



# Содержание

Введение и слова признательности . . . . .	7
1. Энергия и общество . . . . .	8
Потоки, запасы и средства контроля . . . . .	11
Концепции и единицы измерения . . . . .	14
Сложности и предупреждения . . . . .	23
2. Энергия в доисторические времена . . . . .	27
Общества охотников-собирателей . . . . .	33
Истоки сельского хозяйства . . . . .	46
3. Традиционное сельское хозяйство . . . . .	53
Общие и разные практики . . . . .	56
Работа в поле . . . . .	57
Господство зерновых . . . . .	61
Циклы севооборота . . . . .	66
Маршруты интенсификации . . . . .	68
Тягловые животные . . . . .	69
Орошение . . . . .	78
Внесение удобрений . . . . .	84
Разнообразие культурных растений . . . . .	88
Постоянство и инновации . . . . .	89
Древний Египет . . . . .	90
Китай . . . . .	92
Культуры Мезоамерики . . . . .	98
Европа . . . . .	101
Северная Америка . . . . .	107
Пределы традиционного земледелия . . . . .	112
Достижения . . . . .	113
Питание . . . . .	118
Ограничения . . . . .	120
4. Топливо и первичные движители доиндустриальной эпохи . . . . .	128
Первичные движители . . . . .	132
Одушевленная мощность . . . . .	133
Мощность воды . . . . .	146
Мощность ветра . . . . .	156
Растительное топливо . . . . .	162
Дерево и древесный уголь . . . . .	163
Пожнивные остатки и навоз . . . . .	166
Хозяйственные нужды . . . . .	168
Приготовление пищи . . . . .	169
Тепло и свет . . . . .	172
Транспорт и строительство . . . . .	175
Наземный транспорт . . . . .	175
Гребные и парусные суда . . . . .	185
Здания и другие сооружения . . . . .	193

## Содержание

Металлургия . . . . .	203
Цветные металлы . . . . .	204
Железо и сталь . . . . .	207
Военное дело. . . . .	213
Одушевленные энергии . . . . .	213
Взрывчатые вещества и огнестрельное оружие . . . . .	218
5. Ископаемое топливо, первичное электричество и возобновляемые источники энергии . . . . .	220
Великий переход . . . . .	223
Начало и распространение добычи каменного угля . . . . .	224
От древесного угля к коксу . . . . .	228
Паровые двигатели . . . . .	230
Нефть и двигатели внутреннего сгорания . . . . .	239
Электричество . . . . .	249
Технические инновации . . . . .	260
Уголь . . . . .	264
Углеводороды . . . . .	268
Электричество . . . . .	273
Возобновляемые источники энергии. . . . .	277
Первичные двигатели в транспорте . . . . .	281
6. Цивилизация ископаемого топлива . . . . .	286
Беспрецедентная мощность и ее использование . . . . .	287
Энергия в сельском хозяйстве . . . . .	295
Индустриализация . . . . .	302
Транспорт. . . . .	313
Информация и коммуникация . . . . .	322
Экономический рост . . . . .	331
Последствия и проблемы. . . . .	337
Урбанизация . . . . .	338
Качество жизни . . . . .	342
Политические импликации. . . . .	350
Оружие и войны . . . . .	354
Изменения окружающей среды . . . . .	366
7. Энергия в мировой истории . . . . .	370
Большие паттерны в использовании энергии . . . . .	370
Энергетические эпохи и переходы . . . . .	372
Долгосрочные тенденции и снижение затрат. . . . .	382
Что не изменилось? . . . . .	392
Между детерминизмом и выбором. . . . .	401
Императивы энергетических потребностей и видов использования энергии . . . . .	402
Важность средств контроля . . . . .	409
Пределы энергетических объяснений . . . . .	413
Приложение. . . . .	426
Базовые единицы измерения . . . . .	426
Научные единицы измерения, их множители и делители . . . . .	428
Хронология достижений, связанных с энергией . . . . .	429
Мощность в истории . . . . .	435
Библиографические заметки . . . . .	437
Справочная литература. . . . .	438

## Введение и слова признательности

Я завершил работу над «Энергией в мировой истории» в июле 1993 года, книга вышла в 1994-м и оставалась в печати два десятилетия. Но с 1994 года исследования в области энергии ушли далеко вперед, и я сам внес в них вклад, написав девять книг, посвященных только энергетическим вопросам, а также дюжину междисциплинарных трудов со значительной энергетической составляющей. И когда я вновь решил коснуться этой удивительной темы, стало очевидно, что поверхностное обновление данных не поможет. В результате читателю предлагается в сущности новая работа с новым заголовком: текст почти на 60% объемнее, чем первая версия, в книге на 40% больше иллюстраций и в два раза больше ссылок на литературу, включены некоторые интересные вычисления, детальные объяснения важных тем и таблицы, без которых не обойтись. Я использовал цитаты из разнообразных источников, от классиков — Апулей, Лукреций, Плутарх — до исследователей девятнадцатого и двадцатого веков, таких как Бродель, Эден, Оруэлл и Сенанкур. Иллюстрации были обновлены, их созданием занимались Bounce Design в Виннипеге; две дюжины архивных фотографий отыскивались в корпорации Corbis в Сиэтле, их предоставили Ян Саундерс и Ану Хорсман. И как это всегда бывает в случае междисциплинарного исследования такого рода, книга не могла появиться без работ сотен историков, ученых, инженеров и экономистов.

*Виннипег, август 2016 года*

# 1. Энергия и общество

Энергия — единственная универсальная валюта, без ее трансформации в какой-либо форме невозможны никакие свершения. Проявления этих трансформаций варьируются от вращения галактик до термоядерных реакций в недрах звезд. На Земле они ранжируются от терраформирующих сил тектонических плит, которые делят на части дно океана и поднимают горные хребты, до кумулятивного эрозивного воздействия крохотных капель воды (еще римляне знали, что *gutta cavat lapidem non vi, sed saepe cadendo* — капля воды точит камень не силой, а постоянством). Жизнь на Земле — а несмотря на десятилетия попыток поймать внеземные сигналы, мы знаем только жизнь на нашей планете — была бы невозможной без фотосинтетического перехода солярной энергии в фитомассу (биомассу растений). Выживание людей зависит от этой трансформации, и на многих других потоках энергии держится существование нашей цивилизации.

Ричард Адамс (Adams 1982: 27) сказал по этому поводу:

«Мы можем придумать самые безумные идеи, но если у нас нет возможности воплотить их, то они так и останутся идеями... История действует непредсказуемым образом. Но события истории тем не менее опираются на структуру или организацию, которые должны гармонично сочетаться с их энергетическими компонентами».

Эволюция человеческих обществ привела к увеличению этих самых обществ, к росту сложности социальных и производственных процессов и к повышению качества жизни для все большего числа людей. С фундаментальной биофизической перспективы и доисторическую эволюцию человека, и ход человеческой истории можно рассматривать как поиск контроля над все большими запасами и потоками все более концентрированной и гибкой энергии в разных формах, над ее трансформацией со все более низкими затратами и высокой эффективностью в тепло, свет и движение. Подобная тенденция была обобщена Альфредом Лотка (1880–1949), американским математиком, химиком и статистиком, в его законе максимальной энергии: «В любой рассматриваемый момент естественный отбор будет действовать так, чтобы увеличить общую массу органической системы, чтобы увеличить скорость циркуляции материи через систему и чтобы увеличить общий поток энергии через систему до тех пор, пока остается неиспользованный остаток материи и доступной энергии» (Lotka 1922, 148).

История сменяющих друг друга цивилизаций, самых больших и сложных организмов нашей биосферы, идет в рамках этого принципа. Зависимость людей от все более и более мощных потоков энергии можно рассматривать как неизбежное

продолжение органической эволюции. Вильгельм Оствальд (1853–1932, лауреат нобелевской премии по химии 1909 года за работу в области катализа) был первым ученым, который явным образом приложил «второй закон энергетике ко всем и любым действиям и в особенности к совокупности человеческих действий...»: «Все виды энергии не годятся для этой трансформации, только определенные формы, которым вследствие этого дается имя свободных форм энергии... Свободная форма энергии, таким образом, является капиталом, который потребляют все существа всех видов, и посредством ее превращения совершается все» (Ostwald 1912, 83). Это привело его к формулировке энергетического императива: «Vergeude keine Energie, verwerte sie» — «Не тратьте энергию ни в какой форме, делайте ее полезной» (Ostwald 1912, 85).

Три цитаты иллюстрируют, как последователи Оствальда заново использовали его выводы и как некоторые из них устанавливали связь между энергией и всеми человеческими действиями намного более детерминистским и откровенным образом. Начало семидесятых отмечено работой Ховарда Одума (1924–2002), который предложил вариацию ключевой темы Оствальда: «Доступность источников энергии определяет количество рабочей активности, которая может существовать, а контроль над потоками энергии определяет силу в человеческих взаимоотношениях и в относительном влиянии человека на природу» (Odum 1971, 43). В конце восьмидесятых Рональд Фокс завершил книгу о роли энергии в эволюции словами «усовершенствование культурных механизмов происходит с каждым усовершенствованием в области стыковки энергетических потоков» (Fox 1988, 166).

Не нужно быть ученым, чтобы установить связь между запасом энергии и социальным развитием. Об этом Эрик Блэр, больше известный как Джордж Оруэлл (1903–1950), писал в 1937 году во второй главе повести «Дорога на причал Уигана», после того, как сам побывал на угольной шахте:

«Наша цивилизация, при всем уважении к Честертону, базируется на угле куда в большей степени, чем можно полагать, не задумываясь об этом. Машины, позволяющие нам жить, и машины, изготовляющие другие машины, все они прямо или косвенно зависят от угля. В метаболизме западного мира шахтер в угольной шахте стоит на втором месте по важности после того человека, который вспахивает почву. Он что-то вроде кариатиды, на плечах которой стоит все, не запачканное угольной сажой. По этой причине стоит понаблюдать за процессом добычи угля, если у вас есть шанс и вы готовы к трудностям» (Orwell 1937, 18).

Но повторное обозначение этой фундаментальной связи (как сделал Оруэлл) и утверждение, что культурные усовершенствования имеют место после каждого усовершенствования в области энергии (как сделал Фокс), — две разные вещи. Вывод Оруэлла не предвзят, а высказывание Фокса — откровенное изложение заново детерминистического постулата, выраженного двумя поколениями ранее антропологом Лесли Уайтом (1900–1975), который назвал его первым важным законом культурного развития: «При прочих равных условиях степень культурного

развития зависит прямым образом от количества энергии на душу населения, энергии освоенной и пущенной в работу» (White 1943, 346). В то время как не может быть противоречия между фундаментальной формулировкой Оствальда и заявлением о всеобъемлющем воздействии энергии на структуру и динамику эволюционирующих обществ (при всем уважении к Оруэллу), детерминистическая связь между уровнем использования энергии и культурными достижениями — в значительной степени спорная идея. Я оцениваю эту причинность (или ее отсутствие) в следующей главе данной книги.

Фундаментальная природа этого концепта не ставится под сомнение.

Роберт Линдсэй (Lindsay 1975, 2) писал:

«Если мы можем найти единственное слово, чтобы представить идею, которая прилагается к каждому элементу нашего существования способом, заставляющим нас чувствовать, что мы истинным образом его понимаем, то это значит, что мы достигли чего-либо экономичного и могущественного. Именно это и произошло с идеей, выраженной словом «энергия». Никакой другой концепт не объединил подобным образом наше понимание существующего».

Но что такое энергия?

Удивительно, но даже лауреаты Нобелевской премии сталкивались с трудностями, пытаясь дать внятный ответ на этот, казалось бы, простой вопрос. Ричард Фейнман (1918–1988) в своих знаменитых «Лекциях по физике» подчеркнул: «Важно понимать, что в сегодняшней физике мы не имеем представления о том, что такое энергия. Мы не можем представить, что энергия появляется в маленьких шариках определенного объема» (Feynman 1988, 4–2).

Из В	Электромагнитная	Химическая	Ядерная	Термальная	Кинетическая	Электрическая
Электромагнитная		Хемилюминесценция	Ядерные бомбы	Тепловое излучение	Ускоряющиеся заряды	Электромагнитное излучение
Химическая	Фотосинтез	Химическое обогащение		Кипячение	Разложение при облучении	Электролиз
Ядерная	Гамма-нейтронные реакции					
Термальная	Поглощение солнечного излучения	Сгорание	Деление/синтез	Теплообмен	Трение	Нагрев сопротивлением
Кинетическая	Радиометры	Метаболизм	Радиоактивность/ядерные бомбы	Термальное расширение/внутреннее сгорание	Механизмы	Электромоторы
Электрическая	Солнечные батареи	Топливные элементы/батареи	Ядерные батареи	Термоэлектричество	Электростанции	

**Рисунок 1.1.** Матрица энергетических преобразований. В ячейках, где существует несколько возможных вариантов, упомянуты только две, самые известные трансформации

Что мы точно знаем: вся материя в конечном итоге является энергией; энергия проявляет себя множеством путей; различные формы энергии связаны многочисленными трансформациями, многие из них универсальны, вездесущи и непрерывны, другие точно локализованы, встречаются нечасто и выглядят эфемерными (рис. 1.1). Понимание этих путей, потенциалов и трансформаций было достигнуто, быстро расширилось и стало системой на протяжении девятнадцатого века и определенным образом усовершенствовалось в двадцатом — несмотря на остающиеся сложности, касающиеся превращений энергии, — когда мы поняли сначала, как освободить ядерную энергию (теоретически в 30-х, практически к 1943 году), а затем как происходит фотосинтез (процесс был полностью описан на протяжении 50-х годов).

## **Потоки, запасы и средства контроля**

Все известные формы энергии крайне важны для существования человека, сама реальность предостерегает нас от того, чтобы расположить их по порядку значимости. Многое в истории было определено и ограничено как универсальными и планетарными потоками энергии, так и их региональными или локальными проявлениями. Фундаментальные свойства вселенной определяются гравитационной энергией, которая регулирует движение бесчисленного количества галактик и звездных систем. Гравитация также позволяет нашей планете вращаться вокруг Солнца на правильном расстоянии и поддерживает достаточный объем атмосферы, благодаря которой Земля и стала обитаемой (примечание 1.1).

---

### **Примечание 1.1. Гравитация и обитаемость Земли**

Приспособляемость основанного на углероде метаболизма определяется точкой замерзания воды, так как вода в жидкой форме требуется для формирования и существования органических молекул (нижний предел), а также температурой и давлением, при котором стабилизируются аминокислоты и распадаются протеины (верхний предел). Непрерывно обитаемая зона для Земли — предел орбитального радиуса, обеспечивающего оптимальные условия для жизни — очень узка (Perkins 2013). По результатам недавних расчетов стало ясно, что мы даже ближе к границе, чем думали ранее: ученые (Corrigan and co-workers 2014) сделали вывод, что, исходя из состава и давления атмосферы, орбита Земли находится на внутреннем краю обитаемой зоны, прямо на границе того радиуса, где вышедший из-под контроля парниковый эффект вызвал бы за пределами высокие температуры.

Около двух миллиардов лет назад достаточное количество диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) было поглощено океаном, архебактериями и микроводорослями, чтобы этот эффект не возник на Земле, но если бы планета находилась всего на 1% дальше от Солнца, то практически вся ее вода оказалась бы заперта в ледниках. Но даже при температурах внутри зоны оптимума планета не смогла бы поддерживать существование высокоорганизованной жизни без уникальной атмосферы, большей частью состоящей из азота, обогащенной

кислородом от фотосинтеза и содержащей набор важных газовых примесей, регулирующих температуру на поверхности. И эта тонкая газообразная оболочка не могла бы сохраниться, не будь планета достаточно большой, чтобы сформировать мощное гравитационное поле, которое и удерживает атмосферу на месте.

---

Как и в случае со всеми активными звездами, ядерный синтез заставляет Солнце гореть, и продукты термоядерных реакций достигают Земли в виде электромагнитной (солнечной, лучистой) энергии. Этот поток состоит из широкого спектра волн разной длины, в их число входит и видимый свет. Около 30% от этого колоссального потока отражается облаками и внешней поверхностью атмосферы, около 20% задерживается атмосферой и облаками, а остающееся, примерно половина, поглощается океанами и континентами, превращается в термальную энергию и переизлучается в пространство (Smil 2008a). Геотермальная энергия Земли добавляет свой, много меньший поток тепла: он образуется в результате исходного гравитационного сжатия планетарной массы и распада радиоактивной материи и запускает глобальные тектонические процессы, которые движут океанами и континентами и провоцируют вулканические извержения и землетрясения.

Только крошечная часть входящей лучистой энергии, менее чем 0,05%, трансформируется с помощью фотосинтеза в новые запасы химической энергии в растениях, обеспечивая незаменимую основу для всей остальной жизни. Органический метаболизм реорганизует питательные вещества в растущие ткани и поддерживает телесные функции и постоянную температуру тела у представителей высших видов. Пищеварение также генерирует механическую (кинетическую) энергию работающих мышц. В своих преобразованиях энергии животные ограничены размером тел и доступностью питательных веществ. Фундаментальной отличительной характеристикой нашего вида был выход за эти физические границы с помощью более эффективного использования мускулов и овладения энергией за пределами наших тел.

Обнаруженные с помощью человеческого интеллекта экстрасоматические виды энергии использовались для выполнения постоянно растущего списка задач, например для создания все более мощных первичных движителей и топлива, при сгорании которого выделяется тепло. Пусковой импульс в освоении того или иного вида энергии зависит от потока информации и от громадного разнообразия созданных нами орудий. Последние в свою очередь варьируются от простых, вроде каменных топоров и рычагов, до сложных машин внутреннего сгорания и реакторов, освобождающих энергию ядерного распада. Базовые эволюционные и исторические последствия нашего прогресса легко очертить с помощью широкого набора количественных терминов. Как и в случае с любым нефотосинтезирующим организмом, самая важная энергия поступает к нам с едой. Добыча пищи, которую практиковали гоминины, напоминала поведение в схожих обстоятельствах наших предков-приматов. Хотя некоторые приматы — и другие млекопитающие (включая

выдр и слонов), — некоторые птицы (вороны и попугаи) и даже беспозвоночные (головоногие) выработали в процессе эволюции рудиментарное умение пользоваться орудиями (Hansell 2005; Sanz, Call and Boesch 2014; рис. 1.2), только гоминины сделали изготовление орудий отличительной чертой своего поведения.



**Рисунок 1.2.** Шимпанзе (*Pan troglodytes*) в Габоне использует инструменты, чтобы вскрывать орехи (*Corbis*)

Инструменты дали нам механические преимущества в добывании пищи, создании убежища и одежды. Овладение огнем помогло освоить ранее недоступные территории и еще больше отделило нас от животных. Появление новых инструментов привело к приручению животных, к созданию более сложных, движимых мускульной силой машин и к тому, что мы научились превращать крошечную долю кинетической энергии ветра и воды в движение. Эти первичные движители увеличили силу в распоряжении человека, но долгое время их использование было ограничено природой и мощностью освоенных потоков энергии. Хорошим примером здесь служит случай с парусом, древним и эффективным средством передвижения, чьи возможности на протяжении тысячелетий зависели от преобладающих ветров и течений. Именно эта особенность позволила европейцам в конце пятнадцатого века добраться до Карибских островов и помешала испанцам открыть Гавайи, несмотря на то, что торговые корабли под флагом Испании, так называемые Манильские галеоны (*Galeón de Manila*) раз или два в год пересекали Тихий океан из Акапулько (Мексика) на Филиппины 250 лет подряд между 1565-м и 1815-м годами (Schurz 1939).

Контролируемое сгорание в очагах, печах и топках превращало химическую энергию растений в термальную. Тепло использовалось в домашних хозяйствах, а также для плавки металлов, обжига кирпичей, для обработки самых разных

продуктов. Открытие ископаемого топлива сделало все традиционные способы использования тепла более широко распространенными и более эффективными. Набор фундаментальных изобретений дал возможность конвертировать термальную энергию от сгорания ископаемого топлива в механическую. Впервые это было сделано в паровых двигателях и двигателях внутреннего сгорания, позже к ним добавились газовые турбины и ракеты. Мы получали энергию, сжигая ископаемое топливо, используя кинетическую энергию воды (как минимум с 1882 года), а также атомный распад одного из изотопов урана (с 1956-го).

Сжигание ископаемого топлива и генерация энергии привели к возникновению новой формы высокоэнергетичной цивилизации, которая распространилась по всей планете, охватила ее целиком. В число базовых источников энергии этой цивилизации в данный момент входят (их доля мала, но постоянно растет) новые возобновляемые виды, такие как солнечная энергия (получаемая с помощью фотоэлементов на солнечных электростанциях) и энергия ветра (тут используются большие ветровые турбины). В свою очередь, освоение новых источников стало возможным только благодаря комплексу других усовершенствований. Используя аналогию с трубопроводом, можно сказать, что вентили должны быть установлены и затем открыты в правильной последовательности, чтобы поток человеческой изобретательности потек в нужном направлении.

Наиболее важный «вентиль», относящийся к освобождению большого энергетического потенциала, подразумевает необходимые образовательные возможности, предсказуемые законодательные основания, прозрачные экономические правила, адекватную доступность капитала и условия, благоприятные для базовых исследований. Ничего удивительного, что обычно требуются поколения для того, чтобы получить увеличение или качественное улучшение потоков энергии, или для того, чтобы в значительном масштабе освоить использование нового источника энергии. Сроки разработки, общий объем энергии и характеристики энергетических потоков исключительно трудно предсказать, и на ранних фазах процесса перехода невозможно оценить все конечные воздействия, которые изменения первичных движителей и топливной базы окажут на сельское хозяйство, промышленность, транспорт, устройство поселений, военное дело и окружающую среду. Количественные подсчеты являются сущностно важными для оценки ограничений наших действий и размаха наших достижений, и они требуют знания базовых научных концепций и измерений.

## **Концепции и единицы измерения**

Под всеми энергетическими трансформациями лежит несколько базовых принципов. Любая форма энергии может быть превращена в тепло или термальную энергию. Никакая энергия ни при каких условиях не теряется при этих превращениях. Сохранение энергии, первый закон термодинамики — один из наиболее фундаментальных принципов, на которых держится реальность. Но по мере того как

мы движемся по цепям преобразований, потенциал полезной работы постоянно уменьшается (примечание 1.2). Этот непреодолимый факт определяет второй закон термодинамики, и энтропия есть мера потери полезной энергии. В то время как общий объем энергии во вселенной остается неизменным, превращения энергии увеличивают энтропию (одновременно уменьшая полезность энергии). Корзина с зерном или цистерна сырой нефти — низкоэнтропийный запас энергии, который при проращивании или сжигании способен совершить много полезной работы, но заканчивается все случайным движением слегка нагретых молекул воздуха, необратимым высокоэнтропийным состоянием, неизбежной потерей полезности.

Такое одностороннее энтропийное шоссе ведет к потере сложности, к увеличению беспорядка и гомогенности в любой замкнутой системе. Но все живые организмы, от крохотной бактерии до глобальной цивилизации, временно игнорируют этот принцип, импортируя и метаболизируя энергию. Любой живой организм должен быть открытой системой, в которой имеется постоянный приток и отток энергии и материи. Пока эти системы живые, они не могут находиться в состоянии химического и термодинамического равновесия (Prigogine 1947, 1961; von Bertalanffy 1968; Haynie 2001). Их отрицательная энтропия — рост, обновление и эволюция — приводит к увеличению гетерогенности, повышает структурную и системную сложность. Как и в случае со многими другими научными открытиями, связанное понимание этих процессов пришло только в девятнадцатом веке, когда быстро развивающиеся физика, химия и биология начали активно изучать трансформации энергии (Atwater and Langworthy 1897; Cardwell 1971; Lindsay 1975; Müller 2007; Oliveira 2014; Vorvoglis 2014).

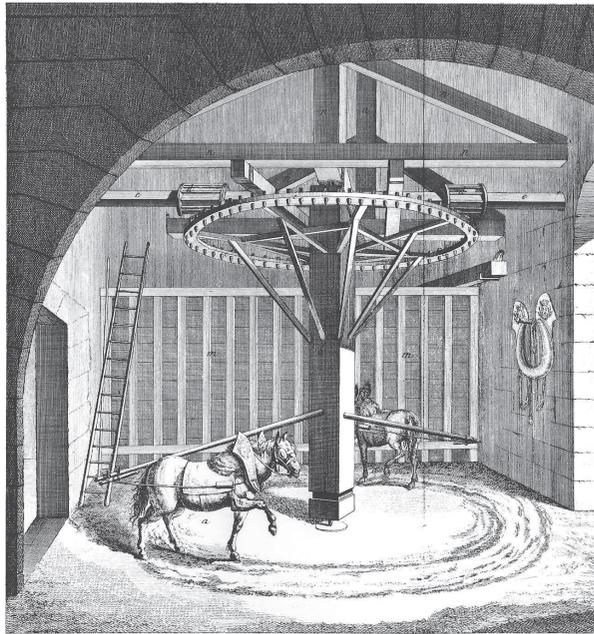
---

### **Примечание 1.2. Уменьшение полезности превращенной энергии**

Любое превращение энергии иллюстрирует этот принцип.

Если американский читатель использует электрическое освещение для того, чтобы прочесть эту страницу, то электромагнитная энергия света составляет только крохотную часть химической энергии, которая содержалась в куске угля, сожженном для получения электричества (в 2015 году уголь использовался для производства 33% электроэнергии в США). По меньшей мере 60% энергии угля теряется в виде тепла через трубы электростанции и через охлаждающие контуры, а если читатель использует старые добрые лампы накаливания, тогда более 95% добравшейся до лампы энергии рассеивается в виде тепла, порожденного раскаленной нитью внутри лампочки, поскольку металл нити сопротивляется прохождению тока. Свет, достигающий страницы, частично поглощается ею, частично отражается, частично снова превращается в тепло. Изначальный низкоэнтропийный кусок угля превращается в высокоэнтропийное тепло, которое нагревает воздух над электростанцией, вокруг проводов, вокруг лампочки, и даже слегка — над страницей. Никакая часть энергии не теряется, но ее форма, обладающая высокой полезностью, изменяется до такой степени, что теряет любое практическое значение.

Базовые исследования вроде нашего требуют кодификации стандартных средств измерения. Две единицы стали общими для измерения **энергии**: калория — метрическая единица, и британская тепловая единица (бТЕ). Сегодняшняя базовая научная единица для энергии — джоуль, она названа по имени английского физика Джеймса Прескотта Джоуля (1818–1889), который опубликовал первый точный расчет эквивалентности работы и тепла (примечание 1.3). **Мощность** обозначает объем энергетического потока, и ее первая стандартная единица — лошадиная сила — была определена Джеймсом Уаттом (1736–1819). Он хотел рассказать о своих паровых машинах так, чтобы все понимали, о чем идет речь, и выбрал очевидное сравнение с первичным двигателем, который машины должны были заменить — с запряженной лошадью, поскольку в те времена их массово использовали на мельницах и для откачки воды (рис. 1.3, примечание 1.3).



**Рисунок 1.3.** *Две лошади поворачивают ось, ведущую к откачивающей воду лебедке. Франция, середина XVIII века, мануфактура по производству ковров (изображение из Encyclopédie, Дидро и д'Аламбер, 1769–1772). Обычная лошадь в то время не смогла бы работать с постоянной мощностью в одну лошадиную силу. Джеймс Уатт использовал преувеличенное значение, чтобы найти покупателей для паровой машины, способной заменить животных*

Другим важным параметром является **плотность энергии**, т. е. количество энергии на единицу массы ресурса (примечание 1.4). Оно играет ключевую роль в питании:

даже имеющиеся в изобилии продукты с низкой плотностью энергии никогда не станут базовыми. Например, обитатели Мексиканского нагорья до прихода испанцев в большом количестве поедали колючие плоды, которые с легкостью собирали со многих разновидностей кактусов из рода *Opuntia* (Sanders, Parsons and Santley 1979). Но как и у большинства фруктов, мякоть этих плодов большей частью (на 88%) состоит из воды, в ней меньше 10% углеводов, 2% белка и 0,5% жиров, и плотность энергии в данном случае всего лишь 1,7 Мдж/кг (Feugang et al. 2006). Это значит, что, например, женщина, выживающая только на плодах кактуса (предположим совершенно нереалистичным образом, что ей не нужны другие питательные вещества), должна будет съедать их по 5 килограммов каждый день, но то же самое количество энергии она может получить из 650 граммов кукурузы, съеденной в виде тортильи и тамала.

---

### Примечание 1.3. Измерение энергии и мощности

Официальное определение джоуля — работа, выполненная, когда сила в один ньютон действует на дистанции в один метр. Другой вариант определения базовой единицы энергии — через требуемое количество тепла. Одна калория — количество тепла, необходимое, чтобы поднять температуру 1 см<sup>3</sup> воды на 1 °С. Это очень мало: чтобы сделать то же самое с 1 килограммом воды, нужно в тысячу раз больше энергии, или одна килокалория (полный список префиксов к единицам измерения приведен в разделе «Базовые единицы измерения» в приложении). Учитывая эквивалентность тепла и работы, все, что нужно для превращения калорий в джоули — помнить, что одна калория равняется примерно 4,2 джоуля. Для до сих пор распространенной неметрической единицы, британской тепловой единицы, преобразование столь же простое. Одна бте равна примерно 1000 Дж (если точно, то 1055). Хороший сравнительный критерий — средняя дневная потребность в пище. Для взрослого в состоянии умеренной активности она обычно варьируется в пределах 2–2,7 Мкал, или примерно 8–11 Мдж, а 10 Мдж можно получить, съев 1 кг цельнозернового хлеба.

В 1782 году Джеймс Уатт начерно рассчитал, что лошадь на мельнице работает примерно со скоростью 32 400 футо-фунтов в минуту, и на следующий год он округлил это значение до 33 000 футо-фунтов (Dickinson 1939). Он предположил, что средняя скорость хода животного около 3 футов в секунду, но мы не знаем, где он взял значение средней тяги в 180 фунтов. Некоторые крупные лошади могли выдавать такую тягу, но большинство лошадей в Европе XVIII века не смогли бы обеспечить одну лошадиную силу из расчетов Уатта. Современный стандарт мощности, ватт, равен джоулю в секунду. Лошадиная сила составляет примерно 750 ватт (если точно, то 745,699). Потребление 8 Мдж пищи в день соотносится с номинальной мощностью в 90 Вт (8 Мдж/24 ч x 3600 с), меньше, чем у стандартной лампы накаливания (100 Вт). Тостер с двумя отверстиями требует 1000 Вт, или 1 кВт; небольшие машины выдают примерно 50 кВт; крупная электростанция на угле или ядерном топливе производит электричества на 2 ГВт.