (2000). Renewable energy technologies. In *WorldEnergy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 7. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/weal/draft-start.html.
- UCUNCU, A. (1993). *Energy recovery from mixed paper waste*. Technical report, NC, USA. www.p2pays.org/ref/11/10059.pdf.
- VAN DEN BERG, G. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277:955–970. www.nowap.co.uk/docs/windnoise.pdf.
- VAN VOORTHUYSEN, E. d. M. (2008). Two scenarios for a solar world economy. *Int. J. Global Environmental Issues*, 8(3):233247.
- VENTOUR, L. (2008). *The food we waste*. news.bbc.co.uk/1/shared/bsp/hi/pdfs/foodwewaste_fullreport08_05_08.pdf.
- WARWICK HRI. (2007). *Direct energy use in agriculture: opportunities for reducing fossil fuel inputs*. www2.warwick.ac.uk/fac/sci/whri/research/climatechange/energy/direct_energy_use_in_agriculture.pdf.
- WATER UK. (2006). *Towards sustainability 2005–2006*. www.water.org.uk/home/policy/reports/sustainability/indicators-2005-06/towards-sustainability-2005-2006.pdf.
- WATSON, J., HERTIN, J., RANDALL, T., and GOUGH, C. (2002). Renewable energy and combined heat and power resources in the UK. Technical report. www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/wp22.pdf. Working Paper 22.

- WAVEGEN. (2002). *Islay Limpet project monitoring – final report*.
www.wavegen.co.uk/pdf/art.1707.pdf.
- WEBER, C. L. and MATTHEWS, H. S. (2008). Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 42(10):3508–3513. doi: 10.1021/es702969f.
- WEIGHTMAN, M. (2007). *Report of the investigation into the leak of dissolver product liquor at the Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP), Sellafield, notified to HSE on 20 April 2005*. www.hse.gov.uk/nuclear/thorpreport.pdf.
- WIEDMANN, T., WOOD, R., LENZEN, M., MINX, J., GUAN, D., and BARRETT, J. (2008). *Development of an embedded carbon emissions indicator producing a time series of input-output tables and embedded carbon dioxide emissions for the UK by using a MRIO data optimisation system*.
randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=EV020337331FRP.pdf.
- WILLIAMS, D. and BAVERSTOCK, K. (2006). Chernobyl and the future Too soon for a final diagnosis. *Nature*, 440:993–994. doi: 10.1038/440993a.
- WILLIAMS, E. (2004). Energy intensity of computer manufacturing hybrid assessment combining process and economic input-output methods. *Environ Sci Technol*, 38(22):6166–6174. ISSN 0013-936X. [url{www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15573621}](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=15573621).
- WILLIAMS, R. H. (2000). Advanced energy supply technologies. In *World Energy Assessment – Energy and the challenge of sustainability*, chapter 8. UNDP, New York, USA. www.undp.org/energy/activities/wea/draft-start.html.
- WILSON, E. M. and BALLS, M. (1990). Tidal power generation. In P. Novak, editor, *Developments in Hydraulic Engineering*, chapter 2 Taylor & Francis. ISBN 185166095X.
- WOOD, B. (1985). Economic district heating from existing turbines *Institution of Civil Engineers Proc. pt. 1*, 77:27–48.
- YAROS, B. (1997). Life-cycle thinking for wood and paper products In E. Ellwood, J. Antle, G. Eyring, and P. Schulze, editors, *Wood in Our Future: The Role of Life-Cycle Analysis: Proc. a Symposium*.
- ZALESKI, C. P. (2005). The future of nuclear power in France, the EU and the world for the next quarter-century.
www.npec-web.org/Essays/Essay050120Zalenski-FutureofNuclearPower.pdf. tinyurl.com/32louu.
- ZHU, X.-G., Long, S. P., and Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, 19:153159

Wykaz linków internetowych

W tym rozdziale podajemy pełne adresy stron internetowych, do których odsyłają skróty adresów w tekście. Każdy wers rozpoczyna numer strony, na której pojawił się skrót. Te same, ale aktywne linki znaleźć można pod adresem <http://tinyurl.com/yh8xse> (lub www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/book/tex/cft.url.html).

Jeżeli niektóre skróty przestały działać, żadaną stronę można odnaleźć poprzez Wayback Machine internet archive [f754].

str. skrót adresu	pełny adres strony
26 ydoobr	www.bbc.co.uk/radio4/news/anyquestions_transcripts_20060127.shtml
26 2jhve6	www.ft.com/cms/s/0/48e334ce-f355-11db-9845-000b5df10621.html
26 25e59w	news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm
26 5o7mxk	www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/10/politics
27 5c4olc	www.foe.co.uk/resource/press_releases/green_solutions_undermined_10012008.html
27 2fztd3	www.jalopnik.com/cars/alternative-energy/now-thats-some-high-quality-h2o-car-runs-on-water-177788.php
27 26e8z	news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/3381425.stm
27 ykhayj	politics.guardian.co.uk/terrorism/story/0,,1752937,00.html
28 16y5g	www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/fig3-1.htm
28 5qfkaw	www.nap.edu/catalog.php?record_id=12181
29 2z2xg7	assets.panda.org/downloads/2_vs_3_degree_impacts_1oct06_1.pdf
29 yyxq2m	www.bp.com/genericsection.do?categoryId=93&contentId=2014442
29 dzcqj	www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf
29 y98ys5	news.bbc.co.uk/1/hi/business/4933190.stm
38 5647rh	www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/tsgb/
38 27jdc5	www.dft.gov.uk/pgr/statistics/datatablespublications/energyenvironment/tsgb-chapter3energyandtheenvi1863
38 28abpm	corporate.honda.com/environmentology/
38 nmn4l	www.simetric.co.uk/si_liquids.htm
39 2hcgdh	cta.ornl.gov/data/appendix_b.shtml
43 vxhjh	www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/weather/
43 tdvml	www.phy.hw.ac.uk/resrev/aws/awsarc.htm
45 3fbufz	www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/004.htm
45 3asmgy	news.independent.co.uk/uk/transport/article324294.ece
45 9ehws	www.boeing.com/commercial/747family/technical.html
45 3exmgv	www.ryanair.com/site/EN/about.php?page=About&sec=environment
46 yrnmm	www.grida.no/climate/ipcc/aviation/124.htm
46 36w5gz	www.rolls-royce.com/community/downloads/environment04/products/air.html
56 2rqloc	www.metoffice.gov.uk/climate/uk/location/scotland/index.html
56 2szckw	www.metoffice.gov.uk/climate/uk/stationdata/cambridgedata.txt
56 5hrxls	eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?+s01
56 6z9epq	ww.reuk.co.uk/40-Percent-Efficiency-PV-Solar-Panels.htm
57 6hobq2	www.azonano.com/news.asp?newsID=4546
57 2lsx6t	www.udel.edu/PR/UDaily/2008/jul/solar072307.html
57 62ccou	www.nrel.gov/news/press/2008/625.html
57 5hzs5y	www.ens-newswire.com/ens/dec2007/2007-12-26-093.asp
57 39z5m5	news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/6505221.stm
57 2uk8q8	www.powerlight.com/about/press2006_page.php?id=59
57 2ahecp	www.aps.org/meetings/multimedia/upload/The_Status_and_Outlook_for_the_Photovoltaics_Industry_David_Carlson.pdf
58 6kqq77	www.defra.gov.uk/erdp/pdfs/ecs/miscanthus-guide.pdf
68 ynjzej	www.aceee.org/conf/06modeling/azevado.pdf
74 wbd8o	www.ref.org.uk/energydata.php
75 25e59w	news.bbc.co.uk/1/low/uk_politics/7135299.stm
75 2t2vjq	www.guardian.co.uk/environment/2007/dec/11/windpower.renewableenergy
76 57984r	ww.businessgreen.com/business-green/news/2205496/critics-question-government
76 6oc3ja	www.independent.co.uk/environment/green-living/donnachadh-mccarthy-my-carbonfree-year-767115.html
76 5soql2	www.housebuildersupdate.co.uk/2006/12/eco-bollocks-award-windsave-ws1000.html
76 6g2jm5	www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/small-wind
87 5h69fm	www.thepoultrysite.com/articles/894/economic-approach-to-broiler-production

87	5pwojp	www.fertilizer.org/ifa/statistics/STATSIND/pkann.asp
88	5bj8k3	www.walkerscarbonfootprint.co.uk/walkers carbon footprint.html
88	3s576h	www.permatopia.com/transportation.html
95	6xrm5q	www.edf.fr/html/en/decouvertes/voyage/usine/retour-usine.html
102	yx7zm4	www.cancentral.com/funFacts.cfm
102	r22oz	www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive charts/energy-cost/NS6Chart.html
102	yhrest	www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/106.pdf
102	y5as53	www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/The Industry/Government Policy/Energy/Energy.htm
102	y2ktgg	www.ssab.com/templates/Ordinary 573.aspx
103	6lbrab	www.lindenau-shipyard.de/pages/newsb.html
103	5ctx4k	www.wilhelmsen.com/SiteCollectionDocuments/WW Miljorapport engelsk.pdf
103	yqbz13	www.normanbaker.org.uk/downloads/Supermarkets Report Final Version.doc
111	yttg7p	budget2007.treasury.gov.uk/page 09.htm
111	fcqfw	www.mod.uk/DefenceInternet/AboutDefence/Organisation/KeyFactsAboutDefence/DefenceSpending.htm
111	2e4fcs	press.homeoffice.gov.uk/press-releases/security-prebudget-report
111	33x5kc	www.mod.uk/NR/rdonlyres/95BBA015-22B9-43EF-B2DC-DFF14482A590/0/gep 200708.pdf
111	35ab2c	www.dasa.mod.uk/natstats/ukds/2007/c1/table103.html
111	yg5fsj	siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/GDP.pdf
111	yfgjna	www.sipri.org/contents/milap/milex/mex major spenders.pdf/download
111	slbae	www.wisconsinproject.org/countries/israel/plut.html
123	uzek2	www.dti.gov.uk/energy/inform/dukes/
123	3av4s9	hdr.undp.org/en/statistics/
123	6frj55	news.independent.co.uk/environment/article2086678.ece
141	5qhvcb	www.tramwayinfo.com/Tramframe.htm?www.tramwayinfo.com/tramways/Articles/Compair2.htm
146	4qgg8q	www.newsweek.com/id/112733/output/print
146	5o5x5m	www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
146	5o5x5m	www.cambridgeenergy.com/archive/2007-02-08/cef08feb2007kemp.pdf
146	5fbeg9	www.cfit.gov.uk/docs/2001/racomp/racomp/pdf/racomp.pdf
146	679rpc	www.tfl.gov.uk/assets/downloads/environmental-report-2007.pdf
148	5cp27j	www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
148	4wm2w4	www.citroenet.org.uk/passenger-cars/psa/berlingo/berlingo-electrique.html
148	658ode	www.greencarcongress.com/2008/02/mitsubishi-moto.html
150	czjjo	corporate.honda.com/environment/fuel cells.aspx?id=fuel cells fcx
150	5a3ryx	automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx
164	yok2nw	www.eca.gov.uk/etl/find/ P Heatpumps/detail.htm?ProductID=9868&FromTechnology=S WaterSourcePackaged
164	2dtx8z	www.eca.gov.uk/NR/rdonlyres/6754FE19-C697-49DA-B482-DA9426611ACF/0/ETCL2007.pdf
164	2fd8ar	www.geothermalint.co.uk/commercial/hydronicheatpumpranges.html
170	5kpkj8	blogs.reuters.com/environment/2008/09/09/a-silver-bullet-or-just-greenwash/
170	yebuk8	www.dti.gov.uk/energy/sources/coal/index.html
170	yhxf8b	www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/coal/coal.asp
170	e2m9n	www.coal.gov.uk/resources/cleanercoaltechnologies/ucgoverview.cfm
183	5qntkb	www.world-nuclear.org/info/reactors.htm
184	y3wnzr	npc.sarov.ru/english/digest/132004/appendix8.html
184	32t5zt	web.ift.uib.no/~lillestol/Energy Web/EA.html
184	2qr3yr	documents.cern.ch/cgi-bin/setlink?base=generic&categ=public&id=cer-0210391
184	ynk54y	doc.cern.ch/archive/electronic/other/generic/public/cer-0210391.pdf
184	yl7tkm	minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/1999/mcs99.pdf
184	yju4a4	www.uic.com.au/nip67.htm
184	yeyr7z	taylorandfrancis.metapress.com/index/W7241163J23386MG.pdf
184	4f2ekz	www.publications.parliament.uk/pa/cm199900/cmhansrd/vo000505/text/00505w05.htm
185	2k8y7o	www.nei.org/resourcesandstats/
185	3pvf4j	www.sustainableconcrete.org.uk/main.asp?page=210
185	4r7zpg	csereport2005.bluescopesteel.com/
185	49hcnw	www.ace.mmu.ac.uk/Resources/Fact Sheets/Key Stage 4/Waste/pdf/02.pdf
185	3kduo7	www.esrcsocietytoday.ac.uk/ESRCInfoCentre/facts/UK/index29.aspx?ComponentId=7104&SourcePageId=18130
185	69vt8r	www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7200593
185	6oby22	www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6773271&query_id=0
185	63l2lp	pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/jacsat/2002/124/i18/abs/ja003472m.html

185	wnchw	www.feasta.org/documents/wells/contents.html?one/horelacy.html
185	shrln	www.enviros.com/vrepository/
210	2wmuw7	news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap_on_hi_te/solar_roads;ylt=AuEFouXxz16nP8MRIInTJMms0NUE
210	2hx6fc	www.eirgrid.com/EirGridPortal/DesktopDefault.aspx?tabid=WindGenerationCurve&TreeLinkModID=1451&TreeLinkItemID=247
210	2l99ht	www.reuters.com/article/domesticNews/idUSN2749522920080228
210	3x2kvv	www.reuters.com/article/rbssIndustryMaterialsUtilitiesNews/idUSL057816620080305
211	5o2xgu	www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web sites/03-04/wind/content/storageavailable.html
211	2n3pmb	www.dynamicdemand.co.uk/pdf/fridge test.pdf
211	2k8h4o	www.int.ioil.co.za/index.php?art_id=vn20080201045821205C890035
211	5cp27j	www.eaton.com/EatonCom/ProductsServices/Hybrid/SystemsOverview/HydraulicHLA/index.htm
211	2sxlyj	www.batteryuniversity.com/partone-3.htm
211	ktd7a	www.vrbpower.com/docs/news/2006/20060830-PR-TapburySale-IrelandWindfarm.pdf
211	627ced	www.vrbpower.com/docs/whitepapers/SEItechpaper1.pdf
211	5fasl7	www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/vanadium/vanadium_t7.html
211	2wmuw7	news.yahoo.com/s/ap/20071231/ap_on_hi_te/solar_roads;ylt=AuEFouXxz16nP8MRIInTJMms0NUE
228	5os7dy	tinyurl.com/5os7dy
228	yrw2oo	tinyurl.com/yrw2oo
234	6eoyhg	news.bbc.co.uk/1/hi/uk/7215688.stm
236	yu8em5	www.foe.co.uk/resource/reports/paying for better transport.pdf
236	3x2cr4	news.bbc.co.uk/1/hi/england/london/6151176.stm
236	2dd4mz	news.bbc.co.uk/1/low/uk politics/6391075.stm
236	7vlp	www.lse.ac.uk/collections/pressAndInformationOffice/newsAndEvents/archives/2005/IDCard_FinalReport.htm
236	6x4nvu	www.statoil.com/statoilcom/svg00990.nsf?opendatabase&artid=F5255D55E1E78319C1256FEF0044704B
236	39g2wz	www.dillinger.de/dh/referenzen/linepipe/01617/index.shtml.en
236	3ac8sj	www.hydro.com/ormenlange/en/
236	y7kg26	www.politics.co.uk/issue-briefs/economy/taxation/tobacco-duty/tobacco-duty-\$366602.htm
237	r9fcf	en.wikipedia.org/wiki/War on Drugs
237	ysncks	news.bbc.co.uk/1/low/uk politics/6205174.stm
238	2vq59t	www.boston.com/news/globe/editorial opinion/oped/articles/2007/08/01/the 63 billion sham/
238	ym46a9	https://www.cia.gov/cia/publications/factbook/print/xx.html
238	99bpt	www.guardian.co.uk/Iraq/Story/0,2763,1681119,00.html
238	2bmuod	www.guardian.co.uk/environment/2007/aug/13/renewableenergy.energy
238	3g8nn8	image.guardian.co.uk/sys-files/Guardian/documents/2007/08/13/RenewablesTargetDocument.pdf
238	3jo7q2	www.viewsofscotland.org/library/docs/HoL STC RE Practicalities 04.pdf
247	2ykfgw	www.guardian.co.uk/environment/2007/jan/09/travelsenvironmentalimpact.greenpolitics
247	2nsvx2	www.number-10.gov.uk/output/Page10300.asp
247	yxq5xk	commentisfree.guardian.co.uk/george monbiot/2007/01/an open letter to the prime mi.html
254	3doaec	web.archive.org/web/20040401165322/members.cox.net/weller43/sunshine.htm
255	3lcw9c	knol.google.com/k/-/-/15x31uzlqeo5n/1
264	voxbz	news.bbc.co.uk/1/low/business/6247371.stm
264	yofchc	news.bbc.co.uk/1/low/uk/7053903.stm
264	3e28ed	www.grida.no/climate/ipcc tar/wg1/118.htm
274	2bh35	www.lafn.org/~dave/trans/energy/rail vs auto EE.html
277	6by8x	encarta.msn.com/encyclopedia 761553622/Internal-Combustion Engine.html
277	348whs	www.cleangreencar.co.nz/page/prius-petrol-engine
282	ydt7uk	www.nrel.gov/business opportunities/pdfs/31235sow.pdf
282	yaoozn	www.windpower.org/en/tour/wres/shear.htm
283	6o86ec	www.londonarray.com/london-array-project-introduction/offshore/
283	6bkvbn	www.timesonline.co.uk/tol/news/world/asia/article687157.ece
284	yekdaa	www.windpower.org/en/stat/betzpro.htm
284	ymfbns	www.windpower.org/en/tour/wres/powdensi.htm
284	ypvbvd	www.ref.org.uk/images/pdfs/UK Wind Phase 1 web.pdf
284	wbd8o	www.ref.org.uk/energydata.php
292	33ptcg	www.stevfossett.com/html/main pages/records.html
294	6r32hf	www.theaustralian.news.com.au/story/0,25197,23003236-23349,00.html
297	2af5gw	www.airliners.net/info/stats.main?id=100
297	32judd	www.wildanimalsonline.com/birds/wanderingalbatross.php
297	2qbquv	news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/6988720.stm
297	5h6xph	www.goldcoastyachts.com/fastcat.htm

297	4p3yco	www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/row/rus/903.htm
303	3ap7lc	www.biocap.ca/files/Ont bioenergy OPA Feb23 final.pdf
303	4hamks	www.methanetomarkets.org/resources/landfills/docs/uk lf profile.pdf
311	65h3cb	www.dorset-technical-committee.org.uk/reports/U-values-of-elements-Sept-2006.pdf
313	5dhups	www.arct.cam.ac.uk/UCPB/Place.aspx?rid=943658&p=6&ix=8&pid=1&prcid=27&ppid=201
335	2bqapk	wwwphys.murdoch.edu.au/rise/reslab/resfiles/tidal/text.html
336	r22oz	www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive charts/energy-cost/NS6Chart.html
338	3kmcks	www.yourhome.gov.au/technical/index.html
339	3kmcks	www.yourhome.gov.au/technical/index.html
347	3b7zdf	www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/generalizedlanduse
349	3av4s9	hdr.undp.org/en/statistics/
357	f754	www.archive.org/web/web.php