

**ЭНДЕЛЬ РИСТХЕЙН**

# **ВВЕДЕНИЕ В ЭНЕРГОТЕХНИКУ**



**Elekriajam**

**2008**

Редактор Любовь Торшина

Оформление: Gädvi Tammann

Обложка: OÜ Pult, Sigrid Randoja  
Фото Janek Jõepera

Первое издание 2008 г.

Авторское право:

Эндель Ристхейн 2008

Институт электропривода и силовой электроники Таллиннского технического университета 2008

## ISBN

Настоящий учебник составлен и издан при поддержке Европейского Союза



**Издательство Elekriajam**

Department of Electrical Drives and Power Electronics  
of the Tallinn University of Technology

Ehitajate tee 5

EST-19086 Tallinn, Estonia

e-mail [aa@ttu.ee](mailto:aa@ttu.ee)

Отпечатано в Таллиннской книжной типографии  
[www.trt.ee](http://www.trt.ee)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга предназначена, в первую очередь, в качестве учебника студентам Таллиннского технического университета, обучающимся по программе бакалавра (обязательному курсу **Введение в энерготехнику**), а также студентам, занимающимся по программам магистра или доктора, – для повторения, пополнения знаний по энерготехнике и энергетике. Книга может быть полезной и другим учебным заведениям, инженерам и всем, интересующимся актуальными проблемами энергетики.

Курс **Введение в энерготехнику** был включен в учебный план инженерной специальности электропривода и силовой электроники Таллиннского технического университета в 1990 году и в настоящее время входит в план первого курса бакалавровского обучения с таким же названием. В курсе кратко и в общих чертах рассматриваются энергоресурсы Земли, их получение, способы использования, преобразование, передача и аккумулирование энергии, влияние энергоустановок на окружающую среду и перспективы развития энергетики как в Эстонии, так и в Европе и в мире в целом. Основной задачей курса является подготовка студентов к более основательному изучению тех же проблем, но уже в курсах по специализации (электропривод, силовая электроника, электротехнология, электроснабжение, электрическое освещение и другие). Кроме того, курс **Введение в энерготехнику** дает и знания, расширяющие кругозор будущих инженеров по проблемам мировой энергетики и окружающей среды.

Опыт показывает, что проблемы, рассматриваемые в этом курсе, представляют интерес не только для первокурсников, которым он предназначен, но и для магистрантов, докторантов, инженеров-энергетиков, инженеров-электриков, а также для всех тех, кто интересуется настоящим и будущим энергетики. По этой причине подбор материала выполнен несколько шире, чем это требовалось бы для получения основных знаний по энерготехнике студентами первого курса.

Настоящая книга содержит как классические основные положения, так и описания постоянно изменяющихся технических решений и данные по развитию энергетики. Исходя из этого, может, было бы целесообразно выпускать повторные издания этой книги (с корректировкой и внесением дополнений) чаще, чем принято в нынешней практике издания учебников для высших учебных заведений. Все замечания, рекомендации и предложения будут с благодарностью приняты автором и, естественно, учтены в последующих изданиях.

Книга основана на первом эстонском издании 2007 года [1], но не является дословным его переводом. В частности, ее структура несколько изменена: введена отдельная глава *Первичные энергоресурсы*, материал которой взят из других глав эстонского издания и изложен несколько более подробно. Кроме того, учтены новые статистические данные по мировой энергетике и по новым международным соглашениям в области энергетики и охраны окружающей среды. Учтены и замечания, поступившие по эстонскому изданию книги.

Автор выражает исключительную благодарность академику Арво Отсу за основательный и благожелательный просмотр рукописи книги, за весьма существенные замечания и рекомендации; доценту Санкт-Петербургского электротехнического университета Валерию Водовозову за терминологические

рекомендации; акционерному обществу *Eesti Energia* за ценные уточнения и за предоставление дополнительных технических данных по энергетике Эстонии; журналисту Любви Торшиной за высококачественное редактирование данного русского издания и техническому редактору Гедви Тамманн за образцовое оформление книги.

Все замечания по этой книге просьба присылать в институт электропривода и силовой электроники Таллиннского технического университета (aa@ttu.ee) или непосредственно автору (risthein@cc.ttu.ee).

Таллинн, январь 2008 г.

*Автор*

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1</b>	<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	
1.1	Основные понятия .....	7
1.2	Единицы энергии и мощности.....	16
1.3	Энергобаланс Земли .....	20
1.4	Историческое развитие энергетики и энергопотребления .....	24
1.5	Энерго- и электропотребление стран мира .....	36
<b>2</b>	<b>ПЕРВИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ</b>	
2.1	Основные понятия .....	46
2.2	Солнечная энергия .....	50
2.3	Ископаемое топливо .....	54
2.4	Возобновляемое биологическое топливо .....	65
2.5	Ядерные энергоресурсы .....	71
2.6	Гидроэнергоресурсы .....	73
2.7	Ветряная энергия .....	78
2.8	Геотермальная энергия .....	80
<b>3</b>	<b>ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ</b>	
3.1	Общие понятия .....	83
3.2	Парогенераторы (паровые котлы) .....	88
3.3	Паровые турбины .....	102
3.4	Газовые турбины .....	108
3.5	Поршневые двигатели .....	113
3.6	Топливные элементы .....	121
3.7	Магнитогидродинамические генераторы	
3.8	Ядерные реакторы	
3.9	Гидротурбины	
3.10	Ветряные турбины	
3.11	Фотоэлектрические преобразователи	
3.12	Электромашинные генераторы	
3.13	Электродвигатели	
3.14	Другие электрические преобразователи	
3.15	Теплообменники и тепловые трансформаторы	
<b>4</b>	<b>ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ</b>	
4.1	Общие понятия	
4.2	Передача топлива	
4.3	Передача механической энергии	
4.4	Передача тепла	
4.5	Передача электрической энергии	
<b>5</b>	<b>АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ</b>	
5.1	Общие понятия	
5.2	Аккумуляция механической энергии	
5.3	Аккумуляция гидроэнергии	
5.4	Аккумуляция тепла	
5.5	Аккумуляция электрической энергии	
5.6	Аккумуляция химической энергии	
5.7	Заключение	

## **6 ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

- 6.1 Общие понятия
- 6.2 Топливосжигающие электростанции
- 6.3 Ядерные электростанции
- 6.4 Гидроэлектростанции
- 6.5 Ветряные электростанции
- 6.6 Геотермальные электростанции
- 6.7 Солнечные электростанции
- 6.8 Подстанции
- 6.9 Энергосистемы

## **7 ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ**

- 7.1 Общие понятия
- 7.2 Неэлектрические способы применения энергии
- 7.3 Электропривод
- 7.4 Электрическое отопление
- 7.5 Электротехнология
- 7.6 Электрическое освещение
- 7.7 Обеспечение электробезопасности
- 7.8 Структура использования энергии в отраслях народного хозяйства
- 7.9 Энерго- и электробаланс народного хозяйства

## **8 ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

- 8.1 Общие понятия
- 8.2 Парниковый эффект
- 8.3 Уменьшение эффективной толщины озонового слоя Земли
- 8.4 Загрязнение окружающей среды выбросами энергоустановок
- 8.5 Тепловое воздействие на окружающую среду
- 8.6 Изменение условий землепользования и ландшафта
- 8.7 Шум и электромагнитные поля

## **9 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**

- 9.1 Общие понятия
- 9.2 Топливный кризис
- 9.3 Направления развития гидро- и ветроэнергетики
- 9.4 Направления развития ядерной энергетики
- 9.5 Альтернативные энергоресурсы
- 9.6 Водородная энергетика
- 9.7 Энергосбережение
- 9.8 О перспективах развития энергетики Эстонии

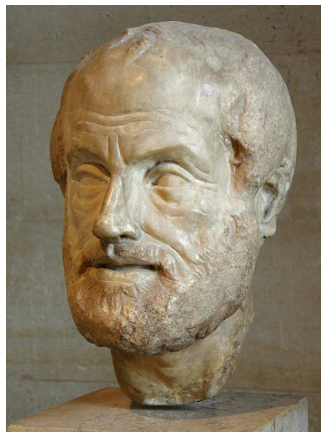
## **ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

# 1 ВВЕДЕНИЕ

## 1.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

**Энергия** является очень старым научным термином. Древнегреческий философ и естествоиспытатель Аристотель (384–322 д. р. Х.) обозначал в своей книге *Метафизика* [1.2], написанной приблизительно в 330 г. до н. э., словом *ενεργεια* – способность человека *действовать* и, в первую очередь, *приводить что-нибудь в движение*. В таком значении это слово применяется и ныне, но в развитии науки и техники оно приобрело и чисто физическое определение. Под **энергией** в настоящее время понимается именно

- 1) в более узком (упрощенном) смысле – величина, характеризующая **способность** какого-либо объекта **совершать работу**; такое определение было дано в 1619 г. австрийским астрономом и математиком Йоганнесом Кеплером (Johannes Kepler, 1571–1630), который в это время был учителем математики в г. Линце (Linz) и который ввел это понятие под названием *facultas* («способность»);
- 2) в более широком смысле – **общая количественная мера различных форм движения материи** (тел, частиц, полей). Такое обобщающее определение сформулировали в 1851–52 годах шотландский физик Уильям Джон Макуорн Ранкин (William John Macquorn Rankine, 1820–1872) и профессор физики университета в городе Глазго (Glasgow), член Лондонского Королевского общества Уильям Томсон (William Thomson, 1824–1907).



**Аристотель**

Аристотель родился в 384 году д. р. Х. во Фракии, учился у Платона (428–348 д. р. Х.) и с 343 по 340 г. находился при дворе царя Филиппа Македонского в качестве воспитателя его сына – будущего Александра Великого. В 335 г. он вернулся в Афины, основал там свою школу (*Ликей*) и руководил ею 12 лет. Он известен прежде всего своими философскими и научно-методологическими работами, является основателем формальной логики и считается величайшим мыслителем древнего мира. Однако он систематизировал и переосмыслил все сведения и по естествознанию того времени, изложив их, в частности, в трактатах *Физика*, *Метеорология*, *Механика* и *Метафизика*.

Уильям Томсон родился в 1824 г. в Северной Ирландии. В возрасте 10 лет он поступил в университет г. Глазго, где его отец был избран профессором математики. Во время учебы его внимание привлекла книга французского математика Жана Батиста Жозефа Фурье (Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830) *Théorie analytique de la chaleur* (*Аналитическая теория тепла*), и в 1841 и 1842 годах он написал три статьи в ее поддержку. В 1845 г. он впервые математически интерпретировал идею Майкла Фарадея (Michael Faraday), по которой электрическая индукция не является *действием на расстояние*, а основана на изменении электрического поля в диэлектрике. В 1846 г. он был избран профессором естествознания Глазгоского университета, где начал основательное исследование тепловых явлений и уже в 1848 г. ввел в применение понятие **абсолютной (термодинамической) температуры**. В области прикладного применения тепловых явлений он изготовил в 1852 г. первый **тепловой насос**. В 1853 г. он впервые начал математическое исследование переходных процессов, возникающих при включении электрических цепей, а в следующем году был привлечен в качестве эксперта к проектированию и прокладке первой телеграфной кабельной линии между Европой и Америкой. С его участием проектировались и прокладывались позже многие другие морские телеграфные кабельные линии. За заслуги в развитии телеграфной техники ему было присвоено королевой Викторией в 1866 г. дворянское звание, и в 1892 он получил титул *лорда Кельвина*. Он занимался также сильноточной электротехникой и составил, например, формулу для определения *экономически оптимального сечения проводников* линий электропередачи. Когда в 1906 г. в Лондоне была основана в целях международной электротехнической стандартизации Международная электротехническая комиссия (*International Electrotechnical Commission, IEC, МЭК*), то лорд Кельвин был избран ее первым президентом и остался им до своей смерти в 1907 году.



**Уильям Томсон**

Энергия может проявляться в очень многих разновидностях. Важнейшими **видами энергии** считаются

- механическая (потенциальная, кинетическая, звуковая, энергия эластичности),
- тепловая внутренняя энергия (называемая также *тепловой энергией*),
- химическая,
- электромагнитная (электрического и магнитного полей, лучистая),
- гравитационная,
- ядерная.

Все виды энергии могут использоваться, после преобразования в механическую, для совершения **работы**.



**Работу** как произведение силы и пройденного пути ввели в терминологию механики в 1826 г. французские ученые – математик Жан Виктор Понселе (Jean Victor Poncelet, 1788–1867) и физик Гаспар Гюстав де Кориолис (Gaspard Gustave de Coriolis, 1792–1843). До этого для выражения понятия *работа* обычно также использовался термин *энергия*.

Количество преобразуемой, передаваемой, аккумулируемой или используемой энергии в единицу времени, а также совершаемая в единицу времени работа называется **мощностью**.

Сущность энергии, ее формы и закономерности проявления, а также математическая интерпретация этих закономерностей рассматриваются в **физике**, относящейся к естественным наукам. Техническое применение энергии является предметом **энерготехники**, которая относится к прикладным наукам и может рассматриваться как один из разделов **техники**.

**Техника** (англ. *technology*, фр. *technique*, нем. *Technik*, эст. *tehnika*), как и наука, экономика, искусство и многие другие, относится к *сферам деятельности человека* и определяется как

**совокупность знаний, навыков и приемов труда, основанных на понимании законов и явлений природы, а также на использовании природных сил и ресурсов.**

Основы этого определения исходят также от Аристотеля, который представил такое понимание (*τεχνη*, ‘умение, мастерство’) в своей вышеупомянутой книге *Метафизика*.

**Знания**, входящие в определение техники, представлены в **технических (прикладных) науках**, к которым, кроме энерготехники, относятся, например, еще

- строительная техника (которая может считаться старейшей, уже Аристотелем весьма разносторонне рассмотренной технической наукой),
- теплотехника,
- электротехника,
- электроника,
- информационная техника (инфотехника)
- и многие другие отрасли техники.

Ни одна техническая наука не имеет четких границ и содержит элементы, которые в большей или меньшей степени совпадают с такими же элементами не только других технических наук, но и фундаментальных, естественных и экономических наук. Энерготехника не является в этом отношении исключением и содержит в себе элементы теплотехники, электротехники, электроники, инфотехники и нескольких других технических наук, а также элементы фундаментальных, естественных и экономических наук.

**Навыки и приемы труда**, названные в определении техники, представляют собой разнообразные способы производства, обработки и использования материалов и изделий, которые объединяются под названием **технология**. Технология может рассматриваться как некий раздел техники в целом, но может быть отнесена и к отдельным техническим наукам. Различают, например,

- *электротехнологию*, относящуюся к электротехнике,
- *строительную технологию*, относящуюся к строительной технике,
- *информационную технологию*, относящуюся к информационной технике.

*Навыки и приемы труда* могут относиться и к личным свойствам человека, к его умению производить те или другие производственные или иные операции. В этом смысле различают, например,

- *технику электромонтажных работ,*
- *технику владения ЭВМ,*
- *технику вождения автомобилей,*
- *технику оформления чертежей и т. д.*

В русском языке техника, кроме того, часто понимается как *совокупность созданных человеком средств, используемых в какой-либо области его деятельности*. Так, под *строительной техникой* часто понимается совокупность строительных машин и механизмов; под *сельхозтехникой* – совокупность тракторов, комбайнов и других сельхозмашин и т. д.

При чтении английской литературы нельзя забывать, что в английском языке *техника* обычно, как было указано выше, обозначается словом *technology*. Стало быть, это английское слово не может механически переводиться как *технология*; следует всегда предварительно точно выяснить, **что** под этим словом в исходном тексте понимается.

Таким образом, **ЭНЕРГОТЕХНИКА** является разделом техники, охватывающим

- выявление, исследование и освоение энергоресурсов,
- преобразование энергии,
- передачу энергии,
- аккумулялирование энергии,
- использование энергии и связанные с этим побочные явления.

Объем рассматриваемых в энерготехнике вопросов упрощенно представлен на рис. 1.1.1, а место энерготехники в науке и технике – также упрощенно, на рис. 1.1.2.

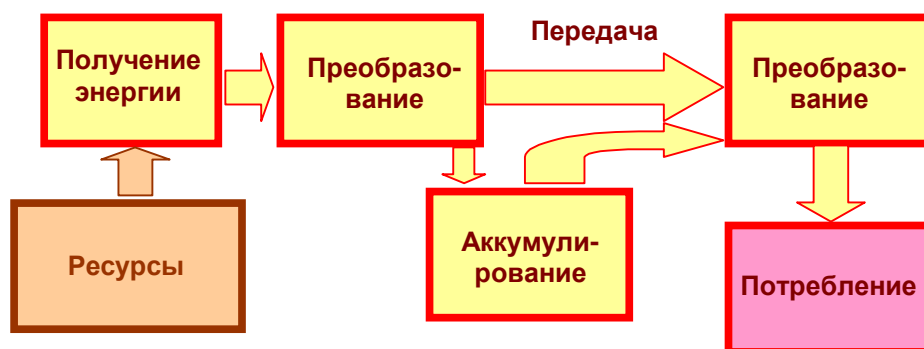


Рис. 1.1.1. Основные вопросы, рассматриваемые в энерготехнике

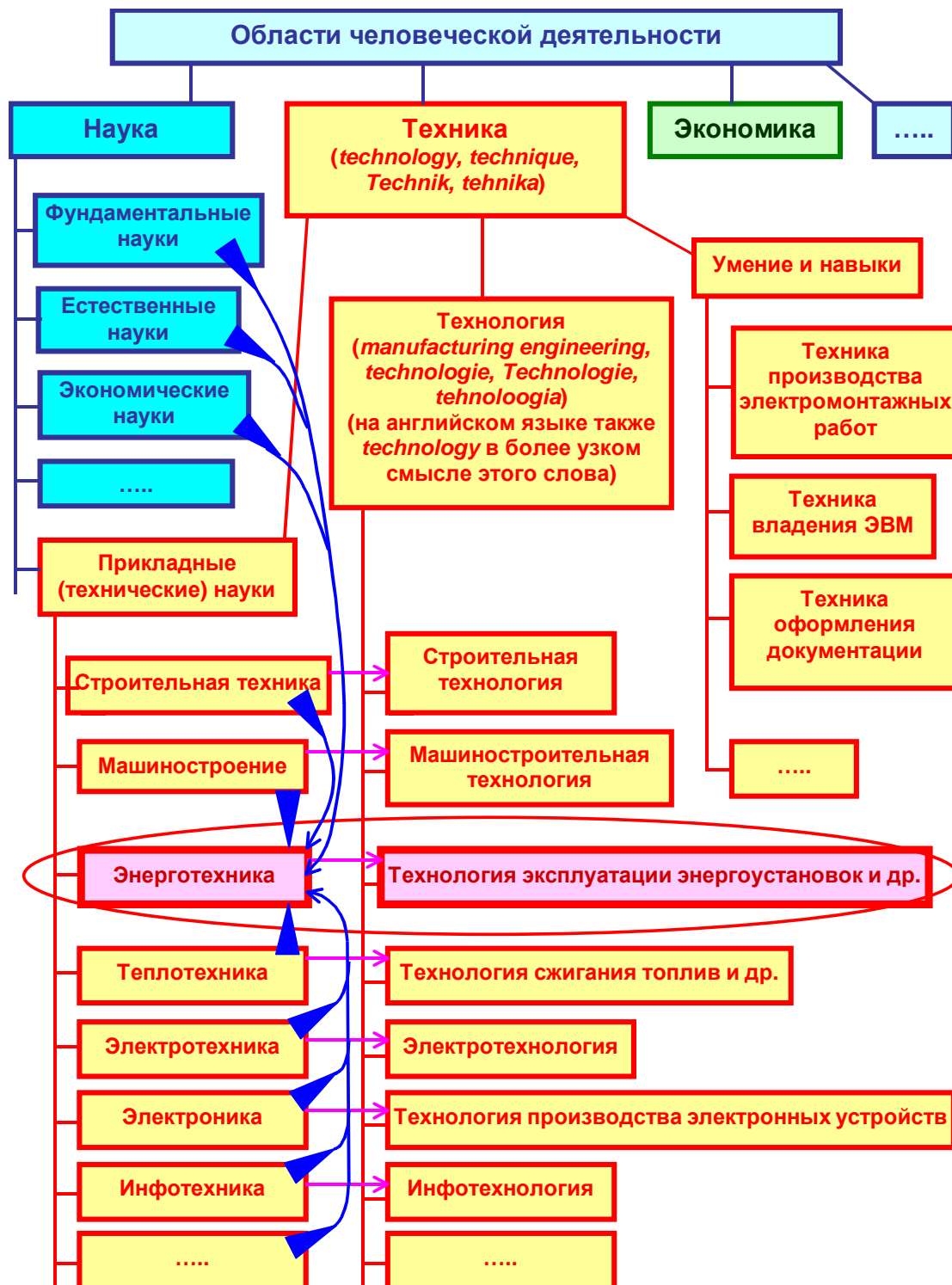


Рис. 1.1.2. Связь энерготехники с другими отраслями науки и техники (упрощенно)

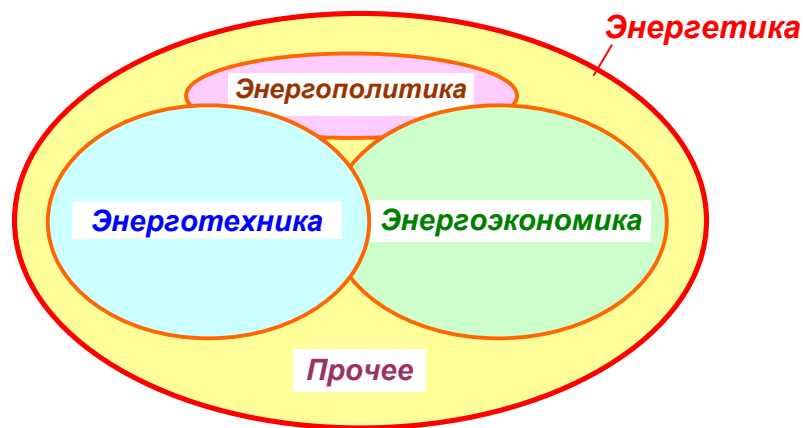
Понятие **ЭНЕРГЕТИКА** ввел в 1855 г. У. Дж. М. Ранкин (W. J. M. Rankine), который в том же году был избран профессором Глазгоского университета. По его определению, под энергетикой понимается область науки и техники, основанная на энерготехнике и охватывающая многообразное использование энергии в народном хозяйстве и в других целях, связанных с деятельностью человека. Как разделы энергетике могут выделяться, например,

- теплоэнергетика,
- гидроэнергетика,
- ядерная (атомная) энергетика,
- электроэнергетика,

или

- промышленная энергетика,
- энергетика сельского хозяйства,
- коммунальная энергетика.

Эти примеры позволяют заключить, что энергетика охватывает не только энерготехнику, но и **энергoэкономикy**, **энергoполитикy**, **энергoбезoпaснoсть** и проблемы, сопутствующие применению энергии. Весьма упрощенно и схематично такой комплекс может представляться в виде диаграммы, изображенной на рисунке 1.1.3.



**Рис. 1.1.3. Энерготехника, энергoэкономикa и энергoполитикa как составные части энергетики**

В более широком смысле энергетика может охватывать любые энергетические процессы в живой или неживой природе. Можно говорить, например,

- о биоэнергетике,
- о геoэнергетикe,
- об энергетикe космoсa

и о других комплексах явлений, охватывающих получение, преобразование и использование энергии.

Важнейшими теоретическими основами энерготехники являются

- три начала термoдинамики – закон сохранения энергии, принцип необратимого рассеяния энергии (или *рoстa энтропий*), невозможность достижения нулевой абсолютной температуры,
- закон эквивалентности массы и энергии.

Все они подробно рассматриваются в той части **физики**, которая называется **термодинамикой** и которая занимается тепловыми явлениями и их связью с физическо-химическими свойствами вещества.

**Первое начало** термодинамики (закон сохранения энергии) означает, что каждая система обладает в качестве *функции состояния* внутренней энергией  $U$ , которая может изменяться только двумя путями:

- переходом энергии за пределы системы в виде тепла или работы,
- получением энергии извне.

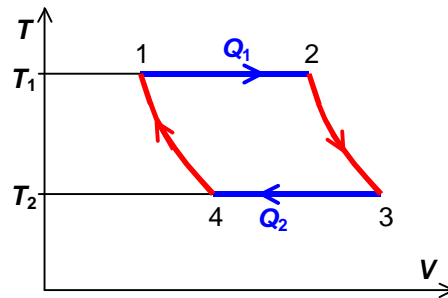
Внутренняя энергия замкнутой системы остается неизменной. Разные виды энергии могут, следовательно, быть преобразованы друг в друга, но энергию невозможно производить из ничего, и ее невозможно также уничтожить. При преобразовании энергии часть ее всегда теряется из-за трения или путем рассеяния во внешнюю среду, из чего вытекает, что если внутренняя энергия системы не изменяется, то система не может совершать никакой работы. Другими словами, создание вечных двигателей (*perpetuum mobile первого рода*) невозможно.

**Тепло** является не энергией в смысле функции состояния, а энергией, переходящей от одного тела к другому. Тепло должно считаться, следовательно, **функцией процесса**; оно зависит от особенностей способа передачи энергии. Тело не может содержать тепло как энергию, но оно может получать или отдавать энергию в виде тепла. В практике, при рассмотрении процессов передачи тепла, используется образный термин *теплоноситель*, предполагающий описание процесса получения или отдачи тепла.

**Работа** также является функцией процесса. Отнятое от тела тепло может преобразоваться в работу или передаваться от тела с одной температурой телу с другой температурой только в ходе **кругового процесса**.

Круговым называется процесс, в ходе которого рассматриваемая система возвращается в свое начальное состояние. Наиболее известным является круговой процесс, теорию которого опубликовал в 1824 г. французский военный инженер Николя Леонард Сади Карно (Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796–1832), доказав, что для работы теплового двигателя нужны по меньшей мере два источника тепла с различной температурой. Круговой процесс Карно, графически представленный на рис. 1.1.4, состоит из 4 следующих этапов:

- изотермическое (без изменения температуры) расширение 1–2, во время которого некоторое *термодинамическое тело*, находясь в контакте с источником тепла (нагревателем) с абсолютной температурой  $T_1$ , получает от него количество тепла  $Q_1$ ;
- адиабатическое (без отдачи тепла) расширение 2–3, в течение которого тело совершает работу за счет своей внутренней энергии и охлаждается при этом до температуры охладителя  $T_2$ ;
- изотермическое сжатие 3–4, при котором тело отдает охладителю количество тепла  $Q_2$ ;
- адиабатическое сжатие 4–1, при котором температура тела снова повышается до температуры источника тепла  $T_1$ .



**Рис. 1.1.4. Прямой круговой процесс Карно.  $Q_1$  получаемое термодинамическим (рабочим) телом количество тепла,  $Q_2$  отдаваемое количество тепла,  $T$  абсолютная температура,  $V$  объем термодинамического (рабочего) тела**

Карно доказал, что коэффициент полезного действия (кпд) такого *прямого обратимого* кругового процесса зависит не от свойств рабочего тела, а только от температуры нагревателя и температуры охладителя, согласно формуле (*теореме Карно*)

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} .$$

Вышеописанный *прямой* круговой процесс имеет место в тепловых силовых установках. В холодильниках, тепловых насосах и т. п. происходит *обратный* круговой процесс, который на рис. 1.1.4 может представляться в виде цикла 4–3–2–1–4.

**Второе начало** термодинамики гласит, что существует функция состояния, характеризующая необратимое рассеяние энергии и называемая *энтропией*. В замкнутой системе энтропия никогда не может уменьшаться. Если обозначить энтропию через  $S$ , то ее изменение  $dS$  выражается формулой

$$dS \geq \delta Q / T$$

$\delta Q$  количество тепла, передаваемое системе при температуре  $T$   
 $T$  абсолютная температура

В случае обратимого процесса – действительно равенство, в случае необратимого процесса – неравенство. Если процесс необратим, то энтропия замкнутой системы растет, приобретая свое наивысшее значение в равновесном состоянии системы. С возрастанием энтропии способность системы совершать работу уменьшается и энергия рассеивается. Из второго начала термодинамики вытекает, в частности, что

- все спонтанные (протекающие в одном направлении) процессы необратимы;
- все процессы, связанные с трением, необратимы;
- процессы выравнивания и перемешивания необратимы;
- тепло не может само по себе передаваться от тела с низшей температурой телу с высшей температурой; чтобы тепло передавать таким образом,

необходимо совершать работу, как, например, в холодильнике или в тепловом насосе;

- в равновесном состоянии замкнутой системы ее энтропия максимальна;
- тепло ни в коем случае не может полностью преобразоваться в работу;
- вечный двигатель, основанный на полном преобразовании тепла в работу (*perpetuum mobile второго рода*), невозможен.

Так как тепло никогда не может полностью преобразоваться в работу, то в теорию тепловых машин введены понятия *эксергия* (часть тепла, которая может преобразоваться в работу) и *анергия* (часть тепла, которая не может преобразоваться в работу). Кпд теплового двигателя, основанного на вышеописанном идеальном круговом процессе Карно, может, следовательно, выражаться и в виде

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{\text{эксергия}}{\text{анергия} + \text{эксергия}} \cdot$$

Реальный КПД теплового двигателя всегда меньше, чем в случае идеального кругового процесса. Отсюда вытекает, в частности: если в какой-либо машине (например, в паровой турбине или в двигателе внутреннего сгорания) механическая энергия получается после преобразования энергии в тепло, то ее КПД меньше, чем у машин без такого промежуточного теплового преобразования энергии (например, у гидравлических турбин).

К термодинамическим функциям состояния относятся, кроме вышеназванных внутренней энергии и энтропии, и температура, давление, объем, масса вещества (или количество частиц вещества), плотность и энтальпия (функция состояния, которая при заданных энтропии, давлении и числе молей компонентов, как независимых переменных, полностью определяет термодинамические свойства системы).

**Третье начало** термодинамики, по которому никакое вещество не может охлаждаться до нулевой абсолютной температуры, сформулировал в 1908 г. профессор физической химии Берлинского университета Вальтер Герман Нернст (Walther Hermann Nernst, 1864–1941); это начало часто называется и *тепловой теоремой Нернста*.

Иногда отмечают существование и **нулевого** (или общего) начала термодинамики, имея в виду принцип, согласно которому замкнутая система независимо от начального состояния, в конце концов, приходит к состоянию термодинамического равновесия.

**Закон эквивалентности массы и энергии** опубликовал 21 ноября 1905 г. эксперт швейцарского патентного департамента в Берне (Bern) Альберт Эйнштейн (Albert Einstein, 1879–1955) в виде формулы [1.3]

$$E = m c^2$$

***E*** энергия, J  
***m*** масса, kg  
***c*** скорость света ( $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ )

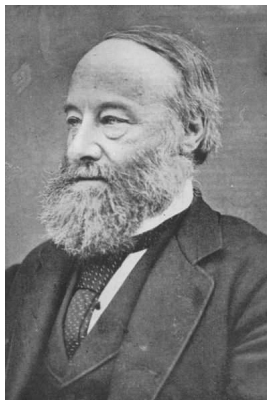
Согласно законам термодинамики, энергия, как уже отмечалось, не может сама собой (произвольно) возникать или путем потребления уничтожаться; она может только преобразоваться из одного вида в другой. В экономических науках энергия, однако, часто рассматривается как **товар**, в связи чем говорят и о ее производстве, продаже и потреблении. Такая экономическая интерпретация энергии принципиально отличается

от термодинамической. В настоящей книге приходится все же иногда учитывать и экономическое понимание энергии, особенно тогда, когда это сопровождается рассмотрением других экономических критериев и показателей. Так, например, в соответствии с той экономической терминологией, которая используется в статистических изданиях ООН, приходится волей-неволей применять в разделах 1.4 и 1.5 настоящей главы такие понятия, как *производство и потребление товарных видов энергии, производство и потребление электроэнергии* и др.

## 1.2 ЕДИНИЦЫ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ

Чтобы выражать энергию в численном виде, необходимо ее, как и любую другую физическую величину, в подходящих единицах *измерять*. **Единицей энергии** в Международной системе единиц (*Système International d'unités, SI*) [1.4] является введенная в 1849 г. и определяемая через основные единицы SI (килограмм, метр и секунду)  $\text{kg m}^2 / \text{s}^2$ , которую в 1881 г. на первом международном конгрессе электриков в Париже было предложено назвать в честь английского физика Джеймса Прескотта Джоуля **джоулем (J)**:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2 / \text{s}^2 = 1 \text{ N m} = 1 \text{ W s} .$$



**Джеймс Прескотт Джоуль**

Джеймс Прескотт Джоуль (James Prescott Joule, 1818–1889) был владельцем пивоваренного завода вблизи Манчестера (Manchester) и считал необходимым тщательно, с применением научных методов, изучать технологические процессы энергопреобразования на своем заводе. Одним из первых он стал применять электрические нагревательные устройства и в 1840 г. сформулировал закон теплового действия электрического тока. Весьма основательно он исследовал преобразование механической энергии в тепло и установил в 1843 г. при помощи вращающейся в жидкости крылатки собственного изготовления *механический эквивалент тепла*. На основании произведенных в одно и то же время исследований Джоуля и немецкого физика Юлиуса Роберта фон Майера (Julius Robert von Mayer, 1814–1878) другой немецкий физик Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц (Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, 1821–1894) обобщил сформулированный Майером в 1842 г. **закон сохранения энергии** на все процессы преобразования энергии.

В настоящей книге применяются международные (латинские) обозначения единиц, находившие преимущественное применение и в России до 1957 года, хотя параллельные русские обозначения были стандартизованы уже в 1929 году. В



настоящее время в русской технической литературе используются сложившиеся на практике обозначения, основанные на русском алфавите и приведенные в Российском государственном стандарте по международной системе единиц [1.5] наряду с международными обозначениями. Некоторые из них приведены в нижеследующей таблице 1.1.1.

**Таблица 1.1.1. Международные и русские обозначения некоторых единиц**

Физическая величина	Единица	Обозначение единицы	
		Международное	Русское
Длина	метр	m	м
Масса	килограмм	kg	кг
Время	секунда	s	с
	минута	min	мин
	час	h	ч
Абсолютная температура	кельвин	K	К
Сила	ньютон	N	Н
Энергия, работа	джоуль	J	Дж
	ватт-час	W·h, Wh	Вт·ч
Мощность, активная мощность	ватт	W	Вт
Реактивная мощность	вар	var	вар
Полная мощность	вольт-ампер	V·A, VA	В·А
Ток	ампер	A	А
Напряжение	вольт	V	В
Сопротивление	ом	Ω	Ом
Проводимость	сименс	S	См
Индуктивность	генри	H	Гн
Емкость	фарада	F	Ф
Магнитная индукция	тесла	T	Тл

Так как в одном и том же документе или издании не допускается параллельное применение международных и русских обозначений единиц, то в настоящей книге последовательно используются только латинские обозначения.

Вышеуказанный международный стандарт [1.4], а также Европейский стандарт по буквенным обозначениям в электротехнике [1.6], идентичный с таким же стандартом Международной электротехнической комиссии, рекомендуют использовать в сложных единицах, выражаемых в виде произведений, точку умножения. Стандарт допускает, однако, применение и пробелов (как в математических выражениях) и, если это не вызывает разночтений, слитное написание. В настоящей книге используются, главным образом, эти два допускаемых способа написания, так как они широко распространены как в эстонской, так и в иностранной технической литературе и в технической документации. В русских обозначениях сложных единиц, согласно государственным стандартам России, требуется применять только точки умножения.

Джоуль является относительно малой единицей, и поэтому в энерготехнике обычно применяются ее десятичные кратные, например,

$$\begin{array}{ll}
 1 \text{ kJ (килоджоуль)} = 10^3 \text{ J} & 1 \text{ PJ (петаджоуль)} = 10^{15} \text{ J} \\
 1 \text{ MJ (мегаджоуль)} = 10^6 \text{ J} & 1 \text{ EJ (эксаджоуль)} = 10^{18} \text{ J} \\
 1 \text{ GJ (гигаджоуль)} = 10^9 \text{ J} & 1 \text{ ZJ (цеттаджоуль)} = 10^{21} \text{ J} \\
 1 \text{ TJ (тераджоуль)} = 10^{12} \text{ J} & 1 \text{ YJ (йоттаджоуль)} = 10^{24} \text{ J}
 \end{array}$$

Международная организация по стандартизации (*International Organization for Standardization, ISO*) разрешает, как известно, наравне с единицей времени

секунда, пользоваться и единицами *минута* (min), *час* (h) и *сутки* (d). Пользуясь этим, в электро- и теплоэнергетике, по практическим соображениям, находят широкое применение единица энергии **ватт-час** (Wh) и ее десятичные кратные, например,

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}, \quad 1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot \text{MJ} \quad \text{и т. д.}$$

Когда хотят подчеркнуть, что какая-либо десятичная дробь является **точной**, ее последнюю цифру представляют **жирным шрифтом**. Этот принцип используется в настоящей книге и в дальнейшем.

В качестве единицы тепла в энерготехнике долго, с 1772 года, применялась (и применяется даже сейчас, например, для характеристики количества энергии в пищевых продуктах) **калория** (cal), определяемая как количество тепла, необходимого для повышения температуры 1 г воды на 1 К. Это означает, что

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J.}$$

Использование единицы *калория* в Европейском Союзе необязательно и допускается лишь дополнительно к нормативной единице *джоуль* до 1 января 2010 г.

Теплотворная способность топлива может весьма наглядно представляться в виде эквивалентного, хорошо понятного количества некоторого **условного топлива**, в качестве которого в свое время был принят **каменный уголь** с теплотворной способностью 7000 kcal/kg. В некоторых странах предпочитают с той же целью применять **нефть** с теплотворной способностью 10 000 kcal/kg. Таким путем получают внесистемные единицы энергии

$$1 \text{ tce ( [metric] ton of coal equivalent, тонна условного угольного топлива) = 7000 \text{ Mcal} = 29,31 \text{ GJ} = 8,14 \text{ MWh} \text{ и}$$

$$1 \text{ toe ( [metric] ton of oil equivalent, тонна условного нефтяного топлива) = 10\,000 \text{ Mcal} = 41,87 \text{ GJ} = 11,63 \text{ MWh.}$$

В последнее время в русском языке вместо вышеприведенных традиционных единиц *тонна условного угольного топлива* и *тонна условного нефтяного топлива* стали, по аналогии с английским языком, применяться и выражения *тонна угольного эквивалента* и *тонна нефтяного эквивалента*.

В ядерной физике (например, для характеристики процессов, происходящих в ядерных реакторах) используют внесистемную единицу энергии **электронвольт** (с обозначением **eV**), определяемую как энергию, получаемую электроном в ускоряющем электрическом поле при движении под действием сил этого поля от одной точки к другой, если напряжение между этими точками составляет 1 V.

$$1 \text{ eV} = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

В США и (уже в меньшей мере) в Великобритании находится в применении **британская единица тепла** (*British thermal unit, Btu*) – количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 фунта воды на 1 °F.

$$1 \text{ Btu} = 1,0551 \text{ kJ} = 0,2520 \text{ kcal} = 36,0 \cdot 10^{-6} \text{ кгсэ.}$$

В качестве единицы **мощности** на первом международном конгрессе электриков в Париже (в 1881 г.), в честь изобретателя универсальной паровой машины Джеймса Уатта (James Watt, 1736–1819) (см. раздел 3.2) был предложен **ватт** (W). В случае необходимости пользуются также десятичными кратными или дольными единицами (kW, MW, GW и т. д.; mW,  $\mu$ W и т. д.).

На второй день работы первого (Парижского) международного конгресса электриков, 21 сентября 1881 г., были утверждены названия электротехнических единиц **ампер, вольт, ом, кулон** и **фарада**. Были предложены и названия единиц энергии и мощности – **джоуль** и **ватт** (причем, предлагалось, чтобы 1 W равнялся 1000 J/s), но утверждение этих единиц было отложено, так как определение ватта не представилось целесообразным. Обе единицы вместе с современным определением ватта ( $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ ) были утверждены на четвертом международном конгрессе электриков в Чикаго в 1893 г.

Еще недавно в качестве единицы мощности (особенно механической) использовалась **лошадиная сила**, введенная в 1770 г. Джеймсом Уаттом. В 1783 г. он уточнил свое определение так, что

$$1 \text{ HP (horsepower)} = 33\,000 \text{ lbf ft/min (силовых фунт-футов в минуту)} = 0,74570 \text{ kW.}$$

Эта единица была выбрана Уаттом приблизительно на 50 % выше, чем развиваемая обычной английской лошадью средняя тяговая мощность в течение 8-часового рабочего дня, чтобы при опытном сравнении с живой лошадиной силой его паровая машина ни в коем случае не проиграла [1.7].

До определения Уатта (часто и после того) эту единицу выражали просто и приближенно – словом *лошадь*, в соответствии с числом лошадей в лошадном приводе или с воображаемым числом лошадей в ветряном или водяном приводе.

Во Франции и в Германии после перехода на метрическую систему стали определять лошадиную силу, как

$$1 \text{ CV (cheval-vapeur)} = 1 \text{ PS (Pferdestärke)} = 75 \text{ kgf m/s (силовых килограммометров в секунду)} = 0,73550 \text{ kW.}$$

Эта единица широко применялась как в России (и в СССР), так и в Эстонии с обозначением соответственно *л.с.* или *hj*.

Единица *лошадиная сила* не имеет общепринятого международного обозначения.

### 1.3 ЭНЕРГОБАЛАНС ЗЕМЛИ

Человечество использует для удовлетворения своих энергетических нужд энергоресурсы Земли и живет в климатических условиях, определяемых энергетическим равновесием (энергобалансом) Земли. В то же время, начиная с 20-го века, оно, через свою деятельность, оказывает все возрастающее влияние на энергетическое равновесие и на климат Земли.

Земля непрерывно получает энергию от трех естественных и двух искусственных источников, характеризующихся следующим годовым количеством энергии (см. рис. 1.3.1) [1.8]:

- 1) излучение, получаемое от Солнца –  $5,6 \cdot 10^3$  ZJ,
- 2) геотермальная энергия (тепло, выделяющееся при радиоактивном распаде урана, тория, а в меньшей мере также калия внутри Земли) – **1,1 ZJ**,
- 3) энергия приливов и отливов, вызванных гравитационным воздействием Луны – **0,1 ZJ**,
- 4) тепло, выделяющееся при сжигании накопившегося в недрах Земли ископаемого топлива (каменного угля, нефти, природного газа, сланцев и др.) и продуктов их переработки (например, продуктов рафинирования нефти) – **0,5 ZJ**,
- 5) тепло, выделяющееся при искусственном расщеплении добываемого из недр Земли урана в атомных реакторах (как на атомных электростанциях, так и на плутониевых заводах, на атомных судах и подводных лодках) – **0,04 ZJ**.

Путем измерения потока антинейтрино в 2005 г. в Японии удалось установить, что выделяемая при радиоактивном распаде урана 238, тория 232 и калия 40 внутри Земли тепловая мощность находится в пределах от 16 до 60 TW, что соответствует годовому количеству энергии от 0,5 до 1,9 ZJ [1.9]. Вышеприведенное числовое значение 1,1 ZJ, полученное путем оценки результатов теплотехнических измерений в 1993 г., может, таким образом, считаться подтвержденным.

Приведенные данные по искусственным источникам соответствуют состоянию на 2000 год и за последние несколько лет практически не изменились.

Кроме вышеназванных, в качестве источников энергии Земли могут в принципе учитываться излучение звезд и превращение кинетической энергии падающих на Землю метеоритов в тепло. Однако значение этих источников, по сравнению с вышеназванными, пренебрежимо мало.

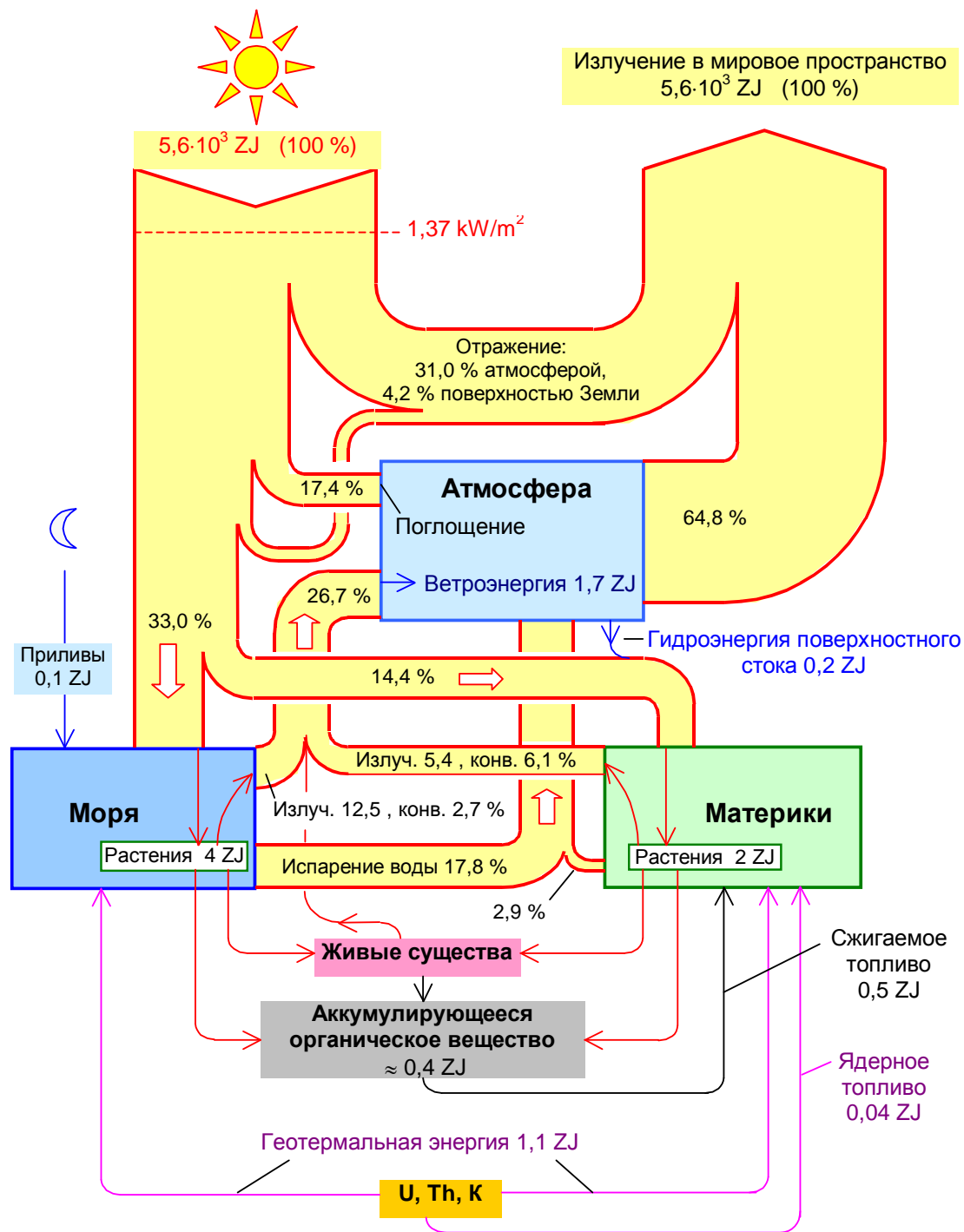


Рис. 1.3.1. Энергобаланс Земли

Излучение, получаемое от Солнца, характеризуется **солнечной постоянной** – облученностью воображаемой поверхности, перпендикулярной к лучам солнца, на верхней границе атмосферы; эта постоянная равна  $1372 \text{ W/m}^2$ . Из получаемого Землей лучистого потока 35,2 % сразу, в качестве коротковолнового оптического излучения, отражается обратно в мировое пространство (31,0 % от атмосферы и 4,2 % от поверхности Земли), а остальная часть поглощается в виде тепла

- атмосферой (17,4 %),

- морями (33,0 %),
- материками (14,4 %).

Необходимо отметить, что обозначение единицы *процент*, как и все другие обозначения единиц физических и математических величин, отделяется от численного значения величины, на основании международных и российских стандартов, обязательно **пробелом**. Слитное написание, все же еще встречающееся как в русской, так и в эстонской и английской литературе, следует считать ошибкой.

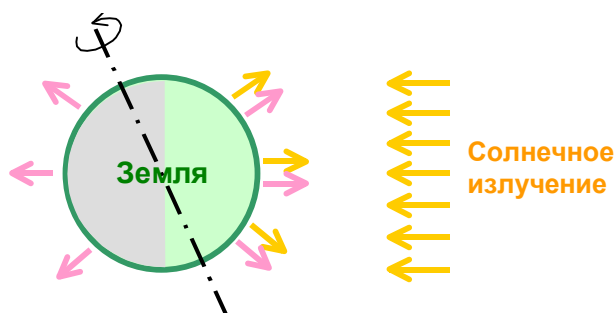
Из тех 33,0 % солнечной энергии, которые поглощаются морями, возвращается атмосфере

- через испарение воды – 17,8 %,
- в виде длинноволнового теплового излучения – 12,5 %,
- путем конвекции – 2,7 %.

С поверхности материков аналогичным путем возвращается в атмосферу соответственно 2,9 , 5,4 и 6,1 % получаемого Землей солнечного излучения.

Некоторое количество энергии – около **6 ZJ** или  $10^{-4}$  % от получаемого Землей солнечного излучения – потребляют для фотосинтеза земные и морские растения (первые из них около 4 ZJ, вторые около 2 ZJ). Часть этой энергии растения возвращают атмосфере в виде теплового излучения, а часть аккумулируют в своей биомассе. Некоторая часть мертвой биомассы откладывается затем на дне океанов или в недрах Земли и может медленно превращаться в ископаемое топливо. Часть биомассы растений потребляется в виде растительной пищи живыми существами, от которых эта энергия частично также, в виде длинноволнового теплового излучения, возвращается в атмосферу или гидросферу, а частично аккумулируется в виде их биомассы. Эта биомасса также может откладываться в неживом виде на дне океанов или в недрах земли и превращаться затем в ископаемое топливо. В виде древесины, торфа и (в относительно малой части) ископаемого топлива в настоящее время аккумулируется около 0,4 ZJ энергии в год.

Энергия, поглощенная в результате вышеназванных процессов в атмосфере (в итоге 64,8 % от получаемого Землей солнечного излучения), излучается как с освещенной, так и с неосвещенной Солнцем сторон Земли в виде длинноволнового теплового (инфракрасного) излучения обратно в мировое пространство, вызывая суточные колебания температуры атмосферы и поверхности Земли (рис. 1.3.2). Относительно малая часть (около 1,7 ZJ) перед этим превращается в *энергию ветра*, а еще меньшая часть (около 0,2 ZJ) возвращается на материки в виде гидравлической энергии поверхностного стока.



**Рис. 1.3.2. Отражение солнечного излучения Землей и длинноволновое тепловое излучение Земли в мировое пространство**

В конечном итоге вся получаемая извне и освобождаемая на Земле энергия излучается в мировое пространство, причем, средний поток излучения с единицы поверхности Земли (*излучаемость Земли*) составляет  $348 \text{ W/m}^2$ . Если бы Земля была идеальным *черным излучателем* без атмосферы, то ее средняя абсолютная температура при таком равновесном состоянии, на основании закона Стефана-Больцмана

$$M_e = \sigma_0 T^4$$

$M_e$  излучаемость,  $\text{W/m}^2$   
 $\sigma_0$  постоянная Стефана-Больцмана,  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$   
 $T$  абсолютная температура,  $\text{K}$

составляла бы

$$T = (M_e / \sigma)^{1/4} = (348 / 5,67 \cdot 10^{-8})^{1/4} = 280 \text{ K.}$$

Другими словами, среднегодовая температура поверхности Земли была бы около **+7 °C**.

Так как Земля все же не является черным излучателем, то вместо постоянной  $\sigma$  в вышеприведенной формуле следует пользоваться произведением  $\varepsilon \sigma_0$ , где  $\varepsilon < 1$  – зависящий от температуры *коэффициент лучеиспускания*, учитывающий и существование атмосферы, а также то, что содержащиеся в атмосфере трехатомные газы, а также газы, молекулы которых состоят из еще большего числа атомов (водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$ , углекислый газ  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ , закись азота  $\text{N}_2\text{O}$  и др.), селективно поглощают длинноволновое тепловое излучение Земли и таким образом повышают среднюю температуру как нижней части атмосферы (*тропосферы*), так и поверхности Земли. Поэтому средняя температура поверхности Земли в настоящее время равна около **+15 °C**. Так как тепло, выделяющееся в энергоустановках и производственных процессах, а также содержание углекислого газа, метана и других *парниковых газов* в атмосфере постоянно увеличиваются, то температура равновесия поверхности Земли медленно, но в ускоряющемся темпе повышается. Этот важный вопрос более подробно рассматривается в разделе **8.2** настоящей книги, так как энергобаланс Земли, а также ее температура равновесия в результате энергоемкой деятельности человека стали весьма заметно и опасно изменяться.