

№ 841

**МИСиС**

---

Л.А. Шульц

# **Теплоэнергетическое оборудование и энергосбережение**

Учебное пособие

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 841

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ  
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра теплофизики и экологии металлургического  
производства

Л.А. Шульц

# **Теплоэнергетическое оборудование и энергосбережение**

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлению Металлургия

Москва Издательство «УЧЕБА» 2007

УДК 662.99:669.013  
Ш95

Рецензент  
канд. техн. наук, проф. *В.А. Муравьев*

**Шульц Л.А.**  
Ш95 Теплоэнергетическое оборудование и энергосбережение:  
Учеб. пособие. – М.: МИСиС, 2007. – 252 с.

Учебное пособие включает все основные разделы учебной дисциплины «Теплоэнергетическое оборудование и энергосбережение», содержащие исторические и современные представления о тепловой энергетике. В нем рассматриваются различные источники энергии и перспективы их развития. Проанализированы способы производства энергоносителей и их основное оборудование. Значительное внимание уделяется энерго-экологическому анализу энергетического и металлургического производства.

Предназначено для студентов МИСиС, обучающихся по специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды», направлению 280200 «Защита окружающей среды», «Техносферная безопасность» – профиль 1, специальности и направлению 550103 «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
Введение.....	7
1. История тепловой энергетики на фоне становления и развития человеческого общества.....	15
1.1. Фрагменты предыстории развития человеческого общества на Земле.....	15
1.2. Огонь – основа современной человеческой цивилизации.....	20
1.3. Закон сохранения энергии и другие научные предпосылки современной теплоэнергетики.....	32
1.4. Энергетические кризисы в истории человеческого общества.....	37
1.5. Теплоэнергетика на базе ядерного топлива.....	39
1.6. Энергетика возобновляемых и других альтернативных источников энергии.....	45
1.7. История климата и его энергетическая биорегуляция.....	54
1.8. Энергоэффективность жизненного цикла изделий – ключевая задача в обеспечении устойчивого развития современного общества.....	60
2. Энергетические системы промышленного предприятия.....	63
3. Котлы и другие установки для производства водяного пара.....	74
3.1. Топливные котлы.....	78
3.1.1. Тепловой и эксергетический балансы котла.....	80
3.1.2. Экологическая эффективность работы котлов.....	91
3.2. Котлы-утилизаторы и системы испарительного охлаждения.....	99
4. Преобразователи теплоты стационарной электроэнергетики.....	110
4.1. Паровые турбины.....	110
4.2. Газовые турбины.....	119
4.3. Энергоэффективность работы ТЭЦ, ПГУ-ТЭЦ.....	126
5. Лопастные газодувные машины.....	134
5.1. Центробежные вентиляторы.....	134
5.2. Осевые вентиляторы.....	148
5.3. Турбовоздуходувные машины.....	150
6. Производство кислорода методом глубокого охлаждения.....	156
6.1. Сжижение воздуха.....	159
6.2. Ректификация воздуха и производство кислорода в установках низкого давления.....	165

7. Вакуумирование и вакуумные установки .....	171
7.1. Элементы расчета вакуумных систем .....	172
7.2. Вакуумные насосы .....	175
8. Энерго-экологическая эффективность технологического производства (на примере черной металлургии) .....	183
8.1. Энерго-экологическая оценка металлургического производства.....	183
8.1.1. Энергетическая оценка .....	185
8.1.2. Экологическая оценка.....	205
8.2. Оборот лома черных металлов и его энерго-экологическая оценка .....	220
8.3. Оценка возможных изменений в металлургии в условиях развивающейся электроэнергетики и увеличения потребления каменного угля .....	231
Заключение.....	244
Библиографический список .....	249

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Энергетика – одна из форм природопользования, один из основных источников загрязнения окружающей природной среды, оказывающий серьезное влияние на тепловой баланс между биосферой и космическим пространством. В своей основе энергетика современной человеческой цивилизации является тепловой, т.е. получение необходимых видов энергии (электрической, механической и др.) в подавляющем большинстве случаев связано с преобразованием теплоты, выделяемой при сгорании минерального и других видов топлива, распаде (или синтезе) ядерного горючего, теплоты, поступающей от Солнца, термальных источников и др. *Важнейшая задача современной, в основе своей тепловой энергетики – это повышение ее энерго-экологической эффективности на всех этапах выработки, преобразования и использования энергии.*

### *Содержание учебного пособия*

Введение. Рассмотрены основные проблемные вопросы современной энергетики.

Глава 1 посвящена главным историческим моментам энергетики, что, по мнению автора, будет способствовать выработке у студентов системного подхода при оценке достижений соответствующих областей науки и техники, повысит их интерес к теме и позволит лучше представить возможные пути ее дальнейшего развития. Показано, что развитие энергетики – это зарождение и развитие современной человеческой цивилизации. В главе отмечены некоторые моменты из истории установления основных законов термодинамики, важных для понимания курса. Поясняется термин «эксергия». Приводятся основы атомной энергетики, ее проблемы и возможные пути развития. Рассмотрены нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Проводится оценка экологических проблем, связанных с энергетикой.

В главах 2, 3 и 4 рассмотрены примеры технической вооруженности и эффективности энергопреобразующей части современной тепловой топливной и утилизационной энергетики. Рассмотрены энерго-экологические элементы работы различных ТЭС, ТЭЦ и ПГУ-ТЭЦ (ТЭС), устройств для производства, утилизации и преобразования теплоты.

В главе 5 рассмотрены работа и конструктивные схемы наиболее распространенного типа воздуходувок – лопастных машин. Особое внимание обращено на современные возможности метода импульсно-частотного регулирования числа оборотов привода таких машин, значительно повышающего возможности их экономичной эксплуатации.

В главах 6 и 7 даются основы производства кислорода и работы вакуумной техники, широко используемых в металлургии.

В главе 8 проанализированы интегральные энерго-экологические показатели металлургического производства. Рассмотрены примеры определения энергоемкости и экологической ущербности продукции. Прогнозируются энергетически обоснованные направления эволюции металлургии.

В заключительном материале дается оценка возможных путей решения надвигающихся мировых энергетических проблем. Показано, что устойчивая и достаточная энергетика в целом является одним из главных условий устойчивого экономического и энерго-экологического развития земной цивилизации.

В теоретический курс не включены материалы расчетных работ, которые будут разбираться на практических занятиях. На такие же занятия перенесено и рассмотрение поршневых компрессорных машин.

Пособие включает все основные разделы учебной дисциплины «Теплоэнергетическое оборудование и энергосбережение» для подготовки бакалавров, инженеров и магистров и может быть полезно при изучении соответствующих тем в дисциплинах «Энерго-экологический анализ и малоотходные технологии», «Экология и рациональное природопользование» (курс «Энергия и человек»).

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы, связанные с получением, преобразованием и использованием энергии, неизменно затрагивают интересы каждого человека, в какую бы историческую эпоху мы его ни рассматривали. Однако особое значение эти вопросы приобрели в последние годы.

В период 1975–2005 гг. в мире было использовано столько же энергетических ресурсов, сколько за весь период человеческой цивилизации, т.е. почти за 7500 лет. Мировое энергопотребление сейчас достигло почти 15 млрд т у. т./год (соответствует мощности примерно 14 ТВт). Не случайно энергетическими программами различных стран с каждым годом уделяется все большее внимание развитию энергосберегающих технологий и, что не менее важно, энергоэкологическому совершенствованию процессов использования топлива и других видов энергии.

За все время существования земной цивилизации, со времен неолитовой революции, в результате хозяйственной деятельности в атмосферу Земли поступило около 360 млрдт углекислого газа, сейчас же в год в атмосферу поступает около 25 млрд т этого газа (почти 7 млрд т углерода) (Зеленый мир. 2006. № 19–20). Накопление в атмосфере парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др.), резко возросшее в последние годы интенсивное энергопотребление наряду с разрушением природных экосистем, напрямую связанным с тем же потреблением энергии и играющим ключевую роль в фиксации атмосферного углерода в процессе фотосинтеза, все ближе подводит нас к границе возможных серьезных изменений земного климата.

Геологические мировые запасы горючих ископаемых, которые являются основой современной энергетики, по данным XXVI Международного геологического конгресса, составляют, млрд т у. т. (%): уголь – 10126 (89,53), нефть – 743 (6,57), природный газ – 229 (2,02), торф – 98 (0,88), горючие сланцы – 114 (1). Условно доступные для извлечения запасы, по данным той же организации, оцениваются в следующих количествах, млрд т у. т. (%): уголь – 2880 (82,66), нефть – 372 (10,68), природный газ – 178 (5,11), торф – 26 (0,75), горючие сланцы – 28 (0,8). Всего мировые геологические запасы горючих ископаемых составляют 11310 млрд т у. т., условно доступные – 3484 млрд т у. т.

Геологические запасы горючих ископаемых в настоящее время примерно в три раза превышают запасы, условно доступные для раз-



работки и использования. При современном уровне добычи все доступные месторождения будут исчерпаны ориентировочно за следующие сроки: уголь – 250–300 лет, природный газ и нефть – 50–75 лет, т.е. за срок, неизмеримо меньший времени существования современной цивилизации.

Россия по геологическим запасам газа занимает 1-е место – 47,8 трлн м<sup>3</sup>, Иран – 26,7, Катар – 25,8 трлн м<sup>3</sup>. По запасам нефти мы находимся на 7-м месте – 10,2 млрд т, на первом месте Саудовская Аравия – 36,3, на втором месте Иран – 18,9, на третьем месте Ирак – 15,5 млрд т (по данным журнала «АиФ» за 2006 г., №29).

Оценки геологических и доступных запасов горючих ископаемых в результате последующих поисковых работ, безусловно, будут изменяться в сторону их увеличения. Так, например, намечается проведение исследовательских работ по извлечению газа (состоящего в основном из метана) из угольных пластов, из глубоководных месторождений, из вечной мерзлоты, из нижних слоев земной коры. Его суммарные запасы могут в миллиарды раз превысить все учитываемые в настоящее время геологические запасы горючих ископаемых. Однако пока нет никаких надежд на хотя бы временную приостановку роста себестоимости добывания энергоресурсов даже из традиционных месторождений. Более того, уже сейчас энергозатраты на добычу и транспортировку энергоресурсов в ряде случаев достигают 70–75 % их фактической энергетической ценности.

Очень важный, несмотря на разные точки зрения, источник энергии – атомная энергетика. В 2003 г. на долю атомных электростанций приходилось около 6 % мировой выработки электроэнергии. Однако общие мировые запасы потребляемого в настоящее время изотопа урана 235 составляют порядка 4 млн т, что соответствует обеспеченности атомным топливом всего на 30 лет. Использование реакторов-размножителей открывает новые возможности в применении традиционно накапливаемого оружейного плутония и существенно расширяет топливную базу атомной энергетики.

Возлагаются определенные надежды и на использование термоядерной энергии, для производства которой имеются огромные ресурсы дейтерия – тяжелой воды (в природной воде до 0,014 % дейтерия). Поставить ядерный синтез на службу человеку позволило бы обеспечить его практически неисчерпаемым источником энергии. Это же процесс, который лежит в энергетической основе «жизни» не только Солнечной системы, но и всей Вселенной!

Объем добычи ископаемых топлив в мире непрерывно увеличивается, но ограниченность этой тенденции уже ощущается в настоящее время даже в нашей богатой ресурсами стране. В России первичных энергоресурсов в 2020 г. намечено произвести 1990 млн т у. т. (в 2000 г. было произведено 1380 млн т), в том числе: угля 370 млн т, нефти и газового конденсата 500 млн т, природного газа 740 млрд м<sup>3</sup>, гидроэнергии 215 ТВт·ч, атомной энергии 303 ТВт·ч, нетрадиционных источников 20 млн т у. т. (2000 г. – 1 млн т у. т.). В последующие годы суммарное производство первичных энергоресурсов возрастет следующим образом: 2030 г. – до 2115 млн т у. т., 2040 г. – до 2185, 2050 г. – до 2215. Видно, что темпы общего прироста производства первичной энергии к середине XXI века заметно снизятся. Максимальная же добыча природного газа в 2030 г. достигнет 810 млрд м<sup>3</sup>, после чего она также начнет снижаться: к 2040 г. – до 765 млрд м<sup>3</sup>, 2050 г. – до 725 млрд м<sup>3</sup>. По уровню же добычи нефти и газового конденсата мы уже достигли максимального уровня. В 2030 г. она составит 455 млн т, 2040 г. – 445 млн т, а в 2050 г. – 430 млн т. Причем добыча нефти в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке с 2000 г. до 2050 г. возрастет в 30 раз – с 3,5 до 105 млн т. Добыча природного газа в этом регионе за период 2000–2030 гг. увеличится почти в 18 раз – с 7 млрд м<sup>3</sup> до 125 млрд м<sup>3</sup>, после чего стабилизируется. Как и многие другие страны, Россия испытывает значительный дефицит коксующихся углей, особенно в европейской ее части.

Доля различных видов энергетических ресурсов в общемировой выработке первичной энергии в настоящее время ориентировочно составляет (без учета дров и других видов биотоплива), %: нефть – 40–45, уголь – 25–30, газ – 20–25, ГЭС и АЭС – 3–5. Энергопотребление в ЕС в 2000 г. составило (план на 2030 г.), %: нефть – 41 (38), уголь – 16 (19), газ – 22 (29), АЭС – 15 (6), ВИЭ – 6 (8). В энергобалансе первичных источников энергии в России первое место занимает природный газ. В США на долю природного газа приходится примерно 21 %, угля – 27 %, большую же часть в энергетическом балансе составляют продукты переработки нефти – 40 %, на долю АЭС приходится 6 %, ГЭС – 5 %, прочие – 1 %. В топливном балансе тепловых электростанций основным видом топлива является: в России – природный газ (63–66 %), США – уголь (54–57 %), в Германии – уголь (50–52 %), в Китае и Индии – уголь (75–80 %). На ТЭС мира доля угля составляет 38–40 %, в России – 16,5–17 %, Японии – 27–28 т.

Объем добычи и производства первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в России в 2004 г. составил 1693,4 млн т у. т., потре-

ния – 951,1 млн т у. т.  $\approx 0,9$  ТВт (по данным журнала «Теплоэнергетика», № 12 за 2005 г.). Потребление добытой энергии ископаемого топлива распределилось следующим образом: нефть и нефтепродукты – 21,5 %, природный газ – 60,1 %, уголь – 18,4 %. Доля ископаемого топлива, используемого на ТЭС, составила 25 % (в США около 30 %). Уровень ГЭС и АЭС в первичных ТЭР (при топливном эквиваленте: 1 кВт·ч = 0,35 кг у. т.) оценивается в 113,7 млн т у. т., или 12 %. Объем производства электроэнергии в 2004 г. в России составил 931 млрд кВт·ч: ТЭС – 65,4 %, ГЭС – 19 %, АЭС – 16,4 %. Потребление электроэнергии в нашей стране в 2000 г. составляло 880 ТВт·ч, в 2005 г. – 993, в 2010 г. планируется выработка 1127 ТВт·ч. Ежегодно спрос на электроэнергию увеличивается на 2 – 4 %. С учетом ограниченности ископаемого топлива после почти двадцатилетней паузы в связи с чернобыльской аварией все больше внимания уделяется производству электроэнергии на атомных электростанциях. Так, на атомных электростанциях в 2030 г. планируется выработка 430 ТВт·ч электроэнергии, в 2040 г. 545 ТВт·ч, 2050 г – 668 ТВт·ч, выработка гидроэнергии в те же годы соответственно составит: 230, 255 и 285 ТВт·ч. Есть все основания полагать, что выработка ядерной электроэнергии существенно превысит приведенные здесь плановые показатели. Ожидается существенное расширение технологий АЭС на быстрых нейтронах, позволяющих утилизировать плутоний из отработанного топлива, расширить топливную базу за счет не используемого сегодня урана 238, а также сформировать замкнутый ядерно-топливный цикл, обеспечить нераспространение ядерного оружия, сократить время полураспада радиоактивных отходов. Из правительственных выступлений следует, что уже к 2030 – 2050 гг. доля атомной электроэнергии в России возрастет с 16 % в 2006 г. до 25 %. Возрастает стремление к расширению АЭС и в других странах, т.е. мир начинает осознавать, что использование углеводородного топлива в скором времени не позволит обеспечить его энергетической безопасности.

Определенные надежды в энергетическом обеспечении возлагаются на возобновляемые и нетрадиционные энергоносители, к которым прежде всего относят солнечную энергию, гидроэнергию, энергию ветра, волн, приливов и отливов, термальный градиент моря, геотермальную энергию, энергию преобразованной биомассы, древесного угля, торфа, синтетического жидкого топлива из угля, энергию битуминозных песчаников и сланцев. На необходимость «вовлечения в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии» указывается и в Законе РФ «Об энергосбережении» (1996 г.). Разработками альтернативной

энергетики и ее внедрением сейчас активно занимаются ученые более чем в 50 странах по всему миру. Большинство из них хотят уже через пять – десять лет в своих странах производить от 5 до 30 % электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии. Значительные успехи достигнуты в производстве жидкого топлива биоэтанола и биодизеля из растений, которые можно постоянно сажать и выращивать. Причем немаловажно, что они в процессе своей жизни поглощают углекислый газ и выделяют в атмосферу кислород. Например, бразильцы гонят такое топливо из сахарного тростника, на Тайване собираются производить биотопливо из шелухи риса, на Филиппинах из косточек кокосового ореха, в ряде стран используются различные органические отходы. Начинают вновь развиваться технологии производства синтетического бензина из угля, основы которого были разработаны еще в СССР и широко использовались Германией во время Второй мировой войны. Сейчас они доведены до совершенства в ЮАР. Китай в ближайшее время собирается использовать опыт этой страны и построить у себя несколько крупных заводов по производству бензина из угля. Заметные успехи достигнуты в разработках солнечных электростанций, в частности глобальной солнечной энергетической системы. В настоящее время доля возобновляемых источников энергии (в том числе гидроэнергии) составляет: в Финляндии 24,9 (3,9), Швеции 33 (14,4), Канаде 16,5 (12,1), Норвегии 49,6 (44,7), России 3,4 (2,3). В целом же, к сожалению, пока известные нетрадиционные и возобновляемые источники энергии ни по экономическим, ни по техническим причинам не могут заменить в необходимой степени существующую энергосистему. В лучшем случае в современных условиях на них может приходиться 5–6 % всей потребляемой в мире энергии.

В России большая часть ТЭС отапливается природным газом: в целом доля газа в электроэнергетике 64 %, в ее европейской части – 80 %. И несмотря на использование для выработки электроэнергии наиболее ценного топлива, энергоэффективность ТЭС в нашей стране не является показательной. Так, например, в Германии при стоимости природного газа в 5 раз выше, чем в России (примерно 250 и 50 евро/т у. т. в 2005 г., соответственно), стоимость получаемой электроэнергии практически одинакова (около 6 центов/кВт.ч). Примерно такая же стоимость электроэнергии в ЕС, Японии, США и других развитых странах, основным видом топлива ТЭС которых является уголь.

Стремление повысить эффективность преобразования топливной энергии на ТЭС наблюдается во всех странах. Причем одновременно все острее ставится вопрос о повышении доли использования угля.

Это расширит топливную базу ТЭС, но одновременно повысит стоимость установочной мощности станций, затруднит решение экологических проблем.

Для повышения тепловых КПД современных ТЭС используется несколько основных направлений. Одно из них – это увеличение доли ТЭЦ, производящих одновременно и электрическую, и тепловую энергию (теплоту). В России доля выработки электроэнергии на ТЭЦ в настоящее время составила почти 55 %. На ТЭЦ общий тепловой КПД достигает: зимой – 55–60 %, летом – 45–50 %. В случае традиционного оснащения конденсатных ТЭС паротурбинными установками (ПТУ) КПД нетто производства электроэнергии таких станций не превышает 39 %. Перевод же их на сверхкритические параметры пара (30 МПа и температура более 600 °С) позволяет повысить КПД до 42 %. При переходе на комбинированные парогазовые турбины (ПГУ) со сверхкритическими параметрами пара и газа (с начальной температурой газа до 1300 °С) он может составить около 60 %. Известны разработки, позволяющие повысить температуру газов перед газовыми турбинами до 1500 °С и КПД газовых турбин (ГТУ) до 58 %, бинарной же установки – до 70 %. Естественны сложности в реализации отмеченных фундаментальных направлений повышения эффективности выработки электроэнергии на современных ТЭС. Переоборудование в соответствии с этими направлениями станций обходится в 2000 – 2500 долл./кВт. И конечно, использование с таким трудом полученной электроэнергии должно быть также предельно эффективным. Очевидно, эффективность энергетики определяется не только эффективностью производства энергии.

Согласно государственному стандарту 19431–84, который действует в России и в настоящее время, «энергетика – вид экономической деятельности, охватывающий энергетические ресурсы, производство, передачу, преобразование, аккумулирование, распределение и потребление различных видов энергии». Следовательно, важнейшим звеном энергоэффективности энергетики в целом является энергосбережение в процессах потребления энергии.

В технике производства различной продукции для характеристики эффективности потребления энергии часто используется понятие «энергоёмкость». Под полной энергоёмкостью продукции понимается сумма всех затрат, выраженных в единицах использованной первичной энергии, приходящейся на единицу произведенной продукции.

При расчете энергоёмкости, например, металлургической продукции учитывается работа по разрушению породы и добыче сырья,

энергия Гиббса для реакции восстановления, затраты первичной энергии на производство электроэнергии и другие энергоносители, затраты энергии на транспорт и транспортные системы, на капитальные строения с учетом их амортизации, затрата энергии на обработку, сборку и транспортировку всех элементов, участвующих в процессе производства объектов, работа деформации при прокатке, затрата энергии при ликвидации отходов. Общий коэффициент полезного использования первичной энергии в расчете на конечный результат получения продукции в металлургии не превышает 15 %. Таким образом, в металлургии только комплексный подход к энергосбережению позволит добиться высоких результатов.

Полная энергоемкость различных материалов значительно отличается от отраслевой, заводской, цеховой или технологических затрат энергии. Так, например, затраты энергии на производство стального листа в прокатном цехе в среднем составляют около 100 кг у. т./т. Полная же энергоемкость такого проката может изменяться от 2 000 до 3 000 кг у. т./т. Для сравнения полная энергоемкость по усредненным данным для других материалов: титан – 38 000, никель – 24 000, магний – 16 000, алюминий – 10 200, медь – 3 500, цинк – 3 300, свинец – 1 900, ацетилен – 30 000, нейлон – 8 000, жидкий азот – 400, сера – 200 кг у. т./т.

Оценка перспективности вновь разрабатываемых технологий по решению ООН обязательно проводится с учетом полной энергоемкости выпускаемой продукции.

Учитывая сложности при расчете полной энергоемкости, для оценки энергетической эффективности технологий принципиально не отличающихся уровней часто ограничиваются отраслевыми, заводскими или цеховыми показателями. Так поступают, например, при сравнении металлургических производств, обычно различающихся всего лишь качеством оборудования и уровнем управления технологическими процессами. Это также позволяет достаточно объективно сравнивать эффективность потребления энергии в тех или иных процессах или производствах. Так, по данным Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН отраслевая энергоемкость производства стального проката в 2005 г. составила (в скобках указано годовое производство стали в стране, млн т): Китай – 1092 кг у. т./т (340), США – 853 кг у. т./т (92), ЕС – 853 кг у. т./т (100 для 15 европейских стран), Япония – 887 кг у. т./т (110), Россия – 1228 кг у. т./т (64). Видно, что при производстве стали в России потребляется наибольшее количество энергии. Причин этому достаточно много. Но главные из них две: у нас самая

низкая доля непрерывной разливки стали и, несмотря на огромный металлофонд страны – 1,45 млрд т (второй после США – 3,28 млрд т), при производстве стали мало используется металлолом. В США стабильно в последнее десятилетие не менее 50 % стали выплавляется из металлического лома (2005 г. – 53 %). Степень возврата лома в металлургию в США достигла 55 %, что вплотную приближается к возможному максимальному ее значению – 65 %. В США самое низкое отношение массы производимого чугуна к массе выплавленной стали: США – 0,46, ЕС – 0,57, Россия – 0,79, Мир в целом – 0,69.

В «Основных направлениях социально-экономического развития Российской Федерации на долгосрочную перспективу», представленных Минэкономразвития РФ на парламентские слушания 3 апреля 2001 г., подчеркивается высокая энергоемкость экономики России, превышающая удельную энергоемкость экономики развитых стран в 3,5 раза. По различным данным межстрановых сопоставлений энергоемкости ВВП, эта величина колеблется от 2 до 10. При оценке энергоемкости ВВП США, Канады, Японии, Германии и России (В.А. Волконский, А.И. Кузовкин) на основе паритетов покупательной способности (ППС) национальных валют к доллару энергоемкость ВВП в этих странах в 2000 г., соответственно, составила, кг у. т./долл. по ППС (нефтяной эквивалент/долл. по ППС): 0,37 (0,26), 0,43 (0,3), 0,26 (0,18), 0,27 (0,19) и 0,9 (0,63). При определении ВВП по обменному курсу валют для России энергоемкость ВВП составила бы в 2000 г. 4 (2,8). Наиболее простое представление энергоемкости по обменному курсу валют обычно используется для отражения динамики внутреннего изменения ВВП страны, например, для оценочных расчетов скрытой энергоемкости капитальных сооружений и других скрытых амортизационных (прошлых) энергозатрат.

С понятием энергоемкости продукции тесно связано понятие экологической ущербности, выражаемое приведенной массой вредных выбросов, приходящихся на единицу массы произведенных изделий. В России в настоящее время удельная величина приведенной массы выбросов, приходящихся на т у. т. полной энергоемкости, оценивается значением 500–550 прив. кг. Выбросы CO<sub>2</sub> на т у. т. (наиболее влиятельного из парниковых газов на лучистый теплообмен Земли с космосом) в зависимости от типа топлива составляют: доменный газ – 6, коксовый газ – 1,3, природный газ – 1,7, мазут – 2,2 т. Доля диоксида углерода в возможном парниковом эффекте всех газообразных антропогенных выделений на Земле – около 70 %.

# **1. ИСТОРИЯ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ФОНЕ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА**

## **1.1. Фрагменты предыстории развития человеческого общества на Земле**

Волнообразный, а иногда и взрывной характер основных этапов эволюции биосферы, развития техники и науки на Земле является отражением характера ее возникновения.

Общепризнано, что Вселенная (часть мира, доступная нашему наблюдению и изучению, или Метагалактика – большое скопление звезд – галактик, в каждую из которых входит порядка 100–200 млрд звезд) находится в состоянии непрерывной эволюции. Вселенная расширяется, причем скорость расширения является очень высокой – ориентировочно сотни километров в секунду. Во Вселенной существуют звезды всех «возрастов». Образование новых звезд происходит и теперь.

В нашу Галактику, именуемую Млечным путем, входит около 150 млрд звезд. Ее возраст около 15 млрд лет. Солнечная система находится на расстоянии около 30 световых лет (световой год приблизительно 10 000 млрд км) от центра нашей Галактики. Солнечная система родилась 4,5–5 млрд лет назад. Земля является сравнительно небольшой планетой Солнечной системы. Она вращается вокруг Солнца на орбите, близкой к круговой, со скоростью около 30 км/с на расстоянии примерно 150 млн км.

Попытки предсказать историю образования Солнечной системы предпринимались очень давно. По теории выдающегося немецкого ученого И. Канта (1702–1804) Солнце и планеты Солнечной системы возникли из холодной пылевой туманности. Позднее П. Лаплас (1749–1827), французский астроном, математик, физик, считал, что Солнечная система образовалась из горячей быстро вращающейся туманности, причем сначала возникли планеты, а потом Солнце. Эти ранние представления о происхождении Солнечной системы вошли в историю под названием гипотезы Канта – Лапласа.

В настоящее время признается, что существование нашей Вселенной началось с так называемого «Большого взрыва». Это стандартная модель происхождения Вселенной. Экспериментально установленные факты: продолжающееся непрерывное расширение Вселенной и



реликтовое (фоновое, ненаправленное) электромагнитное излучение убедительно свидетельствуют в пользу данной, видимо, общепризнанной точки зрения.

По современным представлениям, взрыв произошел одновременно везде 15–20 млрд лет назад. В 2006 г. американцам Д. Матери и Д. Смуту была присуждена Нобелевская премия по физике за вклад в изучение происхождения звезд и галактик, дополнительно подтвердивший теорию о единовременном взрывном характере образования мира. По данным нобелевских лауреатов, реликтовое излучение представляет собой структурированное излучение почти абсолютно черного источника.

Предполагается такая последовательность эволюции Вселенной после взрыва. Всего лишь через 0,01 с после взрыва Вселенная имела температуру около 100 млрд К. При такой температуре ни молекулы, ни атомы, ни даже ядра атомов существовать не могут. Вселенная в этих температурных условиях состояла из элементарных частиц: электронов, позитронов, нейтрино, фотонов, протонов, нейтронов, кварков. Плотность газового вещества в этот момент была в  $4 \cdot 10^9$  раз больше плотности воды. Всего через 3 мин температура вещества Вселенной, непрерывно снижаясь, достигла 1 млрд К. Плотность вещества приблизилась к плотности воды. Начали образовываться ядра атомов, в частности ядра тяжелого водорода – дейтерия и гелия. И только по истечении нескольких сотен тысяч лет возникли условия для относительно быстрого синтеза атомов водорода и гелия. Силы гравитации превратили газ в сгустки, послужившие основой для образования галактик и звезд.

В эволюции Вселенной выделяют несколько периодов: до 300 тыс. лет – эпоха фонового реликтового излучения, Вселенная наполнена взаимодействующими между собой, как бы кипящими элементарными частицами и электромагнитным излучением; 1 млрд лет – Вселенная заполнена образовавшимся горячим газом, в основном водородом, который в целом остывает, снижает плотность и лишь местами начинает сгущаться; 4 млрд лет – расширение Вселенной продолжается, однако в некоторых ее участках газ уже концентрируется в более плотные туманности, внутри которых выделяются участки, где вещество еще сильнее сгущается и в результате разогревается: образуются протогалактики – предшественницы галактик; 15 млрд лет – протогалактики постепенно обособляются от туманностей, в них зарождаются звезды, а протогалактики становятся галактиками.

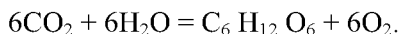
Появлению и развитию жизни на планете требуются известные условия, среди которых важнейшим является приемлемая и стабильная температура среды. В первую очередь она зависит от размеров орбиты планеты. Орбита планеты не должна находиться ни слишком близко к центральной звезде системы, ни слишком далеко от нее. Видимо, наша Земля движется на нужном расстоянии от Солнца, в то время как Меркурий, например, находящийся ближе всех планет к Солнцу, разогревается до слишком высокой температуры – свыше 600 К, а на Уране, Нептуне и Плутоне, расположенных на самых дальних орбитах, наоборот, температура для возникновения жизни слишком низкая – менее 200 К.

Общее время возможного существования образовавшейся примерно 4,5 млрд лет назад Солнечной системы оценивается в 13 млрд лет, т.е. с момента образования Земли до момента ее вероятной гибели прошло уже 35 % времени. По сравнению со средней продолжительностью жизни современного человека это гигантский срок. Время жизни современного человека составляет  $5 \cdot 10^{-7}$  % ожидаемого оставшегося времени существования нашей планеты – Земли. Учитывая накопленный опыт и все более сжимаемые сроки освоения и использования новых изобретений, ускорение темпов цивилизации, сейчас даже невозможно представить, через сколько тысячелетий и какие этапы новых цивилизаций человечеству предстоит еще пройти на нашей планете.

Возникновение жизни на Земле происходило постепенно. Сначала появились простейшие организмы – прокариоты (доядерные). В процессе развития они становились все более сложными. Если расположить организмы в соответствии с их пищевыми взаимодействиями, указав для каждого из них вход и выход энергии и биогенов, то можно сделать вывод, что поток энергии, основой которого является энергия Солнца, непрерывно проходит через экосистему (сообщество живых организмов и среду их обитания), а неорганические биогены непрерывно рециклируются в ней. Важно отметить, что в основе функционирования возникших в ходе эволюции Земли экосистем была и остается до настоящего времени энергия солнечного излучения, преобразуемая фотосинтезирующими растениями в химическую энергию биомассы.

Таким образом, энергетическая основа поддержания и развития биосферы Земли – электромагнитное излучения Солнца. Около 45 % этого излучения – ФАР (фотоактивная радиация) приходится на ви-

димую часть спектра и может участвовать в фотосинтезе зеленых растений в соответствии со следующей обобщенной реакцией:



Годовой запас энергии в органическом веществе (глюкозе и клетчатке), полученном за счет преобразования энергии фотонов солнечного света в энергию его химических связей, оценивается в 105 – 110 млрд т у. т., что соответствует средней мощности фотосинтеза 100 ТВт.

Мощность посылаемого к Земле солнечного излучения составляет 170 000 ТВт. С учетом того, что почти 34 % этого излучения отражается и уходит обратно в космос, энергия, поглощенная атмосферой, сушей и океаном, составляет 112 000 ТВт. Таким образом, около 0,09 % этой поглощенной солнечной энергии усваивается при фотосинтезе, т.е. идет на поддержание жизни на Земле. Остальные 99,91 % энергии поддерживают круговорот воды и минеральных веществ, затрачиваются при перемещении воздушных масс и пр., что не менее важно, чем участие солнечной радиации в фотосинтезе. Для сравнения приведем мощности некоторых потоков преобразованной солнечной энергии (округленно): поглощение сушей – 20 000 ТВт (от всей поглощенной энергии планетой Земля 17,8 %), расход энергии на испарение воды в атмосфере – 40 000 ТВт (35,7 %), турбулентные потоки теплоты в атмосфере – 10 000 ТВт (11,2 %), перенос теплоты с экватора к полюсам атмосферой – 10 000 ТВт (11,2 %), перенос теплоты океаном – 2 000 ТВт (1,7 %), испарение воды сушей (авкотранспирация) – 5 000 ТВт (4,4 %), испарение воды растениями – 3 000 ТВт (2,6 %), ветер – 2 000 ТВт (1,7 %), океанские волны – 1 000 ТВт (0,85 %).

Взрывной характер развития фотосинтезирующих растений произошел 400–300 млн лет назад (в палеозойский период). Содержание кислорода в атмосфере в тот момент достигало 70–90 % от современного. Отмеченный популяционный взрыв – это одновременно и начало, и завершение интенсивного образования ископаемого топлива, или «солнечных консервов», длившийся порядка 100 млн лет. С учетом все возрастающего содержания кислорода в атмосфере – это можно считать периодом, в который были заложены ресурсные основы современной энергетики.

Взрывному характеру развития растений (обширному «автотрофному цветению») в тот период способствовало высокое содержание в атмосфере диоксида углерода. Оно достигало нескольких процентов,

т.е. превышало современное содержание в сотни раз. Однако это не вызвало губительного для растений так называемого «парникового эффекта» – по мнению ряда ученых, неизбежного атрибута современной энергетики. Активная вулканическая деятельность на Земле в то время, сопровождавшаяся выбросами в атмосферу диоксидов углерода, диоксидов серы, пыли и других аэрозолей, по-разному влияющих на спектральные характеристики атмосферы, видимо, сдерживала развитие этого явления. Содержание оксидов серы в атмосфере приводило к образованию высокодисперсного устойчивого тумана серной кислоты, активно поглощающего, как и частицы пыли, солнечное излучение.

На разных этапах эволюции биосферы накапливались запасы неразложившихся «излишков» органического вещества. Постепенно оно было погребено минеральными отложениями, а спустя много миллионов лет превратилось в уголь, нефть, природный газ и другие виды ископаемого топлива. Запасы этих видов топлива ограничены и невозобновляемы. В последние тысячелетия существенного накопления подобных органических веществ уже практически не происходит. С одной стороны, изменились условия и база фотосинтеза, с другой стороны, скорость потребления горючих веществ в настоящее время во много раз превосходит скорость их образования. Например, сейчас ежедневный расход нефти на Земле почти в 5 млн раз превосходит скорость ее возможного геологического накопления.

Если сравнивать геологические запасы горючих ископаемых с энергией фотосинтеза, накопленной за 100 млн лет «автотрофного цветения», то на их долю придется всего около  $1 \cdot 10^{-4} \%$ , т.е. «отходы» биосферы, выражающиеся в виде «консервов» солнечной энергии, весьма невелики. Это убедительный и наглядный пример малоотходности процессов в биосфере Земли. В итоге практически вся поглощенная на Земле энергия Солнца, превращаясь в теплоту, так же, как и отраженная энергия, уходит в космос. В отличие от излучения Солнца собственное излучение поверхности и атмосферы Земли низкочастотное, с максимумом излучения в области инфракрасной части спектра, т.е. Земля получает от Солнца излучение, в котором эксергетическая составляющая достигает 93 %, эксергия же излучения Земли равна 0 %. Причем в связи с низкочастотным излучением Земли оно может в значительно большей степени, чем солнечное излучение, поглощаться ее атмосферой.

Элементы антропогенеза, характеризуемого появлением человекообразных приматов с зачатками разума, передвигающихся на двух

ногах, относятся к значительно более позднему геолого-археологическому периоду по сравнению с периодом бурного образования ископаемого топлива. Древняя жизнь человекообразных – австралопитеков началась 2,6–4 млн лет назад (неогенный период кайнозойской эры, начало четвертичного – атропогенного периода). Источник их существования – растения и животные. Потребовалось еще 2–2,5 млн лет (35–200 тыс. лет до н. э.), чтобы человек, получивший название неандерталец, научился добывать огонь трением. Это была пора древнего палеолита. И лишь период 30–40 тыс. лет назад (эпоха мезолита, четвертичный период кайнозоя) характеризуется началом существования весьма похожего на нас человека – кроманьонца. В это время зародилась и получила существенное развитие система «учитель», укрепилось табу «не убий» (по отношению к старикам), получил все большее распространение способ добывания огня трением, что значительно повысило темпы развития человеческого общества.

## **1.2. Огонь – основа современной человеческой цивилизации**

Наиболее крупными этапами истории взаимодействия человека и природы считаются:

- 1) этап ручного или инструментального производства с применением естественных источников энергии;
- 2) этап машинного производства с применением искусственных источников энергии;
- 3) этап автоматизированного производства с применением искусственных способов переработки и использования информации.

Первый этап связан с так называемой «неолитовой революцией», в которой человек научился использовать огонь и другие средства воздействия на природу, позволяющие ему изменить среду своего обитания. На преодоление такого пути человечеству понадобилось около 5 тысяч лет (8–3 тысячелетие до н. э.) – новый каменный век (неолит). В течение этого периода осуществился переход от присваивающего хозяйства (собирательство, охота) к производящему (земледелие, скотоводство).

Огонь постепенно преобразовал жизнь человека и его самого. Овладение огнем, безусловно, величайшее событие на пути превращения нашего предка в современного человека. Легенды и мифы различных народов весьма схожи – в них рассказывается о бо-

жественном происхождении огня. Огню поклонялись как божеству. Известны случаи использования древним человеком огня, зажженного от огня лесных пожаров или извержений вулканов, почти миллион лет назад. Гораздо позднее научились добывать огонь самостоятельно, сначала за счет трения, а когда появилось железо (примерно 1 тысяча лет до н. э.), огонь стали получать с помощью огнива, высекая искры.

С фактом овладения человека огнем с применением трения непосредственно связано впервые использованное качественное преобразование формы энергии – механической в тепловую. Факт преобразования этих видов энергии уже можно отнести к области теплоэнергетики. А если считать основным отличительным признаком человеческой цивилизации вид и способ применения энергии, то это стало началом современной цивилизации. На этой основе можно установить возраст современной цивилизации – около 7500 лет, связывая ее зарождение с началом неолита, т.е. со временем наиболее вероятного освоения способа получения огня трением более чем половиной массы людей.

Несмотря на повсеместное использование горения до второй половины XVIII, существо этого процесса не было известно. Одна из поздних ошибочных теорий горения связывала этот процесс с флогистоном. Лишь в работах француза А. Лавуазье (1743–1793) было доказано, что горение есть не что иное как соединение сгорающего вещества с кислородом, содержащимся в воздухе. Лавуазье впервые был установлен состав воздуха (1775 г.) и экспериментально исследованы окислительные процессы с участием кислорода, происходящие при дыхании человека. Незадолго до исследований Лавуазье шведу К. Шееле (1770 г.) и англичанину Д. Пристли (1774 г.) удалось получить кислород в чистом виде.

Первые сведения о получении водяного пара за счет сжигания растительного топлива (хвороста, дров) связывают с именем древнегреческого ученого, математика и изобретателя Герона Александрийского (150 г. до н. э. – 150 г. н. э.). Он добился превращения теплоты в механическую энергию, сконструировав «ветряной шар» – эолипил (рис. 1.1). Возможно, это первая в мире реактивная паровая турбина. После Герона почти за 15-вековой период не обнаружено каких-либо принципиально новых документов о получении и использовании водяного пара.



Рис. 1.1. «Ветряной шар» Герона

Существуют некоторые свидетельства того, что еще до Герона жрецы уже использовали движущую силу пара для открывания дверей и перемещения богов в храмах. Начало этих сведений уходит в глубокую древность античных времен. Верующих весьма поражало, например, необъяснимое для них открытие дверей храма, когда на жертвенном месте загорался огонь. Леонардо да Винчи (1452–1519) приводит некоторые сведения о предполагаемом существовании паровой пушки Архимеда (287–212 гг. до н. э.). Возможно, это было неизвестное оружие великого Архимеда, которое применили для обстрела римского флота во время осады Сиракуз. Очевидно, даже греки эллинского периода (4–1 вв. до н. э.) знали о движущей силе водяного пара. Почему же не была тогда построена паровая машина? Это связано с несколькими причинами. Первая из них – при рабовладельческом строе не было недостатка в «живых двигателях». Другая причина объясняется возможным отсутствием в одном месте и железа и топлива, необходимых для создания машины и ее работы. Весьма существенно и третье обстоятельство – у древних греков не было понимания существа физических процессов, происходящих при образовании пара и его использовании. Например, Аристотель, опираясь на свое учение о незыблемости четырех стихий, считал, что вода, разогретая теплом, превращается в воздух.

Лишь к началу XVII века, или началу 2-го этапа взаимодействия человека с природой, ученые стали понимать, что пар это не воздух, а особое состояние воды. В этот период получает распространение экспериментальный метод научных исследований, одним из основоположников которого считается Леонардо да Винчи. Он учил: «Не слушай учения тех мыслителей, доводы которых не подтверждены

опытом». В эпоху машинного производства наука и опыт уже не могли существовать раздельно, они стали успешно дополнять друг друга. Ранее они существовали как бы независимо. И в связи с этим, признавая великие открытия и работы древних ученых, нельзя не отметить, что умозрительность их заключений часто приводила к ошибкам, которые не замечались многие века. В век технической революции умозрительность суждений уже не отвечала задачам создания новой техники.

Серьезное использование теплоты в качестве движущей силы впервые началось в Англии в XVIII в. До этого времени производство в Англии, как и в других странах, было мануфактурным, в котором основной движущей силой была сила «мускулов». В Англии поиски новых источников энергии косвенно оказались связанными с металлургией. В этой стране леса были настолько опустошены в результате вырубки для производства древесного угля, используемого при выплавке металла, что их уже не хватало для решения первостепенной проблемы этой морской страны – постройки кораблей. В конце концов использование лесов для нужд металлургии было запрещено. Начались поиски нового восстановителя и топлива для металлургических печей. Технологическая часть проблемы была достаточно быстро решена. В 1735 г. англичанин А. Дерби из каменного угля впервые получил кокс, который заменил древесный уголь в доменном производстве.

Проблемы использования каменного угля были связаны с его добычей. Шахты выработки угля обычно интенсивно заливали водой, которую приходилось откачивать насосами. Насосы же, в то время приводимые в движение лошадьми, не справлялись с потоками воды в шахтах.

После Герона делались отдельные попытки использовать теплоту для перекачки воды, но они не привели к каким-либо практическим результатам. Только в 1698 г. англичанин Т. Севери, владелец шахты в Корнуэлле, запатентовал водяной насос, приводимый в движение паром. Интересно, что к идее, заложенной в его насосе, он пришел совершенно случайно при приготовлении глинтвейна, который ему пришлось охлаждать в колбе. Научные основы машины Севери были созданы в середине XVII в. работами Торричелли, Паскаля и Герике. Принцип действия его насоса (рис. 1.2) заключался в следующем. Пар из кипяточной камеры 1, обогреваемой разведенным под ней огнем, под давлением поступает в камеру 2 и вытесняет из нее через вентиль 3 и клапан 5 воду. После вытеснения воды из камеры 2 вен-



Теплообменник 3 закрывается и камера 2 снаружи через вентиль 4 охлаждается холодной водой, чтобы пар конденсировался. Благодаря образующемуся при этом вакууму через клапан 6 всасывается (за счет давления атмосферного воздуха) новая порция воды. Далее весь цикл повторяется. Тепловой КПД насоса был чрезвычайно низким (не превышал 0,3 %). Атмосферный насос Севери поднимал воду лишь на небольшую высоту и потреблял огромное количество топлива.

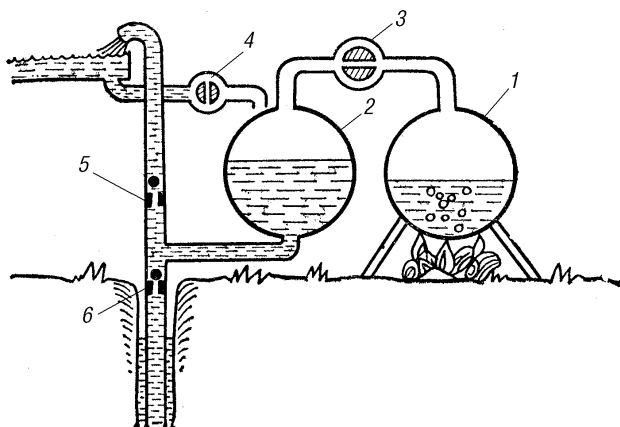


Рис. 1.2. Паровой насос Севери

В 1712 г. другой англичанин, торговец железом Т. Ньюкомен разработал двигатель с поршневым принципом работы. Ранее подобная идея была предложена физиками французом Д. Папеном, учеником великого голландского физика Х. Гюйгенса, и англичанином Р. Гукком. В двигателе Ньюкомена (рис. 1.3) пар под давлением поступает из котла и толкает вверх поршень в вертикальном цилиндре. Затем пар конденсируется за счет впрыскивания в цилиндр воды. В цилиндре образуется вакуум, и атмосферное давление толкает поршень вниз. Поршень же через коромысло связан с поршнем водяного насоса, откачивающего воду. В отличие от двигателя Севери двигатель Ньюкомена получил распространение. Причем он использовался исключительно для откачки воды. Когда требовалась энергия для привода других механизмов, его использовали для подъема воды на более высокий уровень, с которого она, стекая, могла приводить в действие водяное колесо.