

УДК 620.9
ББК 31.15
К72

Косько, А.

К72 Да будет свет... и тепло! Сколько стоит энергия / Андрей Косько. — Минск : Дискурс, 2019. — 192 с.
ISBN 978-985-90515-1-7.

Атомная и возобновляемая энергетика, глобальное потепление и энергетические кризисы, электромобили и энергетические проекты Илона Маска и Билла Гейтса — человек, который в принципе включает телевизор или заходит в интернет, то и дело сталкивается с новостями обо всем этом. Но что представляет собой энергия и откуда она берется? Когда на самом деле закончится нефть? Пересядем ли мы в автомобили с солнечными панелями? Автор подробно отвечает на эти и многие другие вопросы, опираясь на фундаментальные принципы физики, экономики и политики.

УДК 620.9
ББК 31.15

ISBN 978-985-90515-1-7 © Косько А., 2019
© Оформление. ЧУП «Издательство Дискурс», 2019

Оглавление

От автора	5
Глава 1. Энергетика в общем и целом, или Ватт и лошади	8
Измерение энергии	15
Что такое энергетика	19
Основные энергетические принципы	21
Глава 2. Физика энергетики, или Родина электричества	28
Производство электроэнергии	29
Что такое электрическая энергия	37
Глава 3. Техника энергетики, или Как все работает	49
Трёхфазная система электроснабжения	55
Техника для электропередачи	59
Техника и технология управления электросистемой	65
Глава 4. Экономика энергетики, или Счастье электропотребления	72
Энергетическая статистика	79
Нефть — самый востребованный ресурс	82

Энергетические прогнозы.	89
Сланцевая революция	94
Глава 5. Политика, или Как с этим жить	99
Энергетические кризисы.	99
Международные энергетические организации. . .	108
Международные энергетические соглашения. . .	114
Проблемы изменения климата	116
Глава 6. Энергетика в частности, или Пристальный взгляд на энергетику	126
Углеродородная энергетика	127
Атомная энергетика	131
Возобновляемые источники энергии.	139
Солнечная энергетика	142
Ветроэнергетика	156
Биогаз.	161
Глава 7. Будущее энергетики, или Чего нам ждать.	165
Энергетические вызовы и тренды	165
Производство энергоресурсов	168
Передача электроэнергии	176
Smart grid — умные сети электроснабжения . . .	178
Хранение электроэнергии.	180
Потребление электричества.	183
Транспорт будущего.	185
Заключение.	190

От автора

Поступив на первый курс энергетического факультета, я, как и подобает ответственному за свой выбор абитуриенту, понятия не имел, что собой представляет энергетика и, разумеется, чем я буду заниматься после окончания университета. Но если второй вопрос совершенно безболезненно, как мне казалось, можно было забыть на пять лет, то первый не давал мне покоя с первого дня обучения.

К сожалению, система высшего образования имеет изъяны в части «плавного погружения» в специальность, а промежуточного звена между «Википедией», вездесущими ответами на Mail.ru, прочим интернет-контентом и профессиональной узкоспециальной литературой порой не существует. Как следствие, современное высшее образование напоминает небезызвестный способ обучения плаванию, когда потенциального пловца неожиданно сбрасывают в воду, надеясь, что он, несмотря ни на что, справится и осилит нехитрую науку.

Однако, как показывает мой личный опыт и опыт моих многочисленных коллег-инженеров, этот способ, за исключением редких талантов, редко способствует формированию профессионала.

Если продолжить аналогию с плаванием, то лучше всего обучаться, начиная с берега, то есть постепенно погружаясь в специальность и постигая все новые и новые глубины профессии.

Увы, такой возможности зачастую просто нет. Именно в университетскую пору я и понял, для чего нужна научно-популярная литература в целом и популярные книги об энергетике в частности.

Научно-популярная книга, как мне кажется, преимущественно должна преследовать две цели: во-первых, заинтересовать читателя заданной темой, а во-вторых — если первая цель выполнена — создать «скелет» той области, о которой книга написана. Как видите, я не разделяю мнения, что научно-популярная книга должна дать глубокие знания, а полагаю, что она должна лишь намекнуть на них, предлагая минимальный набор структурированных знаний. Узнать остальное (если это необходимо) — личный труд интересующегося.

Именно по этой причине я придаю популярности изложения первостепенное значение, местами упрощая изложение, само собой — в разумных пределах. К тому же, как бы автор того ни хотел, объем любой книги ограничен и не позволяет предоставить исчерпывающие материалы по теме.

Последнее, однако, не говорит о том, что книга не может быть интересна непосредственно специалистам. Если читатель без специального образования, скорее всего, большую часть книги воспримет как новый материал, то читатель с профильным образованием, в свою очередь, сможет взглянуть на энергетику не только с инженерной точки зрения. Ведь энергия — главный «герой»

этой книги — имеет не только физическое и техническое, но и экономическое, политическое и, что менее очевидно, социальное, историческое и психологическое измерения.

Атомная и возобновляемая энергетика, глобальное потепление и энергетические кризисы, электромобили и энергетические проекты Илона Маска и Билла Гейтса — с информацией обо всем этом регулярно сталкивается человек, который в принципе читает или смотрит новости. Но, чтобы понять, например, как энергия связана с благосостоянием государства, нужно разбираться в том, откуда энергия берется и что она собой представляет. Работая над книгой, я в том числе ставил задачу показать, как из фундаментальных принципов физики, экономики и политики следуют ответы на подобные вопросы.

И последнее. Без всесторонней профессиональной и — что, пожалуй, более существенно — дружеской поддержки книга не была бы написана. Именно по этой причине я выражаю признательность Алексею Мацевило, в беседах с которым выкристаллизовывались главные мысли книги, Александру Синенькому, подвергавшему профессиональной и конструктивной критике все, что не было сформулировано предельно понятно и доступно, и Татьяне Гридюшко, которая мученически пыталась постичь основы энергетической политики, экономики и дипломатии. Не могу оставить в стороне и подвижнические мотивы Змитера Былиновича, который поспособствовал появлению этой книги.

Глава 1

Энергетика в общем и целом, или Ватт и лошади

Несомненно, большинству читателей известно, что Евгений Онегин:

...умел судить о том,
Как государство богатеет,
И чем живет, и почему
Не нужно золота ему,
Когда простой продукт имеет.

Разумеется, под простотой не стоит понимать примитивность. Простым мы называем первичный продукт, то есть незаменимый, как, например, продукция сельского хозяйства. Таким продуктом является и энергия. Хотя промышленную технологию производства этого «простого продукта» нельзя назвать простой. Доступ к ней создает и ломает экономики и порой является даже причиной военных конфликтов. В принципе, энергия способна разрушить наш мир в случае неправильного использования. Говоря

техничко-экономическим языком, энергия — базовый ресурс для всех отраслей экономики. Следовательно, энергетика — отрасль стратегическая.

У ученых, коим является автор данной книги, есть две давние традиции. Первая: договариваться о терминах, вторая: ругать друг друга за неправильное понимание этих терминов. Так сложилось, что обе традиции идут рука об руку с момента появления научного знания. Нисколько не рассчитывая соблюсти вторую традицию, договоримся о том, что будем в дальнейшем понимать под энергией и энергетикой. Начнем с энергии.

Во Вселенной все движется. Потому что практически не существует систем, находящихся в равновесии с окружающей их средой, а любая неравновесная система — источник движения¹. *Энергия, в самом общем смысле слова, есть количественная мера движения.* Нужно сказать, что этимология, то есть происхождение, слова «энергия» восходит к греческому «действие»².

Поскольку существуют разные формы движения, существуют и разные формы энергии. Самой привычной из них для нас, пожалуй, является энергия механическая.

Механическая энергия связана с движением тела или его положением относительно других тел.

Известно, что механическая энергия бывает потенциальной и кинетической. Рассмотрим эти две формы энергии подробнее на примере замкнутой механической

¹ Стоит отметить, что главный источник неравновесности на Земле — Солнце.

² Интересно, что слова «энергия» и «каторга» произошли от общего корня. Если задуматься, то ничего странного в этом нет: и первое, и второе связано с работой.

системы и попробуем разобраться, что же они собой представляют.

Первая из упомянутых форм — кинетическая энергия — присуща телам¹, находящимся в каком-либо силовом поле, например в гравитационном поле Земли. Это значит, что любое тело, которое находится на какой-либо высоте, обладает потенциальной² энергией. Проще говоря, оно «потенциально» может упасть с этой высоты, то есть прийти в движение. А если есть движение, значит есть и энергия. И чем больше высота, тем, соответственно, больше потенциальная энергия. Однако непосредственно падающее тело приобретает энергию кинетическую³, то есть энергию механического движения. Величина кинетической энергии зависит уже не от высоты, а от скорости движения тела, а если точнее, от квадрата этой скорости. Рассмотрим пример.

¹ В физике все, что можно, условно говоря, потрогать, принято называть телом, а все, что нельзя, — полем или материальной точкой. Причем материальная точка — это частный случай тела. А именно: материальная точка — это такое тело, размерами которого можно пренебречь, не пренебрегая при этом другими его параметрами, например массой или энергией. Планеты можно считать материальными точками при расчете их орбит, так как расстояния между планетами намного превосходят размеры самих планет. Но при расчете запуска искусственного спутника уже не получится принять Землю за материальную точку.

² От лат. *potens* — «могущий», «способный совершить действие». В приведенном примере «могущий» упасть.

³ От греч. *kinesis* — «движение». Такой же корень имеет слово «кино».

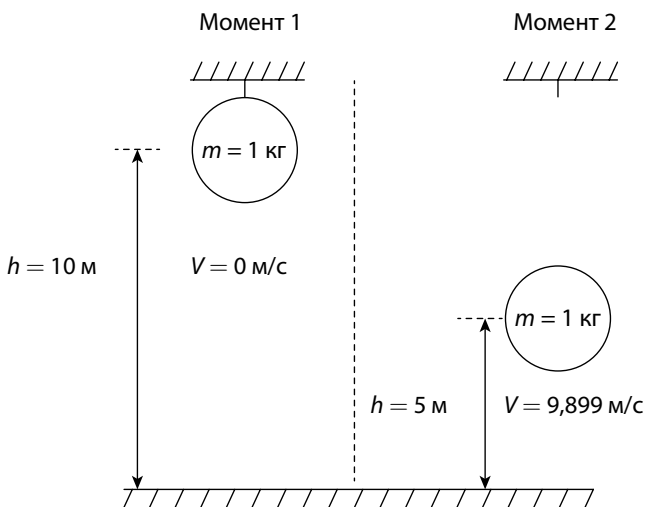


Рис. 1. Механическая энергия шара

На рис. 1 изображен шар массой $m = 1 \text{ кг}$, закрепленный на высоте $h = 10 \text{ м}$.

В первый момент времени шар не движется, так как закреплен под потолком. В момент времени 1 шар имеет потенциальную энергию E_{p1} , то есть, как было оговорено, может упасть и, следовательно, прийти в движение. Потенциальная энергия шара в момент 1 вычисляется по известной формуле:

$$E_{p1} = mgh,$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения. То есть с таким ускорением разгоняется абсолютно любое тело в поле силы тяжести Земли. Потенциальная энергия шара в момент 1, следовательно, равна

$$E_{p1} = 1 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 10 \text{ м} = 98 \text{ Дж}.$$

Дж — это сокращенное название единицы энергии¹. **Джоуль** — основная, но не единственная единица измерения энергии. Об остальных, однако, мы поговорим позже. В «человеческих» масштабах 1 Дж — очень маленькая величина, поэтому на практике применяются более «крупные» производные величины, например мегаджоуль (МДж) или всем известный киловатт-час (кВт·ч), равный 3 600 000 Дж.

В быту мы чаще сталкиваемся с другой единицей измерения энергии — килокалорией (ккал), с помощью которой измеряется энергетический эквивалент пищи. Одна килокалория — это такое количество теплоты, которое необходимо, чтобы нагреть 1 литр воды на 1 градус Цельсия. То есть это совсем небольшое количество энергии. Чтобы представить, насколько мал 1 Дж, подумайте о том, что он меньше 1 ккал в 4184 раза.

Однако вернемся к шару. Поскольку, кроме потенциальной энергии, в момент 1 шар не имеет другой энергии, следовательно, полная энергия шара в момент 1 равна $E_1 = 98$ Дж.

Предположим, что в какой-то миг нить обрывается и шар начинает падать. Зафиксируем его состояние в момент 2, когда шар пролетел 5 м, то есть половину начальной высоты. Кроме потенциальной энергии, равной $E_{p2} = 1 \times 9,8 \times 5 = 49$ Дж (то есть половины потенциальной энергии первоначального состояния), у шара появляется еще и энергия кинетическая, так

¹ Единица энергии джоуль получила название в честь английского физика Джеймса Джоуля (1818–1889), который экспериментально доказал основополагающий закон физики — закон сохранения энергии.

как он теперь находится в движении. Формула, по которой вычисляется кинетическая энергия, также общеизвестна:

$$E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2,$$

где v — скорость шара. Если очень точно измерить скорость шара во время полета на высоте 5 м, она будет равна 9,899 м/с. Следовательно, кинетическая энергия шара в момент времени 2 равна:

$$E_{k2} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ кг} \cdot (9,899 \text{ м/с})^2 = 49 \text{ Дж}.$$

Теперь найдем полную энергию шара в момент времени 2. Она равна сумме потенциальной и кинетической энергий в момент 2:

$$E_2 = E_{p2} + E_{k2} = 49 \text{ Дж} + 49 \text{ Дж} = 98 \text{ Дж}.$$

Нетрудно заметить, что полная энергия шара в момент 1, когда он висит под потолком на высоте 10 м, равна полной энергии шара, когда он находится в полете на высоте 5 м, в момент времени 2. Разумеется, это не совпадение: на любой высоте во время падения энергия шара будет равна 98 Дж. Это значит, что полная энергия шара не меняется в принципе, она постоянна.

Фундаментальное свойство энергии заключается в том, что она никуда не пропадает, а только преобразуется из одного вида в другой. Например, в приведенном нами случае — из потенциальной в кинетическую. Поэтому часто применяемое выражение «потребление энергии» физически (но только физически) совершенно безграмотно: энергию нельзя потреблять — ее можно только преобразовать. Но так сложилось исторически,

и — как, впрочем, часто случается — неправильное словосочетание прижилось¹.

Закон сохранения энергии — фундаментальный закон природы. До сих пор он не знает исключений. Установлен он был опытным путем и справедлив не только для механической системы, рассмотренной нами на предыдущем примере, но и для любой системы, в которой присутствует энергетическая составляющая. А она присутствует в любой системе (к слову, необязательно физической²).

Кроме механической, существует много других видов энергии: химическая, ядерная и термоядерная

¹ И все-таки термин «потребление» применительно к энергии может использоваться вполне корректно. Так, энергия может потребляться с точки зрения энергоснабжающих организаций, так как в данном случае она представляет собой товар, а товары, как известно, являются предметом потребления.

² Данное весьма провокационное, хотя и полностью верное, умозаключение привело к созданию в конце XIX века философской концепции энергизма, согласно которой основной субстанцией, или первоосновой, является не бытие или сознание (или не материя и дух), а энергия. Под энергией, однако, понималось нечто среднее между материей и духом. Существует и более радикальная концепция, разработанная современным писателем Михаилом Веллером, — энергоэволюционизм. Кроме очевидных выводов, следующих из такого названия, любой энергетик, вникнув в его смысл, немного гордится тем, что человек стал человеком в полном смысле слова тогда, когда научился использовать самый простой вид энергии — энергию огня. То есть первый человек, помимо всего прочего, был еще и теплоэнергетиком.

и, безусловно, самые важные и привычные для человечества¹ виды энергии — тепловая и электрическая.

Измерение энергии

Электричество и тепло — два основных вида энергии, используемых человеком. Разобравшись в том, что такое энергия, рассмотрим на простых примерах работу электрического оборудования в количественном отношении. То есть разберемся, откуда берутся и что собой представляют уже упомянутые киловатт-часы на счетчиках электроэнергии и почему в квитанции на оплату электроэнергии стоит вполне определенная и совершенно неслучайная сумма.

Простейшим электроприбором является лампа накаливания. Один из наиболее удачных образцов лампы накаливания с тугоплавкой нитью накала был разработан и запатентован русским ученым-электротехником Александром Николаевичем Лодыгиным в 1906 году и в том же году продан компании General Electric, основанной, как известно, Томасом Эдисоном. Именно Эдисон доработал изобретение Лодыгина и сделал его коммерчески успешным.

Главная характеристика энергетического оборудования, в том числе лампы накаливания, — его мощность.

Мощность — это скорость, с которой прибор преобразует, вырабатывает или передает энергию. Так, лампа

¹ О причинах удобства использования электрической энергии подробнее читайте в главе 7 «Будущее энергетики».

накаливания преобразует электрическую энергию в световую и тепловую.

Мощность принято измерять в ваттах¹. Один ватт — это один джоуль в одну секунду, то есть:

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с.}$$

Существует и внесистемная единица измерения мощности, пожалуй, более известная в обиходе — лошадиная сила (л. с.).

Одна лошадиная сила эквивалентна 700–750 Вт. В обращение термин «лошадиная сила» ввел Джеймс Уатт, в честь которого названа наиболее распространенная единица измерения мощности. Как обычно и случается, мотивы у Джеймса Уатта были просты: заинтересованность в продажах изобретенной им паровой машины. Чтобы показать, сколько живых лошадей может заменить его изобретение, шотландский инженер придумал предельно ясную для крестьян и ремесленников аналогию. Существует полупеленда, что первую паровую машину Уатт продал пивовару, чтобы приводить в движение водяной насос, который ранее в движение приводила лошадь. Пивовар, вероятно, из корыстных соображений выбрал самую сильную лошадь, которая и стала эталоном лошадиной силы. Нужно сказать, что мощность, которую способна развить лошадь, меньше 700 Вт. Но, как писал Пушкин, «привычка свыше нам дана, замена счастию она». И полупелендарная лошадь пивовара осталась эталоном.

¹ Единица измерения ватт названа в честь шотландского инженера-изобретателя Джеймса Уатта (1736–1819). Благодаря его разработкам в Англии, а впоследствии и во всем мире началась первая промышленная революция.

Мощность стандартной лампы накаливания — 100 Вт^1 , то есть каждую секунду она преобразует (в дальнейшем будем употреблять неправильный термин «потребляет») 100 Дж электрической энергии. Поскольку 1 Вт — это весьма малая мощность, в энергетике принято использовать более крупную единицу — 1 киловатт (сокращенно 1 кВт). Следовательно, мощность лампы накаливания равна 100 Вт , или, что то же самое, $0,1 \text{ кВт}$.

Для сравнения возьмем еще два электроприбора: электрочайник мощностью 1 кВт и электроплиту мощностью 4 кВт (рис. 2). Причем физические законы функционирования всех упомянутых приборов практически одинаковы, так как основаны на электронагреве.

Итак, мы знаем скорость потребления энергии каждого прибора. Что необходимо сделать, чтобы узнать, сколько этот прибор потребил энергии? Конечно, нужно скорость умножить на время. Например, каждый прибор работает 1 час . Это значит, что лампочка за 1 час потребляет $0,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии, чайник — $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, а электроплита — $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Именно по такой логике киловатт-час и вошел в обиход энергетиков. Как видите, киловатт-час тоже единица измерения энергии, однако более удобная в быту, нежели джоуль.

При этом важно понимать, что джоуль и киловатт-час, несмотря на существенное различие в названии,

¹ Любопытно, что мощность электрической лампочки эквивалентна мощности человека. Дневной рацион в среднем составляет 2000 ккал , то есть $8\,360\,000 \text{ Дж}$. В сутках $86\,400 \text{ секунд}$. Значит, мощность человека $96,76 \text{ Вт}$.



Рис. 2. Измерение энергии в финансовом выражении

представляют собой количественное представление одной и той же физической величины — энергии. Следовательно, джоули можно выразить через киловатт-часы, и наоборот. Посчитаем, сколько джоулей в киловатт-часе. Запишем 1 кВт·ч таким образом, учитывая, что в одном часу 3600 секунд:

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1\cdot 10^3 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 1\cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{с} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Дж}.$$

Как измеряется энергия в натуральном выражении, известно. Теперь необходимо указать, как измеряется энергия в финансовом выражении, поскольку для инженерной практики одной лишь физики недостаточно.

Для того чтобы получить электроэнергию, необходимо затратить различного рода ресурсы: топливо, оборудование электростанций и линий электропередачи,

¹ Сантик — разменная монета у лунных коротышек в повести Н. Носова «Незнайка на Луне».

рабочую силу и так далее. Все это, конечно, не бесплатно. Затраты на производство 1 кВт·ч, выраженные в денежном эквиваленте, называются тарифом на электроэнергию. Если 1 кВт·ч электроэнергии стоит, положим, 10 сантиков, то один час работы лампочки стоит $0,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 10 \text{ сантик}/\text{кВт}\cdot\text{ч} = 1 \text{ сантик}$, а час работы чайника и плиты — соответственно 10 и 40 сантиков.

Аналогичные рассуждения можно провести и для теплоэнергетического оборудования с оговоркой, что основной единицей измерения тепловой энергии является не киловатт-час, а гигакалория (Гкал), или один миллиард калорий. Вид валюты, будь то сантики или канадские доллары, в данном случае значения не имеет. Тарифы на тепловую энергию, естественно, тоже другие, но принцип остается тем же.

Что такое энергетика

Сейчас, ответив на главный вопрос, что такое энергия и каким образом она измеряется, можно переходить к определению энергетики.

Энергетика — это хозяйственно-экономическая отрасль человеческой деятельности, служащая для производства, распределения и использования энергии.

Кроме приведенного энциклопедического определения, существует еще одно, данное академиком Михаилом Адольфовичем Стыриковичем: «Энергетика — это физика плюс экономика». Действительно, физика отвечает на вопрос «можно ли производить/