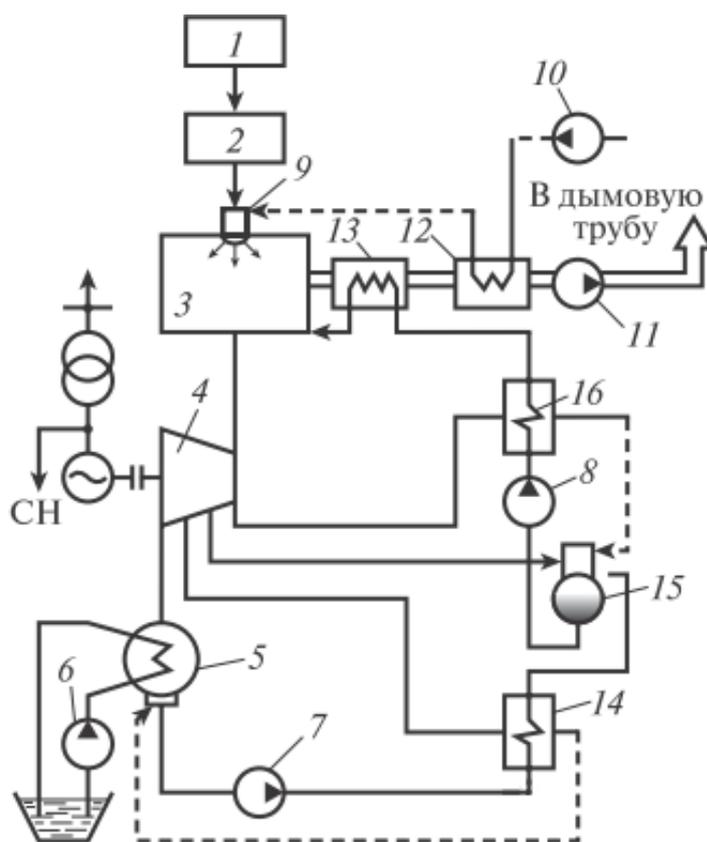


А.А. Малышев, Ю.В. Татаренко, К.В. Киссер

# ЭНЕРГЕТИКА ЧАСТЬ I



Санкт-Петербург

2020

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**А.А. Малышев, Ю.В. Татаренко, К.В. Киссер**

**ЭНЕРГЕТИКА**

**ЧАСТЬ I**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.04.03**

**Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения  
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования ма-  
гистратуры**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2020**

УДК 620.9, 621.56

**Малышев А.А., Татаренко Ю.В., Киссер К.В.** Энергетика. Часть I: Учеб.-метод. пособие.–СПб.: Университет ИТМО, 2020. – 74 с.

Рецензент:

Пронин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория «ординарный профессор») факультета низкотемпературной энергетики, Университета ИТМО.

В пособии приводится теоретический материал по дисциплине «Основы мировой энергетики».

Предназначено для магистрантов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистрантов – 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения».



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Малышев А.А., Татаренко Ю.В., Киссер К.В., 2020

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>1. РОЛЬ ЭНЕРГЕТИКИ В ЭКОНОМИКЕ.....</b>	<b>6</b>
1.1 Основные понятия.....	6
1.2 Потребление энергии по отраслям Российской Федерации.....	8
1.3 Энергообеспечение ведущих стран мира и задачи, стоящие перед энергетикой России.....	8
1.4 Роль энергетики в технологических укладах развития производства.....	10
<b>2. ЭНЕРГОРЕСУРСЫ.....</b>	<b>14</b>
2.1 Общие сведения.....	14
2.2 Структура мирового потребления энергоресурсов.....	14
2.3 Невозобновляемые источники энергии.....	18
2.4 Возобновляемые источники энергии.....	38
2.5 Водород как основа энергетики будущего.....	42
2.6 Биотопливо.....	47
<b>3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....</b>	<b>48</b>
3.1 Энергия и работа.....	48
3.2 Первый закон термодинамики.....	49
3.3 Термодинамические процессы идеальных газов.....	54
3.4 Процессы реальных газов.....	58
3.5 Второй закон термодинамики.....	63
<b>4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ.....</b>	<b>67</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>69</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие предназначено для магистрантов, изучающих дисциплину «Научные основы мировой энергетики». Изучившие дисциплину должны:

– *знать* направления развития мировой энергетик, физический смысл происходящих процессов, методологию расчета тепло-гидродинамических характеристик энергетических установок, основные направления энергоснабжения, методы энергопреобразования будущего;

– *уметь* пользоваться прикладными программами технико-экономического анализа и сопоставления замкнутых термодинамических систем, производить тепловые, прочностные и гидравлические расчеты паросиловых установок и тепловых насосов (ПСУ и ТН), анализировать эффективность альтернативных методов энергосбережения;

– *владеть* методами эксергетического анализа термодинамических прямых и обратных циклов, системами ЕСК при проектировании, методами теоретического анализа эффективности циклов ПСУ и ТН, методами компьютерного моделирования ПСУ и ТН.

Пользуясь списком рекомендованной литературы, изучающие дисциплину должны более детально проработать материал, относящийся к данной теме. Особое внимание рекомендуется обращать на усвоение принципиальных положений и глубокое понимание изучаемого материала.

# 1. РОЛЬ ЭНЕРГЕТИКИ В ЭКОНОМИКЕ

Энергетика по праву может быть названа основой человеческого бытия, поскольку этот вид деятельности человека связан с решением двух важнейших задач: снабжения теплотой жилища и получения электроэнергии.

Электричество – это основа промышленности, обеспечение коммуникации, работы компьютеров, транспорта, медицины, бытовой техники и т.д.

Электричество получается в результате преобразований в электричество других видов энергий: теплоты, химической, ядерной, солнечной и других, получаемых от возобновляемых и невозобновляемых энергоресурсов. Электричество может передаваться на значительные расстояния и превращаться в теплоту.

Одним из направлений энергетики является холодильная техника. Их общность обусловлена тем, что в их основе заложен цикл Карно, только в первом случае прямой, а во втором обратный. Холодильная техника, в отличие от энергетики, энергию потребляет в результате того, что теплота переносится с низкого температурного уровня на высокий.

Теплоснабжение остается важнейшей задачей энергетики. Обеспечение теплотой жилых и производственных помещений может осуществляться путем прямого сжигания топлива, например, в котельных или теплоэнергоснабжениях, но также в результате использования тепловых насосов. Цикл холодильной машины, работающий по обратному циклу, но в ином температурном режиме, то есть от температуры окружающей среды до температуры отопительных приборов, называется циклом теплового насоса. Тепловые насосы могут потреблять как электричество, так и «бросовую» теплоту промышленного производства.

## 1.1 Основные понятия

*Энергия – основа всех природных явлений:*

- базис культуры и деятельности человека;
- мера движения материи;
- энергия может превращаться из одной формы в другую.

Энергетика – совокупность технических комплексов и систем, предназначенных для получения, преобразования и использования всех видов энергетических ресурсов [1].

Энергетические ресурсы – материальные объекты, в которых сосредоточена энергия, возможная для использования.

Энергетические ресурсы подразделяются на невозобновляемые, которые накапливаются в земле и расходуются в процессе производства, и

возобновляемые, то есть непрерывно восстанавливаемые, или иначе говоря, неограниченные.

*Первичная энергия* – это энергия, непосредственно извлекаемая из природы. К ней относятся энергия топлива, ветра, воды и т.д.

*Вторичная энергия* – энергия, полученная после преобразования первичного энергетического ресурса или энергопродукта [1]: электрическая, тепловая и т.д.

Вторичные энергетические ресурсы не встречаются в природе, а получают из первичных энергетических ресурсов. Вторичные источники энергии также называются энергоносителями.

#### Этапы энергетического производства:

I. Прямое сжигание топлива (до XII века).

II. Использование угля.

III. Промышленная революция:

- 1698 г. – паровой насос (начало, революция в науке);
- 1712 г. – паровая машина;
- 1750-1763 г. – кривошипно-шатунный механизм Уатта и Ползунова;
- 1802 г. – паровоз;
- 1820 г. – циклы Карно;
- 1832 г. – электрогенератор;
- 1873 г. – электродвигатель.

#### Стадии энергетического производства:

- a) Получение и концентрация энергоресурсов.
- b) Транспорт энергоресурсов к преобразователям.
- c) Преобразование первичной энергии во вторичную на:  
ТЭС – теплоэлектростанциях,  
АЭС – атомных электростанциях,  
ГЭС – гидроэнергоцентралях.
- d) Распределение энергии у потребителя:  
ТЭЦ – теплоэнергоцентраль,  
ЛЭП – линия энергопередач.
- e) Потребление энергии: системы теплоснабжения, холодильная техника, системы кондиционирования.

#### Плотность потока энергии:

- ТЭС..... $q \approx 400 \div 500 \text{ Вт/м}^2$ .  
АЭС..... $q > 1500 \text{ Вт/м}^2$ .  
ГЭС..... $q \sim 100 \text{ Вт/м}^2$ .  
Возобновляемые источники энергии..... $q = 20 \div 50 \text{ Вт/м}^2$ .

## 1.2 Потребление энергии по отраслям экономики России

По данным Мирового энергетического совета (*World Energy Council WEC*), уровень потребления энергии характеризует уровень развития общества [7]. Уровень потребления энергии определяется коэффициентом энергопотребления  $\Theta$  (кВт·час/ чел). В развитых странах  $\Theta \geq 1500$ , в развивающихся  $\Theta \leq 100$  (примерно 70 % населения).

Для приближенной оценки энергопотребления различных направлений деятельности могут быть использованы следующие данные (по России) [5]:

1. Промышленное производство	33 %
2. Бытовые нужды	37 %
3. Транспорт	19 %
4. Сельское хозяйство	3 %
5. Прочее	8 %

Тенденцией развития общества является снижение энергоемкости промышленного производства и транспорта, при этом рост энергоемкости бытовых нужд и сельского хозяйства.

## 1.3 Энергообеспечение ведущих стран мира и задачи, стоящие перед энергетикой России

В качестве критерия для сопоставления часто выбирается энергоемкость ВВП. Рассмотрим данные об энергоемкости ВВП некоторых стран (данные *World Bank*) [5]:

Англия – 3 %	Канада – 6 %
Германия – 2,5 %	Китай – 6 %
США – 4 %	Россия – 7 %

На основании выше представленных данных можно сделать следующие выводы:

- энергоемкость ВВП в значительной степени связана с географическим положением стран. Так, в Канаде она в 1,5 раза выше, чем в США, и в 2 раза выше, чем в европейских странах;
- важным фактором является технико-экономическое развитие экономики, в том числе изношенность оборудования, уровень энергосбережения, использование передовых технологий.

Важным показателем энергопроизводства государства является душевое потребление энергии. В источнике [5] выбрано для сопоставления три государства – США, Канада и Россия, соответствующее сравнение приведено на рисунке 1. Два последних рассматриваемых государства находятся примерно в одинаковых географических условиях [7].

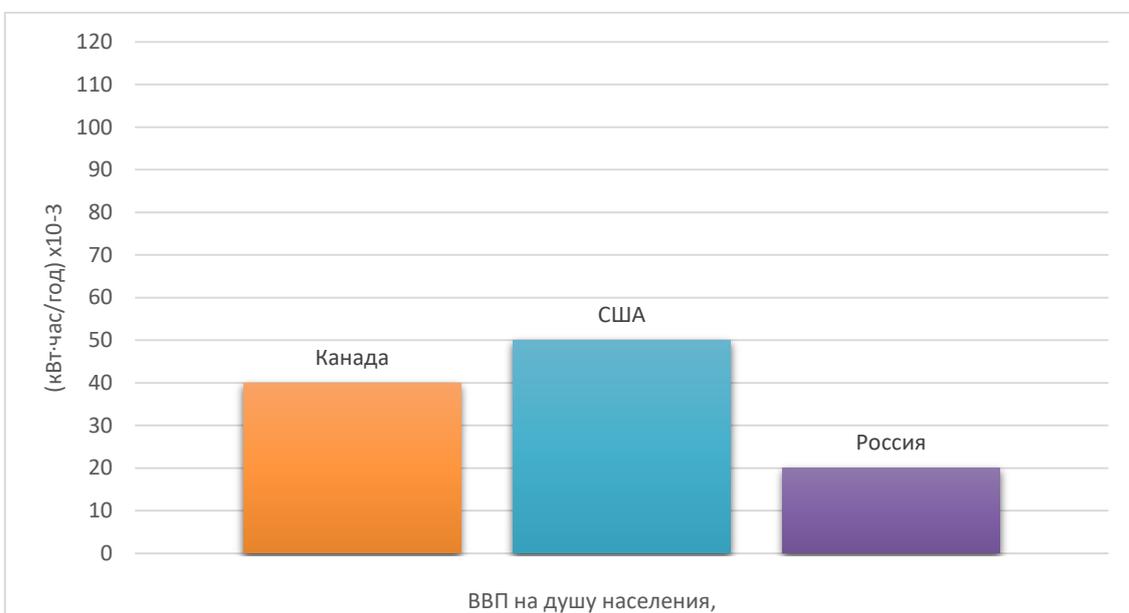
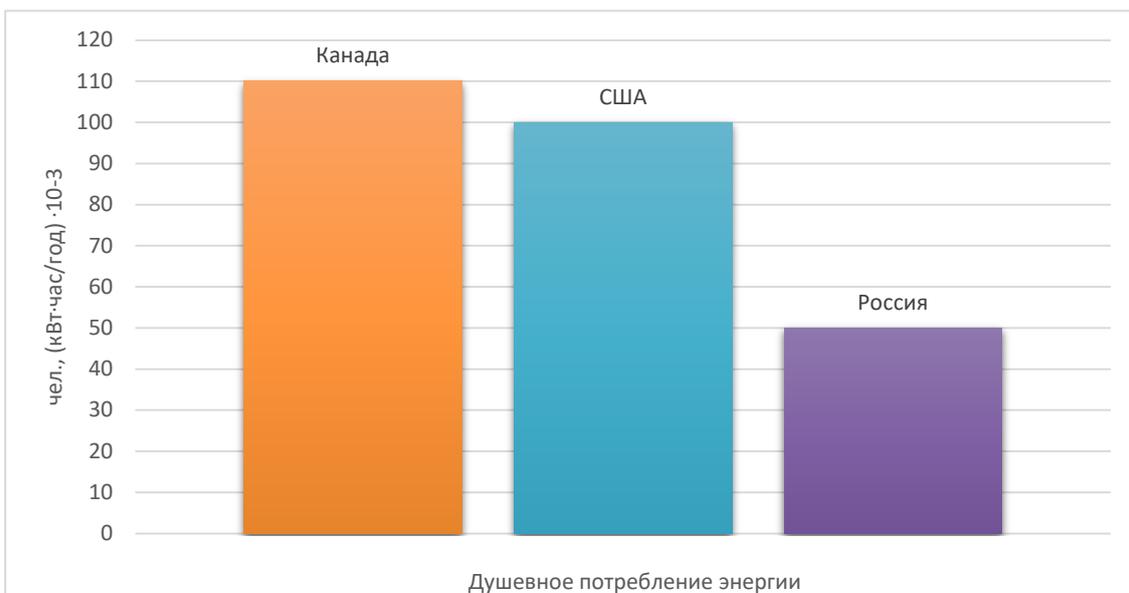


Рисунок 1 – Душевое потребление энергии и ВВП на душу населения США, Канады и России (по данным Международного энергетического агентства (*World Bank*))

Из приведенных данных очевидно, что России необходимо увеличить энергообеспечение, в том числе энергообеспеченность населения не менее чем в 2 ÷ 2,5 раза, даже учитывая специфику природных условий.

По данным Росстата [5] объем добычи и потребления углеводородного топлива характеризуется следующими цифрами, представленными в табл. 1.

**Объем добычи и потребления углеводородного топлива России  
на 2008 год**

Энергоноситель	Годовой объем (млн.тонн, для газа млрд.м <sup>3</sup> )	Внутреннее по- требление	Тоже в %
Нефть	494	253	51
Газ	589	429	73
Каменный уголь	229	135	59

Очевидно, что даже полный отказ от экспорта (что, увы, не возможно даже теоретически) может повысить энергообеспеченность россиян в 1,5 раза.

Признано, что одним из перспективных источников энергообеспеченности следует считать возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – гидравлические, ветряные, солнечные, геотермальные и биологические.

Ресурс ВИЭ достаточно велик, и увеличение их вклада до 4,5 % в общем объеме энергоносителей (согласно энергетической доктрине России) до 2020 года представляется явно недостаточным. Правда, согласно мнению крупных ученых – энергетиков, возможно увеличение роли ВИЭ энергетики. Так, академик Ж.И. Алфёров спрогнозировал к 2030 году прерогативу «солнечной» энергетики в сравнении с углеводородной. Имеются точки зрения, что к 2060 году ВИЭ достигнут 40 % от общего объема энергоресурсов.

#### **1.4 Роль энергетики в технологических укладах развития производства**

Развитие производства основано на преобразованиях энергии, что особенно очевидно в эпоху первой промышленной революции в конце XVII века. Следует считать, что именно в этот период и зародилась энергетика и как наука, и как основа научно-технического развития человечества.

Известный советский экономист Н.Д. Кондратьев выделил несколько этапов в развитии промышленного производства, каждый из которых характеризуется различием энергоресурсов, способов их использования, способов энергопотребления и их влияния на конечный продукт [3, 4]. Эти этапы названы укладами (волнами). В дальнейшем теория Н.Д. Кондратьева была развита многими зарубежными экономистами, а в последнее время российскими экономистами С.Д. Львовым и С.Ю. Глазьевым [3 – 6]. Согласно Н.Д. Кондратьеву, «технологический уклад – это совокупность технологических характеристик, характерных для определенного уровня раз-

вития производства. В процессе развития происходит переход от более низких укладов к более высоким».

*Технологический уклад характеризуется единым техническим уровнем, определяемым качеством и количеством энергетических ресурсов, ресурсами рабочей силы и научно-техническим потенциалом.*

По современным представлениям, «жизненный цикл технологического уклада имеет три фазы развития» общей протяженностью около ста лет.

*Первая фаза* приходится на зарождение жизненного цикла и становление экономики на базе предшествующего уклада.

*Вторая фаза* связана с перестройкой экономики на основе новых технологий производства, определяемых новыми энергетическими ресурсами. Развитие второй фазы определяется примерно пятидесятью годами.

*Третья фаза* характеризуется всплеском технического прогресса, основанного на технологиях, достигнутых на второй фазе, с последующим переходом к отмиранию устаревающего технологического уклада.

Кондратьев в 30-е годы 20 века сформулировал 5 технологических укладов (волн) протяженностью в пятьдесят лет (концепция технологических укладов является продолжением теории длинных волн). Согласно теории длинных волн, каждые 50-60 лет происходят инновационные открытия [5].

*Первая волна* (1785-1835 гг.) сформировала технологический уклад, основанный на новых технологиях в текстильной промышленности, с использованием энергии воды.

*Вторая волна* (1830-1890 гг.) – развитие транспорта (строительство железных дорог, паровое судоходство), возникновение механического производства во всех отраслях на основе парового двигателя. На этом этапе развития становится основным промышленный энергоресурс [7].

*Третья волна* (1880-1940 гг.) базируется на использовании электрической энергии, развитии тяжелого машиностроения и электротехнической промышленности, открытии в области химии. Широко используются новые средства связи, развивается автомобильный транспорт.

Для последних лет третьей волны характерен частичный переход «от угля как основного энергоносителя к нефти и нефтепродуктам, а также появление дизельных и бензиновых двигателей».

*Четвертая волна* (1930-1990 гг.) характерна дальнейшим развитием энергетики с использованием нефти и нефтепродуктов, газа, новых синтетических материалов. Это время массового производства автомобилей, развития авиации, новых видов вооружения, бытовой техники. Появились и начали широко использоваться информационные технологии. В первые послевоенные годы начал применяться атом, вначале в военных, а затем в мирных целях. Атом стал одним из основных энергоносителей, часто заменяя углеводородное сырьё.

*Пятая волна* (1985-2035 гг.) опирается на достижения в области микроэлектроники, информатики, биотехнологии, генной инженерии, новых видов энергоресурсов в том числе и возобновляемых» [6], именно в этот период особенно актуальными становятся экологическая безопасность и энергосбережение. Информационные технологии становятся основой материального производства. Появляется новое понятие – искусственный интеллект.

В табл. 2 в хронологическом порядке представлен перечень основных энергетических установок и рабочих веществ, которые использовались на всех технологических укладах развития промышленности [5].

Таблица 2

**Энергоустановки, применяемые на этапах  
пяти технологических укладов**

<b>Название</b>	<b>Рабочее вещество</b>	<b>Основной рабочий орган</b>
Паровая машина	Водяной пар	Поршневой двигатель
Двигатель внутреннего сгорания	Продукты сгорания топлива	Поршневой двигатель
Паросиловая установка	Водяной пар	Турбина
Газотурбинная установка	Продукты сгорания топлива	Турбина
Реактивный двигатель	Продукты сгорания топлива	Сопло Турбина

Характеристика пяти технологических укладов приведена в табл. 3 [3].

Точка отсчета становления шестого технологического уклада пока не определена. Можно предположить, что человечество пойдет по пути дальнейшего развития нанотехнологий, генной инженерии, цифровых технологий, бионики и в связи с чем появляется новый термин биоэнергетика [8].

Получит развитие термоядерная энергетика, энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии, технологии непосредственного преобразования теплоты в электричество. Развитие атомной энергетики будет сочетаться с использованием водорода в качестве экологически чистого энергоносителя.

Таблица 3

## Характеристики технологических укладов технологического развития человечества

	Технологический уклад				
	Первый (1770-1830)	Второй (1830-1880)	Третий (1880-1940)	Четвертый (1930-1990)	Пятый (1985-2030)
<b>Основной ресурс</b>	Энергия воды	Энергия пара, уголь	Электрическая энергия	Энергия углеводородов, начало ядерной энергетики	Атомная энергетика
<b>Главная отрасль</b>	Текстильная промышленность	Транспорт, черная металлургия	Тяжелое машиностроение, электротехническая промышленность	Автомобилестроение, цветная металлургия, нефтепереработка, синтетические полимерные материалы	Электроника и микроэлектроника, информационные технологии, геновая инженерия, программное обеспечение, телекоммуникации, освоение космического пространства
<b>Ключевой фактор</b>	Текстильные машины	Паровой двигатель, паровые приводы станков	Электродвигатель	Двигатель внутреннего сгорания, нефтехимия	Микроэлектронные компоненты
<b>Достижение уклада</b>	Механизация фабричного производства	Рост масштабов производства, развитие транспорта	Концепция банковского и финансового капитала, появление радиосвязи и телеграфа; стандартизация производства	Массовое и серийное производство	Индивидуализация производства и потребления
<b>Гуманитарное преимущество</b>	Появление новых профессий	Постепенное освобождение человека от тяжелого ручного труда	Повышение качества жизни	Развитие связи, транснациональных отношений, рост производства продуктов народного потребления	Глобализация, скорость связи и перемещения

## 2. ЭНЕРГОРЕСУРСЫ

### 2.1 Общие сведения

Под энергоресурсами понимаются материальные объекты, в которых сосредоточена возможная для использования внутренняя энергия [1, 9].

*Энергия* – «количественная оценка различных форм движения материи, которые могут превращаться друг в друга. Внутренняя энергия условно подразделяется по видам: химическая, механическая, электрическая, ядерная и т.д.

Из большого разнообразия ресурсов, встречающихся в природе, выделяют основные, используемые в больших количествах для практических нужд» [1].

К основным энергоресурсам относят энергию рек, водопадов, также различные виды органического топлива, как уголь, нефть, газ; ядерное топливо (в настоящее время тяжелые элементы урана и тория, а в перспективе – легкие элементы) и т.д.

Энергоресурсы разделяют на возобновляемые и невозобновляемые. К *возобновляемым* относятся энергоресурсы, которые природа непрерывно восстанавливает (вода, ветер и т.д.), а к *невозобновляемым* – ранее накопленные в природе, но в новых геологических условиях практически не образующиеся (например: каменный уголь, нефть, газ и др.).

Энергия, «непосредственно извлекаемая в природе (энергия топлива, воды, ветра, тепла Земли, ядерная), называется *первичной*. Энергия, получаемая человеком после преобразования первичной энергии на специальных станциях, называется *вторичной* (энергия электрическая, пара, горячей воды и т.д.).

Оценить запасы источников первичной энергии довольно сложно из-за различной оценки экономической целесообразности извлечения их из недр Земли и вод Мирового океана» [1]. Источники первичной энергии имеют неравномерное территориальное распределение, поэтому места их сосредоточения не совпадают с их местом потребления (например, каменный уголь, нефть и природный газ).

В табл. 4 приведено ориентировочное количество ресурсов энергии на Земле, МВт·ч [2].

### 2.2 Структура мирового потребления энергоресурсов

Как следует из ретроспективной оценки использования энергоресурсов (рисунок 2), использование угля, который был основным энергоресурсом на протяжении всего XX века, резко снизилось к 1970 году, и в дальнейшем уровень его использования был примерно постоянным [10]. К это-

му же времени относится резкий всплеск применения нефти, что связано с бурным развитием транспорта.

Таблица 4

**Ориентировочное количество энергоресурсов Земли**

<i>Ресурсы</i>	<i>Количество, МВт·ч</i>
<b>1.Невозобновляемые (общие запасы):</b>	
термоядерная энергия	$100000 \cdot 10^{12}$
ядерная энергия деления	$547 \cdot 10^{12}$
химическая энергия ископаемых органических горючих веществ	$55 \cdot 10^{12}$
внутреннее тепло Земли (геотермальная энергия)	$0,134 \cdot 10^{12}$
<b>2. Ежегодно возобновляемые:</b>	
энергия солнечных лучей, достигающих земную поверхность	$580 \cdot 10^{12}$
энергия солнечных лучей, аккумулирующихся в верхних слоях атмосферы (150—200 км) в виде атомарного кислорода	$0,000012 \cdot 10^{12}$
энергия морских приливов	$70 \cdot 10^{12}$
энергия ветра	$1,700 \cdot 10^{12}$
энергия рек	$0,018 \cdot 10^{12}$

Применение газа также возрастает, но все же его потребление отстает от спроса на нефть, что связано с тем, что в рассмотренный период времени нефть являлась основным сырьем горючего для транспорта.

Рост использования атомной энергии в рассматриваемый период времени значительно отставал от потребления углеводородного сырья, что в первую очередь обусловлено высокими требованиями к безопасности работы АЭС и проблемами захоронения ядерных отходов. Тем не менее, начиная примерно с 1985 года вклад атомной энергетики увеличивается.

Гидроэнергетика, которая относится к возобновляемым источникам энергии, на период до 2000 года занимает стабильно невысокие позиции.

Перспективный анализ, приведенный на рисунке 3, свидетельствует, что несколько снизится значение нефти и газа, хотя газ вплоть до конца века будет играть заметную роль в мировой энергетике [11].

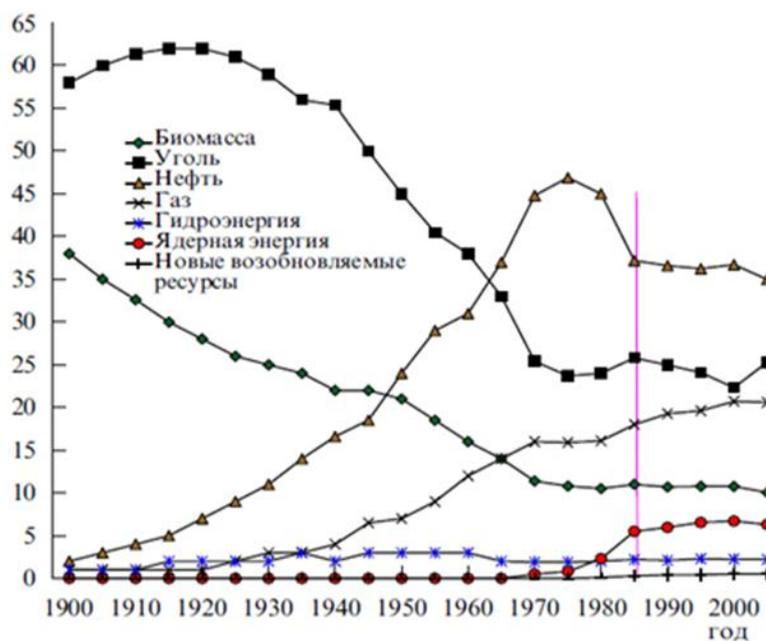


Рисунок 2 – Структура мирового потребления энергоресурсов до 2000 г.

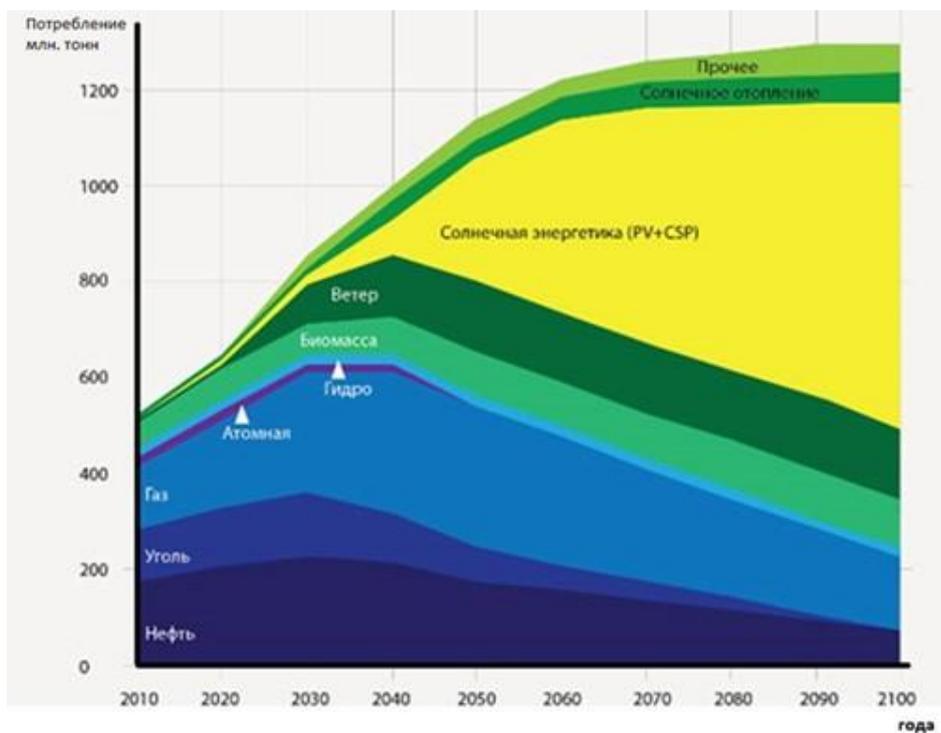


Рисунок 3 – Структура мирового потребления энергоресурсов до 2100 г. (прогноз)

Особенно интересно значительное возрастание значения солнечной энергетики в мировом энергопроизводстве (несколько спорная позиция) [12].

Интересна прогнозная оценка использования угля. Несмотря на то, что уголь имеет невысокую энергоёмкость по сравнению с нефтью и газом (табл. 5) [13], высокую опасность при добыче и сложность транспортировки, к 2030 году спрос на уголь даже несколько возрастет, и практически уголь перестанет быть мировым энергоресурсом только к 2100 году (рисунок 3).

Таблица 5

**Удельная энергоёмкость основных видов энергоресурсов  
(данные 2000 г.)**

	Условное топливо	Уголь	Древесина	Нефть	Газ	Водород
Удельная энергоёмкость Э, $10^{-6}$ Дж/кг	29	33	10	42	46	120

Такая парадоксальная ситуация связана с конъюнктурой цен. Стоимость угля на мировом рынке энергоресурсов в 3-4 раза ниже стоимости нефти и газа. С учетом этого в условиях нефтегазового кризиса, наблюдаемого в последние годы, уголь в ряде случаев находит свою энергетическую нишу [14].

В России же наблюдается противоположная ситуация. Благодаря лоббирующей политики Газпрома, уголь оказывается дороже газа и, следовательно, он не может найти широкого применения на внутреннем рынке РФ [15].

Основным потребителем угля на мировом рынке является Китай, который до недавнего времени занимал первое место по добыче и потреблению этого энергоресурса. В последние годы в Китае происходит замедление темпов экономического развития и переход на возобновляемые источники энергии, рост атомной энергетики и снижение темпов угледобычи. Исходя из этого, китайская энергетика может испытывать временный дефицит угля и потребность в российском энергетическом угле в течение некоторого времени.

Из табл. 5 видно, что энергоэффективность нефти примерно сопоставима с энергоемкостью газа и на 22 % превышает аналогичный показатель угля. Удельная энергоемкость водорода как топлива в 3-4 раза превышает аналогичные характеристики других традиционных энергоносителей.

## 2.3 Невозобновляемые источники энергии

### Органическое топливо

*Топливом* может быть названо «любое вещество, способное при горении (окислении) выделять значительное количество теплоты [1].

По определению, данному Д.И. Менделеевым, «топливом называется горючее вещество, умышленно сжигаемое для получения тепла».

Практическая целесообразность топлива определяется его количественными запасами, удобством добычи, скоростью горения, теплотворной способностью (энергоемкостью), возможностью длительного хранения и безвредностью продуктов сгорания для людей, природы, а также оборудования.

Существуют естественные (природные) виды топлив и искусственные. Процесс освобождения химической энергии представляет собой реакцию окисления горючего. Поэтому химические топлива состоят из горючего и окислителя.

Горючие топлива бывают органического и неорганического происхождения. И те, и другие могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Окислителями служат вещества, включающие элементы с незаполненными внешними атомными оболочками, например, кислород, у которого не хватает двух электронов, фтор и хлор – по одному.

В энергетике для получения электрической энергии на тепловых электрических станциях (ТЭС) в основном используются топлива органического происхождения.

Все виды органического топлива (горючие) представляют собой углеводородные соединения, в которые входят небольшие количества других веществ.

К твердому топливу относят: антрацит, каменный и бурый уголь, торф, дрова, сланцы, отходы лесопильных заводов и деревообделочных цехов, а также растительные отходы сельскохозяйственного производства.

Твердые топлива используются в основном на ТЭС для получения электрической энергии, а также для отопления и технологических нужд промышленности.

К жидкому топливу относят различные продукты переработки нефти: бензин, керосин, лигроин, разнообразные масла и остаточный продукт нефтепереработки нефти – мазут. Искусственное жидкое топливо и горючие смолы, а также масла получают при переработке твердых топлив» [1].

Для нужд транспорта необходимо 70 % жидкого топлива. Для нужд тепловых электростанций необходимо около 30 % топлива в виде мазута.

«К газообразному топливу относят природный газ, добываемый из недр земли, попутный нефтяной газ, газообразные отходы металлургического производства (коксовый и доменный газ), крекинговый газ, а также генераторный газ, получаемый искусственным путем из твердого топлива в особых газогенераторных установках. Газообразные топлива (горючие) сжигаются на ТЭС для получения электрической и тепловой энергии. В последние годы особое значение приобретает сжиженный природный газ, применяемый, как топливо для ТЭС, так и на транспорте.

*Элементарный состав твердого и жидкого топлив.*

Топливо в том виде, в каком оно поступает для сжигания в топку ТЭС или в двигатели внутреннего сгорания, именуется рабочим. В состав рабочего топлива входят углерод  $C$ , водород  $H$ , кислород  $O$ , азот  $N$  и летучая сера  $S$ , а также негорючие примеси — зола  $A$  и влага  $W$ .

Для рабочей массы топлива имеет место равенство [9]:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%, \quad (2.1)$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$  и т. д. — элементы рабочего топлива в процентах от общей массы топлива.

Для одного и того же сорта топлива в зависимости от места и способа его добычи содержание  $S^p$ ,  $A^p$  и  $W^p$  может значительно колебаться.

Влага, содержащаяся в топливе совместно с золой, является балластом. Балласт значительно снижает качество топлива, снижая теплотехнические характеристики. Влага в топливе расходует часть теплоты на ее испарение, и тем самым снижается относительное количество горючего вещества. Наличие золы снижает теплоту сгорания и значительно затрудняет процесс горения в топке и ее эксплуатацию.

В естественных видах ископаемого твердого топлива встречается сера трех видов:

- органическая  $S^O$  — связывается в виде сложных органических соединений с другими элементами, входящими в топливо, а именно с углеродом, водородом, азотом, кислородом;
- колчеданная  $S^K$  — содержится в виде колчедана  $FeS_2$ ;
- сульфатная  $S^{сульф}$  — в виде солей серной кислоты ( $FeSO_4$  и др.).

Сульфаты представляют собой окислы серы, и находящаяся в них сера не горит. Присутствующие в топливе органическая и колчеданная серы сгорают, образуя крайне токсичные сернистый ангидрид  $SO_2$  и серный ангидрид  $SO_3$ . Выброс их с продуктами сгорания вызывает загрязнение воздуха.

Органическая и колчеданная сера образуют летучую горючую серу  $S_{л}$ . Общее содержание серы в топливе:

$$S_{\text{общ}} = S^O + S^K + S^{\text{сульф}} = S_{\text{л}} + S^{\text{сульф}} \quad (2.2)$$

Следовательно, в горючую часть топлива входит только летучая сера, остальная сера в горении участия не принимает и может быть отнесена к балласту (зола топлива).

Для правильного представления о тепловых свойствах топлива вводится понятие горючей массы, для которой

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_{\text{л}}^r = 100 \%, \quad (2.3)$$

где верхний индекс показывает, что процентный состав отдельных элементов отнесен к горючей массе.

Название «горючая масса» носит условный характер, так как действительно горючими ее элементами являются только углерод, водород и сера. Углерод – преобладающий компонент твердых и жидких топлив, в которых его содержание от 50 до 95 %, тогда как содержание водорода  $H^r$  колеблется в пределах от 1 до 11, а серы  $S^r$  – от 0 до 8 %. Горючую массу можно характеризовать как топливо, не содержащее золы и в абсолютно сухом состоянии. Содержание азота в горючей массе твердых топлив обычно составляет 1 – 2 % по массе. Несмотря на столь малое количество, азот является весьма вредным компонентом, поскольку при сгорании азотсодержащих соединений в высокотемпературных топках образуются сильно токсичные оксиды NO и NO<sub>2</sub> (они образуются также и из атмосферного азота, но в меньшей степени) [16].

Для топлива, содержащего большое количество влаги (бурый уголь, торф, дрова, некоторые растительные отходы), в некоторых случаях удобно использовать понятие сухой массы, то есть характеризовать состав абсолютно сухого топлива суммой элементов  $C^c$ ,  $H^c$ ,  $O^c$ ,  $N^c$ ,  $S^c$  и  $A^c$ . При этом

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100 \%, \quad (2.4)$$

где индекс показывает, что процентный состав отдельных элементов отнесен к сухой массе» [1].

*Уголь.* Уголь используется начиная с XII века. Несмотря на известные недостатки, этот вид органического топлива до настоящего времени достаточно распространен в энергетике [9, 15].

Общие запасы угля составляют 12000 млрд. тонн, из которых достоверными является 6000 млрд. тонн. В азиатской части планеты добывается 63 %, в Америке 27 %, в Европе и Австралии около 10 %.

В России уголь добывается в Печорском, Кузнецком, Канско-Ачинском и Иркутском бассейнах.

Более 90 % российских углей являются энергетическими и только 10 % относится к наиболее ценным коксующимся, применяемым в металлургическом производстве.

Недостатки угля:

- относительно низкая энергоемкость;
- опасная и тяжелая добыча. Около 3 % угольных месторождений пригодны для «открытой» добычи (до 20 м). В большинстве случаев уголь добывается с глубины более 200 м.
- нерентабельность транспортировки.

В состав угля входят: 84 % углерода, 2 % серы, 1 % азота, 8 % кислорода и 5 % водорода.

*Жидкое топливо.* «Практически все жидкие топлива производят путем переработки нефти (бензин, керосин, дизельное топливо и мазут) [17, 18]. Мазут представляет собой смесь жидких углеводородов: углерод ( $C^p = 84 \div 86 \%$ ) и водород ( $H^p = 10 \div 12 \%$ ). Содержание воды и зольность не более  $0,2 \div 1,5 \%$ .

Мазуты, полученные переработкой нефти, могут содержать серу в количестве до  $4,5 \div 5 \%$ , что при их сжигании оказывает негативное влияние на окружающую среду».

Характеристики жидкого топлива приведены в табл. 5, согласно данным источника [19].

Таблица 5

#### Характеристика жидкого топлива, получаемого из нефти

Топливо	Состав горючей массы, %				Зольность сухого топлива, $A^c$ , %	Влага рабочего топлива, $W^p$ , %	Низшая теплота сгорания рабочего топлива, МДж/кг
	Углерод $C^r$	Водород $H^r$	Сера $S^r$	Кислород и азот $O^r + N^r$			
Бензин	85	14,9	0,05	0,05	0	0	43,8
Керосин	86	13,7	0,2	0,1	0	0	43,0
Дизельное	86,3	13,3	0,3	0,1	Следы	Следы	42,4
Солярное	86,5	12,8	0,3	0,4	0,02	Следы	42,0
Моторное	86,5	12,6	0,4	0,5	0,05	1,5	41,5
Мазут: малосернистый	86,5	12,5	0,5	0,5	0,1	1,0	41,3
сернистый	85	11,8	2,5	0,7	0,15	1,0	40,2
многосернистый	84	11,5	3,5	0,5	0,1	1,0	40,0

Легкие сорта бензинов применяются в авиации, более тяжелые – в автомобильном транспорте. Лигроин и керосин используются в тракторах, а некоторые сорта керосинов – в турбореактивных двигателях самолетов.

Топочные мазуты классифицируются по степени вязкости в градусах Энглера: М20, М40, М60, М80, М100 и М120.

Основные свойства жидких топлив: плотность; испаряемость; вязкость; стабильность при хранении; температуры застывания, вспышки, воспламенения и самовоспламенения; антидетонационная стойкость и др.

По *испаряемости* жидкие топлива подразделяют на легкие (испаряются полностью при относительно низких температурах) – бензин, бензол, газолин, керосин, лигроин и на тяжелые (испаряются медленно и при высоких температурах) – мазуты [18]. Бензины применяются в авиационных и автомобильных двигателях, керосины – в турбореактивных авиационных двигателях, а отдельные сорта в тракторных двигателях, лигроины – в транспортных, мазуты используются в ТЭС.

*Температура воспламенения горючего* – температура окружающей среды, при которой начинается самоподдерживающееся длительное горение с поверхности горючего. *Температура вспышки* характеризует способность паров жидкого горючего воспламеняться от пламени над поверхностью горючего.

Эти две температуры характеризуют условия пожароопасности при эксплуатации топлива. *Температура самовоспламенения* определяет способность топлива самовоспламениться от постороннего источника. В дизелях это нагретый от сжатия воздух, в карбюраторных двигателях – искра от свечи зажигания.

Показателем *воспламеняемости* дизельных топлив является цетановое число, характеризующее склонность горючего к термическому распаду, то есть к окислению и самовоспламенению. Чем больше цетановое число, тем легче самовоспламеняется горючее. *Цетановое число* определяется лабораторным методом путем сопоставления испытываемого топлива с самовоспламеняемостью цетана  $C_{16}H_{34}$ , который принят за эталон.

*Октановое число* характеризует стойкость жидкого топлива (обычно бензина) к детонационному, то есть взрывному и горению. С ростом октанового числа склонность к детонации меньше. Если при нормальном горении скорость распространения фронта пламени составляет 0,5 – 50 м/с, то скорость детонационного горения достигает 1500 – 3500 м/с, и горение носит характер взрыва.

Детонация имеет место в карбюраторных двигателях и ведет к повышенному износу двигателя, уменьшая его мощность и увеличивая расход горючего. Сила детонации увеличивается с ростом давления.

Жидкие топлива имеют цетановые числа порядка 40 – 50, а октановые числа бензинов имеют значения 60 – 98. Для авиационных, более лег-

ких, бензинов – близки к 100. В качестве антидетонаторов применяют ацетон с тетраэтилсвинцом и ядовитый изооктан.

*Газообразные топлива.* Газообразное топливо по сравнению с другими видами топлив имеет ряд преимуществ. Это топливо сгорает при небольшом количестве воздуха без дыма и копоти и не дает твердых остатков. Оно удобно для транспортировки по газопроводам на большие расстояния [20].

Газообразное топливо подразделяется на естественное и искусственное. Естественное, в свою очередь, делится на природное и нефтепромысловое.

Природный газ получают из газовых месторождений, где он поступает из недр под давлением до 100 и более бар. Основным его компонентом является метан  $\text{CH}_4$ .

Кроме того, в газе содержится небольшое количество водорода  $\text{H}_2$ , азота  $\text{N}_2$ , высших углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$ , оксида  $\text{CO}$  и диоксида  $\text{CO}_2$  углерода. Природный газ обычно очищают от сернистых соединений, но часто сероводород остается.

В бытовой газ для обнаружения утечек и предотвращения аварий добавляют одоризаторы, содержащие соединения серы.

Нефтепромысловые газы выделяются в большом количестве в районах месторождений нефти и особенно в районах эксплуатации нефтяных скважин. При добыче нефти выделяется так называемый попутный газ, содержащий меньше метана, чем природный, но больше высших углеводородов. Теплосодержание попутного газа выше, чем у природного. Проблема полного его использования сейчас весьма актуальна.

В быту находит широкое распространение сжиженный газ [14, 21], получаемый при первичной переработке нефти и попутных нефтяных газов. Это пропан (не менее 93 %  $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_3\text{H}_6$ ), технический бутан (не менее 93 %  $\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_4\text{H}_8$ ) и их смеси. Температура конденсации пропана при стандартном атмосферном давлении равна – 44,5 °С, а бутана + 5 °С; соответственно при 20 °С давление паров пропана составляет около 0,8 МПа, а бутана – около 0,2 МПа. Использование смесей этих газов дает возможность их транспортировать в жидком виде в баллонах под небольшим давлением (менее 2 МПа).

В зависимости от назначения и условий использования смесей содержание в них пропановой и бутановой фракций бывает разным. Так, зимой цистерны без подогрева, размещаемые на открытом воздухе, должны заполняться пропаном, ибо бутан при низких температурах испаряться не будет. Небольшие баллоны, устанавливаемые в помещении, заполняют смесью, состоящей поровну из пропана и бутана, в результате чего давление в баллоне не превышает 0,6 МПа.

К искусственным газам относят:

– доменный газ, являющийся продуктом металлургии;

- коксовый, образующийся при получении кокса;
- светильный, образующийся при перегонке угля;
- генераторный, получаемый в газогенераторах.

К основным свойствам газообразных горючих относятся плотность, токсичность, взрываемость, влажность, запыленность и др. Плотность газообразных горючих составляет  $0,7 - 0,8 \text{ кг/ м}^3$ , сжиженных газов – до  $2,3 \text{ кг/ м}^3$ .

*Токсичность* газов зависит от содержания в них оксида углерода CO, сероводорода H<sub>2</sub>S и др. Наличие в воздухе более 1 % этих газов в течение 1 – 3 мин может привести к гибели людей.

*Взрывоопасность* определяется наличием H<sub>2</sub> и CO, которые образуют взрывоопасные смеси с воздухом.

*Температуры самовоспламенения* газообразных топлив не являются постоянными величинами и зависят от состава и условий нагревания газа.

Повышенная влажность газового топлива снижает их теплоту сгорания и вызывает коррозию.

*Запыленность*, характерная для попутных газов (например, доменных), вызывает эрозию компрессоров и турбин.

Газы обладают определёнными достоинствами по сравнению с жидким горючим. Так, при использовании в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) они обладают высокими антидетонационными свойствами, по избытку воздуха, широкими пределами воспламенения и хорошими условиями смесеобразования. В результате газовое топливо приводит к меньшему, чем жидкое, износу двигателей, снижаются требования к качеству смазочных материалов. При этом горючие газы имеют высокую температуру самовоспламенения, и поэтому при их использовании требуется посторонний источник зажигания.

*Теплота сгорания топлива.* Важнейшей характеристикой топлива является теплота сгорания. Теплотой сгорания  $Q$  называется количество теплоты (кДж/ кг), выделяемое 1 кг топлива при его полном сгорании. Теплота сгорания газообразного топлива может быть отнесена не только к единице массы, но и к единице объема (кДж/ м<sup>3</sup>).

В практических расчетах, как правило, используется теплота сгорания рабочей массы топлива  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ , поскольку в газообразном топливе могут также содержаться влага, газообразный водород и другие балластные примеси. Состав и теплота сгорания основных горючих газов, согласно источника [17], представлены в табл. 6.

Содержащийся в топливе водяной пар обладает энтальпией около 2500 кДж/ кг. Наличие водяного пара учитывается величиной высшей теплоты сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{в}}$ .

*Высшей теплотой сгорания* топлива именуется теплота, выделяемая при полном сгорании 1 кг рабочего топлива (включающего влагу) с учетом теплоты конденсации водяных паров.

Соответственно, *низшей теплотой сгорания* рабочего топлива называются теплота, выделяемая при полном сгорании 1 кг топлива без учета теплоты, затраченной на испарение как влаги, содержащейся в топливе, так и влаги, образующейся от сгорания водорода.

Таблица 6

**Состав и теплота сгорания горючих газов**

Наименование газа	Состав сухого газа, % по объему								Низшая теплота сгорания сухого газа $Q_n^c$ МДж/м <sup>3</sup>
	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CO	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	
Природный	94,9	–	–	3,8	–	0,4	–	0,9	36,7
Коксовый (очищенный)	22,5	57,5	6,8	1,9	0,8	2,3	0,4	7,8	16,6
Доменный	0,3	2,7	28	–	–	10,2	0,3	58,5	4,0
Сжиженный (ориентировочно)	4	Пропан – 79, этан – 6, изобутан – 11							88,5

*Условное топливо.* Для проведения сравнительных расчетов эффективности различных видов топлив, например при оценке запасов топлива, принято понятие условного топлива. Теплота сгорания условного топлива  $Q_{ус}$  равна 29 330 кДж/ м<sup>3</sup>.

Для перевода действительного топлива в условное используются безразмерный коэффициент:

$$\mathcal{E}_k = \frac{Q_n^p}{29330},$$

где  $\mathcal{E}_k$  – калорический эквивалент, учитывающий часть теплоты сгорания условного топлива соответствующего низшей теплоте сгорания рассматриваемого топлива.

Расход условного топлива определяется следующим выражением:

$$B_{ус} = \frac{B Q_n^p}{Q_{ус}},$$

где  $V_{yc}$  – расход рассматриваемого реального топлива;  $Q_n^p$  – его теплота сгорания.

### Неорганические топлива (горючие).

Неорганическое горючее топливо используется преимущественно в ракетной технике. Реагирующие с водой, так называемые гидрорегирующие горючие (ГРГ) перспективны для применения в судовых двигателях [2]. В дальнейшем, по мере исчерпания запасов традиционных горючих топлив, интерес к неорганическому топливу до некоторой степени может возрасти. В первую очередь это относится к кремнию, составляющему 25 % земной коры. Наилучшими показателями обладают металлические горючие – кремний (металлоид), алюминий, бериллий, литий, основные характеристики которых приведены в табл. 7.

В камеру сгорания горючее подается в виде порошка или впрыскивается в расплавленном состоянии. Воспламенение неорганического топлива осуществляется с помощью небольшой порции обычного горючего при регулируемой подаче окислителя.

Таблица 7

#### Основные характеристики элементарных неорганических топлив

Горючее	Окислитель				
	Кислород			Фтор	
	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$Q_n^p$ , кДж/кг	Продукты сгорания	$Q_n^p$ , кДж/кг	Продукты сгорания
Водород H <sub>2</sub>	–	13500	H <sub>2</sub> O газообразный	13350	HF газообразный
Литий Li	0,534	20000	Li <sub>2</sub> O твердый	23700	LiF твердый
Бериллий Be	1,85	2260	BeO	20250	BeF <sub>2</sub>
Бор B	2,30	18200	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15900	BF <sub>3</sub> газообразный
Углерод C	2,25	28970	CO <sub>2</sub> газообразный	7670	CF <sub>4</sub>
Магний Mg	2,25	13120	MgO твердый	17750	MgF <sub>2</sub> твердый
Алюминий Al	2,69	16100	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15500	AlF <sub>3</sub>
Кремний Si	2,40	14340	SiO <sub>2</sub>	14900	SiF <sub>4</sub> газообразный

В качестве окислителя используется вода, поступающая из окружающей среды. Показатели ГРГ значительно превышают показатели лучших ракетных топлив на металлической основе.

### Ядерная энергия и механизм тепловыделения.

*Общие сведения.* Ядерная энергия преобразуется в тепловую в результате торможения продуктов ядерного деления или синтеза атомных ядер [22]. При этом их кинетическая энергия передается теплоносителю. Для деления ядра на отдельные протоны и нейтроны, или же для синтеза нового ядра из отдельных протонов и нейтронов необходимо преодоление сил внутриядерного взаимодействия, обусловленных *энергией связи*.

Если известна масса  $m$  ядра, состоящего из  $Z$  протонов и  $A - Z$  нейтронов, то его полная энергия связи будет равна (согласно источника [23]):

$$E_{\text{св}} = [m_p Z + m_n (A - Z) - m] c^2, \quad (2.5)$$

где  $m_p$  – масса протона;  $m_n$  – масса нейтрона;  $A$  – массовое число, равное числу протонов и нейтронов в ядре;  $c$  – скорость света.

*Удельная энергия связи ядра – это энергия, приходящаяся на один нуклон (равен сумме протонов и нейтронов).* Для большинства ядер с  $A = 50 \dots 90$  удельная энергия связи примерно постоянна и составляет 8,5 МэВ. С увеличением массового числа энергия связи снижается и для области тяжелых ядер достигает величины 7,6 МэВ (например, уран). Таким образом, наиболее стабильными (с ослабленными внутриядерными связями) оказываются элементы с массовыми числами приблизительно до 200.

Из этого следует, что наиболее энергетически выгодно производить деление тяжелых ядер и синтез легких. Для высвобождения ядерной энергии, связанной с началом реакции деления, к ядру необходимо подвести некоторую начальную энергию, называемую *энергией активации*  $E_a$ .

*Деление ядер нейтронами.* Попытки освобождения энергии связи ядра путем бомбардировки заряженными частицами оказывались неудачными из-за противодействия кулоновских сил отталкивания. Освобождение ядерной энергии стало возможным после открытия Дж. Чедвиком в 1932 г. нейтрона, а в 1935 г. за это открытие он удостоился Нобелевской премии. Основу этого открытия дали результаты исследования эффекта Комптона учеными Ирен и Фредериком Жолио-Кюри (Франция, 1932 г.) [24]. Чедвику удалось экспериментально установить, что масса нейтрона практически равна массе протона. Благодаря отсутствию заряда нейтрон оказался идеальным снарядом для деления ядер.

По скоростям движения различают *медленные (тепловые) нейтроны*, энергия которых  $E_n = 0,03 \dots 0,5$  эВ, *промежуточные* –  $E_n = 1 \dots 10^3$  эВ и *быстрые* –  $E_n = 10^5$  эВ и более.

Деление  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  происходит под действием тепловых нейтронов, а  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  – при бомбардировке быстрыми нейтронами.

Не все нейтроны, направляемые на ядро, попадают в зону действия ядерных сил и вызывают соответствующую реакцию. Зона воздействия ядра в ядерной физике называется «сечением захвата». Для тепловых нейтронов сечение захвата больше, чем у быстрых. Поэтому на тепловых нейтронах в реакциях участвует большее число элементов. В ряде случаев быстрый нейтрон только сталкивается с ядром, но не поглощается им. Он теряет часть своей энергии, замедляется и может стать промежуточным либо медленным (или тепловым).

Процесс деления ядра можно представить с помощью капельной модели [25]. В ядре-капле действуют противоположные силы – электростатические (кулоновские), отталкивающие протоны и стремящиеся разорвать ядро-каплю на отдельные части, и силы поверхностного натяжения (по аналогии с каплей), обусловленные взаимодействием нуклонов, противодействующие распаду ядра.

Ядро, поглотившее нейтрон, возбуждается и, подобно жидкой капле, начинает колебаться. Если нейтрон с кинетической энергией  $W_k$  захватывается делящимся ядром, то вновь образующееся промежуточное ядро приобретает *энергию возбуждения*  $W_{\text{возб}}$ , равную сумме кинетической энергии и энергии связи поглощенного нейтрона в промежуточном ядре. Если  $W_{\text{возб}} > E_a$ , то ядро делится, а при  $W_{\text{возб}} < E_a$  энергия возбуждения диссипируется внутри ядер.

Согласно правилу Бора, энергия связи зависит от того, является ли число нейтронов в ядре  $N = A - Z$  четным или нечетным. Ядра с нечетным числом нейтронов (большое  $W_{\text{возб}}$ ) в основном делятся тепловыми нейтронами, а с четным числом (малое  $W_{\text{возб}}$ ) делятся под действием быстрых.

Мерой способности деления ядра является отношение энергии электростатического отталкивания протонов  $E_k$  к энергии поверхностного натяжения  $E_n$  называемое *параметром деления*.

Установлено, что

$$E_k/E_n = aZ^2/A,$$

где  $a$  — коэффициент пропорциональности.

Чем  $Z^2/A$  больше, тем меньше надо затратить энергии для разрыва ядра (более подробно вопросы ядерного деления рассматриваются в специальной литературе).

*Цепные реакции деления ядерных топлив.*

Условием «цепной реакции» является спонтанное увеличение количества нейтронов от каждого делящегося ядра по мере протекания реакции

[26]. Тепловые нейтроны поглощаются делящимися изотопами наиболее интенсивно. Как уже было сказано, сечение захвата в тепловой области во много раз превышает сечение в области энергий быстрых нейтронов. Поэтому в атомных реакторах нейтроны замедляются в специальных веществах – замедлителях: воде, тяжелой воде, бериллии, графите и др.

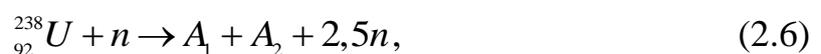
Природный уран, добываемый из земной коры, содержит только 0,712 %  $^{235}\text{U}$ , делящегося при захвате тепловых нейтронов. Остальную же массу топлива составляет  $^{238}\text{U}$ , обладающий меньшим сечением захвата тепловых нейтронов, поэтому для осуществления цепной реакции с природным ураном необходимо использовать замедлитель нейтронов и обогащать природный уран добавлением в него  $^{235}\text{U}$  от 1 – 2 % в реакторах электростанций и до 40 – 80 % в ЯЭУ транспортных установок.

В двухступенчатом режиме, включающем ядерную реакцию и воспроизводство топлива, можно использовать  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Эти изотопы не делятся под действием тепловых нейтронов, но, захватывая быстрые нейтроны, они превращаются в изотопы  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$ , способные к делению на тепловых нейтронах (рисунок 4). Таким путем запасы ядерного топлива теоретически увеличиваются в 140 раз за счет энергии урана и еще в 2 – 3 раза – за счет энергии тория. Однако с учетом потерь возрастание энерго-ресурсов не превысит 15 – 25 раз» [1].



Рисунок 4 – Процессы воспроизводства ядерного топлива:  
 а – урановый цикл; б – ториевый цикл

Реакцию деления в общей форме можно записать следующим образом:



где символ  $n$  – нейтрон;  $A_1, A_2$  – два осколка деления, представляющие собой радиоактивные многократно ионизованные атомы различных элементов из средней части Периодической таблицы Д. И. Менделеева.

Кинетическая энергия продуктов реакции, попадая в теплоноситель, превращается в теплоту.

Ядерное топливо часто применяется в ЯЭУ в виде металлических блоков, отличающихся высокой нейтронной эффективностью, высокой теплопроводностью и высоким сопротивлением термическим ударам, возникающим при изменениям теплового режима .

В среднем за каждый этап деления  $^{235}\text{U}$  испускается примерно 2 – 3 нейтрона. При делении ядра  $^{235}\text{U}$  производимая энергия распределяется следующим образом( МэВ):

Кинетическая энергия осколков деления	168
Энергия нейтронов деления	5
Энергия мгновенного $\gamma$ -излучения	5
Энергия $\beta$ -распада	7
Энергия фотонов $\gamma$ -распада осколков деления	6
Энергия нейтрино	11
Всего	202

При этом твердое металлическое топливо имеет и ряд недостатков: низкую температуру плавления  $t_{\text{пл}} = 1133$  °С, малую прочность, фазовые превращения при высокой температуре (до 600 °С), что ограничивает его использование в реакторах большой мощности.

В качестве альтернативы разработаны различные виды керамического ядерного топлива – двуокись урана  $\text{UO}_2$  ( $t_{\text{пл}} = 2800$  °С), карбид урана  $\text{UC}$  ( $t_{\text{пл}} = 2700$  °С), силицид урана  $\text{USi}_2$  ( $t_{\text{пл}} = 1700$  °С) и др.

Помимо твердых, на базе указанных выше делящихся материалов готовят жидкие и газообразные ядерные топлива, топливные суспензии и аэрозоли.

### Реакции ядерного синтеза

Из основных источников ядерной энергии в настоящее время удалось довести до промышленной реализации цепную реакцию деления в атомных реакторах. Управляемый термоядерный синтез (УТС) находится на уровне разработки [27], а этот источник энергии по своему потенциалу значительно превышает потенциал ядерного распада.

Возможно получить в 10 млн. раз больше энергии при использовании термоядерного топлива относительно сгорания органического или расщепления ядер урана (в 100 раз) [28].

В природных условиях термоядерные реакции между ядрами водорода протекают в недрах звёзд, в том числе на Солнце. Термоядерные реакции на Солнце служат постоянным источником энергии, попадающим на землю.

Управляемый термоядерный синтез, без сомнения, будет важнейшим «прорывным» направлением энергетики ближайшего будущего.

Профессор И.Н. Бекман в источнике [28] говорит, что в отличие от «мирной» энергетики, «неуправляемый термоядерный синтез без особых проблем удалось реализовать в земных условиях при создании водородной бомбы ещё в середине прошлого века, а для энергетики необходимо решение множества научно-технических проблем, возникающих при реализации УТС».

«Принципиальным преимуществом термоядерного синтеза в сравнении с делением тяжелых ядер является отсутствие радиоактивных отходов. В процессе работы термоядерного реактора отдельные его элементы подвергаются воздействию нейтронов – основных носителей энергии» [1], в результате чего возникает некоторая наведенная радиация. Однако существующие низко активируемые материалы снижают уровень радиоактивности до безопасного уровня за тридцать лет после его остановки.

*Физические принципы управляемого термоядерного синтеза.*

В «термоядерных энергетических установках (ТЯЭУ) используется изотоп водорода – нерадиоактивный *дейтерий* и радиоактивный *тритий*, но уровень радиации при этом в тысячи раз меньше, чем в атомной энергетике. Даже в возможных аварийных ситуациях радиоактивный фон ТЯЭУ не превысит природных показателей.

Другое преимущество термоядерной энергетики заключается в том, что в природе существуют практически неисчерпаемые запасы топлива, достаточные для производства энергии в течение многих сотен лет» [28]. Не следует также забывать, что водород – самое распространенное вещество во Вселенной.

Основными элементами, участвующими в реакциях УТС являются:

*водород*: атомная масса  $A = 1$ , включает: число протонов  $p = 1$ , число электронов  $e = 1$ ;

*дейтерий* D ( $^2\text{H}$ ) (изотоп водорода) атомная масса  $A = 2$ , включает: число протонов  $p = 1$ , число нейтронов  $n = 1$ , число электронов  $e = 1$ ;

*третий* Т ( ${}^3\text{H}$ ) (изотоп водорода, в природе отсутствует) атомная масса  $A = 3$ , включает: число протонов  $p = 1$ , число нейтронов  $n = 2$ , число электронов  $e = 1$ .

*Ядерные силы* – силы, действующие между нуклонами (протоны + нейтроны) и значительно превышающие электростатические силы. Ядерные силы включают:

- силы притяжения между нуклонами;
- кулоновские силы отталкивания;
- силы притяжения коротко действующие. Действуют на расстоянии  $10^{-15}$  м (1 фемтометр);
- при уменьшении расстояния силы притяжения в 100 раз превышают кулоновские силы отталкивания, при увеличении расстояния – уменьшаются до нуля;
- силы притяжения не имеют электрической природы (электро-независимые);

Силам притяжения противодействуют кулоновские силы отталкивания, определяемые как

$$E_{\text{к}} = a Z^2/A^{1/3}, \quad (2.7)$$

где  $Z$  – число протонов;  $A$  – атомное число.

Как следует из формулы, основное влияние на кулоновские силы отталкивания оказывает число протонов  $Z$ . Соответственно, с ростом числа протонов увеличиваются силы отталкивания, что препятствует реакциям синтеза.

*Энергия связи* – это энергия, характеризующая устойчивость ядра (уравнение (2.5)). Энергия связи определяется соотношением сил притяжения и сил отталкивания.

Из рисунка 5 следует, что максимальной устойчивостью обладают вещества при атомной массе порядка 60. У ядер дейтерия и трития энергия связи порядка 8,5 МэВ, а тяжелых атомов  ${}^{235}\text{U}$  – 7,5 МэВ. Иначе говоря, легкие ядра, более устойчивые, то есть более подвержены реакциям синтеза, чем деления. Необходимость преодоления кулоновских сил отталкивания определила актуальность использования легких ядер – изотопов водорода, гелия, лития [28].

Также, анализируя рисунок 5, можно увидеть, что у лёгких ядер с увеличением количества нуклонов энергия связи растёт, а у тяжелых убывает.

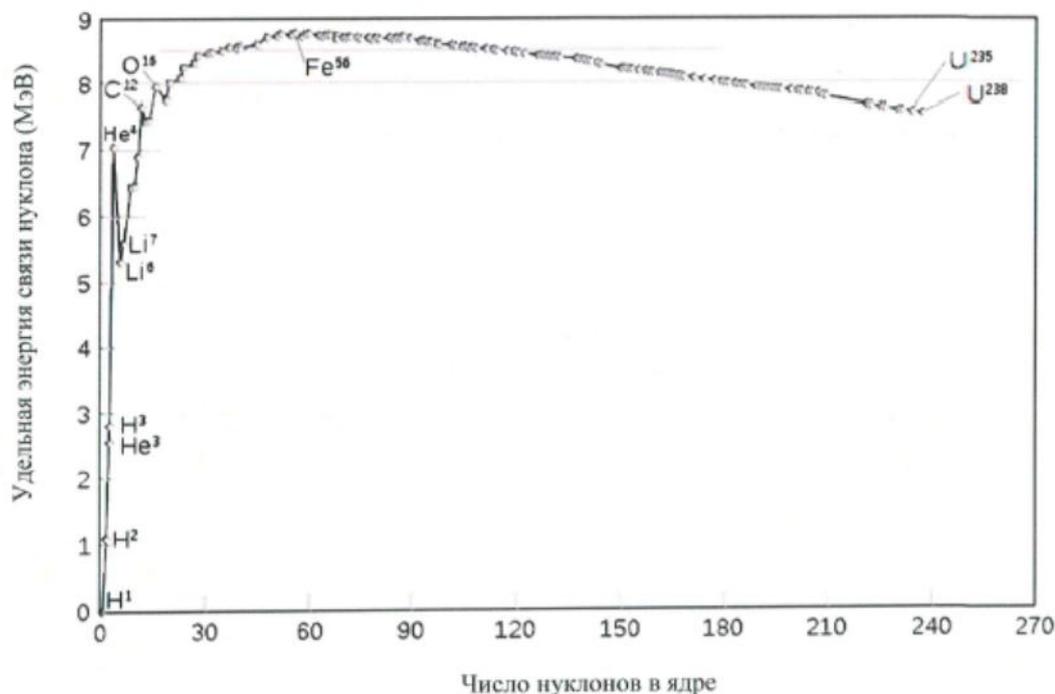


Рисунок 5 – Зависимость удельной энергии связи нуклона от числа нуклонов в ядре

*«Термоядерные реакции – реакции слияния (синтеза) лёгких атомных ядер, происходящие при температурах порядка десятков миллионов градусов с выделением большого количества энергии».*

Теоретически реакция синтеза возможна с использованием любых веществ, от водорода до железа. Препятствием для этого является наличие кулоновских сил, отталкивающих тяжелые ядра [28].

Практический интерес представляют следующие реакции УТС (табл. 8.)

Реакция №1, по мнению ведущих ученых, является наиболее перспективной для промышленной термоядерной энергетики, так как в водах Мирового океана содержится огромное количество дейтерия при хорошо апробированной технологии его получения из воды.

Тритий – также изотоп водорода, но он в природе отсутствует. Технология получения трития в лабораторных условиях пока весьма дорогостоящая. В основе этой технологии заложено облучение лития Li потоком нейтронов, в результате чего получается He и тритий T (реакции 6 и 7

табл. 8). Проблема может быть решена путем совмещения в одной установке термоядерной реакции получения энергии и реакции производства трития (более подробно это будет описано в следующей части пособия).

Таблица 8.

### Реакции термоядерного синтеза

№ п/п	Реакция	Энергетический выход $q$ , МэВ
1.	$D + T = He^4 + n$	17,6
2.	$D + D = He^3 + n$	3,27
3.	$D + D = T + p$	4,03
4.	$D + He^3 = He^4 + p$	18,4
5.	$p + B = He^4$	8,7
6.	$Li^6 + n = He^4 + T$	4,8
7.	$Li^7 + n = He^4 + T + n$	2,47

*Сечение реакции.* Понятие сечения ядра было упомянуто в предыдущем разделе при рассмотрении реакции деления тяжелых ядер. В реакциях синтеза понятие сечения по сути такое же, но рассматривается с точки зрения противоположного процесса.

Вероятность взаимодействия ядра с другими ядрами, а также скорость реакции характеризуется «сечением реакции», измеряемом в барнах ( $1 \text{ бн} = 10^{-24} \text{ см}^2$ ). «Сечение реакции – это площадь эффективного поперечного сечения ядра, в которое должно попасть другое ядро, чтобы произошло их взаимодействие» [29] (в данном случае реакция синтеза).

Зависимость сечения реакции от энергии частиц представлена на рисунке 6. Сечения реакций, описанные в табл. 8, показаны на рисунке 6 как функция энергии сталкивающихся частиц [27].

Максимальное сечение реакции дейтерия с тритием  $10^{-23}$  имеют при энергии частиц порядка 80 кэВ. При реакции  $D + D$  сечение связи составляет величину порядка  $10^{-25}$  при энергии около 1000 кэВ ( $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Из сказанного следует, что для того, чтобы реакции синтеза имели заметное сечение, сталкивающиеся частицы должны иметь большую кинетическую энергию, чтобы, преодолев кулоновский барьер, сблизиться на расстояние порядка ядерных сил (условие синтеза).

Достижение необходимой кинетической энергии при реакции  $D + T$  может быть обеспечено температурой порядка  $T = 10^8$  К. При таких температурах реагирующая смесь представляет собой плазму – квазинейтральную смесь электронов и положительно заряженных ионов.

Для «запуска» реакции УТС и достижения энергоэффекта  $P_{fus}$  необходим разогрев смеси до температур высокотемпературной плазмы ( $10^8 - 10^9$  К). При этом необходимо затратить определенную энергию  $P_{затр}$ .

Коэффициент воспроизводства энергии будет равен:

$$Q_{fus} > P_{fus}/P_{затр} \quad (2.8)$$

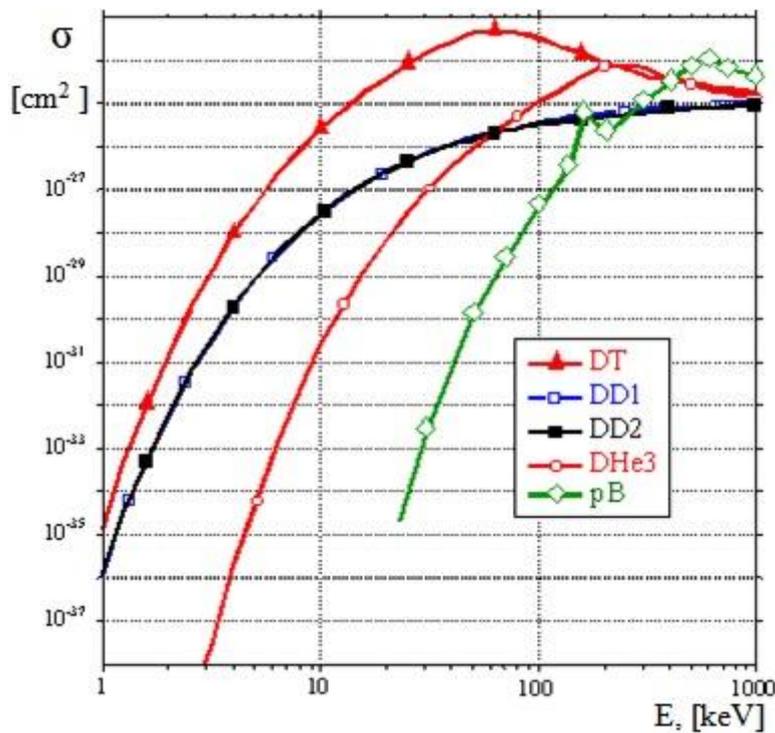


Рисунок 6 – Сечения некоторых термоядерных реакций как функция энергии частиц в системе центра масс

Наиболее признанным способом разогрева является бомбардировка ионов дейтерия (мишень) ионами трития. Однако разогретые ионы трития попадают в «холодную мишень» и также остывают, не производя установившейся реакции. Исходя из этого, требуется дополнительный разогрев ионов дейтерия [30, 31].

Объемная плотность выделяемой полезной энергии будет равна:

$$P_{fus} = q n_1 n_2 K(T) \quad (2.9)$$

где  $q$  – энергия выхода реакции (согласно табл. 8);  $n_1, n_2$  – объемные концентрации компонентов;  $K$  – константа Больцмана.

*Потери, возникающие при установившейся реакции.*

Поскольку плазма представляет смесь свободных электронов и положительно заряженных ионов, то при столкновении дополнительно вводимых ионов трития с электронами плазмы возникают *тормозные потери*, которые могут быть оценены с помощью зависимости:

$$P_b = 5,3 \cdot 10^{-37} n_e n_z Z^2 T^{1/2} \quad (2.10)$$

Достижение положительного энергетического эффекта возможно при условии:

$$P_{fus}/P_b > 1 \quad (2.11)$$

Пороговое значение температуры для реакции  $D + T$  равно  $3,5 \cdot 10^7$  К. При меньших температурах потери будут превышать полезную энергию выхода.

*Обеспечение времени стабильной реакции.*

Помимо потерь от тормозного излучения, существуют потери от теплопроводности, от излучения примесей и др.

В общем случае потери характеризуются *энергетическим временем существования плазмы*  $t_e$ . Время существования плазмы обеспечит положительный энергетический выход при условии:

$$P_{fus} > 3n T/t_e \quad (2.12)$$

где  $n = n_d + n_t$  – плотность плазмы (концентрация дейтерия и трития).

Для реакции  $D + T$  необходимо выполнение условия Лоусона,  $c/m^2$ :

$$n t_e > 5 \cdot 10^{19} \quad (2.13)$$

Таким образом, условие (2.12) определяет общее условие достижения положительного энергоэффекта.

Дальнейшая компенсация всех потерь и обеспечение стабильного существования плазмы достигается с помощью выполнения условия Лоусона (2.13).

С учетом выполнения всех условий обеспечения стабильной реакции, включая первичный разогрев до температур начала реакции, компенсацию потерь, удержание плазмы во времени, энергетические характеристики реакции D + T определяются следующими уравнениями [32]:

Полезная энергия на выходе из реактора:

$$P_{fus} = 17,6 K n_d n_t t_e \quad (2.14)$$

Затраченная энергия на обеспечение стабильной реакции:

$$P = 3 K T (n_d + n_t) + E_u t_e, \quad (2.15)$$

где  $E_u$  – потери энергии на компенсацию тормозного излучения.

С учетом необходимости выполнения условий Лоусона (2.13) все установки ЯЭУ разделяются на две группы в зависимости от способа удержания плазмы:

*квазистационарные*, в которых осуществляется удержание плазмы низкой плотности (область 1 на рисунке 6);

*импульсные*, в которых удерживается плазма высокой плотности (область 2 на рисунке 6).

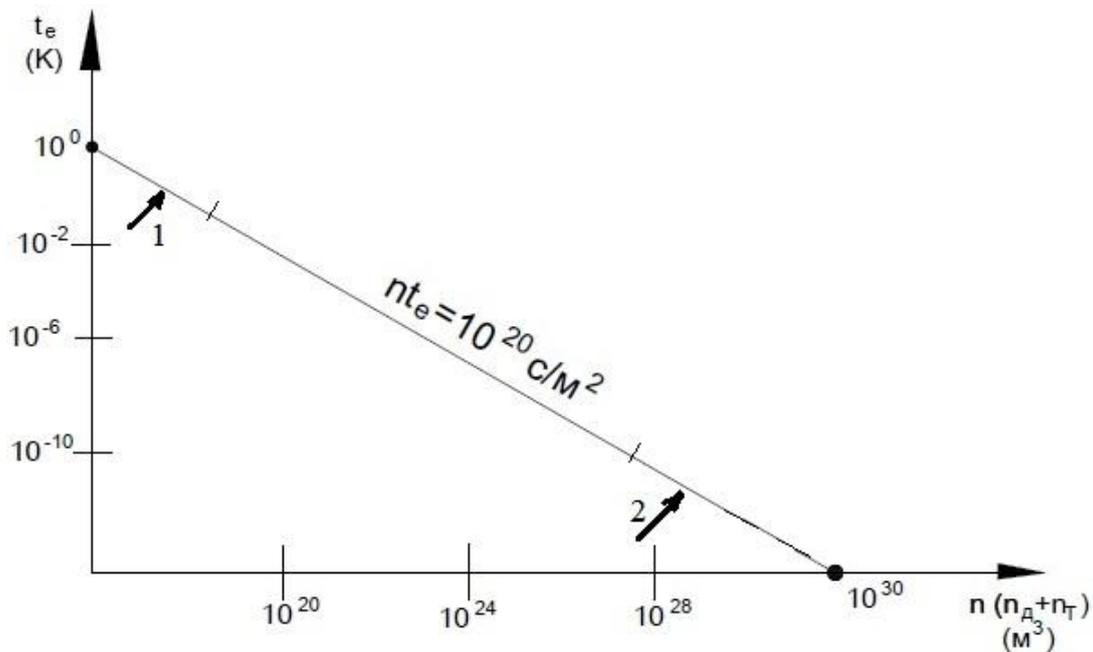


Рисунок 6 – Зависимость энергетического времени удержания плазмы от плотности плазмы

В квазистационарных системах плазма удерживается магнитным полем. Давление магнитного поля  $P_m$  должно превышать кинетическое давление плазмы с плотностью  $n = n_d + n_t$  и удовлетворять следующему условию:

$$P_m > K T(n_d + n_t) \quad (2.16)$$

В квазистационарных установках плотность плазмы составляет  $10^{20} - 10^{22} \text{ м}^3$ , время удержания  $10 - 0,1 \text{ с}$ .

В импульсных ЯЭУ используется сжатие плазмы за счет лазерного излучения, обеспечивающего плазму высокой плотности при очень коротком времени удержания плазмы  $t_e = 10^{-28} \text{ с}$ .

## 2.4 Возобновляемые источники энергии

В органическом топливе преобразование энергии происходит в несколько этапов: добыча топлива, транспортировка, сжигание, генерация пара (газа), генерация механической энергии, генерация электричества.

В возобновляемых источниках энергетический потенциал непосредственно превращается в механическую работу, либо в электричество.

На планете Земля за счет энергии, поступающей от Солнца, радиоактивного распада элементов, входящих в состав мантии Земли, от гравитационного поля, вызванного циклическим движением Луны, происходит естественное преобразование энергии. Это проявляется в выпадении осадков, движении воздуха, генерации биомассы, процессов фотосинтеза, морских течений, градиентов температуры в океанах и материках, приливов и отливов в Мировом океане [10].

Естественное преобразование энергии за счет так называемых возобновляемых источников происходит постоянно, и в этом преобразовании участвуют колоссальные объемы энергии, на несколько порядков превышающие химическую энергию, накопленную в полезных ископаемых [33].

При этом до настоящего времени использование возобновляемых источников энергии не получило практического распространения в основном из-за технических сложностей. Между тем энергетический кризис последнего времени поставил перед человечеством задачу серьезного осмысления использования возобновляемых источников энергии.

### Теплота недр Земли.

Поток теплоты из недр Земли постоянен, но имеет очень низкую плотность. Так, с углублением на 33 метра температура повышается на  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Геотермальная энергетика – это экологически чистые технологии выработки электроэнергии и теплоты, исключая прямой контакт геотермального источника теплоты с рабочим веществом [34].

По мнению академика Алексеенко С. В., «особенно перспективной можно считать петротермальную энергию, добываемую из тепла сухих пород на глубинах от 3 до 10 км, где температура может достигать 350 градусов. Есть основания считать, что она может обеспечить человечество топливом на достаточно длительный период. Например, по оценкам ученых при нынешнем энергопотреблении США хватит доступного петротермального тепла на 50 тыс. лет. Сегодня в мире существует более 20 опытных установок по добыче петротермальной энергии с глубины 5 км – в США, Австралии, Франции, Великобритании и Японии».

«Интересно использование разности температур между нагретым воздухом и более холодной поверхностью воды в тропических морях или холодным воздухом и более теплой водой в северных морях» [1]. В этих случаях перепады температур небольшие ( $30 \div 40$  °С), но и в этих случаях можно получить достаточно эффективные установки – преобразователи теплоты.

В ряде случаев используется теплота горячих источников воды и газов, выбрасываемых на поверхность Земли через естественные разломы. Термальные воды широко используются для теплоснабжения Исландии и частично находят применение в Австралии, Новой Зеландии и Италии.

Энергоресурсы недр практически неисчерпаемы, но рентабельность их использования зависит от глубины их залегания. Кроме того, выход горячих источников нередко расположен в сейсмоопасных районах, что сопряжено с такими опасностями, как землетрясениями, цунами и извержением вулканов.

Геотермальная энергетика в перспективе может составлять до 8 % общей выработки энергии на ТЭС. В России на Камчатке планируется создать ГеоЭС на базе Мунтовского месторождения общей мощностью 300 МВт.

### Гидроэнергетические ресурсы

Гидроэнергетические ресурсы на Земле оцениваются величиной 33000 ТВт·ч, по техническим либо экономическим причинам доступно от 4 до 25 %. Общий гидропотенциал рек России составляет 4000 млн. МВт·ч, что составляет  $10 \div 12$  % от мирового гидропотенциала [8]. В табл. 8 представлены данные о гидроресурсах различных стран мира (при среднегодовых расходах воды) [2].

Возобновляемость гидроресурсов определяют важные преимущества гидроэлектростанций (ГЭС):

- невысокая стоимость эксплуатации и относительно низкая себестоимость электроэнергии;
- высокая надежность работы, обусловленная относительно невысокими скоростями вращения турбин и низкими давлениями;
- высокая манёвренность работы, связанная с широкими возможностями изменения режимов работы.

Таблица 8

### Гидроресурсы различных стран

Страна	Мощность, ГВт
Россия	230
США	54
Канада	25
Япония	13
Норвегия	20
Швеция	8,9
Франция	5,8
Италия	5,2
Испания	5,0
Германия	3,7
Англия	1,2

Недостатками ГЭС являются высокая стоимость инфраструктуры и длительность строительства, а также требования к полноводности рек и географическим параметрам местности. В связи с этим нередко возникают сложности транспортировки электроэнергии от ГЭС к районам потребления электроэнергии.

### Солнечная энергия

«Солнце обладает огромными запасами энергии. Например, рассматриваемая энергия Солнца составляет  $3,48 \cdot 10^{30}$  кВт·ч/ год. При этом на поверхность Земли доходит  $7,5 \cdot 10^{17}$  кВт·ч/ год» [35].

Солнечная энергия (СЭ) направлена на использование энергии солнечного излучения (СИ) на Земле и в космосе для получения электрической, тепловой и других видов энергий.

Источник СИ – Солнце, имеющее радиус в 695300 км и массу  $2 \cdot 10^{30}$  тонн. Температура поверхности Солнца около  $6000$  °С, внутри  $4 \cdot 10^7$  °С. Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите. Расстояние от

Солнца до Земли 147 – 152 млн.км. Скорость движения Земли вокруг Солнца 29,3 – 30,3 км/ с.

Продолжительность жизни Солнца – несколько миллиардов лет. Поэтому солнечная энергия является вечным самым мощным источником энергоснабжением Земли. Мощность СИ превышает энергетические потребности человечества в несколько раз.

Спектр электромагнитного излучения Солнца можно разделить по длине электромагнитных волн:

- область ультрафиолетового излучения  $0 < \lambda < 0,4$  мкм, примерно 9 %;
- область видимого СИ  $0,4 < \lambda < 0,7$  мкм, около 45 %;
- область инфракрасного излучения  $\lambda > 0,7$  мкм, около 46 %.

«Из-за отражения и поглощения излучения в средних широтах до поверхности доходит не более 10 % солнечной энергии.

Преимуществом солнечной энергии является ее безвредность для окружающей среды в процессе ее превращения в иные виды энергии» [1].

При этом используемая величина плотности потока солнечной энергии, например, в средних широтах достигает  $160 \text{ Вт/ м}^2$ , а на экваторе  $250 \text{ Вт/ м}^2$  [35]. Это приводит к тому, что размеры солнечных концентраторов энергии очень велики. Для сравнения, величина отчуждаемых участков Земли для строительства ТЭС мощностью 1 МВт не выше  $2400 \text{ м}^2$ , для АЭС –  $630 \text{ м}^2$ , ГЭС –  $26500 \text{ м}^2$  для электростанций на солнечной энергии  $10^5 \text{ м}^2$ , на энергии ветра  $17 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ .

Тем не менее гелиоэнергия (солнечная) имеет большие перспективы. Так, по мнению академика Ж. И. Алфёрова, к 2030 году солнечная энергетика составит конкуренцию традиционным методам энергопреобразования.

Далее будут рассмотрены новые методы использования энергии Солнца, основанные на ее аккумуляции и концентрировании.

### Энергия движения воздуха

Ветер на протяжении многих веков является важнейшим источником энергии для человечества. Запасы энергии воздуха в сотни раз превышают общую энергию всех водных ресурсов земли. Ветровая энергия может быть эффективной при средней скорости ветра более 5 м/с. Это приемлемо в основном для прибрежных районов. Для России – это Нижнее Поволжье, Приморский край, побережье Северного Ледовитого океана, Камчатка и др.

Сейчас по всему миру двигатели, использующие энергию ветра имеют суммарную мощность всего 1300 МВт и дают около 107 МВт энергии, что составляет 0,002 мировых потребителей. Благодаря мировому

энергетическому кризису востребованность этого возобновляемого энергоресурса может быть повышена.

Темп роста ветроэнергетики по различным странам характеризуется следующими значениями и согласно данным на 2000 г. [34]: Германия – 22,7 %, США – 0,9 %, Испания – 36,1 %, Дания – 13,8 %, Китай – 15 %, Греция – 12,6 %, Япония – 19 %, Марокко – 100 %, Египет – 51 %. Иначе говоря, интерес к ветроэнергетике по миру несколько возрастает.

В настоящее время самые крупные ветрогенераторы имеют мощность  $2 \div 4$  МВт и диаметр рабочего колеса  $80 \div 100$  м.

### Энергия приливов и отливов

Мировой энергетический кризис обуславливает определенный интерес к этому виду возобновляемой энергии в последнее время [1]. Наибольшая высота приливов имеет место в открытых частях океанов и окраинных морях: в Атлантическом океане  $14 \div 18$  м, в Тихом океане – 13 м, у берегов Кольского полуострова и в Охотском море – 7 м. Во внутренних морях – Средиземном, Черном, Балтийском приливы и отливы незаметны.

В настоящее время сооружено несколько мощных электростанций, использующих энергии приливов – отливов. Однако высокая их стоимость и неравномерность работы, связанная с пульсацией воды, не позволяет считать этот вид энергии высокоэффективным.

## **2.5 Водород как основа энергетики будущего**

### *Предпосылки создания водородной энергетики.*

С 20 по 21 вв. «потребление энергии в мире увеличилось в 15 раз – с 21 до 320 экодж (1 экодж =  $27 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup> нефти). В качестве первичных эргоресурсов применялись нефтепродукты (34,9 %), уголь (23,5 %), природный газ (21,1 %), ядерное топливо (6,8 %) и возобновляемые источники (13,7 %), такие как ветер, солнце, гидро- и биотопливо. За 50 лет выбросы углекислого газа в атмосферу возросли в 4,5 раза» [41].

Углекислый газ как причина парникового эффекта является основной экологических проблем современности. Энергетика, основанная на ископаемом топливе, во-первых, не имеет дальнесрочных перспектив из-за ограниченности энергоресурсов, а во-вторых, приводит к разрушению окружающей среды.

Одним из направлений создания "чистой энергетики" будущего является частичный переход на водородную энергетику. Водородная энергетика (ВЭ) как понятие сформировалось в 70–е гг. XX века. Сейчас ВЭ объединяет комплекс проблем, включающих получение, хранение, транспортировку и использование водорода [36]. Таким образом, водород является вторичным энергоресурсом.

Благодаря уникальным теплофизическим и радиационным свойствам водород перспективно использовать в схемах с высокотемпературными ядерными и термоядерными реакторами.

Успехи в развитии водородной энергетики в первую очередь обусловлены созданием топливных элементов (ТЭ).

Разработка ТЭ в совокупности с системами хранения и получения водорода продемонстрировала, что использование этого вещества в ряде случаев приводит к качественно новым показателям в работе энергетических систем.

Работы в области водородной энергетики во многих странах вынесены в приоритетные направления развития техники.

В России водородной энергетике также уделено пристальное внимание, и она относится к числу критических технологии федерального уровня [37].

Возросший интерес к водороду как к горючему и энергоносителю определяется следующими его основными особенностями:

- запасы водорода практически не ограничены;
- водород – универсальный энергоресурс и может использоваться в качестве горючего для производства электричества в рабочих циклах;
- при помощи водорода возможна аккумуляция энергии;
- среди органического топлива водород имеет максимальную теплотворную способность на единицу массы и наименьшее отрицательное воздействие на окружающую среду [38].

Так, тепловорная способность метана – 13,8 кВт/ м<sup>3</sup>, пропана – 12,6 кВт/ м<sup>3</sup>, водород – 33кВт/ м<sup>3</sup>.

Тем не менее, не следует противопоставлять водородную энергетику углеводородной [66]. Сразу необходимо отметить, что ВЭ относится к категории «*down stream*», включающей получение, транспортировку, хранение и уже на последнем этапе – использование водорода для получения электроэнергии. Это ее отличает от углеводородной энергетики или технологии «*up stream*», являющейся результатом добычи и использования первичного сырья. Естественно, что углеводородное сырье нефть, уголь, газ, тоже необходимо хранить и транспортировать, но в водородной энергетике эти процессы намного более наукоемкие и дорогостоящие.

Сказанное может быть проиллюстрировано следующими соображениями [1, 39]:

*«Водород представляет собой вторичный энергоноситель (переносчик, аккумулятор энергии и химреагент), но не энергоисточник, так как на его получение надо затратить первичную энергию: при переводе в условное топливо получается, что на производство 1 м<sup>3</sup> водорода (имеющего эквивалент ~ 400 г.у.т.) путем электролиза расходуется 5,5 – 6 кВт·час электроэнергии (или 1750 – 1880 г.у.т.). Здесь использовано понятие г.у.т. – в России за единицу условного топлива (у.т.) принимается теп-*

лотворная способность 1 кг каменного угля = 29,3 МДж или 7000 ккал. Международное энергетическое агентство (IEA) приняло за единицу нефтяной эквивалент, обычно обозначаемый аббревиатурой ТОЕ (англ. *Tonne of oil equivalent*). Одна тонна нефтяного эквивалента равняется 41,868 ГДж».

Таким образом, если ввести понятие *условного коэффициента полезного действия водородного технологического процесса: производство водорода – тепловой эффект от его использования в виде топлива*, то величина КПД не превысит 24 %.

Следует оговориться, что подобное рассуждение правомерно только в случае использования водорода в виде топлива, когда результатом многоэтапного процесса является только произведенная от сжигания водорода теплота. Это рассуждение не учитывает конечный этап, а именно преобразование теплоты в электроэнергию. В этом случае необходимо также учитывать потери от преобразования в соответствии со вторым законом термодинамики.

Из сказанного следует: во-первых, недостаточная эффективность использования водорода как горючего, даже с учетом высокой теплотворной способности; во-вторых, наиболее перспективным направлением водородной энергетики является использование электрохимических преобразователей ТЭ, в которых коэффициент преобразования химической энергии в электрическую достигает 90 %.

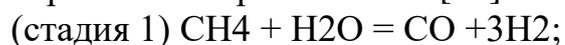
При выборе наиболее экономически обоснованных технологий водородной энергетики важно учитывать масштабы использования этого вещества во всех отраслях экономики, например: металлургии, космической промышленности, оборонном комплексе, пищевых производствах, медицине и др. С учетом высокой стоимости получения водорода совместно с понятием «водородная энергетика (ВЭ)» появился термин «водородная экономика».

Водородную энергетику нельзя рассматривать как монополиста энергетического будущего. Безусловно, это энергоресурс перспективен как для транспортной, так и для стационарной энергетики, но он может рассматриваться в виде дополнения к другим энергоресурсам, включая атомную или «возобновляемую» энергетику.

#### *Получение водорода.*

Источниками водорода, согласно рисунку 7, может быть природное топливо: метан, уголь, древесина, вода и т.д.

«Наиболее распространенная технология получения водорода сегодня – паровая конверсия метана [39]:



Для рассматриваемой технологии характерна относительно низкая стоимость – 1,0 – 1,5 долл./ кг H<sub>2</sub>. Сегодня в США производится в год око-

ло  $10^6$  т водорода, на что расходуется  $\sim 5$  % полного потребления природного газа и выбрасывается в атмосферу около 100 млн. т  $\text{CO}_2$ ».

Достаточно перспективны также отходы сельскохозяйственного производства, из которых может быть получен биогаз, а затем через конверсию вырабатывается водород.

Конверсия – это специальная технология, отделение водорода от углеродной основы. Для этого требуются пар и тепловая энергия при температурах  $750 - 850$  °С, что осуществляется в химических реакторах на каталитических поверхностях [40].

Поскольку метан сам по себе является ценным химическим сырьем и важнейшим на сегодняшний день энергоресурсом, перспективны технологии получения водорода из воды.

Одним из таких способов является термодиссоциация воды, протекающая при температурах  $4000 - 5000$  К, а также двухступенчатый цикл с использованием теплоты атомного (термоядерного) реактора, разработанный в Институте атомной энергии им. В. И. Курчатова [11]:



Результаты анализа свидетельствуют, что термоядерный реактор тепловой мощности 1000 мВт при работе по такому циклу позволит получить 1 млн. т  $\text{H}_2$  в год.

Получение водорода методом разложения воды в многоступенчатых термохимических циклах возможно только в стационарных энергетических установках (порядка 300 кВт), а на транспортных энергоустановках практически невозможно в первую очередь из-за высоких температур (до  $450 - 900$  °С).

При получении водорода из твердых промышленных бытовых отходов используется плазменный пиролиз. Это один из способов утилизации отходов, а во-вторых – технология производства горючего, в том числе и водорода.

Плазменная обработка отходов заключается в термическом разложении с окислением под воздействием водяного пара воздуха под избыточным давлением. Чтобы исходное сырье не сгорало, нужно контролировать поступление окислителя – воздуха.

Пиролиз начинается при температурах более  $1000$  °С. На выходе из установки образуется углекислый газ, водород и окись углерода. Далее следует каталитическая очистка.

Получение чистого водорода из газовой смеси может осуществляться с помощью очистки газа на палладиевых мембранах (каталитическая очи-

стка) либо воздействием электрического поля (электрохимическая конверсия – рисунок 7).

На сегодняшний день самым распространенным способом хранения водорода считается использование баллонов [41]. При этом очевидно, что с повышением давления увеличивается количество хранимого водорода, но при этом возрастает и металлоёмкость тары. Баллон рассчитан на давление в 300 атм, таким образом в нем можно хранить 13 % (масса газа по отношению к массе баллона) водорода, при давлении 500 атм – 11 %.

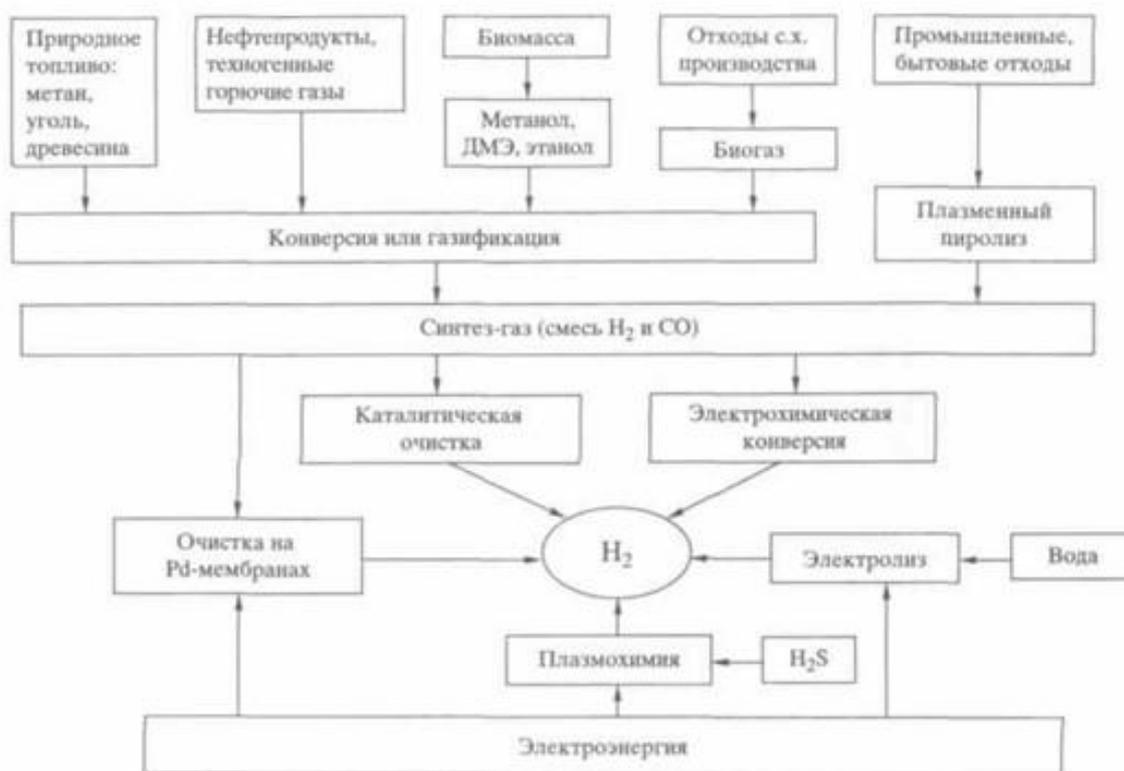


Рисунок 7 – Получение водорода

В США разработаны баллоны, рассчитанные на 700 атм. Относительное количество хранимого водорода в них не превышает 9 %.

Перспективно хранить водород в сжиженном состоянии.

Рассматриваются также адсорбция водорода в сплавах различных металлов –интерметаллидах [62]. Проводятся уже эксперименты по хранению водорода с использованием углеродных наноматериалов.

Схема основных этапов водородной технологии представлена на рисунке 8.

Способы использования водорода как энергоресурса будут рассмотрены в следующей части пособия.

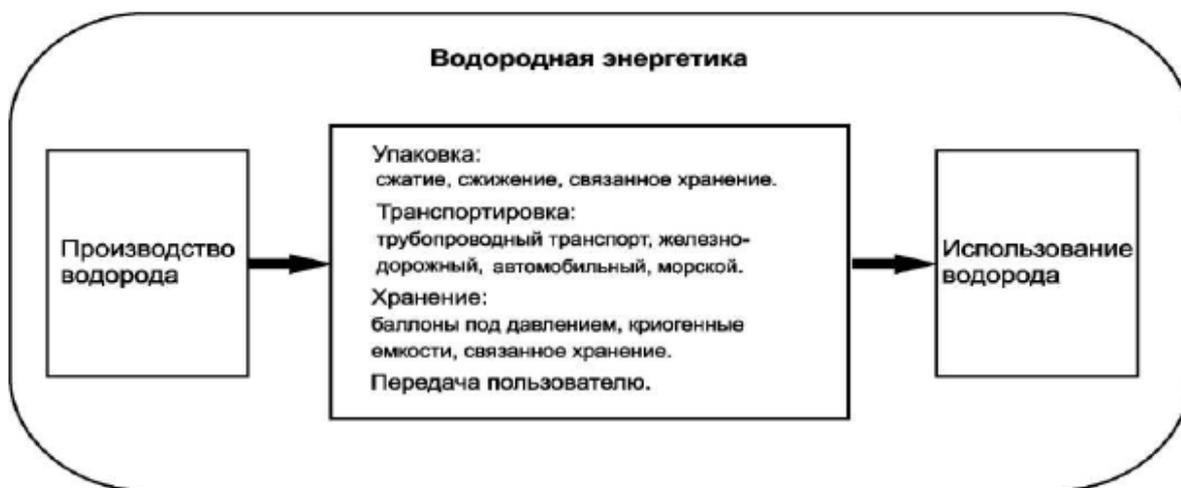


Рисунок 8 – Жизненный цикл водорода

## 2.6 Биотопливо

Биомасса является одним из наиболее возобновляемым источником энергии на рынке международной торговли. В отличие от иных альтернативных источников энергии биотопливо отличается универсальностью [16].

Это обусловлено:

- возможностью применения в теплоснабжении, электрогенерации, в транспортном секторе;
- возможностью заменять (в ряде случаев) традиционные энергоресурсы, такие как: уголь, нефть или газ.

Биомасса может храниться, транспортироваться и использоваться как первичное сырье, и в переработанном виде.

Применение биомассы в мире в начале 20 века возросло более чем в 4 раза. В определенной степени это связано с энергетическим кризисом в ряде стран, с развитием безотходного производства и новых наукоемких технологий переработки биологических отходов, возросшими требованиями мирового сообщества к экологии.

Эффективность применения биотоплива из органического сырья определяется его теплосодержанием, экономическими и экологическими характеристиками его производства.

В качестве сырья используются первичная растительная биомасса, а также бытовые отходы, отходы сельскохозяйственного производства, лесозаготовок, деревообработки и т. п.

Несмотря на рост значимости мировой биоэнергетики, этот энергоресурс не может рассматриваться в качестве базового в ближайшей перспективе. Безусловно, это вспомогательный источник энергии, поскольку

привязан к существующей инфраструктуре сельскохозяйственного производства и бытовых предприятий.

Тем не менее, «в результате изменения приоритетов мировой экологической и энергетической политики современная биоэнергетика представляет собой новый источник спроса на сельскохозяйственную продукцию, способный в долгосрочной перспективе содействовать оживлению сельского хозяйства в развивающихся странах» [16].

В табл. 9 представлены значения энергоемкости некоторых видов биоэнергоресурсов.

Рапсовое масло является продуктом переработки сельскохозяйственного сырья – злака рапса. Этот энергоресурс близок к метану, производимому из биогаза, и является наиболее перспективным видом биотоплива в странах Европы.

Таблица 9  
**Примерные значения энергоемкости биотоплива**

Вид биотоплива	Энергоемкость мДж/кг
Бытовые отходы	9
Дерево свежее	6
Дерево сухое	15
Навоз	16
Метан из биогаза	55
Отработанное пищевое масло, рапсовое масло	42
Макулатура	17
Уголь древесный	30

### **3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Содержание данной главы не дублирует специальные курсы «Технической термодинамики» [9, 43] и «Теплопередачи» [44, 45], так как авторы данного пособия лишь напоминают некоторые положения, ранее изученные студентами в бакалавриате.

#### **3.1 Энергия и работа**

Термин «энергия» имеет целый ряд определений, трактующих это понятие как со стороны физических представлений, так и философских. Тем не менее, среди физиков нет единой точки зрения по поводу трактовки этой важнейшей характеристики процессов и явлений современной науки.

Ниже приведены некоторые определения энергии и ее важнейшие свойства.

*Энергия:*

- всеобщая основа природных явлений;
- мера всех форм движения материи;
- базис культуры и человеческой деятельности;
- энергия может превращаться из одной формы в другую.

Из этого следует важнейший теоретический вывод: нет движения – нет материи. Исходя из этого, становится понятным – почему абсолютный ноль температуры недостижим, поскольку абсолютный ноль предполагает отсутствие движения, а следовательно, и материи, что невозможно в принципе.

На основе понятия энергии формулируется понятие *энергетики*.

*Энергетика* – совокупность больших (естественных) систем и сложных технических комплексов, предназначенных для получения, преобразования, распределения, использования энергии [9].

Различные тела, взаимодействуют друг с другом, передают некоторое количество энергии. Передача энергии может осуществляться различными способами, из которых для данного курса важнейшим являются два:

*первый способ* передачи энергии состоит в совершении работы одним телом над другим. В этом случае увеличение энергии одного из тел равно величине произведенной работы. Совершение работы всегда связано с изменением положения макротел в пространстве.

Передача теплоты является *вторым способом* передачи энергии, который возникает при непосредственном контакте тел. Теплота передается от более нагретого тела к менее нагретому. Носителем энергии в этом случае являются микрочастицы – молекулы либо атомы.

*Работа* представляет собой упорядоченную форму передачи энергии в результате взаимодействия макротел.

*Теплота* – хаотическое движение микрочастиц.

### 3.2 Первый закон термодинамики

*Первый закон термодинамики* описывает взаимное превращение работы и теплоты.

Первый закон термодинамики имеет различные формулировки, приведённые в специальных курсах применительно к различным случаям обмена энергии. Для задач теплоэнергетики наиболее интересным является следующая формулировка. *Теплота и работа обладают свойствами взаимного превращения в определенном количественном соотношении:*

$$Q = L, \quad (3.1)$$

где  $Q$  – теплота, Дж;  $L$  – работа, Дж.

При выводе аналитического уравнения первого закона следует рассмотреть известную из физики идеализированную модель процесса расширения газа в цилиндре (рисунок 9). При подводе теплоты к определенному объему идеального газа (отсутствуют трение, химические реакции, пренебрежимо вес цилиндра и его частей) совершается работа, выраженная в перемещении поршня на величину  $dz$ :

$$dQ = dK + dP + dL, \quad (3.2)$$

где  $dK$  – изменение кинетической энергии газа;  $dP$  – изменение потенциальной энергии газа.

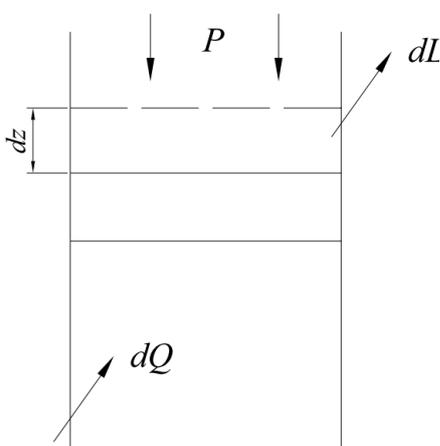


Рисунок 9 – К выводу аналитического уравнения первого закона термодинамики

Сумма  $dK$  и  $dP$  есть внутренняя энергия. Вводя обозначение  $dK + dP = dU$ , получаем аналитическое выражение первого закона термодинамики:

$$dQ = dU + dL \quad (3.3)$$

или в удельных величинах:

$$dq = du + dl, \quad (3.4)$$

где  $q = Q/M$ ;  $M$  – масса газа.

Работа, совершаемая газом при подводе теплоты  $Q$ , направлена на перемещение поршня (рисунок 9) на величину  $dz$ . Величина работы определяется из выражения:

$$dL = p F dz = p dv, \quad (3.5)$$

где  $p$  – внешнее давление,  $F$  – площадь поршня,  $dv$  – изменение объема газа.

Принято, что при расширении работа имеет положительное значение, а при сжатии – отрицательное.

Для 1 кг газа уравнение (3.5) принимает вид:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (3.6)$$

Как известно из курса «Термодинамика», процесс сжатия – расширения в диаграмме  $p - v$  отражается следующим образом – рисунок 10.

Площадь под процессом 1–2  $p-v$  диаграммы выражает величину подведенной, либо отведенной работы. Поэтому диаграмма  $p-v$  называется рабочей.

После интегрирования уравнение (3.3) приобретает вид:

$$q = \Delta u + l.$$

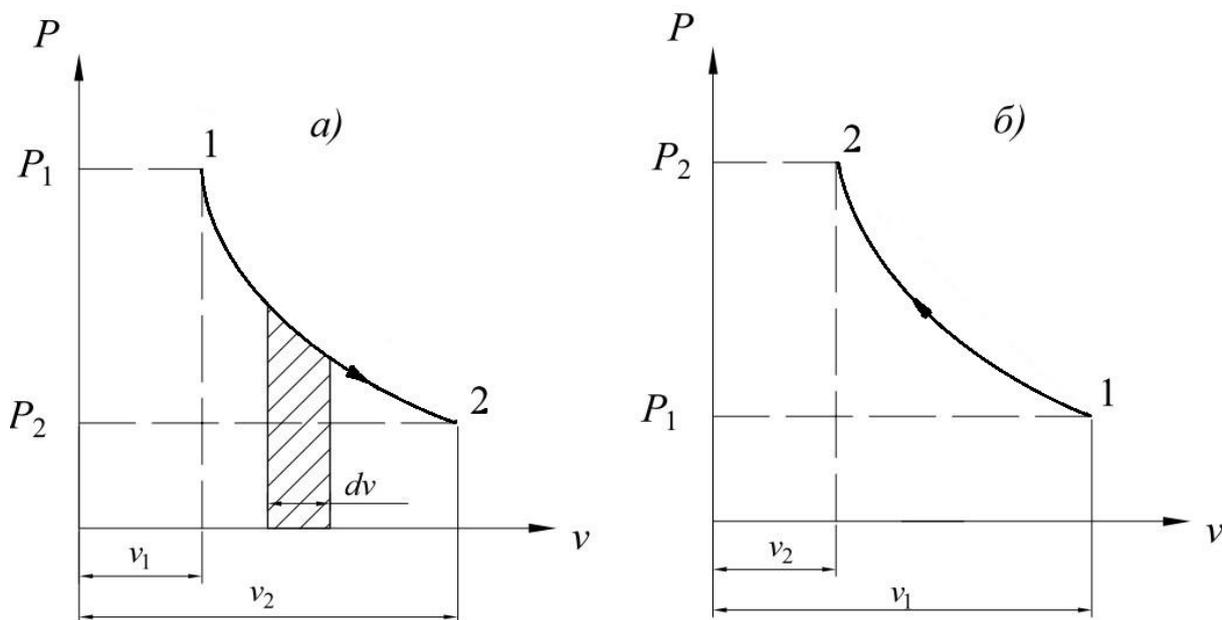


Рисунок 10 – Графическая интерпретация внешней работы:  
*a* – при расширении, *б* – сжатии

## Теплоемкость

*Теплоемкость – это количество теплоты, которое нужно сообщить телу, определенной массы либо объема, чтобы его температура изменилась на 1 °С.* В зависимости от того, какой физической величиной задано количество вещества, теплоемкость может быть массовой, объемной либо мольной.

Удельная (массовая) теплоемкость определяется отношением теплоемкости тела к его массе  $s$  и имеет единицу измерения Дж/(кг·К).

Теплоемкость зависит от температуры, поэтому для определенного диапазона температур используется средняя теплоемкость.

В зависимости от термодинамического процесса теплоемкость может быть при постоянном объеме (изохорная  $c_v$ ), либо при постоянном давлении (изобарная  $c_p$ ). Из уравнения первого закона термодинамики  $dq = du + pdv$  следует, что при  $v = const$ ,  $pdv = 0$  и  $dq = du$  или

$$du = c_v dT, \quad (3.7)$$

или в интегральной виде:

$$\Delta u = c_v \Delta T. \quad (3.8)$$

В выражение (3.8) входит средняя теплоемкость, так как  $\Delta T$  – конечная разность температур. В выражение (3.7) включена истинная теплоемкость, поскольку в формуле разность температур – бесконечно малая.

Изобарная теплоемкость получена из выражения:

$$c_p = dq_p / dT,$$

при этом

$$dq_p = du + p dV.$$

В результате преобразования этих выражений получаем:

$$c_p = (du + pdv) / dT = du / dT + p dv / dT = c_v + p dv / dT.$$

Из уравнения состояния идеального газа получаем

$$p dv / dT = R. \quad (3.9)$$

Тогда

$$c_p = c_v + R. \quad (3.10)$$

Это выражение называется уравнением Майера. Для реальных газов  $c_p - c_v > R$ .

### Энтальпия

Для вывода формулы энтальпии принимается выражение:

$$u + pv = h, \quad (3.11)$$

где  $h$  – энтальпия, кДж/кг.

Исходя из уравнения (3.11) уравнение первого закона термодинамики приобретает вид:

$$dq = dh - vdp. \quad (3.12)$$

Энтальпия  $h$  является еще одним параметром состояния и измеряется в кДж/кг, среди которых также давление  $p$  (МПа), удельный объем  $v$  (кг/м<sup>3</sup>), температура  $T$  (К).

### Энтропия.

Понятие *энтропии* достаточно подробно изложено в [18], где выводится зависимость

$$dq/T = ds, \quad (3.13)$$

где  $s$  – энтропия, имеющая размерность кДж/(кг·К).

Физический смысл энтропии рассматривается на основе теории вероятности в курсе «Теоретической физики».

В технической термодинамике физический смысл энтропии, как правило, не анализируется. Энтропия представляется как функция любой пары параметров:

$$s = f_1(T, v),$$

$$s = f_2(p, T),$$

$$s = f_3(p, v).$$

В результате интегрирования выражения (3.13) получаем для двух произвольных состояний 2 и 1:

$$\int_1^2 \frac{dq}{T} = s_2 - s_1 = \Delta s \quad (3.14)$$

В технической термодинамике чаще всего используется не абсолютная величина энтропии, а разность энтропий рабочего вещества, находящегося в двух различных термодинамических состояниях.

Разность энтропий  $s_2 - s_1$  не зависит от характера процесса перехода от одного состояния к другому, а определяется лишь величиной теплоты  $q$  и диапазоном температур. При подводе теплоты  $dq > 0$ ,  $\Delta s > 0$ , а при отводе  $dq < 0$ ,  $\Delta s < 0$ .

Для энергетики важным направлением использования энтропии является тепловая диаграмма, имеющая координаты  $T - s$ .

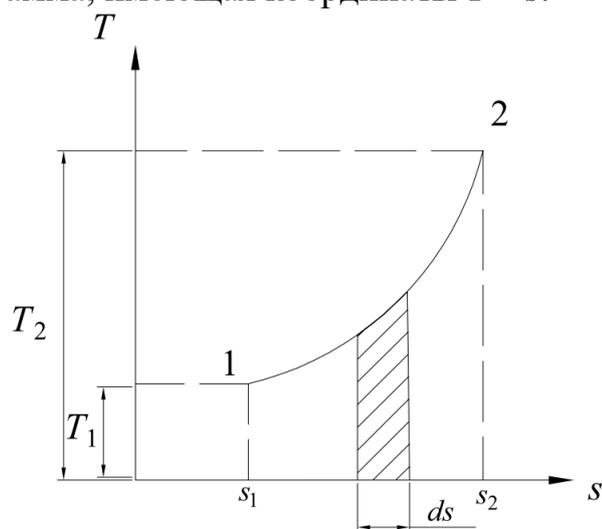


Рисунок 11 – Изображение процесса подвода теплоты в диаграмме  $T-s$

В ходе процесса подвода теплоты возрастание температуры от  $T_1$  до  $T_2$  соответствует увеличению энтропии от  $s_1$  до  $s_2$ .

Величина теплоты  $q$ , подводимая в процессе 1–2, в диаграмме  $T - s$  выражается площадью под процессом 1–2,  $dq = Tds$ .

### 3.3 Термодинамические процессы идеальных газов

Из первого закона термодинамики следует, что внутренняя энергия является источником передачи теплоты, обусловленной движением микрочастиц, либо совершения работы, выраженной перемещением макрообъектов.

Работы и теплота  $dq$  и  $dl$  являются функциями процесса, что означает, что их величины зависят от характера происходящих процессов и связаны с изменением параметров состояния ( $p, v, T, h, s$ ).

*Изохорный процесс.* Это процесс происходит при постоянном объеме  $v = const$ . Примером является нагревание газа в открытом объеме.

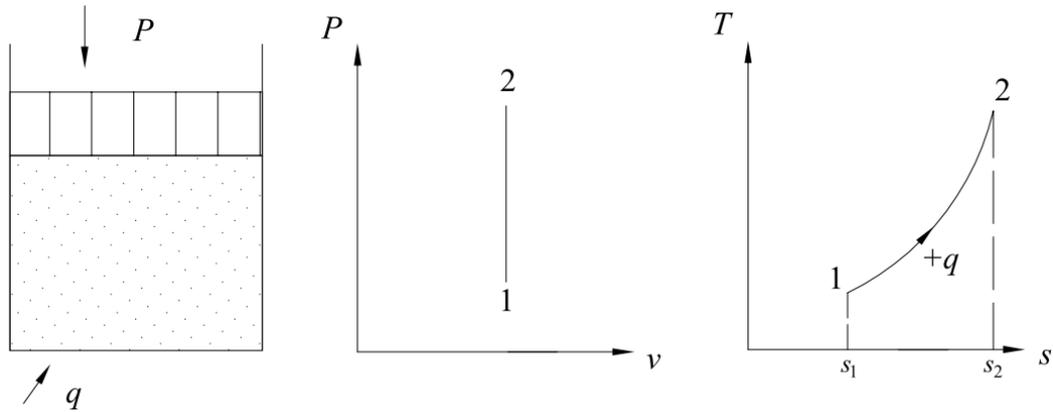


Рисунок 12 – Изохорный процесс

Основная формула изохорного процесса выводится из уравнения идеально-газового состояния при переходе вещества из состояния 1 до состояния 2. В результате получено выражение:

$$P_2 / P_1 = T_2 / T_1. \quad (3.15)$$

Работа в изохорном процессе не совершается: так как  $v = const$ , а изменение внутренней энергии равно величине подведенной теплоты

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1). \quad (3.16)$$

Изменение энтропии в изохорном процессе вычисляется из формулы  $ds = dq / T$ . Используя выражение для подводимой при постоянном объеме теплоты (3.16), получаем  $dq = du = c_v (T_2 - T_1)$ .

После интегрирования получим выражение:

$$\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2 / T_1). \quad (3.17)$$

*Изобарный процесс.* Уравнение изобарного процесса имеет вид  $p = const$ . В соответствии с законом Гей-Люссака  $v_1 / v_2 = T_1 / T_2$ . Изменение внутренней энергии также определяется зависимостью (3.16).

Выражение работы получается в результате интегрирования общего уравнения работы  $v_2$ :

$$l = p \int_{v_1}^{v_2} dv = p(v_2 - v_1). \quad (3.18)$$

Согласно уравнению идеально-газового состояния

$$pv_1 = RT_1$$

и

$$pv_2 = RT_2,$$

тогда

$$l = R (T_2 - T_1).$$

Количество теплоты, сообщаемое газу в изобарном процессе:

$$q = c_p (T_2 - T_1). \quad (3.19)$$

Исходя из первого закона термодинамики с учетом уравнений (3.18) и (3.19):

$$q = \Delta u + l = c_v (T_2 - T_1) + R (T_2 - T_1) = c_p (T_2 - T_1), \quad (3.20)$$

где  $c_p$  – теплоемкость при  $p = const$ .

Изменение энтропии имеет вид:

$$ds = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (3.21)$$

Графики изобарного процесса представлены на рисунке 13.

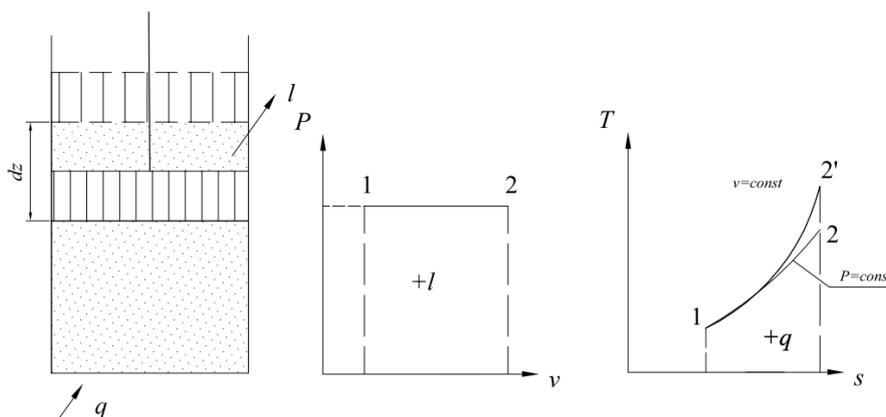


Рисунок 13 – Изобарный процесс

Для сравнения на тепловой диаграмме представлен изобарный  $p = const$  и изохорный процессы.

*Изотермический процесс.* Уравнение процесса выражается законом Бойля-Мариотта: при  $T = const$ ;  $pv = const$ . Так как температура не изменяется, то изменение внутренней энергии также не происходит  $du = c_v dT$ .

Выражение для работы получено в результате интегрирования зависимости  $l = \int p dv$ , при учете уравнения состояния  $p = \frac{RT}{v}$ .

В результате:

$$l = \int_1^2 \frac{pT}{v} dv = RT \int_1^2 \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (3.22)$$

Энтропия в изотермическом процессе, как и в ранее рассмотренных процессах, вычисляется в результате интегрирования выражения  $ds = dq/T$ . При  $T = const$

$$\Delta s = \frac{1}{T} \int_1^2 dq = \frac{q}{T}. \quad (3.23)$$

$$\Delta s = R \ln \frac{p_1}{p_2} = R \ln \frac{v_1}{v_2} \quad (3.24)$$

Теплота в изотермическом процессе отводится, а работа затрачивается, что видно на рисунке 14.

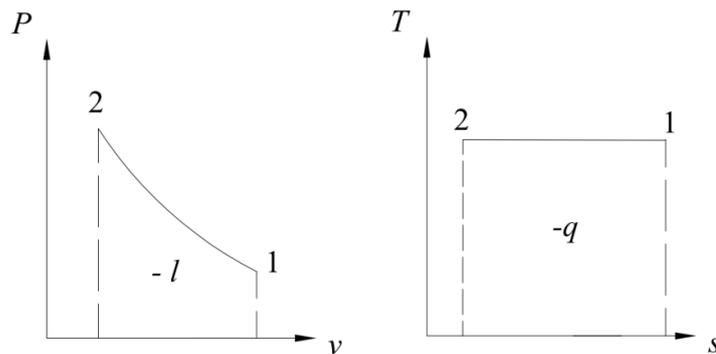


Рисунок 14 – Изотермический процесс

*Адиабатный процесс.* Адиабатный процесс происходит без теплообмена с окружающей средой или  $dq = 0$ . В идеале он может осуществляться в идеально изолированном сосуде.

Кроме этого, признаком адиабатного процесса является также и постоянство энтропии поскольку  $ds = 0$ ,  $dq = 0$ .

Общим уравнением адиабатного процесса является  $pv^k = const$ .

Коэффициент  $k$  называется показателем адиабаты. Для идеальных газов  $k$  всегда больше единицы, различен для разных газов и изменяется с изменением температуры.

Из уравнения адиабаты  $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$  следует:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{1/k} . \quad (3.25)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{(k-1)/k} . \quad (3.26)$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{1/(k-1)} . \quad (3.27)$$

Внутренняя энергия вычисляется по известной формуле:

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Формула работы может быть получен из уравнения первого закона термодинамики:

$$l = u_1 - u_2 = c_v (T_1 - T_2) \quad (3.28)$$

или

$$l = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (3.29)$$

*Политропный процесс.* Политропным называется любой термодинамический процесс, в котором превращение энергии осуществляется согласно определенному закону.

Уравнение политропного процесса записывается в виде  $pv^n = const$ . При этом значение  $n$  – показателя политропы может изменяться от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Таким образом все ранее рассмотренные процессы являются частными случаями политропного процесса. Так, например, для изотермического процесса  $n = 1$ , а для адиабатного  $n = k$ .

### 3.4 Процессы реальных газов

В отличие от ранее рассмотренных процессов идеальных газов, реальные газы при определенных условиях способны переходить в жидкое либо твердое состояние.

В идеальных газах молекулы рассматриваются как материальные точки, и силами взаимодействия между ними пренебрегают. Состояние идеальных газов описывается уравнением Клайперона-Менделеева  $pv = RT$ .

В реальных газах учитывается как размеры молекул, так и силовое взаимодействие между ними. Для реальных газов имеется множество

уравнений состояния, которые с той или иной степенью точности описывают свойства реальных газов.

Для реальных газов принят термин пар. В качестве наиболее известного и качественно хорошо работающего признано *уравнение состояния Ван-дер-Ваальса*, учитывающее силы взаимодействия между молекулами и их объем с помощью поправочных коэффициентов:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT, \quad (3.30)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные коэффициенты для каждого газа;  $\frac{a}{v^2}$  именуется внутренним давлением и учитывает силы притяжения между молекулами; число  $b$  учитывает объем молекул, недоступный для движения частиц.

При значительном разрежении газа молекулы удаляются друг от друга, ослабевают силы межмолекулярного взаимодействия и пренебрежимо малыми оказываются размеры молекул. В этом случае величины  $\frac{a}{v^2}$  и  $b$  перестают быть существенными, и уравнение (3.30) переходит в традиционное уравнение идеально-газового состояния.

В дальнейшем для построения циклов паросиловых установок интерес представляют реальные газы, переходящие в жидкое состояние при определенных условиях.

На рисунке 15 в координатах  $p$ – $T$  представлены области существования различных агрегатных состояний и линии перехода от одного состояния к другому.

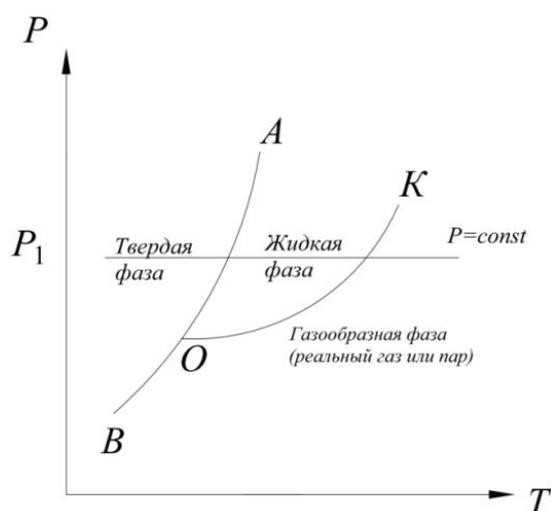


Рисунок 15 – Фазовая диаграмма чистого однокомпонентного вещества

Рассматривая рисунок 15, можно увидеть, что линия  $AB$  – линия плавления,  $KO$  – кипения (конденсации),  $BO$  – сублимации. Точка  $O$  именуется тройной точкой.

Для построения термодинамических циклов энергетических установок обычно используются следующие тепловые диаграммы:  $T-S$ , энтальпийная диаграмма  $P-h$  и рабочая диаграмма  $P-v$ .

Рассмотрим расположение основных процессов по этим диаграммам, которые представлены на рисунке 16.

В этих диаграммах область  $A$  соответствует области ненасыщенной жидкости,  $B$  – влажному пару,  $B$  – перегретому пару.

Линия  $M-K$  соответствует состоянию насыщенной жидкости (левая пограничная кривая),  $K-H$  – сухого насыщенного пара (правая пограничная кривая). Точка  $K$  – критическая точка. Критическое состояние – это особое термодинамическое состояние, в котором физические свойства пара и жидкости утрачивают смысл.

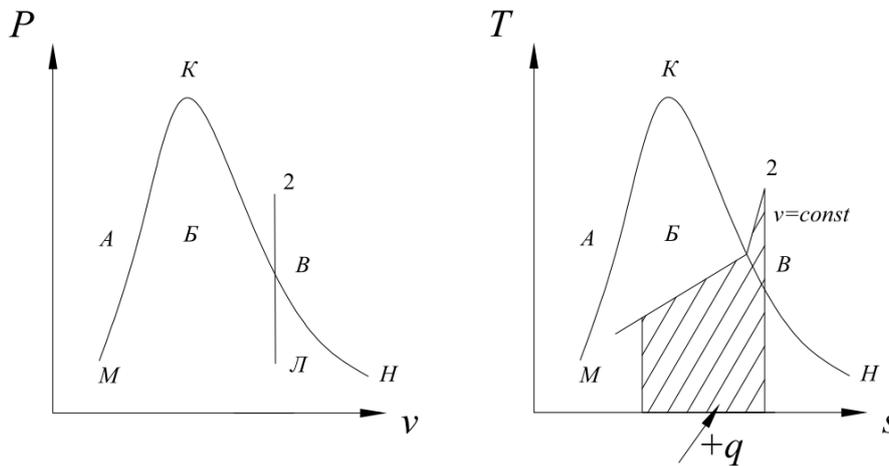


Рисунок 16 – Изохорный процесс

*Изохорный процесс.* Рассмотрим подвод теплоты к влажному пару в состоянии 1. Влажный пар находится в замкнутом сосуде. Конечное состояние 2 – состояние перегретого пара.

Линия процесса в диаграмме  $P-v$  проецируется в точку на оси абсцисс, следовательно, работа в изохорном процессе равна нулю. Теплота в диаграмме  $T-S$  выражается площадью под процессом 1–2:

$$q = u_2 - u_1 = (h_2 - h_1) - v \cdot (p_2 - p_1). \quad (3.31)$$

*Изобарный процесс.* К влажному пару в состоянии 1 будет подводится теплота  $q$  (цилиндр с подвижным невесомым поршнем). Давление при этом остается неизменным. На рисунке 17 представлен изобарный процесс в диаграммах с осями  $P-v$  и  $T-S$ .

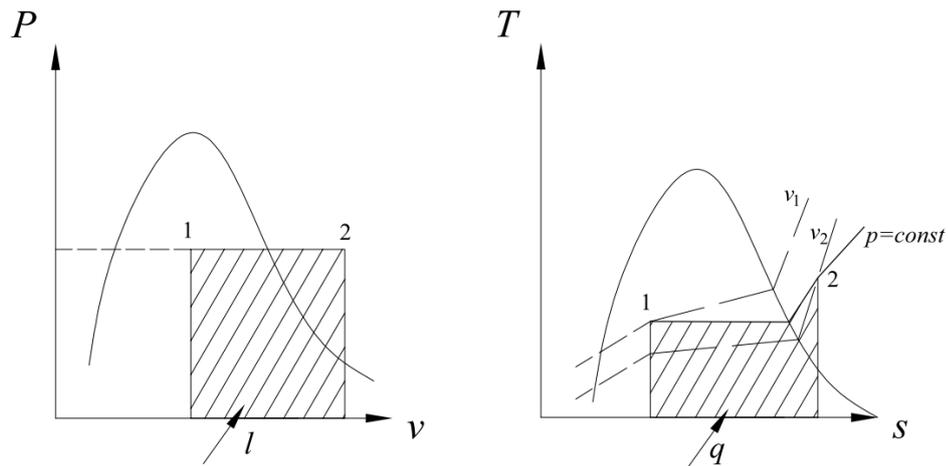


Рисунок 17 – Изобарный процесс

Работа будет равна (заштрихованная площадь под процессом 1–2 рисунок 17 оси  $P-v$ ):

$$l = \int_1^2 p \, dv = p(v_2 - v_1). \quad (3.32)$$

Заштрихованная площадь под процессом 1–2 в диаграмме  $T-S$  на рисунке 17 выражает теплоту, которая равна:

$$q = h_2 - h_1 \quad (3.33)$$

*Изотермический процесс.* Рассмотрим изотермический процесс подвода теплоты в процессе 1–2, представленный на рисунке 18. На участке 1– $a$  будет происходить парообразование и превращение влажного пара в сухой насыщенный пар в состоянии  $a$ . В дальнейшем происходит перегрев пара до состояния 2 при этом давление понижается от  $p_1$  до  $p_2$ .

Теплота процесса:

$$q = \int_1^2 T \, ds = T(s_2 - s_1) \quad (3.34)$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1). \quad (3.35)$$

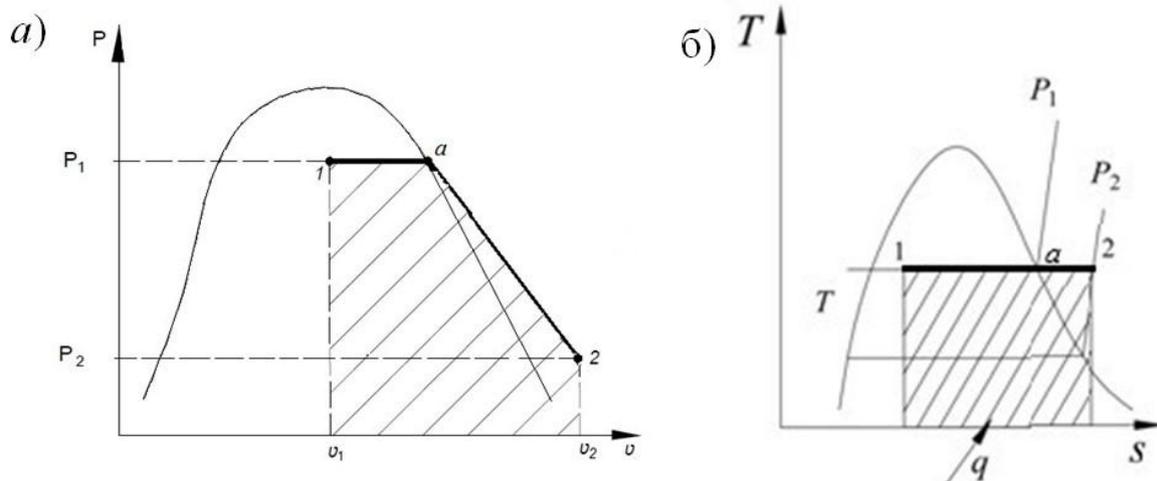


Рисунок 18 – Изотермический процесс

Работа может быть вычислена на основе первого закона термодинамики с учетом (3.34) и (3.35):

$$l = T(s_2 - s_1) - (h_2 - h_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad (3.36)$$

*Адиабатный процесс.* Рассмотрим процесс адиабатного сжатия влажного пара с начальным давлением  $p_1$  (точка 1) на рисунке 19.

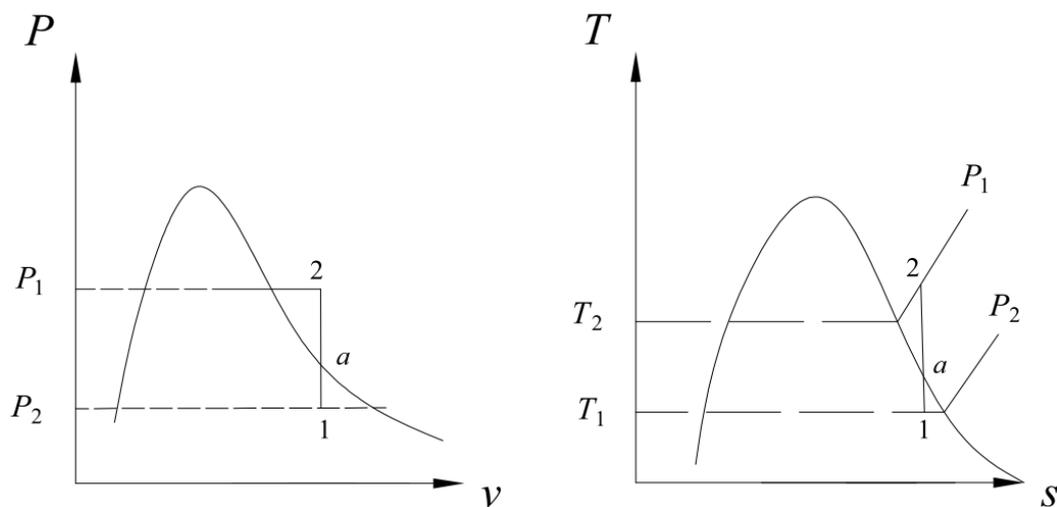


Рисунок 19 – Адиабатный процесс

Поскольку процесс происходит без теплообмена с окружающей средой энтропия остается неизменной, давление и температура увеличивается. Пар сначала превращается в сухой насыщенный (точка  $a$ ), а затем в перегретый (точка 2).

Теплота процесса:

$$q = 0 \quad (3.37)$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = (h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad (3.38)$$

Работа в соответствии с первым законом термодинамики равна изменению внутренней энергии:

$$l = -\Delta u = (h_1 - h_2) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad (3.39)$$

### 3.5 Второй закон термодинамики

Первый закон термодинамики устанавливает количественную связь взаимного превращения работы и теплоты, выраженную уравнением (3.1). Между тем это уравнение не учитывает возможность и условия осуществления такого превращения.

Основным условием является наличие возможности (либо невозможности) самопроизвольного осуществления этого превращения, либо требуется внешнее воздействие.

В природе происходит множество самопроизвольных процессов без воздействия извне. Это остывание нагретых предметов, свободное падение тел с определённой высоты и т.д.

Остывание тела происходит при условии, что его температура выше температуры окружающей среды  $T_T > T_0$ . В процессе остывания передается теплота  $Q$  до тех пор, пока температуры не выравниваются, то есть  $T_T = T_{oc}$ . Это процесс самопроизвольной, но невозможно самопроизвольно осуществить превращение теплоты в работу. А работа в теплоту может превращаться, причем в полном объеме. Следует вспомнить способ получения огня древними людьми.

Вопрос о возможности осуществления процессов превращения теплоты в работу или работы в теплоту и об условиях осуществления этих процессов и является предметом второго закона (начало) термодинамики.

*Теплота.* Как было сказано, обусловлено, хаотическим движением микрочастиц – молекул.

*Работа.* Это направленное, организованное движение макрообъектов. Очевидно, что хаотическое движение является наиболее вероятным поскольку происходит без внешнего воздействия, то есть самопроизвольно.

Самопроизвольный же переход от хаотического к направленному организованному движению макротел невозможен, или с позиции теории вероятности имеет минимальную вероятность.

Отсюда и одна из формулировок второго закона термодинамики «Природа стремится к переходу от менее вероятных состояний к более вероятным» [9].

Из всего сказанного следует, еще одна формулировка этого закона: «все самопроизвольные процессы необратимы». Ведь легко себе представить, что какое-либо тело самопроизвольно падает с высоты, но невозможно допустить, чтобы оно самостоятельно, преодолев силы тяжести, возвратилось в первоначальное положение. То же можно сказать и о теплоте.

Помещение остывает, если в нем температура выше, чем снаружи. То есть теплота передается при наличии разности температур, если нет внутри дополнительного нагревателя.

Очевидно, что самопроизвольные процессы происходят, когда в системе нет равновесия. Иначе говоря, обязательным условием для самопроизвольных процессов является наличие *разности потенциалов*: разности давлений, концентраций или температур.

Однако при наличии разности потенциалов (температур) отнюдь не вся теплота может быть преобразована в полезную работу. Часть теплоты передается источнику низкой температуры (ИНТ) и с точки зрения термодинамики теряется. Формулировка М. Планка как раз и отображает сущность этого процесса: «Невозможно построить периодически действующую тепловую машину, результатом действия которой было бы только получение механической работы и охлаждение источника теплоты».

На рисунке 20 представлена схема реализации второго закона термодинамики применительно к тепловому двигателю, холодильной машине или тепловому насосу.

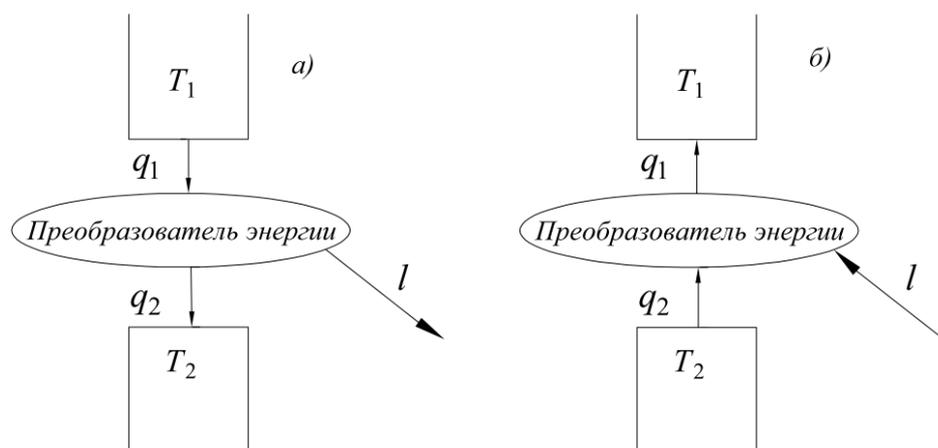


Рисунок 20 – Схема реализации второго закона термодинамики:  
а) применительно к тепловому двигателю;  
б) применительно к холодильной машине или тепловому насосу

В тепловом двигателе (рисунок 20, а) имеются два тела с разными температурами, причем  $T_1 > T_2$ . Очевидно, что в естественных условиях при данной разности температур будет самопроизвольно осуществляться процесс передачи теплоты от большей температуры к меньшей. Для того, чтобы теплоту преобразовать в работу, необходимо поместить между источниками некий механизм преобразования энергии, который только часть теплоты преобразует в работу, а другая часть будет передана источнику с низкой температурой.

Во втором случае (рисунок 20, б) осуществляется несамопроизвольный процесс передачи теплоты от ИИТ  $T_2$  к источнику с более высокой температурой  $T_1$ . При этом необходимо затратить работу, используя механизм, помещенный между источниками температур.

Схема преобразования энергии, изображенная на рисунке 20, б, аналогична и для холодильной машины, и для теплового насоса. Отличие, в диапазоне температур  $T_1$  и  $T_2$ .

Французским инженером С. Карно было доказано, что в основу преобразователя энергии должен быть заложен замкнутый круговой процесс последовательных изменений состояния рабочего вещества. Такой процесс был назван циклом. Первый цикл, который до сих пор считается идеальным, именуется циклом Карно.

Известны прямые и обратные циклы. Первые предназначены для превращения теплоты в работу на основе второго закона термодинамики (рисунок 20, а).

### Цикл Карно прямого цикла для идеального газа

На рисунке 21 представлена схема осуществления прямого цикла Карно для рабочего вещества в идеальном состоянии.

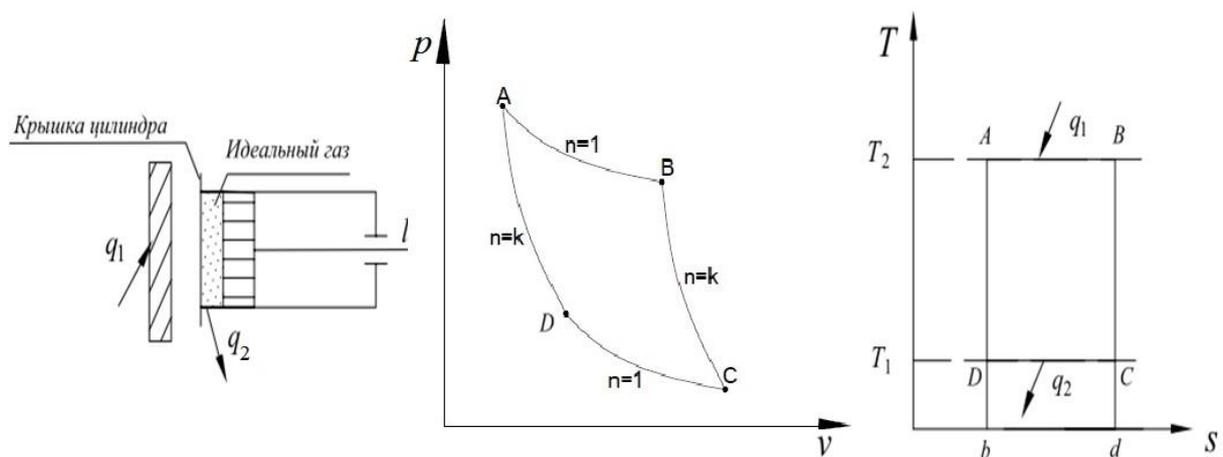


Рисунок 21 – Цикл Карно для идеального газа

На рисунке 21 представлен цилиндр с поршнем и идеальным газом в качестве рабочего вещества. Имеются два источника теплоты, которые попеременно соприкасаются с крышкой цилиндра. Один из них с высокой температурой  $T_1$  является источником подводимой теплоты  $q_1$ , второй с низкой температурой  $T_2$  – отводимой теплоты  $q_2$ . Обеспечивается подвод теплоты  $q_1$  к рабочему веществу в цилиндре. Цилиндр начинает свободно перемещаться за счет расширения газа.

Процесс подвода теплоты  $AB$  будет происходить изотермически при  $T_1 = const$ . Считаем, что масса источников теплоты намного больше массы рабочего вещества, а следовательно, температура и источник теплоты равна температуре газа и не меняется. При этом разностью температур между источником теплоты и газом, а также газом и окружающей средой пренебрегаем.

За период расширения газа изотермически подводится теплота  $q_1$ , в диаграмме  $T-S$  эквивалентная площади  $ABdb$ .

В процессе  $AB$  одновременно с подводом теплоты совершается работа  $l$ . Источник теплоты в точке  $B$  удаляется, при этом обеспечивается полное отсутствие теплообмена рабочего вещества с окружающей средой.

Поскольку давление газа в точке  $B$  выше, чем давление окружающей среды, газ продолжает самопроизвольно расширяться за счет внутренней энергии. В этом случае процесс расширения происходит адиабатно (процесс  $BC$ ). При этом температура понижается, достигнув значения  $T_2$ .

Для совершения постоянной работы поршень необходимо вернуть в первоначальное положение. Для этого крышка снимается, и к цилиндру подводится источник низкой температуры.

От рабочего вещества отводится теплота  $q_2$ , которая передается источнику низкой температуры. Поскольку мы пренебрегаем перепадами температур, процесс отвода теплоты  $q_2$  изотермический при  $T_2 = const$ .

В диаграмме  $T-S$  отводимая теплота  $q_2$  эквивалентна площади  $DCdb$ . В точке  $D$  источник теплоты  $q_2$  отводится от цилиндра.

Возврат рабочего вещества в первоначальное положение  $A$  происходит с затратой внешней работы (например, компрессора).

Термический КПД цикла Карно вычисляется по формуле:

$$\eta_{tk} = l_{ц} / q_1. \quad (3.40)$$

В соответствии с циклом, построенным в диаграмме  $T-S$

$$l_{ц} = q_{ц} = q_1 - |q_2| \quad (3.41)$$

где  $l_{ц} = q_{ц}$  – работа цикла эквивалентная площади  $ABCD$ .

Тогда

$$\eta_{tk} = (\text{площадь } ABCD / \text{площадь } bABd) = [(s_2 - s_1) \cdot (T_1 - T_2)] / [(s_2 - s_1) \cdot T_1]$$

или

$$\eta_{tk} = (T_1 - T_2) / T_1 = 1 - (T_2 / T_1) \quad (3.42)$$

Формула (3.42) определяет величину термического коэффициента полезного действия, характеризующего степень термодинамического совершенства цикла. В курсах «Технической термодинамики» [18-19] доказывается, что цикл Карно имеет максимальный КПД из всех циклов.

#### 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

*Произвести расчет паросиловой установки, работающей по обратному циклу Ренкина и циклу Карно.*

*Дано:*

Давление пара, поступающего в турбину,  $p_1 = 170$  бар.

Температура пара на входе в турбину  $T_1 = 600$  °С.

Давление в конденсаторе  $p_2 = 0,004$  бар ( $T_2 = 29$  °С).

Для построения цикла удобно использовать диаграмму  $h-S$  (рисунок 67) для построения цикла Ренкина и диаграмму  $T-S$  (рисунок 68) для построения цикла Карно. Для получения более точных значений параметров узловых точек паросиловой установки (ПСУ) построенного цикла рекомендуется использовать таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения [46], особенно при определении параметров точек 3, 4, 5. Параметры узловых точек для рассматриваемого варианта расчета представлены в таблице 10.

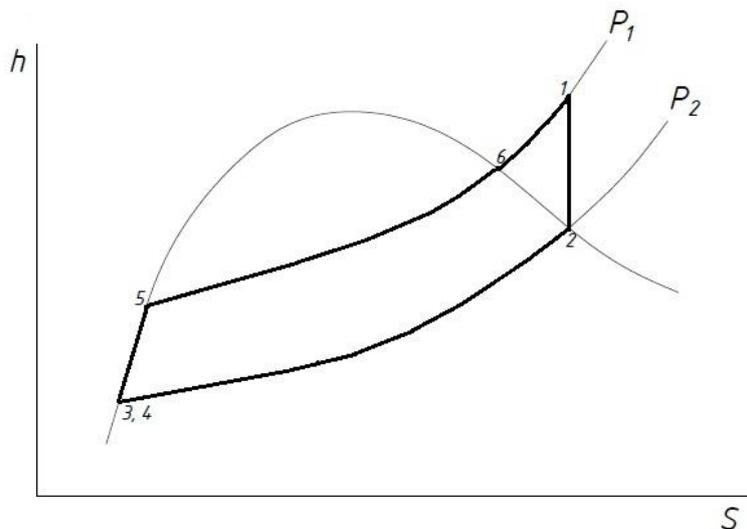


Рисунок 67 – Цикл Ренкина для расчета паросиловой установки

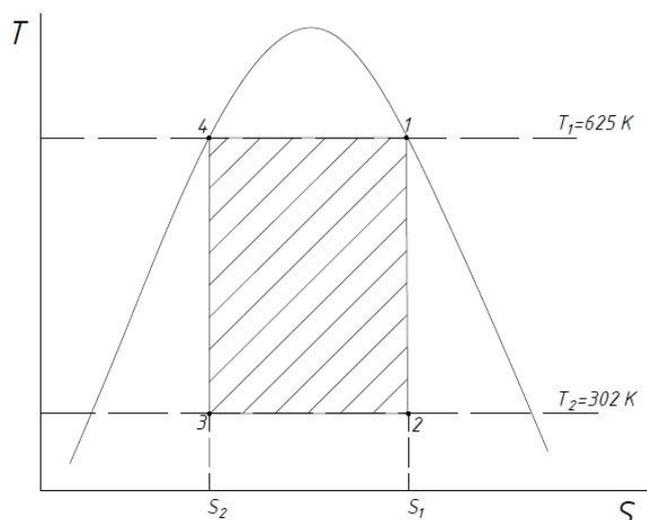


Рисунок 68 – Цикл Карно для расчета паросиловой установки

Таблица 10

Параметры узловых точек для расчета ПСУ

Параметры	Узловые точки					
	1	2	3	4	5	6
$p$ , бар	170	0,004	0,004	170	170	170
$T$ , °C	600	29	29	29	352	352
$h$ , кДж/кг	3448	1948	125	125	1689	2552
$S$ , кДж/(кг К)	6,4	6,4	0,42	0,42	3,8	5,1

Работа цикла, кДж/кг:

$$l_{\text{ц}} = 3448 - 1948 = 1500$$

Подведенная теплота, кДж/кг:

$$q_1 = 3448 - 125 = 3323$$

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_{\text{т}} = 1500 / 3323 = 0,45.$$

Термический КПД цикла Карно:

$$\eta_{\text{т.карно}} = (T_1 - T_2) / T_1 = (625 - 302) / 625 = 0,52$$

На основании расчетов, представленных выше, можно сделать вывод, что КПД цикла Карно выше, чем цикла Ренкина.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстрицкий, Г. Ф. Основы энергетики: учебник/ Г. Ф. Быстрицкий. – М.: КНОРУС, 2012. – 352 с.
2. BP Statistical Review of World Energy June 2014 [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de\\_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf)
3. Глазьев, С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса/ С.Ю. Глазьев. – М.: Экономика, 2010. – 255 с.
4. Львов, Д.С. Экономика России на перепутье веков/ Д.С. Львов, В. Макаров, Г. Клейнер – М.: Вече, 1999. – 85 с.
5. Львов Д.С. Эффективное управление техническим развитием./ Д.С. Львов – М.: Экономика, 1990. – 255 с.
6. D.S. Lvov, N.N. Moiseev, V.G. Grebennikov A Conception of Russia's Socioeconomic Development// Matecon, vol. 32, 4, 1999.
7. Экология угольной промышленности России на рубеже XXI века/ Под общей ред. С.Л. Климова. – М.: Академии горных наук. 2006. – 295 с.
8. Кондранова, А.М. О достоинствах и недостатках гидроэлектростанций / А. М. Кондранова, М. В. Куимова// Молодой ученый. – 2015. – №9. – С. 465 – 467.
9. Теплотехника: Учеб. для втузов/ Под ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. – М.: МГТУ им. Баумана. 2004. – 712 с.
10. Сидорович, В. Мировая энергетическая революция. Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир/ В. Сидорович – М: Альпина Паблишер, 2015. – 208 с.
11. Байков, Н.М. Прогноз развития отраслей ТЭК по основным регионам до 2030 г./ Н.М. Байков, Р.Н. Гриневич – М: ИМЭМО РАН, 2009. – 82 с.
12. Кобрянский В. М. Многослойные гибридные солнечные батареи на основе кристаллического кремния и сопряженных полимеров/ Материалы Международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность». Под ред. Д.О. Дуникова, О.С. Попеля.– 2016. – №1. – с. 22-26.
13. Беляков, Ю.С. Основы энергетики (конспект лекций): учебное пособие./ Ю.С. Беляков – Петрозаводск: ПетрГУ, 2011 – 80 с.
14. Плакиткин, Ю.А., Плакиткина Л.С, Дьяченко К.И., Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития/ Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина, К.И. Дьяченко // Уголь. – 2016.– № 7. – С. 12 – 16.
15. Плакиткин, Ю.А. Прогнозирование оценки масштабов применения новых технологий в угольной отрасли на период до 2040 года/ Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина, К.И. Дьяченко// Горная промышленность. – 2019. – № 5 (147). – С. 10 – 16.

16. Холманский, В.Г. Оценка теплотворной способности органических компонентов биотоплива/ В.Г. Холманский, Ю.А.Чирков, А.С. Кожевников// Экология промышленного производства. – 2016. – №1. – С. 1 – 11.
17. Ахатов, А.Г. Ресурсы нефти и газа на рубеже веков (экономико-экологические аспекты)/ А.Г. Ахатов, А.А. Ильинский – М.: Недра, 1998. – 432 с.
18. Дэниел, Е. Добыча. Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть./ Е. Дэниел – М.: Альпина Паблишер, 2014. – 944 с.
19. Хайн, Норман Дж. Геология, разведка, бурение и добыча нефти/ Дж. Хайн Норман – М.: Олимп-Бизнес, 2019 г. – 746 с.
20. Гайнуллин, Ф.Г. Природный газ как моторное топливо на транспорте./ Ф.Г. Гайнуллин, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский – М.: Недра, 1986. – 255 с.
21. Мировая индустрия и рынки сжиженного природного газа: прогнозное моделирование// под ред. Вовк В.С. – М.: Газпром экспо, 2009. – 311 с.
22. Jr. Joseph A. Angelo Nuclear Technology. – Greenwood Press, 2009. – p.656.
23. Малышев, А.А. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков хладагентов: Учеб. -метод. пособие./ А.А. Малышев, В.О. Мамченко, К.В. Киссер – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 116 с.
24. Андрущечко, С.А. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрущечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
25. Кириллов, П.Л. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках. Учебное пособие для вузов./ П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская – М.: ИздАТ, 2008 – 255 с.
26. Грешилов А.А. Ядерный щит/ Н.Д. Егупов, А.М. Матущенко, А.А. Грешилов . – М.: Логос, 2008. – 210 с.
27. Энергетика сегодня и завтра / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 344с.
28. Бекман, И.Н. Атомная и ядерная физика и ионизирующее излучение: учебное пособие для бакалавров и магистров/ И.Н. Бекман – М: Юрайт, 2016. – 398с.
29. Сергеев, И.И. Управляемый термоядерный синтез: учебное пособие по курсу «Физика» для студентов всех специальностей форм обучения/ И.И. Сергеев – Минск: БГУИР, 2014. – 27с.

30. Велихов Е. П., Путвинский С. В. Термоядерный реактор. Термоядерная энергетика. Статус и роль в долгосрочной перспективе // Доклад от 22.10.1999, выполненный в рамках Energy Center of the World Federation of Scientists.
31. Энциклопедия низкотемпературной плазмы./ Под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2000, т. IV – 507 с.
32. Сергеев, И.И. Управляемый термоядерный синтез: Учебное пособие по курсу «Физика» для студентов БГУИР всех специальностей и форм обучения /И.И. Сергеев – Минск: БГУИР, 2014. – 27 с.
33. Renewable and Sustainable Energy Reviews. – №12. –2009.
34. David W. Keith The influence of large-scale wind power on global climate //Communicated by Stephen H. Schneider, Stanford University, Stanford, CA, September 19, 2004 (received for review April 16, 2004)
35. Remard Chabot Analysis of the Global Electricity Production unto 2014. Ren21: Renewables Global Status Report, 2015.
36. Аль-Бермани, А.Г. Создание водородной энергетики. /А.Г. Аль-Бермани //Молодой ученый. – 2014. – №18(77) – С. 217–219.
37. Указ Президента от 07 июля 2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».
38. <http://protown.ru / information / doc / 4295. Html>
39. <http://www.proatom.ru>
40. Обельницкий, А.М. Топливо и смазочные материалы/ А.М. Обельницкий – М.: Высшая школа, 1982. – 208 с.
41. Месяц, Г.А. Водородная энергетика и топливные элементы/ Г.А. Месяц, М.Д. Прохоров. – Вестник РАН. – 2004. – Том74. – М7. – С. 579 – 597.
42. Водород в металлах. 1. Основные свойства. /Под ред. Г. Алефельда, И. Фелькля. – М.: Мир, 1981. – 430 с.
43. Теоретические основы хладотехники. Часть I. Техническая термодинамика./ Под ред. Э.И. Гуйго. – М., Колос, 1994. – 288 с.
44. Исаченко, В.П. Теплопередача. Учебник для вузов./ В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
45. Теоретические основы хладотехники. Часть II. Тепломассообмен/ Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 368 с.
46. Галдин В.Д. Генераторы теплоты: учебно-методическое пособие / В.Д. Галдин. – Омск: СибАДИ, 2013 – 114 с.



**Миссия университета** – открывать возможности для гармоничного развития конкурентоспособной личности и вдохновлять на решение глобальных задач.

---

Мальшев Александр Александрович  
Татаренко Юлия Валентиновна  
Киссер Кристина Владимировна

## **ЭНЕРГЕТИКА**

### **ЧАСТЬ I**

#### **Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано в ризографе

Н.Ф. Гусарова

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49