

# ENERGIA I CYWILIZACJA

## TAK TWORZY SIĘ HISTORIA



## VACLAV SMIL

„Czekam na nowe książki Smila tak, jak niektórzy czekają na nowy film z serii *Gwiezdne wojny*. (...) W swojej najnowszej książce, *Energia i cywilizacja. Tak tworzy się historia*, Smil dogłębnie i szczegółowo wyjaśnia, w jaki sposób wynalazki związane z ludzką zdolnością do przetwarzania energii na ciepło, światło i ruch stały się siłą napędową naszego kulturowego i ekonomicznego postępu w ciągu ostatnich 10 tysięcy lat”

— Bill Gates, *Gates Notes* (lista najlepszych książek 2017 roku)

Tytuł oryginału: Energy and Civilization: A History

Tłumaczenie: Joanna Sugiero

ISBN: 978-83-283-6487-5

© 2017 Massachusetts Institute of Technology

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form by any electronic or mechanical means (including photocopying, recording, or information storage and retrieval) without permission in writing from the publisher.

Polish edition copyright © 2022 by Helion S.A.

All rights reserved.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz wydawca dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz wydawca nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

<https://editio.pl/user/opinie/energy>

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Helion S.A.

ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice

tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63

e-mail: [editio@editio.pl](mailto:editio@editio.pl)

WWW: <https://editio.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

## Spis treści

Przedmowa i podziękowania vii

### 1. Energia i społeczeństwo 1

Przepływy, zasoby i regulacja 3

Koncepcje i miary 6

Zawilości i zastrzeżenia 13

### 2. Energia w prehistorii 16

Społeczności zbieraczy-łowców 21

Początki rolnictwa 31

### 3. Tradycyjne rolnictwo 37

Elementy wspólne i cechy szczególne 40

Prace polowe 40

Dominacja ziaren 44

Cykle upraw 48

Różne drogi do intensyfikacji 50

Zwierzęta pociągowe 51

Nawadnianie 58

Nawożenie 62

Zróżnicowanie upraw 65

Wytrwałość i innowacja 66

Starożytny Egipt 67

Chiny 69

Kultury mezoamerykańskie 73

Europa 76

Ameryka Północna 81

Ograniczenia tradycyjnego rolnictwa 85

Osiągnięcia 86

Dieta 91

Ograniczenia 93

### 4. Napędy podstawowe i paliwa epoki przedindustrialnej 99

Napędy podstawowe 102

Siła ludzi i zwierząt 102

Energia wodna 113

Energia wiatrowa 121

Paliwa z biomasy 125

Drewno i węgiel drzewny 126

Resztki poźniwne i łajno 128

Potrzeby gospodarstwa domowego 130

Przygotowywanie jedzenia 131

Ogrzewanie i oświetlenie 133

Transport i budownictwo 136

Transport lądowy 136

Statki wiosłowe i żaglowce 145

Budynki i konstrukcje 151

Metalurgia 160

Metale nieżelazne 160

Żelazo i stal 163

Działania wojenne 167

Energia zwierzęca i ludzka 168

Materiały wybuchowe i działa 172

### 5. Paliwa kopalne, początki elektryczności i zasoby odnawialne 174

Wielka transformacja 176

Początki i rozpowszechnienie się

wydobycia węgla 177

Od węgla drzewnego do koksu 181

Silniki parowe 182

Ropa naftowa i silniki spalinowe 189

Energia elektryczna 197

Innowacje techniczne 206

Węgiel 209

Węglowodory 212

Elektryczność 217

Energia odnawialna 220

Napędy podstawowe w transporcie 224

## 6. Cywilizacja oparta na paliwach kopalnych 228

- Bezprecedensowa moc i sposoby jej wykorzystywania 229
  - Energia w rolnictwie 236
  - Industrializacja 242
  - Transport 250
  - Informacja i komunikacja 259
  - Rozwój gospodarczy 265
- Konsekwencje i obawy 270
  - Urbanizacja 271
  - Jakość życia 274
  - Skutki polityczne 281
  - Broń i wojny 284
  - Zmiany związane ze środowiskiem naturalnym 295

## 7. Energia w historii świata 299

- Podstawowe schematy konsumowania energii 299
  - Ery i transformacje energetyczne 301
  - Długofalowe trendy i malejące koszty 309
  - A co się nie zmieniło? 316
- Pomiędzy determinizmem a wyborem 324
  - Imperatywy dotyczące zapotrzebowania na energię i jej wykorzystywania 325
  - Rola elementów kontrolnych 331
  - Ograniczenia objaśnień energetycznych 335

## Dodatki 346

- Podstawowe miary 346
- Jednostki naukowe oraz ich wielokrotności i podwielokrotności 348
- Ważne przełomy związane z energią w porządku chronologicznym 349
- Moc w historii 355
- Nota bibliograficzna 358
- Literatura 360

## Rozdział 1. Energia i społeczeństwo

Energia jest jedyną uniwersalną walutą, jaka istnieje; abyśmy mogli cokolwiek zrobić, jedna z jej licznych form musi ulec transformacji. Przykładami tych transformacji, obserwowanymi we wszechświecie, są potężne rotacje galaktyk i reakcje termonuklearne zachodzące w gwiazdach. Na Ziemi natomiast obejmują one szeroki zakres, od terraformujących sił płyt tektonicznych przesuwających się na dnie oceanu i tworzących nowe łańcuchy górskie po kumulatywne erozyjne działanie maleńkich kropli deszczu (już starożytni Rzymianie mawiali *gutta cavat lapidem non vi, sed saepe cadendo*, czyli 'kropla drąży skałę nie siłą, lecz ciągłym padaniem'). Życie na Ziemi — nadal jedyne życie, jakie znamy w całym wszechświecie, pomimo podejmowanych od dziesięcioleci prób wychwycenia sygnałów pochodzących z cywilizacji pozaziemskiej — byłoby niemożliwe bez reakcji fotosyntezy przekształcającej energię słoneczną w fitomasę (masę roślinną). Od tej przemiany zależy przetrwanie gatunku ludzkiego, a nasze ucywilizowane istnienie jest zdeterminowane wieloma innymi przepływami energii. Oto co napisał na ten temat Richard Adams [1982, s. 27]:

Potrąfimy myśleć szeroko, ale jeśli nie będziemy mieć potrzebnych środków, żeby przekształcić te myśli w działanie, pozostaną one tylko myślami. [...] Koło historii toczy się w nieprzewidywalny sposób. Jednakże wydarzenia historyczne zawsze przyjmują strukturę lub tworzą organizację, która musi być zgodna z ich energetycznymi komponentami<sup>1</sup>.

Ewolucja społeczności ludzkich przyniosła skutki w postaci większych populacji, coraz bardziej złożonych relacji społecznych i produkcyjnych, a także poprawy jakości życia rosnącej liczby ludzi. Z fundamentalnej perspektywy biofizyki można postrzegać prehistoryczną ewolucję człowieka oraz całą historię ludzkości jako misję, której celem jest kontrolowanie większych zasobów i przepływów bardziej skoncentrowanych i zróżnicowanych form energii, a następnie przetwarzanie ich na ciepło, światło oraz ruch tańszymi sposobami, przy niższych kosztach i z większą wydajnością. Ta tendencja została zgeneralizowana przez Alfreda Lotkę (1880 – 1949), amerykańskiego matematyka, chemika i statystyka, w sformułowanej przez niego zasadzie maksymalizacji przepływu energii: „W każdym rozważanym przypadku naturalna selekcja będzie działać w taki sposób, aby zwiększyć masę całkowitą systemu organicznego, zwiększyć tempo krążenia materii po tym systemie, a także zwiększyć energię całkowitą przepływającą przez ten system, dopóki istnieją nieużywane pozostałości materii i dostępnej energii” [Lotka 1922, s. 48].

Historia następujących po sobie cywilizacji — największych i najbardziej złożonych organizmów w biosferze — przebiegała właśnie według tego schematu. Zależność ludzkości od coraz większych przepływów energii może być postrzegana jako nieunikniona kontynuacja ewolucji organicznej. Wilhelm Ostwald (1853 – 1932, laureat Nagrody Nobla z 1909 roku w dziedzinie chemii za pracę dotyczącą katalizy) był pierwszym naukowcem, który wyraźnie rozszerzył drugą zasadę energetyki na wszelkie działania, a w szczegól-

<sup>1</sup> Wszystkie cytaty z książek w tłumaczeniu własnym, jeśli nie zaznaczono inaczej — *przyp. tłum.*

ności na całość działań człowieka: „Nie wszystkie energie są gotowe na tę transformację, a jedynie pewne ich formy, które w związku z tym otrzymały nazwę energii swobodnej. [...] Wolna energia jest zatem kapitałem konsumowanym przez wszelkiego rodzaju istoty, a wszystko, co się dzieje, jest efektem jej konwersji” [Ostwald 1912, s. 83]. Skutkiem tych przemyśleń było sformułowanie przez niego imperatywu energetycznego: „Vergeude keine Energie, verwerte sie”, czyli: „Nie marnuj energii, tylko ją użytkuj” [Ostwald 1912, s. 85].

Trzy kolejne cytaty to parafrazy przemyśleń Ostwalda sformułowane przez jego naśladowców. Niektórzy z nich sprawili, że połączenie między energią a wszystkimi ludzkimi działaniami zostało jeszcze bardziej deterministycznie zdefiniowane. Na początku lat 70. XX w. Howard Odum (1924 – 2002) zaproponował pewną wariację głównego tematu rozważań Ostwalda: „Dostępność źródeł energii określa możliwy zakres wykonywanej pracy, a kontrola nad przepływem tej energii określa moc człowieka w jego działaniach i w jego względnym wpływie na naturę” [Odum 1971, s. 43]. Ronald Fox tak podsumował swoją książkę na temat energii i ewolucji, którą napisał pod koniec lat 80. XX w.: „Doskonalenie mechanizmów kulturowych następowało wraz z doskonaleniem procesu łączenia strumieni energii” [Fox 1988, s. 166].

Nie trzeba być naukowcem, żeby rozumieć połączenie między dostępnością energii a postępek społecznym. Oto co napisał Eric Blair (George Orwell, 1903 – 1950) w 1937 roku w drugim rozdziale *Drogi na molo w Wigan* po tym, jak odwiedził podziemną kopalnię węgla:

Nasza cywilizacja, z całym szacunkiem dla Chestertona, jest oparta na węglu, w sposób bardziej kompletny, niż na pierwszy rzut oka nam się wydaje. Maszyny, które utrzymują nas przy życiu, oraz te, które produkują inne maszyny, są bezpośrednio lub pośrednio uzależnione od węgla. W metabolizmie świata Zachodu górnik jest drugi pod względem ważności i ustępuje miejsca tylko temu, który orze ziemię. Jest swoistą kariatydą, która dźwiga na swoich barkach prawie wszystko, co nie jest brudne. Z tego powodu rzeczywisty proces wydobywania węgla jest wart obserwowania, jeśli tylko trafi ci się okazja i będziesz chciał zadać sobie ten trud [Orwell 1937, s. 18].

Jednak sparafrazowanie tego fundamentalnego powiązania (tak jak to zrobił Orwell) jest czymś zupełnie innym niż twierdzenie, że doskonaleniu strumienia energii zawsze towarzyszy doskonalenie mechanizmów kulturowych (co zrobił Fox). Wniosek Orwella jest niepodważalny. Natomiast stwierdzenie Foxa to po prostu parafraza deterministycznego poglądu wyrażonego dwa pokolenia wcześniej przez antropologa Lesliego White'a (1900 – 1975), który nazwał go pierwszym ważnym prawem rozwoju kultury: „Przy założeniu, że pozostałe czynniki pozostają niezmiennie, stopień rozwoju kultury zależy bezpośrednio od ilości energii przypadającej na każdego pracującego mieszkańca rocznie” [White 1943, s. 346]. Możliwe, że takie kwestie jak fundamentalny komentarz Ostwalda czy wszechogarniający wpływ energii na strukturę i dynamikę ewoluujących społeczeństw (z całym szacunkiem dla Orwella) nie podlegają żadnej dyskusji, ale deterministyczne powiązanie między poziomem wykorzystania energii a *kulturowymi* osiągnięciami jest już dość wątpliwe. Wspomniany tu związek przyczynowy (lub jego brak) analizuję w ostatnim rozdziale tej książki.

Fundamentalna natura tej koncepcji jest czymś niekwestionowalnym. Oto co napisał na ten temat Robert Lindsay [1975, s. 2]:

Jeżeli potrafimy określić jednym słowem ideę, która ma zastosowanie do każdego aspektu naszej egzystencji, w taki sposób, aby poczuć, że naprawdę dobrze ją rozumiemy, to osiągnęliśmy coś ekonomicznego i potężnego. To właśnie się dzieje z ideą wyrażoną za pomocą słowa „energia”. Żadna inna koncepcja tak bardzo nie zunifikowała naszego zrozumienia tego zjawiska.

Czym jednak jest energia? Zaskakujące jest to, że nawet laureaci Nagrody Nobla mają ogromne trudności z udzieleniem satysfakcjonującej odpowiedzi na to pozornie proste pytanie. Richard Feynman (1918–1988) w swoich słynnych *Wykładach z fizyki* podkreślił: „Musimy zdać sobie sprawę z tego, że fizyka współczesna nie mówi właściwie, czym jest energia. Nie uważa się, że energia występuje w postaci małych porcji o określonej wielkości”<sup>2</sup> [Feynman 1988, 4–1].

Wiemy jedynie, że materia to energia w stanie spoczynku i że energia manifestuje się na wiele różnych sposobów, a te rozmaite formy energii są powiązane poprzez liczne konwersje, z których wiele ma charakter uniwersalny, wszechobecny i nieustający, podczas gdy inne są konkretnie zlokalizowane, nieczęste i efemeryczne (rysunek 1.1). Zrozumienie tych zasobów, potencjałów i transformacji wzrosło i zostało usystematyzowane w XIX w., a później poszerzyliśmy je o nową wiedzę w XX w., gdy — co jest istotne w kontekście złożoności transformacji energii — odkryliśmy, jak uwolnić energię jądrową (teoretycznie pod koniec lat 30., a praktycznie przed 1943 r., gdy uruchomiono pierwszy reaktor) wcześniej, niż zrozumieliśmy, jak działa fotosynteza (której fazy zostały odkryte dopiero w latach 50.).

Do \ Od	Elektromagnetyczna	Chemiczna	Jądrowa	Ciepłna	Kinetyczna	Elektryczna
Elektromagnetyczna		Chemi-luminescencja	Bomby jądrowe	Promieniowanie ciepłe	Ładunki przyspieszone	Promieniowanie elektromagnetyczne
Chemiczna	Fotosynteza	Obróbka chemiczna		Wrzenie	Dysocjacja przez radiolizę	Elektroliza
Jądrowa	Reakcje gamma-neutronowe					
Ciepłna	Absorpcja słoneczna	Spalanie	Rozszczepienie /synteza jądrowa	Wymiana ciepła	Tarcie	Ogrzewanie oporowe
Kinetyczna	Radiometry	Metabolizm	Promieniotwórczość/bomby jądrowe	Rozszerzalność cieplna/spalanie wewnętrzne	Przekładnie	Silniki elektryczne
Elektryczna	Ogniwa słoneczne	Ogniwa paliwowe /baterie	Baterie jądrowe	Termo-elektryczność	Generatory prądu	

**Rysunek 1.1**

Macierz konwersji energii; tam, gdzie jest więcej możliwości, podano jedną lub dwie podstawowe transformacje

## Przepływy, zasoby i regulacja

Wszystkie znane formy energii są kluczowe dla istnienia ludzkości — jest to fakt, który należy sobie uświadomić, zanim dokonamy jakiegokolwiek próby uporządkowania tych form według ich ważności. Wiele wydarzeń w historii ludzkości zostało zdeterminowa-

2. Fragment w tłumaczeniu Zofii Królikowskiej pochodzi z polskiego przekładu *Feynmana wykłady z fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1968.

**Ramka 1.1****Grawitacja i życie na Ziemi**

Zakres istnienia metabolizmu opartego na węglu jest zdefiniowany przez punkt zamrażania wody — która musi się znajdować w stanie ciekłym, aby cząsteczki organiczne mogły powstawać i wchodzić ze sobą w reakcje (dolna granica) — oraz przez temperatury i ciśnienie powodujące destabilizację aminokwasów i rozkład białek (górną granicę). Strefa Ziemi, która może być stale zamieszkała — czyli promień orbitalny, w którym warunki życia na tej planecie są optymalne — jest bardzo wąska [Perkins 2013]. Niedawno obliczono, że znajdujemy się jeszcze bliżej granicy, niż sądziliśmy: Kopparapu wraz ze współpracownikami [2014] odkryli, że z perspektywy składu naszej atmosfery oraz ciśnienia Ziemia orbituje na wewnętrznej krawędzi strefy zamieszkania — tuż poza promieniem, w którym niekontrolowany efekt cieplarniany wywołałby nieakceptowalnie wysokie temperatury.

Do tego efektu nie doszło, ponieważ około dwóch miliardów lat temu dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) został pochłonięty przez ocean, algi i archeony, ale gdyby nasza planeta znajdowała się zaledwie 1% dalej od Słońca, praktycznie cała woda zostałaby zamrożona w lodowcach. A nawet gdyby temperatury mieściły się w optymalnym zakresie, planeta nie byłaby w stanie zapewnić warunków do przetrwania wysoce zróżnicowanym formom życia bez swojej unikalnej atmosfery zdominowanej przez azot, wzbogaconej przez tlen z fotosyntezy i zawierającej wiele ważnych gazów śladowych, które regulują temperaturę na jej powierzchni. Z kolei ta cienka gazowa pokrywa nie mogłaby trwale istnieć, gdyby planeta nie była wystarczająco duża, aby wytworzyć siłę grawitacyjną przytrzymującą atmosferę na miejscu.

nych i ograniczonych zarówno przez uniwersalne i planetarne przepływy energii, jak i przez regionalne lub lokalne ich manifestacje. Fundamentalnymi cechami wszechświata rządzi energia grawitacyjna, która porządkuje niezliczone galaktyki i układy gwiazd. To właśnie dzięki grawitacji nasza planeta krąży w odpowiedniej odległości od Słońca i posiada wystarczająco masywną atmosferę, aby na Ziemi mogło istnieć życie (ramka 1.1).

Tak samo jak w przypadku wszystkich innych aktywnych gwiazd, Słońce jest napędzane przez syntezę jądrową, a produkt tych reakcji termojądrowych dociera do Ziemi w postaci energii elektromagnetycznej (promieniowania słonecznego). Jej strumień obejmuje szerokie spektrum długości fal, włącznie ze światłem widzialnym. Około 30% tego potężnego przepływu jest odbijane przez chmury i powierzchnie, około 20% wchłaniane przez atmosferę i chmury, a reszta, czyli mniej więcej połowa całego promieniowania, jest wchłaniana przez oceany i kontynenty, przetwarzana na energię cieplną, a potem odprowadzana z powrotem do przestrzeni kosmicznej [Smil 2008a]. Energia geotermiczna Ziemi ge-

neruje dużo mniejszy strumień ciepła: jej źródłem jest pierwotna akrecja grawitacyjna masy planetarnej i rozpad materiałów promieniotwórczych. Aktywuje ona potężne procesy tektoniczne, które zmieniają układ oceanów i kontynentów, a także wywołują wybuchy wulkanów i trzęsienia ziemi.

Tylko niewielki ułamek energii promieniowania, która dociera do Ziemi (mniej niż 0,05%), jest przekształcany przez rośliny w nowe zasoby energii chemicznej za pomocą fotosyntezy i tworzy niezastąpiony fundament dla wszystkich wyższych form życia. Metabolizm zwierząt umożliwia przemianę składników odżywczych w rozwijające się tkanki, podtrzymuje funkcje organizmów i utrzymuje stałą temperaturę u przedstawicieli wszystkich bardziej rozwiniętych gatunków. Trawienie również powoduje wytwarzanie energii mechanicznej (kinetycznej) — w tym przypadku jej źródłem są pracujące mięśnie. Z perspektywy konwersji energii zwierzęta są w naturalny sposób ograniczone przez wielkość swoich ciał i dostępność składników odżywczych. Fundamentalne cechy wyróżniające nasz gatunek są rozszerzeniem tych fizycznych ograniczeń, które jest skutkiem bardziej wydajnego używania mięśni oraz z ujarznienia form energii obecnych poza naszymi ciałami.

Te zewnętrzne formy energii, odblokowane przez intelekt człowieka, są wykorzystywane do przeróżnych zadań jako główna siła napędzająca bądź też jako paliwo,



które uwalnia ciepło w procesie spalania. Czynniki aktywujące dostawy energii zależą od przepływu informacji oraz od ogromnej liczby urządzeń, od tak prostych narzędzi jak tłuki kamienne i dźwignie po skomplikowane silniki spalające paliwo i reaktory uwalniające energię wytworzoną w reakcji rozszczepienia jądrowego. Ewolucyjna i historyczna kolejność wydarzeń, jakie przyczyniły się do postępów dokonanych przez ludzkość, jest łatwa do nakreślenia w szerokich kategoriach jakościowych. Podobnie jak w przypadku organizmów nieprzeprowadzających fotosyntezy, najbardziej fundamentalnym zapotrzebowaniem człowieka na energię jest potrzeba pożywienia. Poszukiwanie i zbieranie jedzenia przez hominidów bardzo przypominało praktyki zdobywania pożywienia stosowane przez ich przodków, ssaki naczelne. I chociaż niektóre naczelne — a także kilka innych ssaków (w tym wydry i słonie), pewne gatunki ptaków (kruki i papugi), a nawet niektóre bezkręgowce (głównonogi) — wykształciły niewielki zakres podstawowych umiejętności stosowania narzędzi [Hansell 2005; Sanz, Call, Boesch 2014; rysunek 1.2], tylko hominidni doprowadzili tę umiejętność do takiego poziomu, że używanie narzędzi stało się ich cechą wyróżniającą.



**Rysunek 1.2**  
Szympans zwyczajny (*Pan troglodytes*) w Gabonie używający narzędzi do rozłupania orzechów (Corbis)

Narzędzia dały nam mechaniczną przewagę w zdobywaniu pożywienia, budowaniu schronień i wytwarzaniu prymitywnych ubrań. Ujarzmienie ognia znacząco rozszerzyło obszar ludzkich siedlisk i jeszcze bardziej odróżniło nas od zwierząt. Nowe narzędzia umożliwiły udomowienie zwierząt, budowanie bardziej złożonych maszyn napędzanych siłą mięśni oraz przetworzenie pewnego ułamka energii kinetycznej wiatru i wody na potrzebną moc. Te nowe napędy podstawowe zwielokrotniły siłę, jaką władał człowiek, ale przez długi czas ich używanie było ograniczane przez naturę i przez potęgę ujarzmionych przepływów. Bardzo dobrze to widać na przykładzie żagli — pradawnych, skutecznych narzędzi, których możliwości były ograniczone przez całe tysiąclecia przez przeważające wiatry i stałe prądy morskie. To właśnie te prądy pod koniec xv w. pokierowały europejskie żaglowce przez ocean aż do Karaibów. Również one sprawiły, że Hiszpanie nie odkryli Hawajów, mimo że przez 250 lat — między rokiem 1565 a 1815 — hiszpańskie statki handlowe, galeony z Manili (Galeón de Manila) raz albo dwa razy do roku przepływały Ocean Spokojny z Meksyku (Acapulco) do Filipin [Schurz 1939].

Kontrolowane spalanie w ogniskach, paleniskach i piecach przekształciło energię chemiczną roślin w energię termiczną. To ciepło zaczęło być wykorzystywane bezpośrednio w domostwach i w zakładach przemysłowych, gdzie topiono metale, wypalano cegły, a także wykonywano i przetwarzano niezliczoną liczbę produktów. Spalanie paliw kopalnych sprawiło, że wszystkie te tradycyjne metody bezpośredniego wykorzystywania ciepła zwiększyły swój zasięg i skuteczność. Wiele fundamentalnych wynalazków umożliwiło przekształcanie energii termicznej pochodzącej ze spalania paliwa kopalnego w energię mechaniczną — najpierw przy użyciu silników parowych i spalinowych, a potem w turbinach gazowych i raketach. Wytwarzamy elektryczność, spalając paliwa kopalne i ujarzmiając energię kinetyczną wody, od 1882 roku, a stosując metodę rozszczepienia izotopu uranu — od 1956 roku.

Spalanie paliw kopalnych i wytwarzanie prądu umożliwiło powstanie nowej formy cywilizacji wysokoenergetycznej, której ekspansja objęła całą planetę. Wśród stosowanych przez nią głównych źródeł energii coraz większą rolę zaczynają odgrywać źródła odnawialne, a zwłaszcza energia słoneczna (ujarzmiona przez urządzenia fotowoltaiczne albo elektrownie słoneczne) oraz wiatr (konwertowany przez wielkie turbiny wiatrowe). Oczywiście u podstaw tego rozwoju leży cały zbiór innych wynalazków. Stosując analogię do modelu przepływu, można powiedzieć, że człowiek musiał postawić i aktywować ciągi bram (zaworów) w odpowiedniej kolejności, aby umożliwić przepływ ludzkiej inwencji.

Najznakomitsze z tych bram wymagały uwolnienia dużych potencjałów energii, włącznie z możliwością edukacji, przewidywalnymi regulacjami prawnymi, transparentnymi zasadami ekonomii, odpowiednią dostępnością kapitału i warunkami sprzyjającymi przeprowadzaniu podstawowych badań. Nic dziwnego, że zazwyczaj trzeba całych pokoleń, żeby mogły nastąpić zwiększone albo lepsze jakościowo przepływy energii albo żeby człowiek opanował całkowicie nowe źródła energii i zaczął je wykorzystywać na dużą skalę. Odpowiedni moment, siła i struktura tych przepływów energii to czynniki, które są niebywale trudne do przewidzenia. W najwcześniejszych fazach takich przekształceń nie da się oszacować potencjalnego wpływu nowych napędów podstawowych i baz paliwowych na takie aspekty naszego życia jak rolnictwo, przemysł, transport, osadnictwo, działania wojenne i środowisko naturalne Ziemi. Konieczne jest przeprowadzenie rachunków ilościowych, żeby zrozumieć ograniczenia naszych działań i rozmiary naszych osiągnięć, a to wymaga wiedzy na temat podstawowych naukowych miar i koncepcji.

### Ramka 1.2

#### Malejąca użyteczność przekształconej energii

Ta zasada dotyczy dowolnej formy przekształcania energii. Jeżeli czytelnik używa światła elektrycznego do oświetlenia tej strony, energia elektromagnetyczna tego światła jest tylko małą cząstką energii chemicznej zawartej w bryle węgla, która została użyta do jej wytworzenia (w 2015 roku 33% elektryczności w Stanach Zjednoczonych zostało wyprodukowanych przy udziale węgla). Co najmniej 60% energii węgla uległo stracie, zamieniając się w ciepło, które ulotniło się przez komin fabryczny i zostało schłodzone przez wodę. Jeżeli natomiast czytelnik używa starej jarzeniówki, to ponad 95% dostarczonej elektryczności kończy jako ciepło, ponieważ metal w zwojach żarnika opiera się prądowi elektrycznemu. Światło docierające do kartki jest przez nią wchłaniane albo odbijane i wchłaniane przez jej otoczenie, skąd jest ponownie odbijane w formie ciepła. Energia chemiczna węgla, charakteryzująca się niską entropią, została rozproszona jako ciepło o wysokiej entropii, które ogrzało powietrze wzdłuż kabli i wokół żarówki i spowodowało niedostrzegalny wzrost temperatury nad kartką. Żadna energia nie została utracona, ale jej wysoce przydatna forma została zdegradowana do takiego stopnia, że straciła ona swoją praktyczną użyteczność.

### Koncepcje i miary

U podstaw wszystkich rodzajów konwersji energii leży kilka fundamentalnych zasad. Każda forma energii może zostać przetworzona w ciepło, czyli w energię termiczną. Podczas dowolnej z tych konwersji nigdy nie dochodzi do strat energii. Zachowanie energii — pierwsza zasada termodynamiki — jest jedną z najbardziej fundamentalnych uniwersalnych prawd. Jednak im bardziej przesuujemy się po łańcuchu konwersji, potencjalna energia użytkowa stopniowo maleje (ramka 1.2). Ten nieunikniony skutek został wyrażony w drugiej zasadzie termodynamiki, a miarą służącą do określania utraty energii użytkowej jest entropia. Chociaż ilość energii we wszechświecie jest stała, konwersje energii zwiększają jej entropię (czyli zmniejszają użyteczność). Kosz

z ziarnami albo baryłką ropy naftowej to zapasy energii o niskiej entropii. Dzięki procesowi metabolizmu lub spalania są one w stanie posłużyć do bardzo użytecznej pracy. Oba te zasoby kończą ostatecznie jako przypadkowy ruch delikatnie podgrzanych cząsteczek powietrza, osiągając nieodwracalny stan wysokiej entropii odzwierciedlający niemożliwą do odzyskania utratę użyteczności.

To jednokierunkowe entropiczne rozproszenie prowadzi do utraty złożoności, a także wywołuje większy nieład i większą homogeniczność w dowolnym zamkniętym układzie. Jednak wszystkie żywe organizmy, od najmniejszych bakterii po światową cywilizację, jak dotąd stawiają opór temu trendowi, importując i metabolizując energię. To oznacza, że każdy żywy organizm musi być otwartym układem podtrzymującym proces ciągłego przyływu i odpływu energii oraz materii. Organizmy te nie mogą znaleźć się w stanie chemicznej i termodynamicznej równowagi, dopóki żyją [Prigogine 1947, 1961; von Bertalanffy 1968; Haynie 2001]. Ich negentropia — rozwój, odnawianie się i ewolucja — powoduje większą heterogeniczność oraz wzrost strukturalnej i systemowej złożoności. Podobnie jak w przypadku wielu innych ważnych kroków w rozwoju nauki, pełne zrozumienie tych prawd nastąpiło dopiero w XIX w., gdy szybko rozwijające się dziedziny fizyki, chemii i biologii znalazły punkt wspólny: transformację energii [Atwater, Langworthy 1897; Cardwell 1971; Lindsay 1975; Müller 2007; Oliveira 2014; Varvoglis 2014].

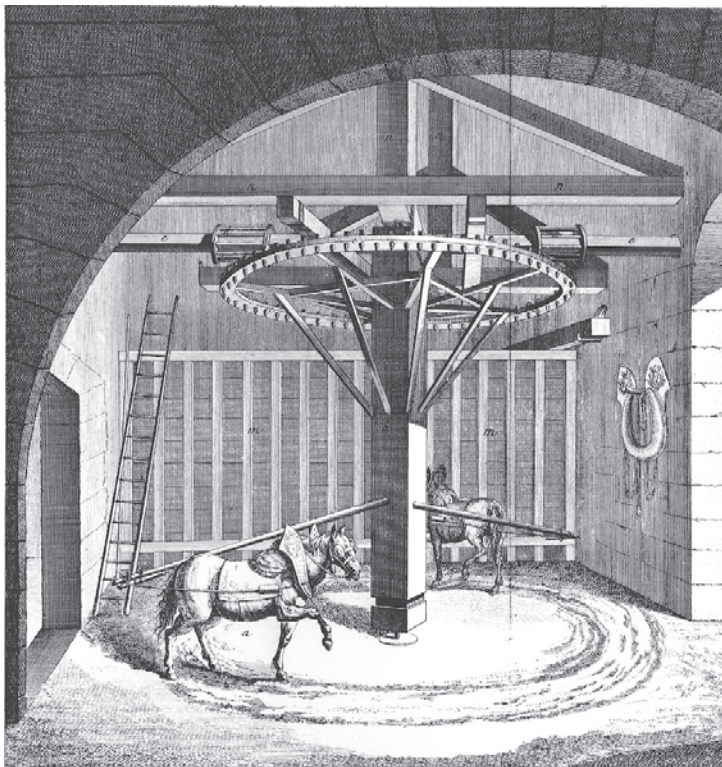
To połączenie zainteresowań wymagało dokonania kodyfikacji standardowych miar. Do mierzenia **energii** zaczęto stosować dwie jednostki: kalorię (jednostkę metryczną) oraz brytyjską jednostkę ciepła (Btu). Obecnie podstawową naukową jednostką energii jest dżul — nazwa ta pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka Jamesa Prescottta Joule'a (1818–1889), który opublikował pierwsze dokładne obliczenie równoważności pracy i ciepła (ramka 1.3). **Moc** określa tempo przepływu energii. Pomysłodawcą pierwszej standardowej jednostki mocy — konia mechanicznego — był James Watt (1736–1819). Chciał on definiować moc swoich silników parowych w zrozumiały dla wszystkich sposób, dlatego wybrał oczywiste porównanie z napędem, który miały one zastąpić — z zaprzężonym koniem, często wykorzystywanym jako siła napędowa w młynach albo pompach (rysunek 1.3, ramka 1.3).

Inną ważną jednostką jest **gęstość energetyczna**, czyli ilość energii znajdującej się w określonej masie zasobów (ramka 1.4). Wartość ta ma krytyczne znaczenie dla produktów spożywczych: żywność o niskiej gęstości energetycznej nie może stać się podstawowym pożywieniem, nawet jeśli mamy go w bród. Na przykład społeczeństwa przedkolumbijskie zamieszkujące dzisiejsze tereny Doliny Meksyku zawsze żywiły się dużymi owocami, które rosły na wielu gatunkach kaktusów z rodzaju *Opuntia* [Sanders, Parsons, Santley 1979]. Jednak podobnie jak w przypadku większości innych owoców, miąższ owoców opuncji składa się głównie z wody (88%). Oprócz tego zawiera niecałe 10% węglowodanów, 2% białka i 0,5% tłuszczów, a jego gęstość energetyczna wynosi zaledwie 1,7 MJ/kg [Feugang i in. 2006]. To oznacza, że drobna kobieta, której jedynym źródłem węglowodanów są owoce opuncji (oczywiście przy nierealistycznym założeniu, że nie ma ona praktycznie żadnego zapotrzebowania na dwa pozostałe makroskładniki), musiałaby zjadać 5 kg tych owoców dziennie. Taką samą ilość energii mogłaby wytworzyć z zaledwie 650 g mielonego zboża spożytego pod postacią tortilli albo tamali.

**Ramka 1.3****Mierzenie energii i mocy**

Oficjalna definicja dżula (J) brzmi: praca wykonana przez siłę o wartości jednego niutona przy przesunięciu punktu przyłożenia siły o jeden metr. Podstawową jednostką energii można też zdefiniować, określając wymagania dotyczące ciepła. Jedna kaloria (1cal) to ilość ciepła potrzebna do tego, aby podnieść temperaturę 1 cm<sup>3</sup> wody o 1°C. Jest to bardzo niewielka ilość energii: uzyskanie takiego samego efektu dla 1 kg wody wymaga 1000-krotnie większej energii, a dokładnie 1 kilokalorii (1 kcal; pełną listę przedrostków wielokrotności znajdziesz w dodatku w podrozdziale „Podstawowe miary”). Pamiętając o stosunku ciepła do pracy, wystarczy tylko zamienić kalorie na dżule (jedna kaloria równa się mniej więcej 4,2 J). Zamiana jednostek jest równie prosta w przypadku wciąż jeszcze popularnej angielskiej niemetrycznej jednostki miary — brytyjskiej jednostki ciepła, bowiem jedna Btu zawiera mniej więcej 1000 J (a dokładnie 1055 J). Dobrym kryterium porównawczym jest średnie dzienne zapotrzebowanie na pożywienie. W przypadku większości dorosłych osób prowadzących umiarkowanie aktywny tryb życia jest to 2 – 2,7 Mcal, czyli około 8 – 11 MJ, a żeby dostarczyć organizmowi 10 MJ, można na przykład zjeść 1 kg pełnoziarnistego chleba.

W 1782 roku James Watt w swojej książce *Blotting and Calculation Book* obliczył, że koń zaprzęzony do młyna pracuje w tempie 32 400 stopofuntów na minutę. Rok później zaokrąglił tę liczbę do 33 000 stopofuntów [Dickinson 1939]. Swoje obliczenia oparł na założeniu, że średnie tempo chodzenia konia wynosi około trzech stóp na sekundę, ale nie wiemy, dlaczego określił średni uciąż na poziomie około 180 funtów. Bywały zwierzęta, które miały aż tak dużą siłę, ale większość koni w XVIII-wiecznej Europie nie byłaby w stanie osiągnąć mocy jednego konia mechanicznego. Obecnie standardowa jednostka mocy — 1 wat (W) — jest równa przepływowi 1 dżula (J) w ciągu sekundy. Jeden koń mechaniczny jest równy mniej więcej 750 W (a dokładnie 745,699 W). Spożycie 8 MJ dziennie odpowiada mocy 90 W ( $8 \text{ MJ} \div 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s}$ ), czyli mniej niż wynosi moc standardowej żarówki (100 W). Podwójny toster potrzebuje mocy 1000 W, czyli 1 kW; małe samochody wytwarzają około 50 kW; a duża elektrownia węglowa lub jądrowa produkuje elektryczność na poziomie 2 GW.

**Rysunek 1.3**

Dwa konie obracają kołowrót, który pompuje wodę we francuskiej fabryce dywanów z połowy XVIII w. (reprodukcja z *Encyclopédie* [Diderot i d'Alembert 1769 – 1772]). W tamtych czasach typowy koń nie był w stanie pracować ze stałą mocą jednego konia mechanicznego. James Watt świadomie dokonał tego przeszacowania, żeby mieć pewność, że jego klienci, którzy w miejsce żywych zwierząt zamontują silniki parowe z mocą określoną w koniach mechanicznych, będą usatysfakcjonowani

**Ramka 1.4****Gęstość energetyczna produktów spożywczych i paliw**

Klasyfikacja	Przykłady	Gęstość energetyczna (MJ/kg)
Produkty spożywcze		
Bardzo niska	warzywa, owoce	0,8 – 2,5
Niska	bulwy, mleko	2,5 – 5,0
Średnia	mięso	5,0 – 12,0
Wysoka	płatki śniadaniowe i nasiona roślin strączkowych	12,0 – 15,0
Bardzo wysoka	oleje, tłuszcze zwierzęce	25,0 – 35,0
Paliwa		
Bardzo niska	torf, zielone gałęzie, trawa	5,0 – 10,0
Niska	resztki poźniwne, drewno wysuszone na powietrzu	12,0 – 15,0
Średnia	suche drewno	17,0 – 21,0
	węgiel kamienny	18,0 – 25,0
Wysoka	węgiel drzewny, antracyt	28,0 – 32,0
Bardzo wysoka	ropa naftowa	40,0 – 44,0

Źródło: Dokładna gęstość poszczególnych produktów spożywczych i paliw została podana w: Merrill, Watt [1973], Jenkins [1993] oraz USDA [2011].

**Ramka 1.5****Gęstości mocy paliw roślinnych**

Fotosynteza powoduje przetworzenie niecałych 0,5% promieniowania emitowanego przez Słońce w nową biomasę roślinną. Najlepsza wydajność drewna opałowego pochodzącego z tradycyjnych szybko rosnących gatunków drzew (topoli, eukaliptusa, sosny) wynosiła nie więcej niż 10 t/ha, a w suchszych regionach nie przekraczała 5–10 t/ha [Smil 2015b]. Przy średniej gęstości energetycznej suchego drewna wynoszącej 18 GJ/t plon o wielkości 10 t/ha przełożyłby się na gęstość mocy około 0,6 W/m<sup>2</sup>: (10 t/ha × 18 GJ) ÷ 3,15 × 10<sup>7</sup> (sekund w jednym roku) = ~5708 W; 5708 W ÷ 10 000 m<sup>2</sup> (ha) = ~0,6 W/m<sup>2</sup>. Duże XVIII-wieczne miasto musiało przeznaczyć co najmniej 20–30 W/m<sup>2</sup> swojego zabudowanego obszaru na ogrzewanie, gotowanie i działalność rzemieślniczą, a drewno opałowe pochodziło z obszaru co najmniej 30-krotnie, a nawet 50-krotnie większego.

Jednak miasta potrzebowały mnóstwo węgla drzewnego, jedynego bezdymnego paliwa w epoce przedin-

dustrialnej powszechnie stosowanego do ogrzewania wewnętrznego przez wszystkie tradycyjne cywilizacje, a ogrzewanie tym węglem wiązało się z dalszą znaczącą utratą energii. Nawet w połowie XVIII w. typowy stosunek węgla drzewnego do drewna wciąż był wysoki i wynosił 1:5, co z punktu widzenia energii (czyli 18 GJ/t dla suchego drewna i 29 GJ/t dla węgla drzewnego — praktycznie czystego węgla) oznacza, że sprawność przemiany wynosiła tylko 30% (5×18 ÷ 29 = 0,32), a gęstość mocy zbiorów drewna do produkcji węgla drzewnego wynosiła tylko około 0,2 W/m<sup>2</sup>. W rezultacie duże przedindustrialne miasta leżące w obszarach o umiarkowanym klimacie na półkuli północnej i mocno uzależnione od węgla drzewnego (dobrymi przykładami są chińskie Xi'an albo Pekin) potrzebowały zalesionego obszaru co najmniej 100-krotnie większego od nich, żeby mogły zapewnić mieszkańcom stałe dostawy tego paliwa.

**Gęstość mocy** to tempo produkcji lub zużycia energii na jednostkę obszaru. Zatem jest ona krytycznym strukturalnym wyznacznikiem w systemach energetycznych [Smil 2015b]. Na przykład wielkość miasta we wszystkich tradycyjnych społeczeństwach zależała od drewna opałowego i węgla drzewnego i była wyraźnie ograniczona przez naturalnie niską gęstość mocy produkcyjnej masy roślinnej (ramka 1.5, rysunek. 1.4). Gęstość mocy



**Rysunek 1.4**

Węglarstwo w Anglii na początku XVII w. przedstawione w książce *Silva* Johna Evelynia [1607]

odgrywa istotną rolę w kontekście rozwijającego się przemysłu: **sprawność przemiany energetycznej**. Ten stosunek „wejścia — wyjścia” opisuje wydajność konwerterów energii takich jak piece, silniki czy źródła światła. Nie mamy żadnego wpływu na rozproszenie energii, ale możemy poprawić sprawność przemiany, zmniejszając ilość energii potrzebnej do wykonania określonych prac (ramka 1.6). Te udoskonalenia są obwarowane fundamentalnymi ograniczeniami (termodynamicznymi, mechanicznymi), ale w przypadku pewnych procesów udało nam się zbliżyć do granic praktycznej sprawności. W większości przypadków jednak — obejmujących między innymi popularne konwertery energii, takie

zrównoważonego rocznego wzrostu drzewa rosnącego w umiarkowanym klimacie jest w najlepszym razie równa 2% gęstości mocy konsumpcji energii obejmującej tradycyjne miejskie ogrzewanie, gotowanie i produkcję. Dlatego miasta musiały czerpać paliwo z pobliskich terenów, których obszar był co najmniej 30-krotnie większy od nich samych. To spowodowało spowolnienie rozwoju miast, nawet jeśli inne zasoby, takie jak jedzenie i woda, były dostępne w wystarczających ilościach.

Jest jednak jeszcze inna miara, która

#### **Ramka 1.6**

##### **Zwiększanie sprawności i paradoks Jevonsa**

Postęp techniczny przyniósł znaczącą poprawę wydajności w wielu obszarach, a historia oświetlenia jest jednym z najlepszych tego przykładów [Nordhaus 1998; Fouquet, Pearson 2006]. Świece przetwarzają w światło zaledwie 0,01% energii chemicznej łożu lub wosku. Żarówki stworzone przez Edisona w latach 80. XIX w. były mniej więcej 10-krotnie wydajniejsze. Na początku XX w. elektrownie opalane węglem miały sprawność na poziomie 10%, a żarówki zmieniały nie więcej niż 1% elektryczności w światło, co oznacza, że jedynie około 0,1% energii chemicznej węgla zmieniało się w światło [Smil 2005]. Obecnie najlepsze elektrownie z gazowymi turbinami w układzie kombinowanym (używające gorącego gazu wylotowego z turbiny gazowej do tego, aby wytworzyć parę do turbiny parowej) mają sprawność na poziomie około 60%, podczas gdy maksymalna sprawność świetlówek wynosi 15%, podobnie jak diod elektroluminescencyjnych (LED) [USDOE 2013]. To oznacza, że około 9% energii gazu ziemnego kończy jako światło — jest to 90-krotny zysk w porównaniu z końcem lat 80. XIX w. Tak duża poprawa pomogła zaoszczędzić kapitał, zmniejszyć koszty operacyjne, a także obniżyć negatywny wpływ działalności człowieka na środowisko.

Jednak w przeszłości wzrost sprawności konwersji nie zawsze przynosił realną oszczędność energii. W 1865 angielski ekonom Stanley Jevons (1835–1882) zauważył, że wprowadzeniu wydajniejszych silników parowych towarzyszył duży wzrost konsumpcji węgla. Doszedł on do następującego wniosku: „Kompletnym błędem jest zakładanie, że ekonomiczne zużycie paliw jest równoznaczne ze zmniejszeniem konsumpcji. W rzeczywistości jest zupełnie na odwrót. Zazwyczaj jest tak, że nowe systemy ekonomiczne prowadzą do zwiększenia konsumpcji zgodnie z zasadą zaobserwowaną w wielu analogicznych przypadkach” [Jevons 1865, s. 140]. Jego spostrzeżenie zostało potwierdzone przez wielu innych badaczy [Herring 2004, 2006; Polimeni i in. 2008], jednak w bogatych krajach — tych, w których wysokie wykorzystanie energii na mieszkańca doprowadziło lub może doprowadzić do osiągnięcia poziomu nasycenia — efekt ten słabnie. W rezultacie efekt odbicia wywołany wyższą sprawnością na etapie końcowym często jest niewielki, a z czasem maleje jeszcze bardziej. Z kolei pewne ogólnogospodarcze wzrosty mogą być nieistotne, a nawet przynosić pozytywne skutki netto [Goldstein, Martinez i Roy 2011].

jak silniki wewnętrznego spalania i źródła światła — wciąż można jeszcze wiele poprawić.

Kiedy mówimy o sprawności w kontekście produkcji artykułów spożywczych (obliczamy ją, dzieląc energię w pożywieniu przez energię produktów użytych do uprawy lub hodowli), paliw lub elektryczności, zazwyczaj określamy ją mianem **zwrotu energii**. W tradycyjnym rolnictwie opartym wyłącznie na sile zwierząt pociągowych zwrot energii netto musiał wynosić dużo więcej niż jeden: jadalne plony musiały zawierać więcej energii niż jedzenie i pasza stanowiące pożywienie nie tylko dla ludzi i zwierząt produkujących te plony, ale również dla niepracujących członków rodziny. Jednak pojawia się niemożliwy do rozwiązania problem, gdy próbujemy porównać pod kątem zwrotu energii tradycyjne agrokultury napędzane wyłącznie energią pochodzenia zwierzęcego (czyli obejmujące tylko transformację promieniowania słonecznego zachodzącą tuż po jego wchłonięciu) ze współczesnym rolnictwem, które jest zasilane bezpośrednio (paliwo do pracy na polu) i pośrednio (energia potrzebna do syntetyzowania nawozów i pestycydów, a także do budowania sprzętów używanych na roli), co automatycznie przekłada się na niższy zwrot energii niż w tradycyjnym rolnictwie (ramka 1.7).

I wreszcie ostatnia miara: **energochłonność**, która określa koszt produktów, usług — a także samej energii — a nawet łączne wyniki ekonomiczne w standardowych jednostkach energii. Weźmy dla przykładu kilka powszechnie używanych materiałów: aluminium i plastik są bardzo energochłonne, natomiast szkło i papier są stosunkowo mało energochłonne. Drewno (pomijając koszt jego fotosyntezy) jest najmniej energochłonnym z szeroko stosowanych materiałów (ramka 1.8). Postęp techniczny, jaki się dokonał w ciągu ostatnich dwóch stuleci, przyniósł znaczący spadek energochłonności w różnych obszarach naszego życia. Najbardziej zauważalnym z nich jest chyba przetapianie surówki hutniczej w wielkich piecach opalanych koksem — proces, podczas którego obecnie zużywa się mniej niż 10% energii na jednostkę masy gorącego metalu w porównaniu z tą, jaka była zużywana w produkcji surówki opartej na węglu drzewnym w epoce przedindustrialnej [Smil 2016].

Energetyczny koszt energii (często nazywany EROI od angielskich słów *energy return on investment*, chociaż bardziej poprawne byłoby EROEI — *energy return on energy investment*, czyli zwrot energii wobec energii zainwestowanej) to wiele mówiący wskaźnik — pod

### Ramka 1.7

#### Porównanie zwrotu energii w produkcji żywności

Od wczesnych lat 70. XX w. ludzie używają współczynników zwrotu energii do udowodnienia wyższości tradycyjnego rolnictwa nad współczesną gospodarką rolną, charakteryzującą się niskim zwrotem energii. Takie porównania są oparte na błędnym myśleniu, które nie uwzględnia zasadniczej różnicy między tymi dwoma współczynnikami. W przypadku tradycyjnego rolnictwa mamy do czynienia z prostym stosunkiem wartości energetycznej żywności zebranej podczas zbiorów do wartości energetycznej żywności i paszy potrzebnych do wyprodukowania tych zbiorów przy wykorzystaniu siły roboczej ludzi i zwierząt. Natomiast we współczesnym rolnictwie głównym mianownikiem są nieodnawialne paliwa kopalne potrzebne do zasilania urządzeń rolniczych, a także do produkcji tych urządzeń oraz środków chemicznych używanych do uprawy; wkład w postaci siły roboczej jest natomiast nieznaczący.

Jeżeli ograniczymy się do prostego porównania ilości spożywanej energii do nakładu pracy, okaże się, że współczesne systemy — z minimalnym wkładem siły roboczej człowieka i zerowym wkładem siły zwierząt pociągowych — są lepsze niż wszystkie tradycyjne praktyki. Gdyby jednak w koszczie wyprodukowania zboża uwzględnić również wszystkie przekształcone paliwa kopalne i elektryczność (sprowadzając je najpierw do wspólnego mianownika), zwrot energii we współczesnym rolnictwie byłby dużo mniejszy niż w rolnictwie tradycyjnym. Wykonanie takiego obliczenia jest możliwe dzięki fizycznej równoważności energii. Zarówno pożywienie, jak i paliwo można wyrazić w identycznych jednostkach. Pozostaje jednak oczywisty problem wynikający z porównywania dwóch fundamentalnie różnych kwestii: nie ma satysfakcjonującego sposobu na proste i bezpośrednie porównanie zwrotu energii w dwóch systemach rolnictwa, które są oparte na dwóch kompletnie różnych rodzajach nakładu energetycznego.

warunkiem, że porównujemy wartości, które zostały obliczone za pomocą identycznych metod przy użyciu standardowych założeń i jasno określonych ograniczeń analitycznych. Współczesne wysokoenergetyczne społeczeństwa preferują używanie paliw kopalnych, które mają najwyższy zwrot energii netto — stąd nasze upodobanie do ropy naftowej (mówiąc ogólnie) i do bogatych złóż na Bliskim Wschodzie (mówiąc bardziej szczegółowo); wysoka gęstość energetyczna ropy i związane z nią duże możliwości transportowania to kolejne oczywiste zalety (ramka 1.9).

**Ramka 1.8**  
Energochłonność popularnych materiałów

Materiał	Koszt energetyczny (MJ/kg)	Proces
Aluminium	175 – 200	metal z boksytu
Cegły	1 – 2	wypalane z gliny
Cement	2 – 5	z surowych materiałów
Miedź	90 – 100	z rudy
Materiały wybuchowe	10 – 70	z surowych materiałów
Szkło	4 – 10	z surowych materiałów
Żwir	< 1	wydobywany
Żelazo	12 – 20	z rudy żelaza
Drewno	1 – 3	z drzewostanu
Papier	23 – 35	z drzewostanu
Plastik	60 – 120	z węglowodorów
Sklejka	3 – 7	z drzewostanu
Piasek	< 1	wydobywany
Stal	20 – 25	z surówki hutniczej
Stal	10 – 12	ze złomu
Kamień	< 1	wydobywany

Źródło: Smil [2014b].

**Ramka 1.9**  
Zwrot energii wobec energii inwestowanej

Różnice w jakości i dostępności paliw kopalnych są gigantyczne: spróbujmy na przykład porównać cienkie warstwy podziemnych pokładów niskojakościowego węgla z grubą warstwą dobrego węgla kamiennego, który można wydobywać w kopalniach odkrywkowych — albo supergigantyczne złoża paliw kopalnych na Bliskim Wschodzie z niskowydajnymi szybami, które wymagają ciągłego pompowania. Z tego powodu konkretne wartości EROEI znacząco się od siebie różnią i mogą się zmieniać wraz z powstawaniem coraz wydajniejszych technik wydobywania. Poniższe zakresy to tylko przybliżone wskaźniki, które

pokazują różnice między czołowymi metodami wydobywania i konwersji paliwa [Smil 2008a; Murphy, Hall 2010]. Dla produkcji węgla mieszczą się one w zakresie 10 – 80, dla ropy naftowej i gazu mogą wynosić od 10 do sporo ponad 100; dla dużych turbin wiatrowych w najbardziej wietrznych lokalizacjach mogą sięgać 20, ale zwykle nie przekraczają 10; dla fotowoltaicznych ogniw słonecznych nie są wyższe niż 2; a dla współczesnych biopaliw (etanol, biodiesel) wynoszą w najlepszym razie tylko 1,5, chociaż ich produkcja często wiąże się ze stratami energii i z zerowym zyskiem netto (EROEI wynosi zaledwie 0,9 – 1,0).



## Zawiłości i zastrzeżenia

Używanie standardowych jednostek do mierzenia zasobów energii i jej przepływów jest oczywistym i rozsądnym rozwiązaniem z fizycznego i naukowego punktu widzenia, jednak sprowadzanie do wspólnego mianownika często prowadzi do błędnych wniosków. Przede wszystkim miary te nie są w stanie odzwierciedlić kluczowych jakościowych różnic pomiędzy różnymi formami energii. Dwa rodzaje węgla mogą mieć identyczną gęstość energetyczną, ale jeden z nich może się spalać bardzo czysto i pozostawiać po sobie tylko niewielką ilość pyłów, natomiast drugi może się palić intensywnie, emitując duże ilości dwutlenku siarki i pozostawiając dużo odpadów w postaci niedopałów. Duże zasoby węgla o wysokiej gęstości energetycznej, będącego doskonałym paliwem do silników parowych (przymiotnik „bezdymny” często używany w tym kontekście należy traktować w kategoriach relatywnych), to jeden z kluczowych czynników, które zapewniły Wielkiej Brytanii dominację w XIX-wiecznym transporcie morskim, ponieważ ani Francja, ani Niemcy nie posiadały aż tyle węgla.

Abstrakcyjne jednostki energii nie są w stanie odzwierciedlić różnicy między biomasą jadalną a niejadalną. Identyczne masy pszenicy i suchej słomy pszennej zawierają praktycznie taką samą ilość energii cieplnej, jednak słoma, składająca się głównie z celulozy, hemicelulozy i ligniny, nie jest trawiona przez ludzi, natomiast pszenica, zawierająca około 70% złożonych węglowodanów (w tym skrobi) i aż do 14% białka, jest doskonałym źródłem podstawowych składników odżywczych. Jednostki te nie informują również dokładnie o źródle wartości energetycznej, co ma duże znaczenie z punktu widzenia prawidłowej diety. Wiele pokarmów wysokoenergetycznych nie zawiera białka i lipidów (bądź też ma ich bardzo mało) — dwóch składników odżywczych potrzebnych do prawidłowego rozwoju organizmu; mogą one też nie dostarczać niezbędnych mikroskładników, czyli witamin i mikroelementów.

Istnieją jeszcze inne ważne cechy, których nie da się uwzględnić, używając abstrakcyjnych miar. Dostęp do zapasów energii jest bez wątpienia kluczową kwestią. Drewno z pnia i drewno z gałęzi mają tę samą gęstość energetyczną, ale bez dobrych toporów i pił ludzie w wielu przedindustrialnych społeczeństwach mogli pozyskiwać tylko ten drugi rodzaj paliwa. Do dziś jest to normą w najbiedniejszych częściach Afryki i Azji, gdzie kobiety i dzieci ręcznie zbierają drzewną fitomasę. Forma tej fitomasy — a co za tym idzie, również możliwości jej transportu — również ma znaczenie, bo osoby te niosą potem zebrane drewno (gałęzie) na rękach do domu, często pokonując długie dystanse. Łatwość używania i sprawność przemiany mogą być czynnikami decydującymi o wyborze określonego paliwa. Dom można ogrzewać drewnem, węglem, olejem opałowym albo gazem ziemnym, ale sprawność najlepszych pieców gazowych wynosi obecnie aż do 97%, dzięki czemu są one dużo tańsze w obsłudze niż dowolna inna opcja.

Palenie słomą w prostym piecu wymaga częstego dorzucania do ognia, podczas gdy duże kawałki drewna można zostawić na kilka godzin bez konieczności dokładania czegośkolwiek. Niewentylowane (bądź słabo wentylowane — przez dziurę w suficie) domowe paleniska opalane suchym obornikiem wytwarzają dużo więcej dymu niż dobrej jakości piece opalane drewnem sezonowym, a spalanie biomasy w pomieszczeniach zamkniętych wciąż jest główną przyczyną chorób układu oddechowego w wielu krajach o niskich dochodach

[McGranahan, Murray 2003; Barnes 2014]. W przypadku energii, której pochodzenie nie jest dokładnie określone, takie wskaźniki jak gęstość czy przepływ nie odróżniają energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych od energii z paliw kopalnych, a przecież rozróżnienie to jest fundamentalne dla zrozumienia natury i trwałości obu wspomnianych systemów energetycznych. Współczesne cywilizacje powstały dzięki intensywnemu (i wciąż rosnącemu) spalaniu paliw kopalnych, jednak ta praktyka jest wyraźnie ograniczona przez ilość zasobów obecnych w skorupie ziemskiej, a także przez konsekwencje środowiskowe spalania węgla i węglowodorów. Przetrwanie wysokoenergetycznych społeczeństw zależy wyłącznie od definitywnego przejścia na inne paliwa niż kopalne.

Kolejne trudności pojawiają się, gdy porównujemy wydajność przemiany energetycznej w napędach zwierzęcych i niezwierzęcych. W tym drugim przypadku jest to po prostu stosunek nakładu paliwa lub energii elektrycznej do produkcji energii użytkowej. Natomiast w pierwszym przypadku codzienne spożycie jedzenia (lub paszy) nie powinno być traktowane jako nakład energetyczny potrzebny do wykonania pracy przez człowieka lub zwierzę, ponieważ większość tej energii jest wykorzystywana w podstawowych procesach metabolicznych, czyli we wspomaganie pracy najważniejszych narządów i w utrzymaniu stałej temperatury ciała — a podstawowy metabolizm odbywa się niezależnie od tego, czy dana osoba lub zwierzę pracuje, czy odpoczywa. Prawdopodobnie najbardziej satysfakcjonującym rozwiązaniem jest obliczenie kosztu energetycznego netto (ramka 1.10).

Należy jednak pamiętać, że nawet w dużo prościej zorganizowanych społeczeństwach niż nasze praca umysłowa (czyli na przykład wymyślenie, jak się zabrać do jakiegoś za-

### Ramka 1.10

#### Obliczenie kosztu energetycznego pracy ludzkiej netto

Nie istnieje żaden uniwersalnie akceptowalny sposób na wyrażenie kosztu energetycznego ludzkiej pracy, a najlepszą opcją jest chyba obliczenie kosztu energetycznego netto — jest to konsumpcja energii wykraczająca poza egzystencjalne potrzeby danej osoby, które i tak musiałaby zaspokoić, gdyby nie wykonywała żadnej pracy. Takie założenie umożliwia obciążenie ludzkiej pracy rzeczywistym wzrostem kosztu energii. Całkowity wydatek energetyczny to iloczyn podstawowego tempa metabolizmu (inaczej metabolizmu w stanie spoczynku) i poziomu aktywności fizycznej ( $CWE = PTM \times PAF$ ), a rosnący koszt energii będzie oczywiście stanowić różnicę między  $CWE$  a  $PTM$ .  $PTM$  dorosłego mężczyzny ważącego 70 kg wynosi około 7,5 MJ na dzień, a kobiety ważącej 60 kg około 5,5 MJ na dzień. Jeśli założymy, że ciężka praca zwiększa codzienne zapotrzebowanie na energię o około 30%, to koszt energetyczny netto wyniesie około 2,2 MJ dziennie dla mężczyzny i 1,7 MJ dziennie dla kobiety. Dlatego we wszystkich obliczeniach codziennego kosztu energetycznego netto dotyczących takich aktywności jak zbieractwo i łowiectwo, tradycyjna uprawa i praca w przemyśle będą używać uśrednionej liczby 2 MJ na dzień.

Nie należy traktować codziennego spożycia żywności jako nakładu energetycznego na pracę: podstawowy metabolizm (umożliwiający pracę najważniejszych narządów i krążenie krwi, a także utrzymujący stałą temperaturę ciała) działa bez względu na to, czy odpoczywamy, czy pracujemy. Badania fizjologii mięśni, a zwłaszcza prace Archibalda v. Hilla (1886–1977, laureat Nagrody Nobla z fizjologii z 1922 r.) umożliwiły liczbowe określenie wydajności pracy mięśni [Hill 1922; Whip, Wasserman 1969]. Sprawność netto stałej aktywności aerobowej wynosi około 20%, co oznacza, że 2 MJ metabolicznej energii wykorzystanej w ciągu jednego dnia do aktywności fizycznej daje pracę użytkową o wartości około 400 kJ — i tej przybliżonej liczby będą używać w swoich obliczeniach. Z kolei Kander, Malanima i Warde [2013] w swoim historycznym porównaniu źródeł energii odwołali się do miary całkowitego spożycia żywności, a nie do rzeczywistego wydatku energetycznego. Założyli oni, że średnie roczne spożycie żywności wynosi 3,9 GJ na osobę, a liczba ta pozostała niezmienną od 1800 r. aż do 2008 r.

dania, jak je wykonać w warunkach ograniczonej siły albo jak obniżyć jego koszt energetyczny) zawsze stanowiła większą część wysiłku niż praca fizyczna, a metaboliczny koszt myślenia — nawet intensywnego — jest bardzo niewielki w porównaniu z fizyczną pracą mięśni. Nie można też zapominać, że rozwój umysłowy wymaga wielu lat nauki języka, socjalizacji i zdobywania umiejętności poprzez zbieranie doświadczenia i podpatrywanie mentorów. Wraz z rozwojem społeczeństw proces nauki stał się dłuższy i trudniejszy, do czego przyczyniło się wprowadzenie formalnych systemów edukowania i szkolenia — usług, które z czasem zaczęły wymagać znaczących pośrednich nakładów energii potrzebnych do wspomaganie niezbędnej fizycznej infrastruktury i utrzymania wysokiego poziomu specjalistycznej wiedzy.

I tak koło się zamyka. Przeprowadzanie pewnych obliczeń ilościowych jest niezbędne, ale prawdziwe zrozumienie energii w kontekście jej historii wymaga dużo więcej niż zredukowania wszystkiego do obliczeń numerycznych w dżulach i watach i traktowania ich jak kompleksowego wyjaśnienia wszystkich zagadnień. Ja w swoich rozważaniach uwzględnię oba spojrzenia: poruszę takie kwestie jak wymagania dotyczące mocy i gęstości oraz zwrócę uwagę na stały wzrost wydajności, ale nie zignoruję licznych atrybutów liczbowych, które ograniczają lub wspomagają określone formy użycia energii. I chociaż imperatyw zapotrzebowania na energię i korzystania z niej odcisnął silne piętno na naszej historii, wiele szczegółów, sekwencji i konsekwencji tych fundamentalnych wyznaczników ewolucyjnych może zostać wyjaśnionych tylko poprzez odwołanie się do ludzkich motywacji i preferencji, a także przez uświadomienie sobie zaskakujących i często niewytłumaczalnych decyzji, które ukształtowały historię naszej cywilizacji.



# PROGRAM PARTNERSKI

— GRUPY HELION —



1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW w działający bankomat!

**Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!**

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA  
**Helion**

# ENERGIA I CYWILIZACJA: POZNAJ FASCYNUJĄCĄ HISTORIĘ ŚWIATA!

Energia jest warunkiem wszystkiego. Energia ukształtowała Ziemię przez ruchy płyt tektonicznych i doprowadziła do bujnego rozwoju niezliczonych form życia. Wszystkie te ekosystemy i układy troficzne zależały od przepływu energii i ona modyfikowała je w ograniczonym stopniu. Ten prastary układ został zmieniony przez człowieka: jedyną istotę, która, używając intelektu, systematycznie ujarzmiła i wykorzystywała różne formy energii. Epokowe odkrycia niemal zawsze miały związek z energią i konsekwentnie wpływały na rolnictwo, przemysł, wojny, ekonomię, urbanizację, sposób życia, politykę czy środowisko.

W tej książce – monumentalnym dziele wybitnego myśliciela – znajdziemy dogłębne, szczegółowe i równocześnie panoramiczne wyjaśnienie znaczenia ludzkich zdolności przetwarzania energii w odniesieniu do działania mechanizmów kulturowego i cywilizacyjnego postępu w ciągu ostatnich 10 tysięcy lat. Przedstawiono tutaj szeroką gamę metod, których użyła ludzkość, aby zmusić energię do napędzania rozwoju, i zarazem konsekwencje tych procesów: wpływ rosnących możliwości wykorzystania coraz większych ilości energii na życie człowieka. Publikacja ta w oryginalny, a przy tym mądry sposób poszerza horyzonty i pozwala spojrzeć na historię cywilizacji z zupełnie innej perspektywy.

## W książce:

- rozwój wiedzy o pozyskiwaniu, przekształcaniu i wykorzystywaniu energii
- kontrola zasobów i przepływów energii a kontrola społeczeństw
- różne drogi intensyfikacji produkcji energii na przestrzeni dziejów cywilizacji
- innowacje w pozyskiwaniu energii a konsekwencje społeczne, polityczne i środowiskowe
- kryzysy i transformacje energetyczne w historii świata



## PROF. VACLAV SMIL

proceedzi interdyscyplinarne badania w dziedzinie zmian środowiskowych, produkcji żywności, innowacji technicznych, oceny ryzyka i polityki publicznej. Napisał 40 książek i prawie

500 artykułów. Jest emerytowanym profesorem University of Manitoba oraz członkiem Royal Society of Canada. Uważany za jednego ze 100 najbardziej znaczących światowych myślicieli, pracował jako konsultant dla instytucji międzynarodowych, wyładał też na wielu uczelniach na całym świecie.