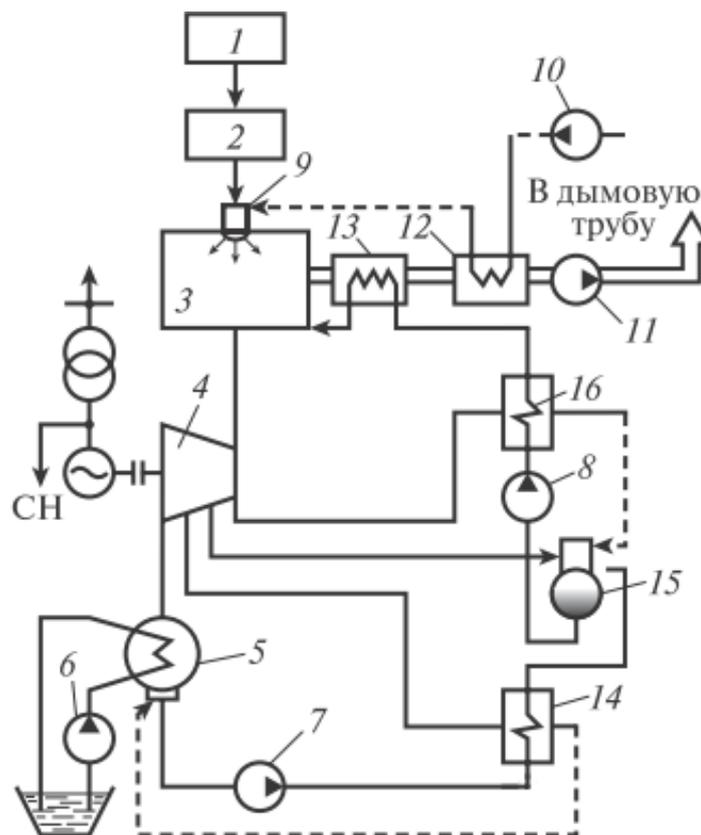


А.А. Малышев, Т.В.Рябова

## ОСНОВЫ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



Санкт-Петербург

2022

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**А.А. Малышев, Т.В. Рябова**

# **ОСНОВЫ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**УЧЕБНОЕ 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**

**2022**

УДК 621.575

**А.А., Малышев, Т.В. Рябова** Основы мировой энергетики: Учеб.-  
пособие.–СПб.: Университет ИТМО, 2022. – 201 стр.

Рецензент:

Сулин Александр Борисович, доктор технических наук, профессор,  
профессор (квалификационная категория «ординарный профессор») фа-  
культета низкотемпературной энергетики, Университета ИТМО.

В пособии приводится обзор состояния и основных направлений  
направлений развития энергетики в мире «Основы мировой энергетики».

Предназначено для магистрантов высших учебных заведений, обуча-  
ющихся по направлению подготовки магистрантов – 16.04.03 «Холодиль-  
ная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения».

Авторы выражают благодарность магистранту В.С.Кирееву, аспи-  
ранту В.С.Рымкевичу за оказанную помощь при написании учебного посо-  
бия.



**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 конку-  
рентоспособности российских университетов среди ведущих мировых  
научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель  
Университета ИТМО – становление исследовательского университета ми-  
рового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на ин-  
тернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2022

© А.А. Малышев, Т.В. Рябова 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
Предисловие.....	6
Глава 1 Роль энергетики в экономике	
1.1 Основные понятия.....	7
1.2 Потребление энергии по отраслям Российской Федерации.....	9
1.3 Энергообеспечение ведущих стран Мира и задачи стоящие перед энергетикой России.....	9
1.4 Роль энергетики в технологических укладах развития Производства.....	11
Глава 2 Энергоресурсы	
2.1 Общие сведения.....	15
2.2 Структура мирового потребления энергоресурсов.....	15
2.3 Невозобновляемые источники энергии.....	18
2.3.1 Органическое топливо.....	18
2.3.2 Неорганические топлива (горючие).....	29
2.3.3 Ядерная энергия и механизм тепловыделения.....	30
2.3.4.Реакции термоядерного синтеза.....	33
2.4 Возобновляемые источники энергии.....	40
2.4.1 Теплота недр Земли.....	41
2.4.2 Гидроэнергетические ресурсы.....	42
2.4.3 Солнечная энергия.....	43
2.4.4 Энергия движения воздуха.....	44
2.4.5 Энергия приливов и отливов.....	44
2.5 Водород, как основа энергетики будущего.....	45
2.6 Биотопливо.....	50
Глава 3 Термодинамические основы теплоэнергетических Установок	
3.1 Энергия и работа.....	52
3.2 Первый закон термодинамики.....	53
3.2.1 Теплоемкость.....	54

3.2.2 Энтальпия.....	56
3.2.3 Энтропия.....	56
3.3 Термодинамические процессы идеальных газов.....	58
3.4 Процессы реальных газов.....	62
3.5 Второй закон термодинамики.....	68
3.5.1 Цикл Карно прямого цикла для идеального газа Коэффициент полезного действия.....	70

#### Глава 4 Теплообмен в энергетических установках

4.1 Теплопроводность.....	72
4.2 Конвективный теплообмен в однофазной среде.....	73
4.3 Теплообмен в трубах.....	76
4.3.1 Теплоотдача при поперечном омывании пучков Труб.....	78
4.3.2 Теплоотдача при свободном движении среды в большом объеме.....	80
4.3.3 Теплоотдача при свободном движении среды в ограниченном пространстве.....	83
4.4 Теплопередача.....	85
4.4.1 Теплопередача через плоские и цилиндрические Поверхности.....	85
4.4.2 Теплопередача через ребреные поверхности.....	88
4.5 Теплообмен при фазовых переходах.....	91
4.5.1 Теплообмен при кипении.....	91
4.5.2 Теплообмен при конденсации.....	97
4.6 Теплообмен излучением.....	99

#### Глава 5 Циклы тепловых энергоустановок

5.1 Циклы Ренкина.....	102
5.1.1 Методы повышения термического КПД. Влияние температуры подвода теплоты.....	104
5.2 Регенеративный цикл.....	108
5.3 Бинарные циклы.....	110
5.4 Электростанции, работающие по конденсационному циклу (КЭС).....	112

5.5 Теплоэнергоцентрали.....	113
5.6 Газотурбинные установки (ГТУ).....	117
5.7 Парогазовые установки.....	123
5.8 Тепловые насосы.....	126
5.9 Термодинамический анализ циклов.....	131
5.9.1 Объединенное уравнение первого и второго законов Термодинамики.....	131
5.9.2 Производство работы изолированной термодинамической системой. Полезная работа.....	132
5.9.3 Максимально полезная работа теплоты (работоспособность теплоты).....	136
5.9.4 Метод сравнения термических КПД циклов.....	137
5.9.5. Энтропийный метод анализа потерь Работоспособности.....	140
5.9.6. Эксергетический метод анализа потерь Работоспособности.....	145
Глава 6 Ядерная, плазменная и водородная энергетики	
6.1 Атомные реакторы.....	150
6.1.1 Классификация атомных реакторов.....	151
6.2 Атомные электростанции.....	152
6.2.1 Эффективность АЭС.....	155
6.3 Термоядерные энергетические установки.....	157
6.4 МГД-генераторы.....	161
6.5 Водородная энергетика.....	165
Глава 7 Энергетика возобновляемых источников энергии	
7.1 Гидроэлектростанции (ГЭС).....	170
7.1.1 Энергия водяного потока.....	173
7.2 Ветроэнергетика.....	176
7.2.1 Энергия воздушного потока.....	177
7.3 Солнечная энергия.....	180
7.3.1 Основные схемы солнечных энергоустановок.....	180
7.3.2 Нетрадиционные технологии прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.....	186
Список литературы.....	193

## ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие предназначено для магистрантов, изучающих дисциплину «Основы мировой энергетики»

Данное пособие является дополненным изданием учебно-методического пособия **А.А. Малышев, Ю.В Татаренко, К.В. Киссер. Энергетика. Часть I: Учеб.-метод. пособие.** – СПб.: Университет ИТМО, 2020. – 74 с.

Изучившие дисциплину должны:

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

– *уметь* пользоваться прикладными программами технико-экономического анализа термодинамических систем, производить тепловые, прочностные и гидравлические расчеты тепло-хладэнергетических установок, 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 проработать материал, относящийся к данной теме. Особое внимание надо обращать на усвоение принципиальных положений и глубокое понимание изучаемого материала.

Авторы выражают искреннюю признательность аспиранту Я. Ю. Фомичевой и магистранту В.В Кирееву, внесших весомый вклад в написание учебно-методического пособия.

## 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: тепловой, 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. В отличие от энергетики, холодильная техника 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. Тепловой насос работает по обратному циклу, свойственному холодильной машине, но в ином температурном диапазоне - от температуры окружающей среды до температуры отопительных приборов. 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 источника энергии (энергоресурса или энергопродукта): электрическая, тепловая и т.д.

Следует отметить, что вторичными энергетическими ресурсами являются такие энергетические ресурсы, которые не встречаются в природе, а получают из первичных энергетических ресурсов. Вторичные источники энергии также называются энергоносителями (моторное топливо).

#### 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 стадиях:  
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.

## 1.2 Потребление энергии по отраслям экономики России

По данным Мирового энергетического совета (*World Energy Council WEC*) [7] уровень потребления энергии характеризует уровень развития общества. 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 являются сниженные 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 [5] (данные *World Bank*):

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 [7] выбраны для сопоставления три государства: США, Канада и Россия, соответствующее сравнение приведено на рис.1. Два последних рассматриваемых государства находятся примерно в одинаковых географических условиях .

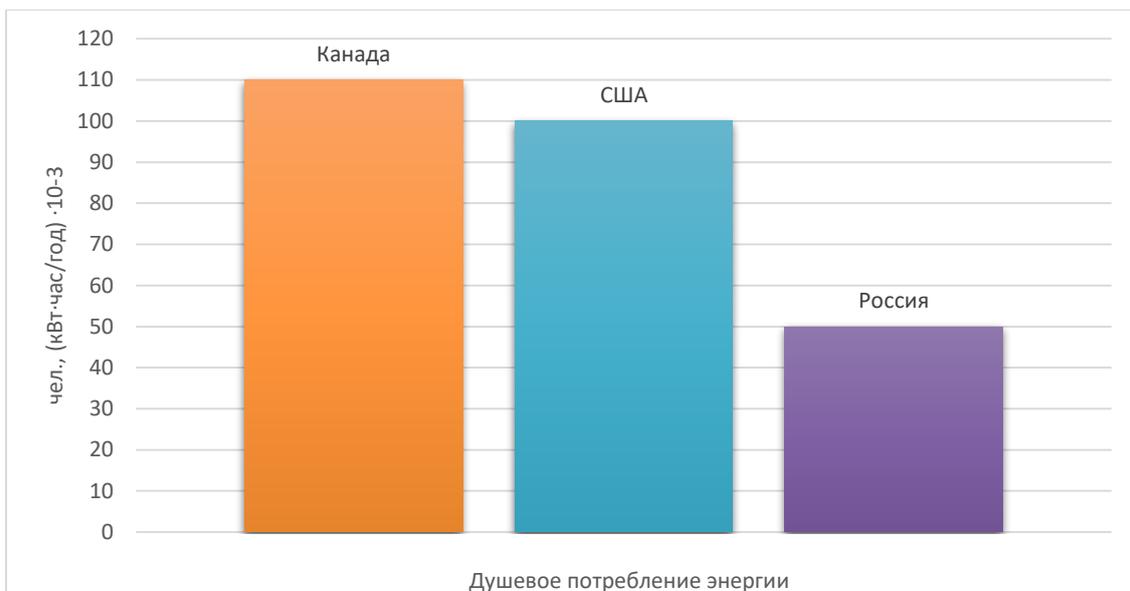


Рисунок 1 – Потребление энергии и ВВП на душу населения США, Канады и России (по данным Международного энергетического агентства (*World Bank*))

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 таблице 1.

Таблица 1

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

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

Очевидно, что даже полный отказ от экспорта может повысить энергообеспеченность россиян в 1,5 раза.

Признано, что одним из перспективных источников энергообеспеченности следует рассматривать 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 2025 года представляется явно недостаточным.

Согласно мнению крупных ученых, в неотдалённой перспективе возможно значительное увеличение роли ВИЭ энергетики. Так, академик Ж.И. Алфёров спрогнозировал к 2030 году прерогативу «солнечной» энергетики в сравнении с углеводородной. Существует точка зрения, согласно которой 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 [4-5]. Эти этапы названы укладами (волнами в англ. *waves of innovation*).

В дальнейшем теория Н.Д. Кондратьева была развита многими зарубежными экономистами, а в последнее время – российскими экономистами С. Д. Львовым и С. Ю. Глазьевым [2–4]. Согласно Н. Д. Кондратьеву, технологический уклад – *это совокупность технологических характеристик для определенного уровня развития 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 пятьюдесятью годами.

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

Кондратьев в 30-годы XX века сформулировал 5 технологических укладов (волн) протяженностью в пятьдесят лет (концепция технологических укладов является продолжением теории длинных волн) [2]. Согласно теории длинных волн, каждые 50-60 лет происходят инновационные открытия.

*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 *уголь* становится основным промышленным энергоресурсом [35].

*Третья волна* (1880–1940 гг.) базируется на использовании электрической энергии, развитии тяжелого машиностроения и электротехнической промышленности, открытий 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, геной инженерии, новых видов энергоресурсов, в том числе и возобновляемых. Именно в этот период особенно актуальными становятся экологическая безопасность и энергосбережение. Информационные технологии становятся основой материального производства. Появляется новое понятие «искусственный интеллект».

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

Характеристика пяти технологических укладов приведена в таблице 3 [5].

Точка отсчета становления шестого технологического уклада пока не определена. Можно предположить, что человечество пойдет по пути дальнейшего развития нано-технологий, геной инженерии, цифровых технологий, бионики. Появляется новое направление – биоэнергетика [6].

**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

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.

**Контрольные вопросы**

1. Энергия , энергетика, энергоресурсы.
2. Первичная и вторичная энергия.
3. Этапы энергетического производства.
4. Понятия технологических укладов.
5. Энергоустановки, применяемые на различных этапах технологических циклов.

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 [19].

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.

К основным энергоресурсам относят энергию рек, водопадов, также различные виды органического топлива, таких 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 обновляющиеся (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 электричества, 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. 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 таблице 4 приведено ориентировочное количество ресурсов энергии на Земле, МВт·ч [7].

### 2.2 Структура мирового потребления энергоресурсов

Как следует из ретроспективной оценки использования энергоресурсов (рис. 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 [17]. К этому же времени относится резкий всплеск применения нефти, что связано с бурным развитием транспорта.

Таблица 4

### Располагаемое количество основных энергоресурсов

<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 земной поверхности	$580 \cdot 10^{12}$
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 [67].

Особенно интересно значительное возрастание значения солнечной энергетики в мировом энергопроизводстве (несколько спорная позиция) [45].

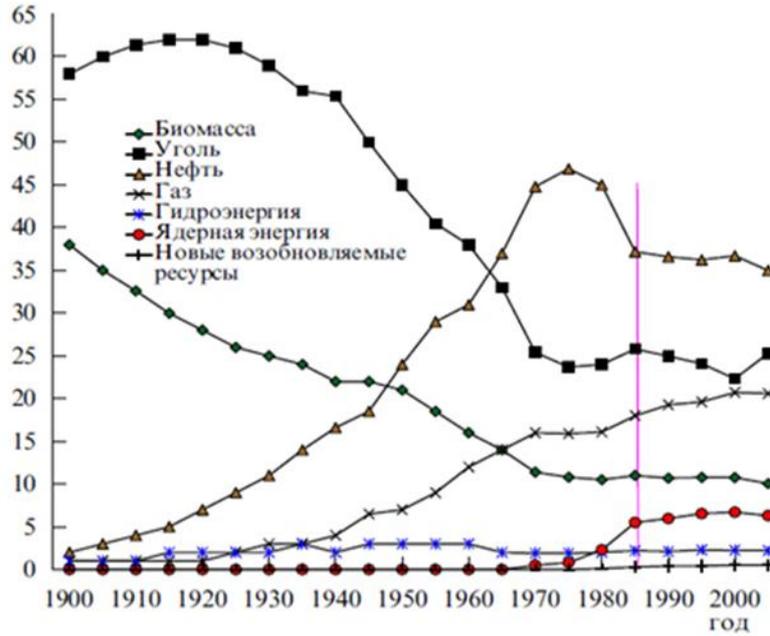


Рисунок 2 – Структура мирового потребления энергоресурсов до 2000 г.

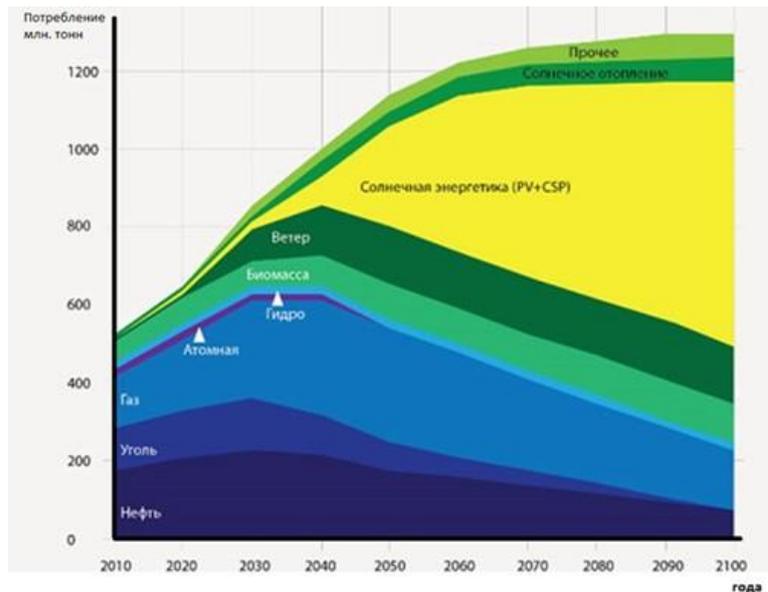


Рисунок 3 – Структура мирового потребления энергоресурсов до 2100 г. (прогноз)

Интересна прогнозная оценка использования угля. Несмотря на то, что уголь имеет невысокую энергоёмкость по сравнению с нефтью и газом (таблица 5) [31], высокую опасность при добыче и сложность транспортировки, к 2030 году спрос на уголь даже несколько возрастет, и уголь практически перестанет быть мировым энергоресурсом только к 2100 году (рисунок 3).

Удельная энергоёмкость основных видов энергоресурсов  
(данные 2000 г.)

	Условное топливо	Уголь	Древесина	Нефть	Газ	Водород
Удельная энергоёмкость Э, 10 <sup>6</sup> 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 [17].

В России же наблюдается противоположная ситуация. Благодаря лоббирующей политике Газпрома, уголь оказывается дороже газа и, следовательно, он не может найти широкого применения на внутреннем рынке РФ [68].

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 течении некоторого времени.

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

#### Контрольные вопросы

1. Количественная оценка основных энергоресурсов.
2. Структура мирового потребления энергоресурсов до 2100 г.
3. Удельная энергоёмкость основных энергоресурсов.

## 2.3 Невозобновляемые источники энергии

### 2.3.1 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 предприятий, растительные отходы сельскохозяйственного производства.

Твердые топлива используются в основном на ТЭЦ 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.

До 70% жидких топлив используется на транспорте. Около 30% сжигается в виде мазута на тепловых электростанциях

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 и на транспорте.

*Элементарный состав твердого и жидкого топлив.*

Топливо в том виде, в каком оно поступает для сжигания в топке 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 [19]:

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

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:

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

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:

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

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 отменяется от 50 % до 95%, тогда как содержание водорода  $H^{\Gamma}$  колеблется в пределах от 1 % до 11 %, а серы  $S^{\Gamma}$  – 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) [6].

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.

### **Уголь**

Уголь используется, начиная с XII века. Несмотря на известные недостатки, этот вид органического топлива до настоящего времени достаточно распространен в энергетике [19],[67],[68].

Мировые запасы угля включают *общие геологические и извлекаемые*. Общие геологические – это частично или полностью разведанное количество полезного ископаемого. Извлекаемые – запасы угля, которые подлежат промышленной разработке.

Общие геологические запасы оцениваются следующим образом:

- Весь уголь – 14 311 153 млн. т
- Бурый – 4 882 726 млн. т

- Каменный – 9 428 427 млн. т
- Извлекаемые запасы:
- Весь уголь – 982 714 млн. т
  - Бурый – 464 510 млн. т
  - Каменный – 518 204 млн. т

Таким образом, извлекаемые запасы, или запасы экономически целесообразные для добычи и использования, составляют не более 7% от общих геологических запасов. Доля наиболее ценного каменного угля – 5,5 %.

На рис 4 представлено распределение разведанных запасов угля по странам мира[35].

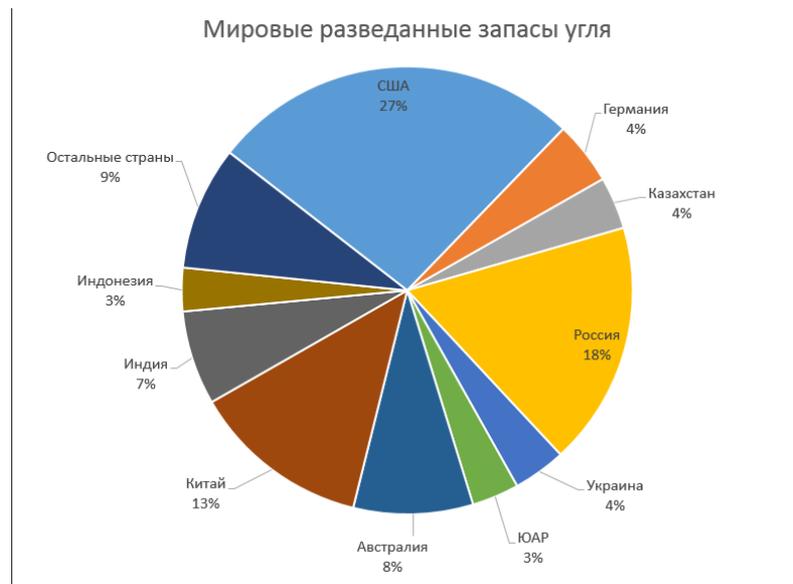


Рисунок 4 – Мировые разведанные запасы угля [67]

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, 5% водорода.

***Жидкое топливо***

## Нефть

Практически все жидкие топлива производят путем переработки нефти (бензин, керосин, дизельное топливо и мазут) [9], [10].

На рис.5 представлены *доказанные* запасы нефти, полученные с помощью анализа геологических данных объемов нефти, имеющих высокую степень достоверности и представляющие коммерческий интерес добычи в настоящий момент или в ближайшем будущем. Наиболее важное значение для экономики имеет текущий рейтинг запасов сырой нефти. По оценкам [16], разведанных запасов пока хватает на 45-50 лет.

Как следует из рис.5, Россия занимает 6 место по запасам нефти и 2 место в мире по количеству добываемой нефти (рис.6).



Рисунок 5 – Распределение мировых запасов нефти [10]

Важнейшим видом топлива, получаемым из нефти, является бензин.

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

Мазут является одним из основных видов топлива для некоторых видов транспорта и энергетических установок.

Мазут представляет собой смесь жидких углеводородов: углерод ( $C^p = 84 - 86 \%$ ) и водород ( $H^p = 10 - 12 \%$ ); содержание воды и зольность не более 0,2–1,5 %.

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

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

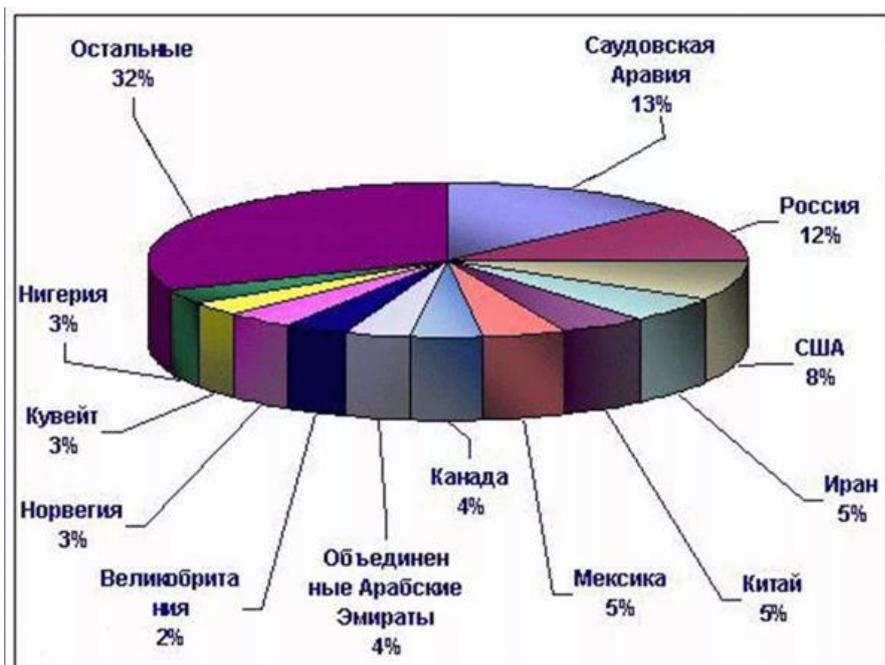


Рисунок 6 – Добыча нефти ведущими мировыми странами (данные ОПЕК октябрь 2020г.)

Характеристики жидкого топлива приведены в таблице 6 [8].

Таблица 6

**Характеристика жидкого топлива, получаемого из нефти**

Топливо	Состав горючей массы, %				Зольность сухого топлива, $A^c$ , %	Влага рабочего топлива, $W^p$ , %	Нижшая 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

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 [10]. Бензины применяются в авиационных и автомобильных двигателях, керосины – в турбо-реактивных авиационных, 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 воспламениться 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 само воспламеняемостью цетана  $C_{16}H_{34}$ , принятого за эталон.

*Октановое число* характеризует стойкость жидкого топлива (обычно бензина) к детонационному, то есть взрывному, горению. С ростом октанового числа склонность к детонации меньше. Если при нормального 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 легких, бензинов – близки к 100. В качестве антидетонаторов применяют ацетон с тетраэтилсвинцом и ядовитый изооктан.

### ***Газообразные топлива***

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

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 [18].

### **Природный газ**

Благодаря своим преимуществам природный газ в настоящее время становится одним из основных видов топлива, применяемых практически на всех видах транспорта и в энергетических установках.

Добыча природного газа среди мировых лидеров представлена на рисунке 7.

<b>(млрд. кубометров)</b>					
<b>Позиция</b>	<b>Страна</b>	<b>2012 год</b>	<b>2011 год</b>	<b>Изм., в %</b>	
1	 Россия	48 676	46 000	5,8	
2	 Иран	33 780	33 620	0,5	
3	 Катар	25 069	25 110	-0,2	
4	 Туркменистан	10 000	10 000	-	
5	 США	8 910	8 200	8,7	
6	 Саудовская Аравия	8 235	8 151	1,0	
7	 ОАЭ	6 091	6 091	-	
8	 Венесуэла	5 563	5 528	0,6	
9	 Нигерия	5 118	5 154	-0,7	
10	 Алжир	4 504	4 504	-	

Рисунок 7 – Разведанные запасы природного газа по странам мира.

По данным исследования энергетической компании ВР [16], природного газа в мире хватит на 53 года, если мировые доказанные запасы и объёмы добычи сохранятся на уровне 2010 года.

Природный газ получают из газовых месторождений, где он поступает из недр под давлением до 100 и более бар. Основным его компонентом является метан  $CH_4$ .

Кроме того, в газе содержится небольшое количество водорода  $H_2$ , азота  $N_2$ , высших углеводородов  $C_nH_m$ , оксида  $CO$  и диоксида  $CO_2$  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 [15], получаемый при первичной переработке нефти и попутных нефтяных газов. Это пропан (не менее 93%  $C_3H_8 + C_3H_6$ ), технический бутан (не менее 93%  $C_4H_{10} + C_4H_8$ ) и их смеси. Температура конденсации пропана при стандартном атмосферном давлении равна  $-44,5^\circ C$ , а бутана  $+5^\circ C$ ; соответственно при  $20^\circ C$  давление паров пропана составляет 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 –  $400-600 \text{ кг/м}^3$  (при  $0^\circ C$ ).

*Токсичность* газов зависит от содержания в них оксида углерода  $CO_2$ , сероводорода  $H_2S$  и др. Наличие в воздухе более 1% этих газов в течение 1 – 3 мин может привести к гибели людей.

*Взрывоопасность* определяется наличием  $H_2$  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 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 матери-

лов. 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  $Q_{н}^p$ , поскольку в газообразном топливе могут также содержаться влага, газообразный водород и другие балластные примеси. Состав и теплота сгорания основных горючих газов, согласно источнику [9], представлены в таблице 7.

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

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

Таблица 7

**Состав и теплота сгорания горючих газов**

Наименование газа	Состав сухого газа, % по объему								Низшая теплота сгорания сухого газа $Q_{н}^c$ МДж/м <sup>3</sup>
	СН <sub>4</sub>	Н <sub>2</sub>	СО	С <sub>n</sub> Н <sub>m</sub>	О <sub>2</sub>	СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> С	Н <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

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.

*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

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

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

Расход условного топлива определяется следующим выражением:

$$B_{ус} = \frac{B Q_n^p}{Q_{ус}},$$

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

### 2.3.2 Неорганические топлива (горючие)

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

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

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

### Контрольные вопросы

1. Определение топлива. Основные виды топлив.
2. Элементарный состав твердого и жидкого топлив.
3. Выражение для общего содержания серы в топливе.
4. Оценка общих мировых запасов угля.
5. Оценка общих мировых запасов нефти и распределение объемов добычи по странам.
6. Характеристики жидких топлив.
7. Общая оценка объемов добычи природного газа по странам мира.
8. Преимущества газообразного топлива перед нефтепродуктами
9. Состав и теплота сгорания горючих газов.

### 2.3.3. Ядерная энергия и механизм тепловыделения

*Общие сведения.* Ядерная энергия преобразуется в тепловую в результате торможения продуктов ядерного деления или синтеза атомных ядер [27]. 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 [24]:

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

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  $A = 50 - 90$  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.* Освобождения энергии связи ядра путем бомбардировки заряженными частицами оказывались неудачными из-за противодействия кулоновских сил отталкивания. Освобождение ядерной энергии стало возможным после открытия Д. Чадвиком в 1932 г. нейтрона, на основе результатов полученных Ирен и Фредерика Жолио-Кюри (Франция, 1932 г.) [24]. Благодаря отсутствию заряда нейтрон оказался идеальным снарядом для деления ядер.

По скоростям движения различают *медленные (тепловые) нейтроны*, энергия которых  $E_n = 0,03-0,5$  эВ, *промежуточные* –  $E_n = 1-10^3$  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 иногда представляется 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, если  $W_{\text{возб}} < E_a$ , то 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 в значительное число 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.

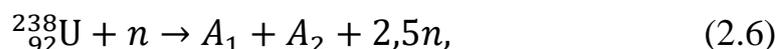
Природный уран, добываемый из земной коры, содержит только 0,712%  $^{235}\text{U}$ , делящегося при захвате тепловых нейтронов. Остальную же массу топлива составляет  $^{238}\text{U}$ , обладающий меньшим сечением захвата тепловых нейтронов, поэтому для осуществления цепной реакции с природным ураном 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 8). 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 энергоресурсов не превысит 15–25 раз.



Рис.8 – 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.

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

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 изменениях теплового режима.

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

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

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

#### 2.3.4. 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 [32], а этот источник энергии по своему потенциалу значительно превышает потенциал ядерного распада.

Так, на единицу массы термоядерного топлива получается примерно в 10 млн. раз больше энергии, чем при сгорании органического, и примерно в 100 раз больше, чем при расщеплении ядер урана [52].

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 (УТС), без сомнения, будет важнейшим «прорывным» направлением энергетики ближайшего будущего.

Профессор И.Н. Бекман сказал [52], что «неуправляемый термоядерный синтез без особых проблем удалось реализовать в земных условиях при создании водородные бомбы ещё в середине прошлого века, а для мирной энергетики необходимо решение множества научно-технических проблем, возникающих при практической 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, 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. 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* (изотоп водорода): атомная масса  $A = 2$  включает: число протонов  $p = 1$ , число нейтронов  $n = 1$ , число электронов  $e = 1$ ;

*тритий T* (изотоп водорода, в природе нет): атомная масса  $A = 3$ , включает: число протонов  $p = 1$ , число нейтронов  $n = 2$ , число электронов  $e = 1$ .

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

- силы притяжения между нуклонами;
- кулоновские силы отталкивания;
- силы притяжения – короткодействующие. Действуют на расстоянии 10–15 м (1 фэнметр);
- 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

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

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 9 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 [52].

Также, анализируя рисунок 9, можно увидеть, что у лёгких ядер с увеличением количества нуклонов энергия связи растёт, а у тяжёлых падает.

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

Теоретически реакция синтеза возможна с использованием любых веществ от водорода до железа. Препятствием для этого является наличие кулоновских сил, отталкивающих тяжелые ядра [52].

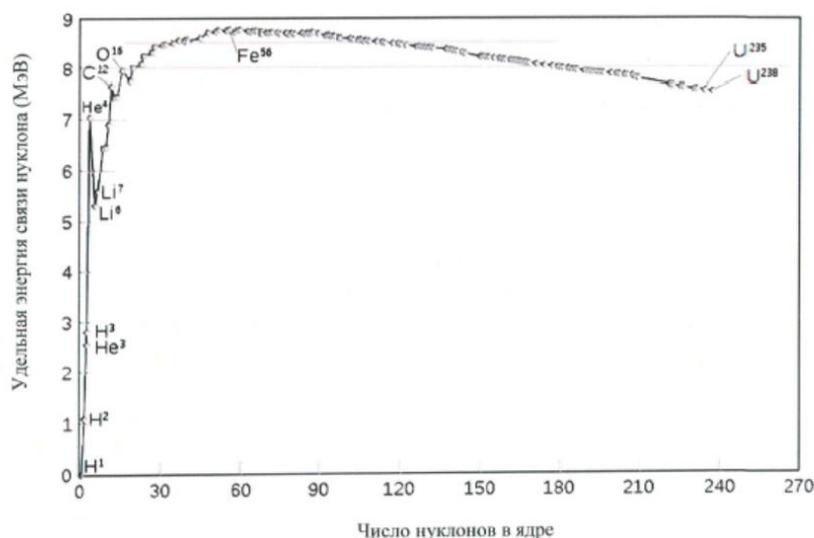


Рисунок 9 – Зависимость удельной энергии связи нуклона от числа нуклонов в ядре

Практический интерес представляют следующие реакции УТС (таблица 8.)

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.	$p + B = He^4 + He^3$	8,7
6.	$Li^6 + n = He^4 + T$	4,8
7.	$Li^7 + n = He^4 + T + n$	2,47

В настоящее время наиболее перспективной для промышленной термоядерной энергетики считается реакция №1. Это обусловлено тем, что запасы дейтерия в водах Мирового океана практически неисчерпаемы и технология его получения из воды хорошо отработана.

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 (реакции 6 и 7 таблица 8). Проблема может быть решена путем совмещения в одной установке термоядерной реакции получения энергии и реакции производства трития (глава 6).

*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.

Один Барн  $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$ . «Сечение реакции – это площадь эффективного поперечного сечения ядра, в которое должно попасть другое ядро, чтобы произошло их взаимодействие» [53] (в данном случае реакция синтеза).

Зависимость сечения реакции от энергии частиц представлена на рисунке 10. Сечения реакций, описанных в таблице 8, показаны на рисунке 10 как функция энергии сталкивающихся частиц [32].

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 ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$  соответствует 11600 К).

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  $T = 10^8 \text{ К}$ . При таких температурах реагирующая смесь представляет собой плазму – квазинейтральную смесь электронов и положительно заряженных ионов.

Из вышеизложенного следует, что 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:

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

Наиболее признанным способом разогрева является бомбардировка ионов дейтерия (мишень) ионами трития. Однако разогретые ионы трития, попадают в «холодную мишень», также остывают, не производя установившейся реакции. Исходя из этого требуется дополнительный разогрев ионов дейтерия [54], [55].

Объемная плотность выделяемой полезной энергии будет равна:

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

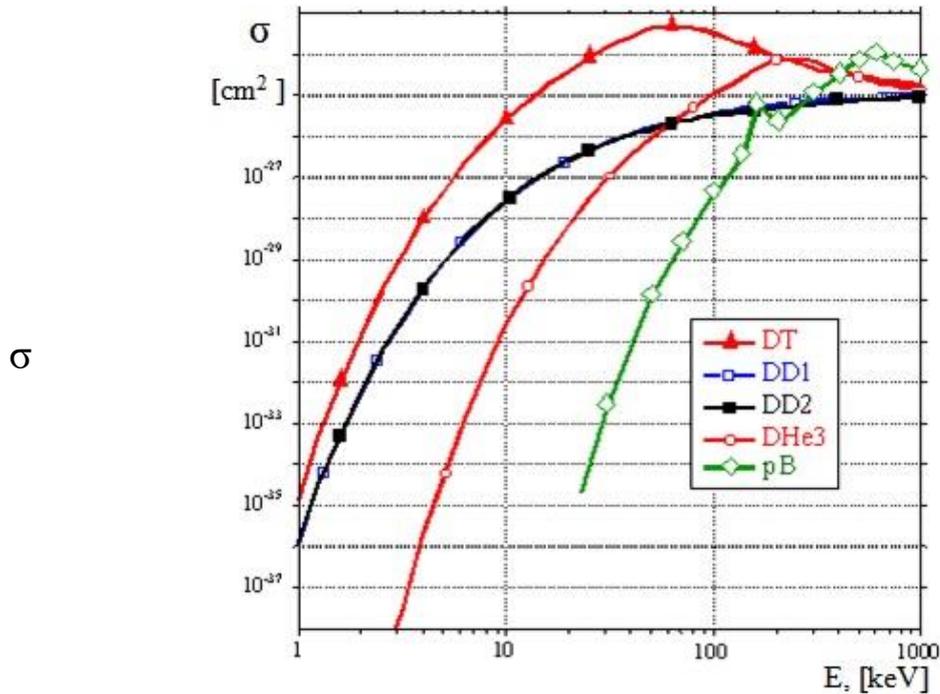


Рисунок 10 – Сечения некоторых термоядерных реакций, как функция энергии частиц в системе центра масс

где  $q$  – энергия выхода реакции (согласно таблице 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 дополнительных 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, с/м<sup>2</sup>:

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

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 выражениями [57].

*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 рис. 11).

- *Импульсные*, в которых удерживается плазма высокой плотности (область 2 на рис. 11).

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:

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

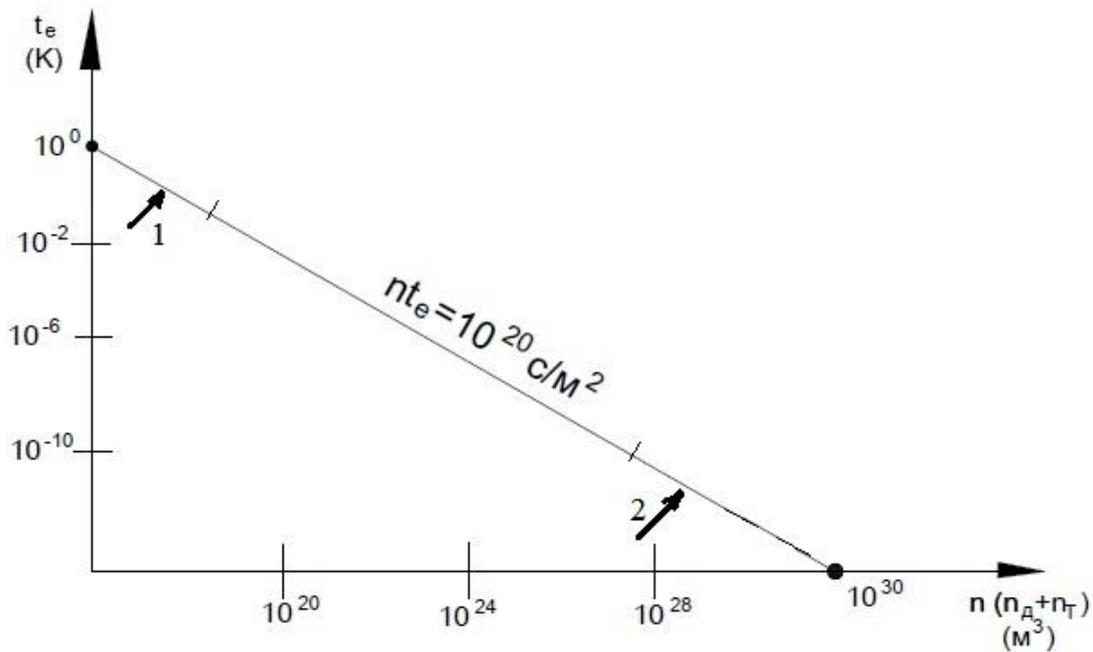


Рисунок 11 – Зависимость энергетического времени удержания плазмы от плотности плазмы

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

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

#### Контрольные вопросы

1. Преобразование ядерной энергии в тепловую.
2. Энергия связи.
3. Градация нейтронов по скоростям.
4. Примеры реакции деления.
5. Термоядерная реакция
6. Элементы термоядерного синтеза и преимущества термоядерной энергетики.
7. Ядерные силы.
8. Основные реакции термоядерного синтеза

## 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, процессах фотосинтеза, морских течений, градиентов температуры в океанах и материках, приливов и отливов в мировом океане [12].

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 [14].

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

Основными факторами, ограничивающими использование нетрадиционных ВИЭ, являются [31]:

- малая плотность энергетического потока, которая составляет для солнечной энергии на поверхности земли  $1,36 \cdot 10^{-3}$  МВт/м<sup>2</sup>, ветровой при скорости ветра 10 м/с –  $6 \cdot 10^{-4}$  МВт/м<sup>2</sup>; геотермальной –  $3 \cdot 10^{-8}$  МВт/м<sup>2</sup>, в то время как для энергии АЭС – 0,2 МВт/м<sup>2</sup>;
- значительная неравномерность выработки энергии во времени и ее использования;
- относительно высокие капиталоемкость энергетических установок и стоимость вырабатываемой электроэнергии

#### 2.4.1 Теплота недр Земли

Поток теплоты из недр Земли, источником которой являются радиоактивные процессы, постоянен, но имеет очень низкую плотность. Так, с углублением на 33 метра температура повышается на 1 °С.

Геотермальная энергетика – это экологически чистые технологии выработки электроэнергии и теплоты, исключаящие прямой контакт геотермального источника теплоты с рабочим веществом [29].

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. В этих случаях перепады температур небольшие (30–40 °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 опасностями, такими как землетрясение, цунами, извержение 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.

## 2.4.2 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 10–12 % от мирового гидропотенциала [11]. В таблице 9 представлены данные о гидроресурсах различных стран мира (при среднегодовых расходах воды) [16].

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.

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.

### 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

### 2.4.3 Солнечная энергия

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

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

Солнце имеет радиус 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.

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.

#### **2.4.4 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 мирового потребления. Однако благодаря мировому энергетическому кризису востребованность этого возобновляемого энергоресурса может быть повышена.

Темп роста ветроэнергетики по различным странам характеризуется следующими значениями: 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 2–4 МВт и диаметр рабочего колеса 80–100 м.

#### **2.4.5 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 14–18 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 позволяют считать этот вид энергии высокоэффективным.

## Контрольные вопросы

1. Основная особенность энерготрансформации в возобновляемых источниках энергии(ВИЭ).
2. Основные факторы, ограничивающие использование ВИЭ.
3. Основные преимущества гидроэнергетических ресурсов.
4. Гидроресурсы различных стран
5. Основные преимущества солнечной энергетики.
6. Темпы роста ветроэнергетики по странам мира.
7. Энергия приливов и отливов

## 2.5 Водород как основа энергетики будущего

### *Предпосылки создания водородной энергетики.*

С 1900 по 2000 г. потребление энергии в мире увеличилось в 15 раз – с 21 до 320 экодж (1 экодж =  $27 \times 10^6$  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%). За 50 лет выбросы углекислого газа в атмосферу возросли в 4,5 раза [61].

Углекислый газ как причина парникового эффекта является основой 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 как понятие сформировалось в 70-е гг. XX века [58].

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

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

Работы в области водородной энергетики во многих странах относятся к приоритетным направлениям развития техники.

В России водородные технологии также относятся к числу критических технологии федерального уровня [59].

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

- запасы водорода практически неограничены;
- 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 [60].

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

Согласно [66], «совершенно неправомерно противопоставлять водородную энергетику углеводородной энергетике», 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. 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 теплотворная 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 как 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%.

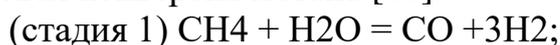
При выборе наиболее экономически обоснованных технологий водородной энергетики важно учитывать масштабы использования этого вещества во всех отраслях экономики, в том числе энергетику: металлургию, космическую промышленность, оборонный комплекс, пищевое производство, медицину и др. С учетом высокой стоимости получения водорода совместно с понятием «водородная энергетика ВЭ» появился термин «водородная экономика».

Водородную энергетику нельзя рассматривать как монополиста энергетического будущего. Безусловно, этот 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 рис. 7, может быть природное топливо: метан, уголь, древесина, вода и т.д.

Наиболее распространенная технология получения водорода сегодня – паровая конверсия метана [66]:



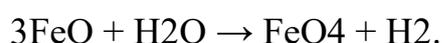
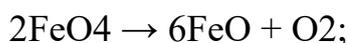
Для нее характерна относительно низкая стоимость – 1,0–1,5 долл./кг  $\text{H}_2$ . Сегодня в США производится в год около  $10^6$  т водорода, на что расходуется ~ 5% полного потребления природного газа и эмитируется в атмосферу около 100 млн. т  $\text{CO}_2$ .

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 [64].

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 [61]:



Результаты анализа свидетельствуют, что термоядерный реактор тепловой мощности 1000 мВт при работе по такому циклу позволит получить 1 млн. т  $H_2$  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 основном из-за высоких температур (до 450–900 °С).

При получении водорода из твёрдых 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 сырьё 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 очистка) либо воздействием электрического поля (электрохимическая конверсия – рисунок 12).

Значительный вклад в процесс производства электроэнергии как конечного продукта водородной технологии вносит хранение водорода [61].

На сегодняшний день самым распространённым способом хранения считается использование баллонов. При этом очевидно, что с повышением давления увеличивается количество хранимого водорода, но при этом возрастает и металлоёмкость тары. Если баллон выдерживает 300 бар., то в нём можно хранить 13% (масса газа по отношению к массе баллона) водорода, при давлении 500 бар. – 11%.

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.

Способы использования водорода как энергоресурса будут рассмотрены в главе 6.

Водород – газ бесцветный, однако в зависимости от способов его производства и с учетом их воздействия на окружающую среду водород условно разделяется на следующие типы (согласно терминологии Международного энергетического агентства:

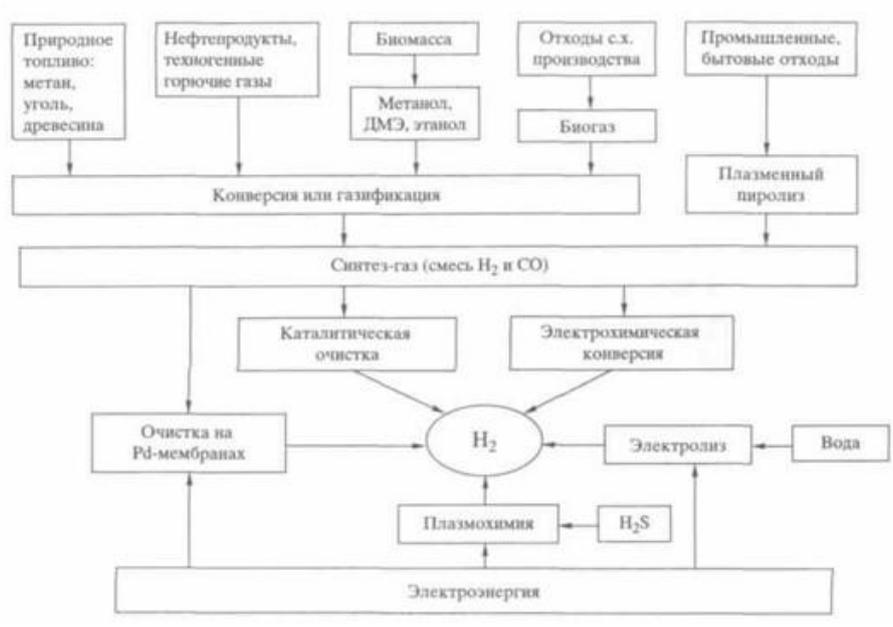


Рисунок 12 – Получение водорода

Схема основных этапов водородной технологии представлена на рисунке 13.

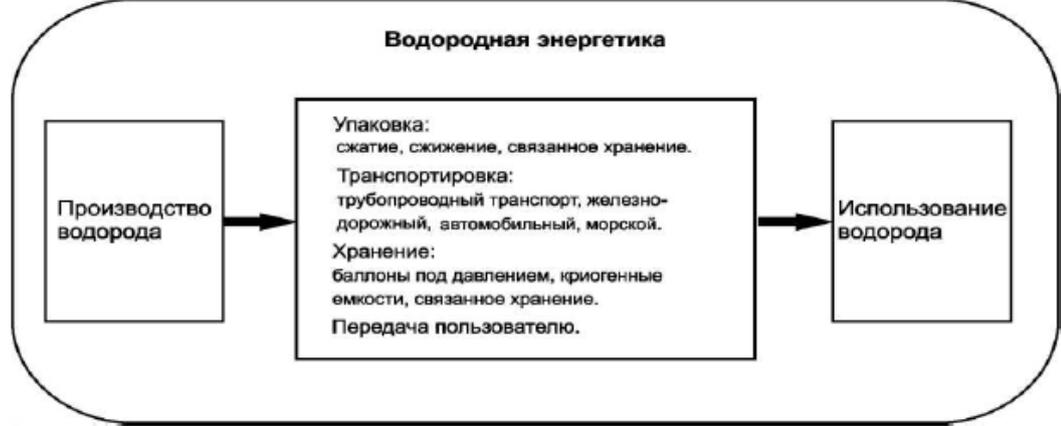


Рисунок 13 – Жизненный цикл водорода

- «Коричневый водород», который производится путем газификации каменного угля или бурого угля;
- «Серый водород» получается методом паровой конверсии метана; «Синий водород» получен также паровой конверсией, но с дополнительно очисткой. По сравнению с серым водородом этот газ содержит вдвое меньше выбросов, но не обеспечивает полное выполнение требований экологии.
- «Зеленый водород», произведённый путем электролиза воды с использованием электроэнергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ), наиболее экологичен.

На долю «зеленого» водорода в настоящее время приходится менее 1% мирового производства водорода, но тем не менее, этот вид газа имеет наибольшие перспективы использования в долгосрочной перспективе.

## 2.6 Биотопливо

Биомасса является одним из наиболее возобновляемым источником энергии на рынке международной торговли. В отличие от иных альтернативных источников энергии, биотопливо универсально [13].

Это обусловлено, во-первых, возможностью применения в теплоснабжении, электрогенерации, в транспортном секторе, а также возможностью заменять (в ряде случаев) традиционные энергоресурсы, такие как, уголь, нефть или газ.

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

Применение биомассы в мире за период 2004–2009 гг. 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 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» [13].

В таблице 10 представлены значения энергоемкости некоторых видов биоэнергоресурсов.

Рапсовое масло является продуктом переработки сельскохозяйственного сырья – злака рапса. Этот энергоресурс наряду с метаном, производимым из биогаза являются наиболее перспективными видами биотоплива в странах Европы.

Таблица 10

**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

**Контрольные вопросы**

1. Предпосылки создания водородной энергетики.
2. Что включает в себя понятие «водородная энергетика»?
3. Особенности водорода как энергоносителя.
4. Понятие условного коэффициента полезного действия водородного технологического процесса.
5. Основные технологии получения водорода.
6. Жизненный цикл водорода.
7. Преимущества и характеристики биотоплива.

## 3 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Содержание глав 3 и 4 не дублирует специальные курсы «Технической термодинамики» [19], [20] и «Теплопередачи» [21], [22]. Авторы данного пособия лишь напоминают некоторые положения, ранее изученные студентами в бакалавриате.

### 3.1 Энергия, работа, теплота

Фундаментальное понятие «энергия» имеет целый ряд формулировок как в физике, так и философии. Тем не менее, среди физиков нет единой точки зрения по поводу трактовки этой важнейшей характеристики процессов и явлений, происходящих в природе.

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 – 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 [19]».

Различные тела, взаимодействуя 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 14). 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.

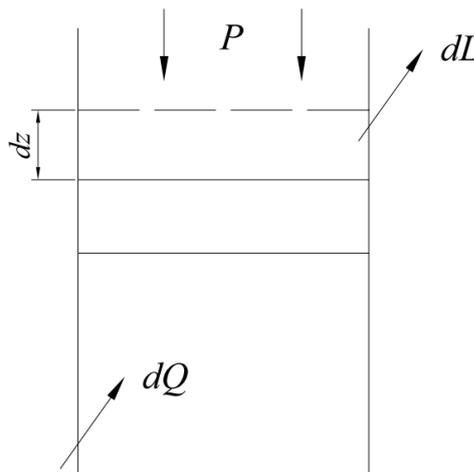


Рисунок 14 – К выводу аналитического уравнения первого закона термодинамики

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  $q = Q/M$ ;  $R = L/M$ ;  $M$  – 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 15.

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:

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

### 3.2.1 Теплоемкость

*Теплоемкость – это количество теплоты, которое нужно сообщить телу (либо отвести от тела) 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  $c$  и имеет единицу измерения Дж/(кг·К).

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

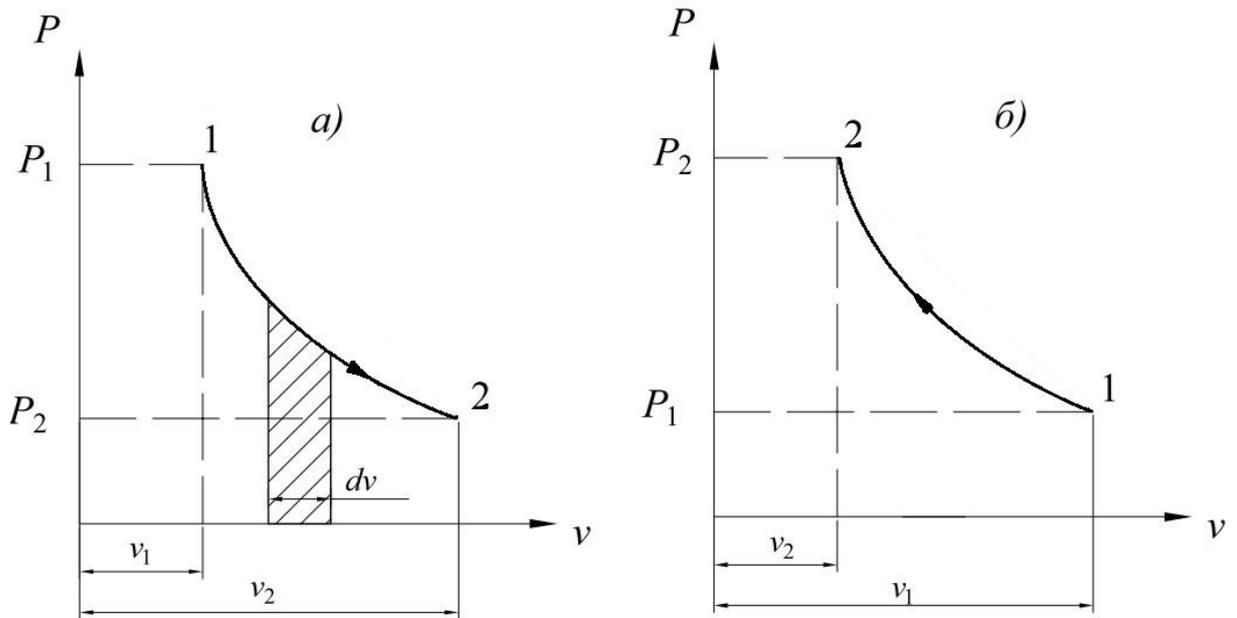


Рисунок 15 – Графическая интерпретация внешней работы:  
*a* – при расширении, *б* – сжатии

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  $c_p - c_v > R$ .

### 3.2.2 Энтальпия

Для вывода формулы энтальпии принимается выражение первого закона термодинамики вида:

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

где  $h$  – энтальпия, кДж/кг.

Исходя из уравнения (3.11):

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

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).

### 3.2.3 Энтропия

Понятие *энтропии* достаточно подробно изложено в [19], 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 термодинамики 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  $T - S$ .

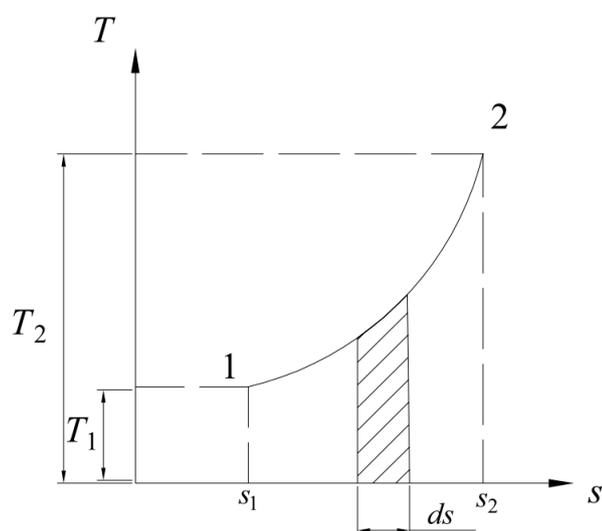


Рисунок 16 – Изображение процесса подвода теплоты в диаграмме  $T-S$

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

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

#### Контрольные вопросы

1. Энергия , работа, теплота.
2. Первый закон термодинамики.
3. Внутренняя энергия.
4. Теплоемкость .
5. Энтальпия.

## 6. Энтропия.

### 3.3 Термодинамические процессы идеальных газов

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

Теплота и работа  $dq$  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 цилиндре при неподвижном поршне (рис. 17).

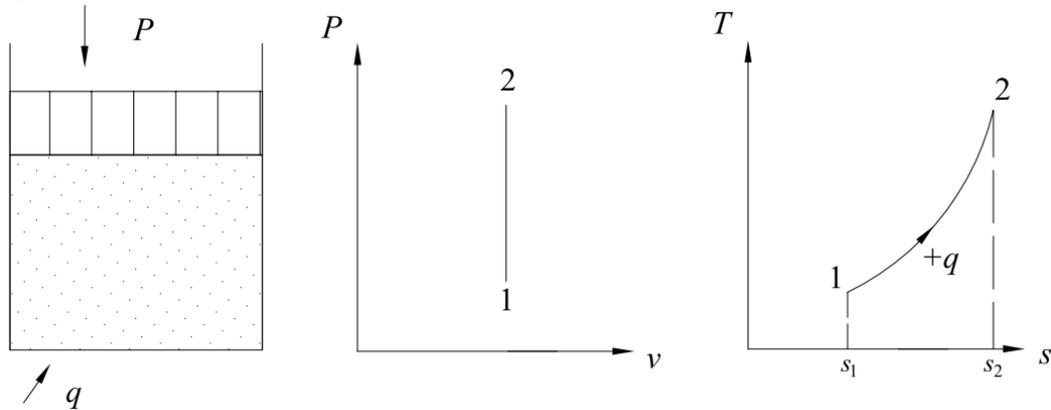


Рисунок 17 – Изохорный процесс

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 поршень неподвижен и  $v = const$ , 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.* Поршень подвижен, следовательно, работа совершается, но давление остается постоянным  $p = const.$  (рис. 13). Изобарный процесс подчиняется закону 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 3.5:

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

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 рис. 18.

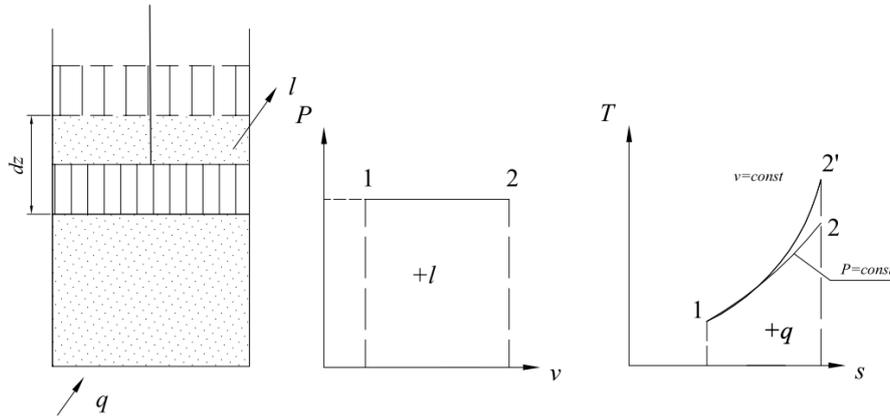


Рисунок 18 – Изобарный процесс

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 также, 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 рис. 19.

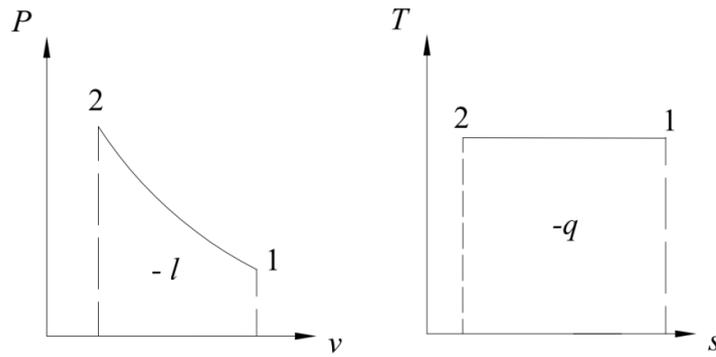


Рисунок 19 – Изотермический процесс

*Адиабатный процесс.* Адиабатный процесс происходит без теплообмена с окружающей средой или  $dq = 0$ . 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 получена 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  $pv^n = \text{const}$ . 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  $n = k$ .

#### Контрольные вопросы

1. Изохорный процесс.
2. Изобарный процесс.
3. Изотермический процесс.
4. Адиабатный процесс.
5. Политропный процесс.

### 3.4 Процессы реальных газов

В отличие от ранее рассмотренных процессов идеальных газов, реальные газы при определённых 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, учитывающего 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 20 в координатах  $p$ – $T$  представлены области существования различных агрегатных состояний и линии перехода от одного состояния к другому.

Рассматривая рисунок 20, можно увидеть, что линия  $AB$  – линия плавления,  $KO$  – кипения (конденсации),  $BO$  – сублимации. Точка  $O$  именуется тройной точкой.

Для построения термодинамических циклов энергетических установок будут использованы тепловая диаграмма  $T$ – $S$ , энтальпийная диаграмма  $P$ – $h$  и рабочая диаграмма  $P$ – $v$ .

Рассмотрим расположение основных процессов по этим диаграммам, которые представлены на рисунке 21.

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

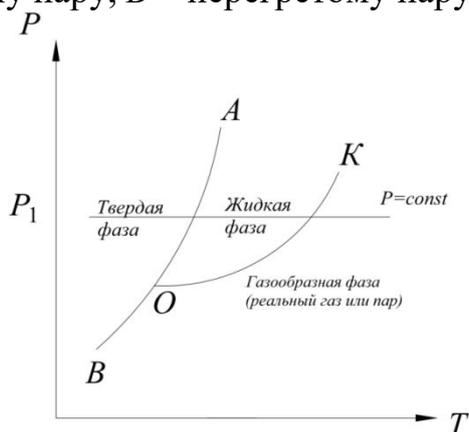


Рисунок 20 – Фазовая диаграмма чистого однокомпонентного вещества

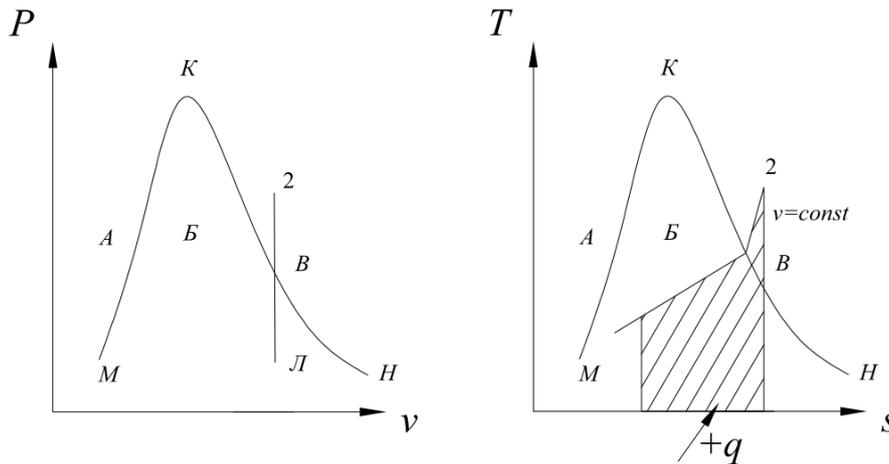


Рисунок 21 – Изохорный процесс

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.

*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.

Работа будет равна (заштрихованная площадь под процессом 1–2 рисунок 22 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

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

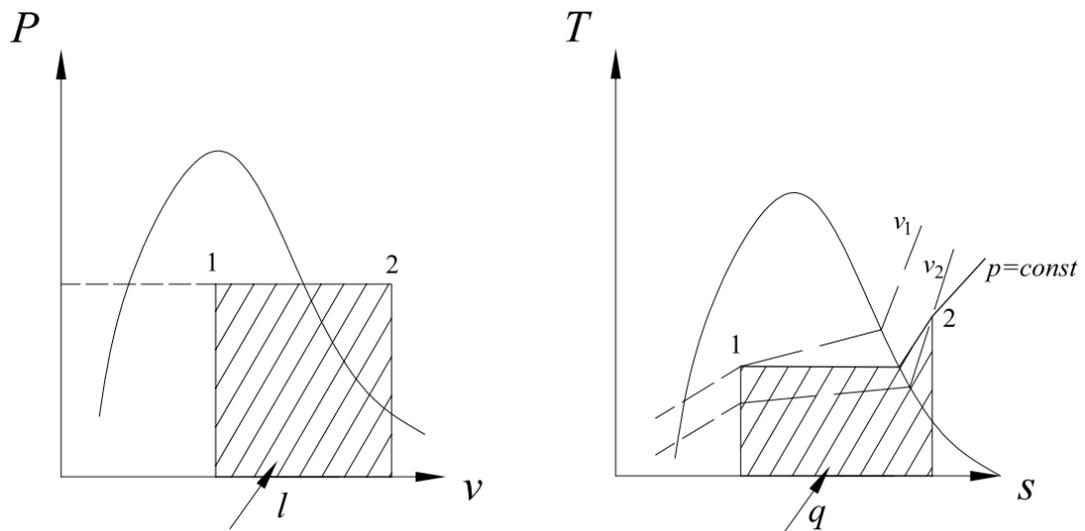


Рисунок 22 – Изобарный процесс

*Изотермический процесс.*

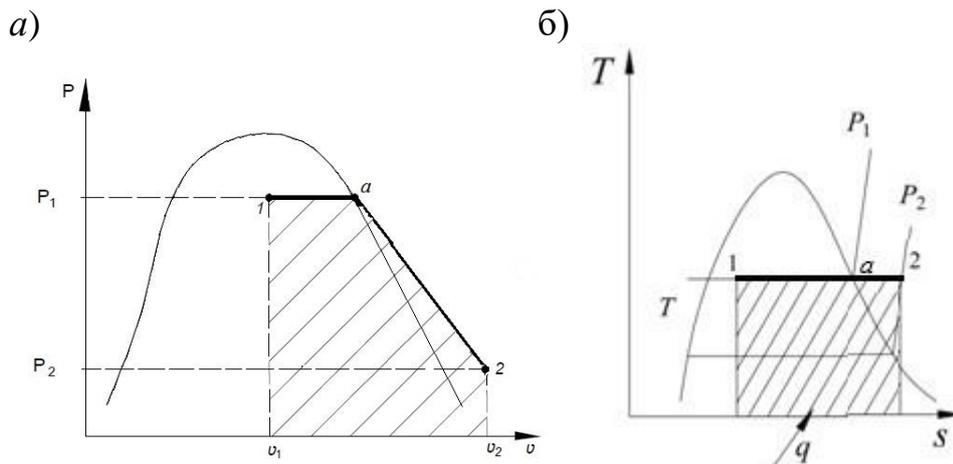


Рисунок 23 – Изотермический процесс

Рассмотрим изотермический процесс подвода теплоты в изотермическом процессе 1–2, представленный на рисунке 23. 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:

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

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 24.

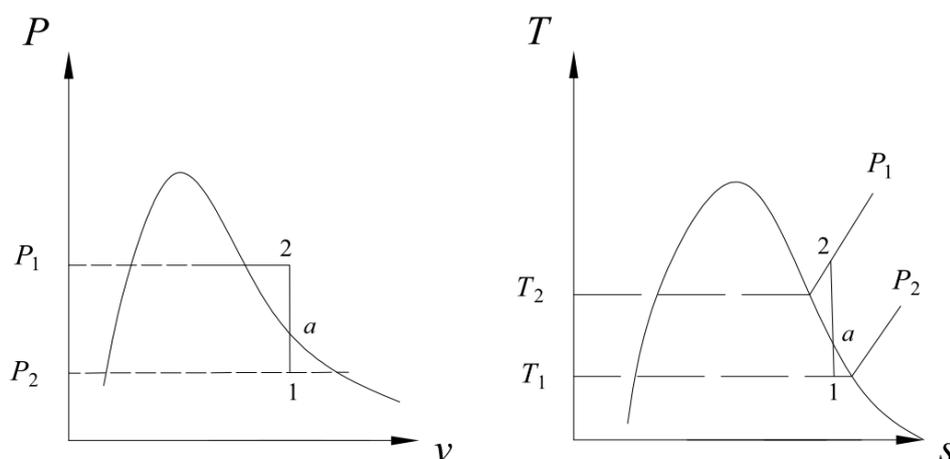


Рисунок 24 – Адиабатный процесс

Поскольку процесс происходит без теплообмена с окружающей средой, энтропия остается неизменной, давление и температура увеличиваются. 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:

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

### Контрольные вопросы

1. Реальные газы (понятие).
2. Уравнение Ван дер Ваальса.
3. Фазовая диаграмма однокомпонентного вещества.
4. Термодинамические процессы реальных газов.

### 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 самопроизвольно, 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, обусловлена хаотическими 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*».

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 (в рассматриваемом случае – температур) отнюдь не вся теплота может быть преобразована в полезную работу. Часть теплоты передается источнику низкой температуры 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 25 представлена схема реализации второго закона термодинамики применительно к тепловому двигателю, холодильной машине или тепловому насосу.

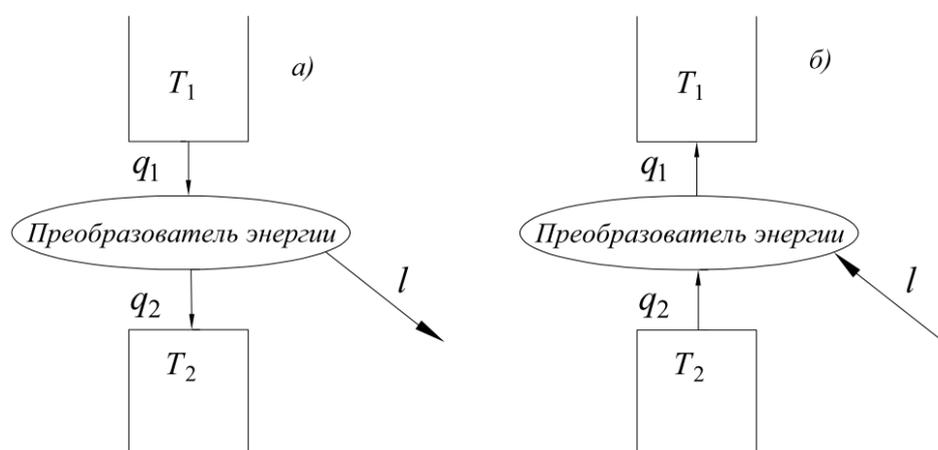


Рисунок 25 – Схема реализации второго закона термодинамики:  
а) применительно к тепловому двигателю;  
б) применительно к холодильной машине или тепловому насосу

В тепловом двигателе (рисунок 25, 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 25, б) осуществляется несамопроизвольный процесс передачи теплоты от источника низкой температуры  $T_2$  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 25, а).

### 3.5.1 Цикл Карно прямого цикла для идеального газа. Коэффициент полезного действия

На рисунке 26 представлена схема осуществления прямого цикла Карно для рабочего вещества в идеальном состоянии.

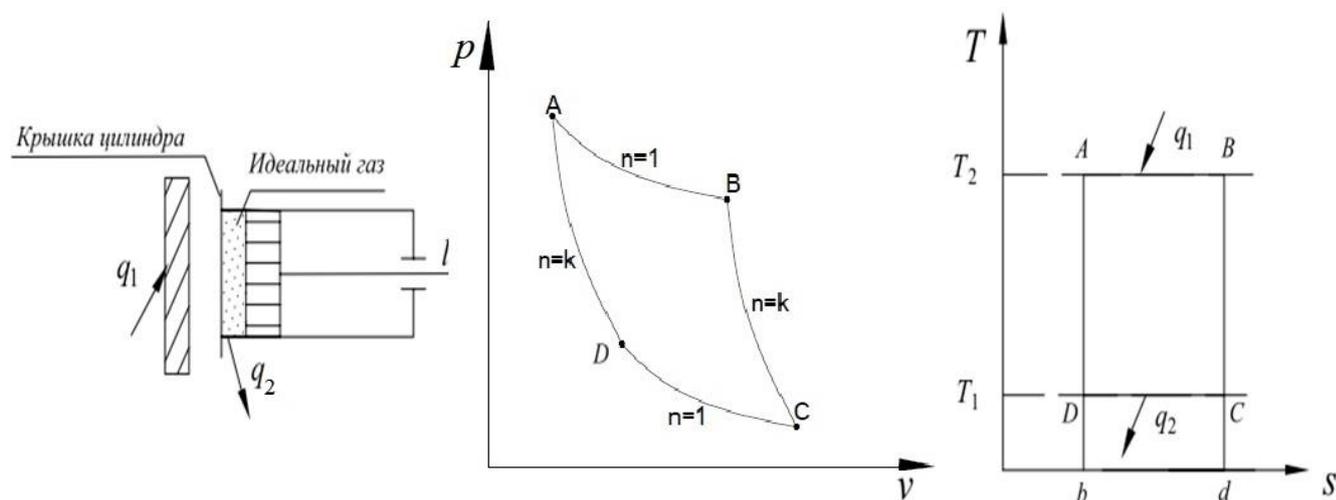


Рисунок 26 – Цикл Карно для идеального газа

На рисунке 26 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  $q_2$  эквивалентная 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» [19], [20] доказывается, что цикл Карно имеет максимальный КПД из всех циклов.

#### **Контрольные вопросы**

1. Второй закон термодинамики.
2. Схемы реализации второго закона термодинамики.
3. Цикл Карно для идеального газа.
4. Коэффициент полезного действия.

## 4 ТЕПЛООБМЕН В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

### 4.1 Теплопроводность

Для более детального ознакомления с теорией теплообмена могут быть рекомендованы учебники по теплообмену или теплопередаче, например: [21,22, 23], а в данном разделе напоминаются основные теоретические положения, как уже было упомянуто выше.

В основе теории теплопроводности лежит закон Фурье, который выражается следующим уравнением:

$$dQ_{\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau, \quad (4.1)$$

где  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – градиент температур – вектор направлен по нормали к изотермической поверхности (рисунок 27);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

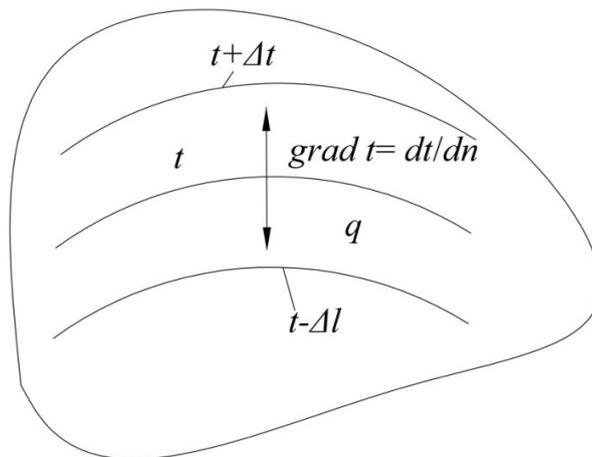


Рисунок 27 – К понятию о температурном градиенте

Знак минус в этом уравнении свидетельствует о том, что любой градиент, являющийся вектором, по законам математики всегда направлен в сторону возрастания скалярной величины в данном случае температуры.

При этом тепловой поток имеет противоположное направление – от большей температуры к меньшей.

В интегральном виде зависимость (4.1) приводится к виду:

$$Q = -\int \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF$$

или для плотности теплового потока

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} . \quad (4.2)$$

Отсюда следует и определение *коэффициента теплопроводности*  $\lambda$  – это количество теплоты, передаваемое в единицу времени через единицу изотермической поверхности при единичном градиенте температур. Коэффициент теплопроводности имеет размерность Дж/[ $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К})/\text{м}$ ], после сокращения в конечном виде Вт/(м·К).

Коэффициент теплопроводности является теплофизическим параметром, зависящим от рода вещества, например: неподвижный воздух –  $\lambda \sim 0,02$  Вт/(м·К), вода –  $\lambda \sim 0,5$  Вт/(м·К), сталь –  $\lambda \sim 50$  Вт/(м·К), медь –  $\lambda \sim 400$  Вт/(м·К). Следует оговориться, что коэффициент теплопроводности зависит также и от температуры, но это следует учитывать при больших разностях температур. Для инженерных расчетов величина  $\lambda$  принимается постоянной для каждого вещества.

Проанализировав данные, представленные выше, можно сделать вывод, что наименьшим коэффициентом теплопроводности обладает неподвижный воздух, чем и объясняется использование пористых структур в качестве теплоизоляционных материалов, например пенополистерол и т.д. Наибольшие значения теплопроводности имеют металлы.

## 4.2. Конвективный теплообмен в однофазной среде

*Конвекцией называется движение макрообъектов жидкости или газа под воздействием различных сил* (например: потоки дыма от горящей сигареты, перемешиваемая жидкость в стакане, потоки теплого воздуха от нагревателя и т.д.). При конвекции макрообъекты (видимые объекты среды) обмениваются кинетической энергией или импульсами. Если конвекция происходит в среде с различными температурами между макрообъемами осуществляется конвективный теплообмен.

При прочих равных условиях интенсивность конвективного теплообмена намного сильнее теплопроводности, при которой теплота передается микрочастицами (атомами, молекулами) в результате их хаотического движения.

Из определения конвективного теплообмена следует понятие теплоотдачи. Теплоотдачей называется теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкостью (либо газом), омывающей данную поверхность.

Процесс теплообмена описывается уравнением Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}) F, \quad (4.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{ж}$  – средняя температура потока жидкости (газа);  $t_{ст}$  – средняя температура стенки.

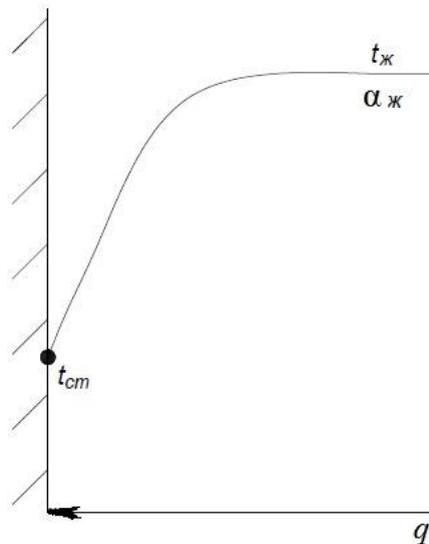


Рисунок 28 – Теплоотдача от жидкости к стенке

*Коэффициент теплоотдачи, в отличие от коэффициента теплопроводности, не является теплофизическим параметром, в основном зависящим от вида вещества. Коэффициент теплоотдачи – это функция процесса, то есть количество теплоты, передаваемой методом конвекции от жидкости к стенке (или наоборот, если температура стенки выше, чем жидкости) через единицу поверхности в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в один градус.*

Размерность коэффициента теплоотдачи Дж/(м<sup>2</sup>·с·К) или Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В общем случае коэффициент теплоотдачи определяется зависимостью вида

$$\alpha = f(\varpi, \lambda, c, \rho, \mu, \beta, \Phi, l_1, l_2, l_3, \Delta t), \quad (4.4)$$

где  $\varpi$  – средняя скорость потока;  $\lambda, c, \rho, \mu, \beta$  – теплофизические свойства жидкости (газа);  $\Phi, l_1, l_2, l_3$  – геометрические параметры;  $\Delta t = t_{ж} - t_{ст}$ .

Коэффициент теплоотдачи зависит от режимов течения среды (жидкости или газа, но, как правило, в обоих случаях употребляется термин жидкость).

При однофазной конвекции известны два основных режима течения: ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме поток состоит из параллельных струйных течений без перемешивания. При ламинарном режиме вклад теплопроводности в общую величину конвективного теплообмена максимальный.

При турбулентном – происходит активное перемешивание потока, наблюдается пульсация скорости, и теплопроводность в ядре потока практически не влияет на теплопередачу

Чрезвычайно важным является следующее обстоятельство: даже при турбулентном режиме имеет место пристенный ламинарный подслой толщиной, в ряде случаев, в десятые доли миллиметра, в котором теплота проводится практически только теплопроводностью (рисунок 29, III).

При этом у самой стенки соблюдается условие «прилипания», при котором скорость среды на поверхности твердого тела равно нулю.

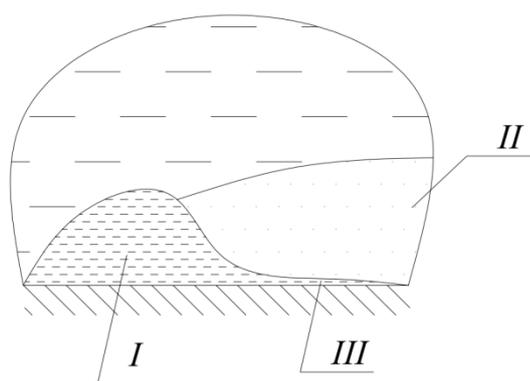


Рисунок 29 – Режимы течений среды при обтекании плоской поверхности:  
I – ламинарный режим; II – турбулентный режим,  
III – ламинарный подслой

В ламинарном подслое I (рисунок 29) перенос теплоты осуществляется только теплопроводностью и подчиняется закону Фурье (4.2):

$$dQ = -\lambda \left( \frac{\partial t_{\text{ж}}}{\partial n} \right)_{\text{ст}} dF d\tau, \quad (4.5)$$

где  $\frac{\partial t_{\text{ж}}}{\partial n}$  – градиент температур у стенки трубы.

В некотором удалении от стенки имеет место турбулентный режим. Строгое математическое описание турбулентного режима затруднительно из-за сложности процесса, поэтому в качестве исходного приходится использовать зависимость (4.3).

Из совместного решения уравнений (4.3) и (4.5) получаем дифференциальное уравнение теплообмена:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}} \left( \frac{\partial t_{\text{ж}}}{\partial n} \right)_{\text{ст}}. \quad (4.6)$$

Математическое описание процессов теплообмена сводится к решению уравнений энергии, движения, сплошности, совместно с условиями однозначности [21].

Учитывая сложность, а в ряде случаев и невозможность аналитического решения системы дифференциальных уравнений, наиболее распространенным методом решения является использование теории подобия. В результате применения этой теории все величины, входящие в систему дифференциальных уравнений, группируются в виде безразмерных комплексов – критериев подобия.

Критерии подобия разделяются на определяющие и определяемые. Определяющие включают в себя величины, состоящие из условий однозначности, то есть из значений параметров, входящих в математическое описание процесса. Критерии подобия, состоящие из зависимых, искомых величин, именуются определяемыми. В задачах конвективного теплообмена определяемыми чаще всего бывают температура и коэффициент теплоотдачи.

Общий вид уравнения подобия, описывающего конвективный теплообмен, приводится к виду:

$$Nu_{ж} = f(Re_{ж}, Pr_{ж}, Gr_{ж}, L/d, Pr_{ж}/Pr_{ст}) \quad (4.7)$$

В уравнении (4.7) определяемым является критерий Нуссельта  $Nu = (\alpha \cdot d) / \lambda$ , все прочие – определяющими.

Критерий Рейнольдса  $Re = (w \cdot d) / \nu$  – выражает соотношение сил инерции (скорость) и сил трения (вязкость). Критерий Прандтля  $Pr = \nu / a$ . Коэффициент температуропроводности –  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ .  $Pr$  состоит только из теплофизических свойств и зависит от рода вещества и температуры. Критерий Грасгофа  $Gr = ((g \cdot d^3) / \nu^2) \cdot \beta \cdot \Delta t$  – выражает соотношение сил гравитации и вязкости, помимо теплофизических свойств и определяющего размера  $d$ , включает коэффициент объемного расширения  $\beta$  и разность температур  $\Delta t = t_{ж} - t_{ст}$ . Соотношение  $Pr_{ж}/Pr_{ст}$  определяется из теплофизических свойств взятых при температурах жидкости и стенки.

Важно отметить, что в систему критериев включена величина  $L/d$ , отражающая отношение характерных размеров. При течении в трубе характерным размером является отношение внутреннего диаметра и длины трубы. При обтекании плоской пластины это соотношение не вводится, а определяющим является  $L$  – длина пластины, которая входит в критерии  $Re$  и  $Gr$ .

### 4.3 Теплообмен в трубах

Критерий Грасгофа не учитывается для турбулентного режима течения, и зависимость (4.7) приобретает вид:

$$\overline{Nu}_ж = c Re_ж^m Pr_ж^n \quad (4.8)$$

Турбулентный режим в трубах наступает при значениях  $Re_ж^m > 10^5$ , и используется уравнение

$$\overline{Nu}_ж = 0,0296 Re_ж^{0,8} Pr_ж^{0,43} \left( \frac{Pr_ж}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_l \quad (4.9)$$

где коэффициент  $\varepsilon_l$  учитывает изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы. При  $L/d > 50$ ,  $\varepsilon_l = 1$ ; при  $L/d < 50$ ,  $\varepsilon_l > 1$  и принимается согласно методике [20].

Ламинарный режим при течении в трубе наступает при значениях критерия Рейнольдса  $Re < 2300$ . Различают две формы ламинарного движения: вязкостное и вязкостно-гравитационное. Кроме того, движение жидкости может быть свободным, обусловленным разностью температур, и вынужденным, вызванным действием вентилятора, компрессора и т.д.

Ламинарный режим при вынужденной конвекции именуется вязкостным. Для энергетических установок предлагается формула [21]:

$$\overline{Nu}_{ж,x} = 0,33 Re_{ж(x)}^{0,5} Pr_{ж(x)}^{0,43} \left( \frac{Pr_ж}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \left( \frac{x}{d} \right)^{0,1} \quad (4.10)$$

В качестве определяющего размера принято расстояние рассматриваемого сечения от начала трубы, а в качестве определяющей температуры – средняя температура в данном сечении.

При вязкостно-гравитационном режиме учитывается естественная конвекция, при которой критерий Грасгофа является определяющим.

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,15 Re_{ж,d}^{0,33} Pr_{ж,d}^{0,33} (Gr_ж Pr_ж)^{0,1} \left( \frac{Pr_ж}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_l \quad (4.11)$$

При  $L/d \geq 50$ ,  $\varepsilon_l = 1$ ; при  $L/d \leq 50$ ,  $\varepsilon_l = 1,9 \div 1,02$  [21]).

Теплоотдача при значениях  $Re$  от  $2 \cdot 10^3$  до  $10^4$  происходит при переходном режиме. Переходный режим характеризуется неустойчивостью, при которой происходит смена турбулентного и ламинарного режимов.

Неустойчивость, имеющая вероятностный характер, приближенно оценивается коэффициентом *перемежаемости*  $\varepsilon_l$ , величина которого изменяется от 0 до 1, в зависимости от соотношения длины и диаметра, а также величины  $Re$  [20].

### 4.3.1. Теплоотдача при поперечном обмывании пучков труб

Теплообменные аппараты часто выполняют в виде трубного пучка, имеющего шахматное (рисунок 30, б) или коридорное (рисунок 30, а) расположение труб [20]. Трубный пучок обычно помещается в цилиндрическую обечайку.

Характеристикой пучка является поперечный шаг  $s_1$ , продольный шаг  $s_2$ , диаметр труб  $d$  и количество труб по ходу жидкости (пара).

Течение жидкости (пара) может быть ламинарным или турбулентным, а также смешанным.

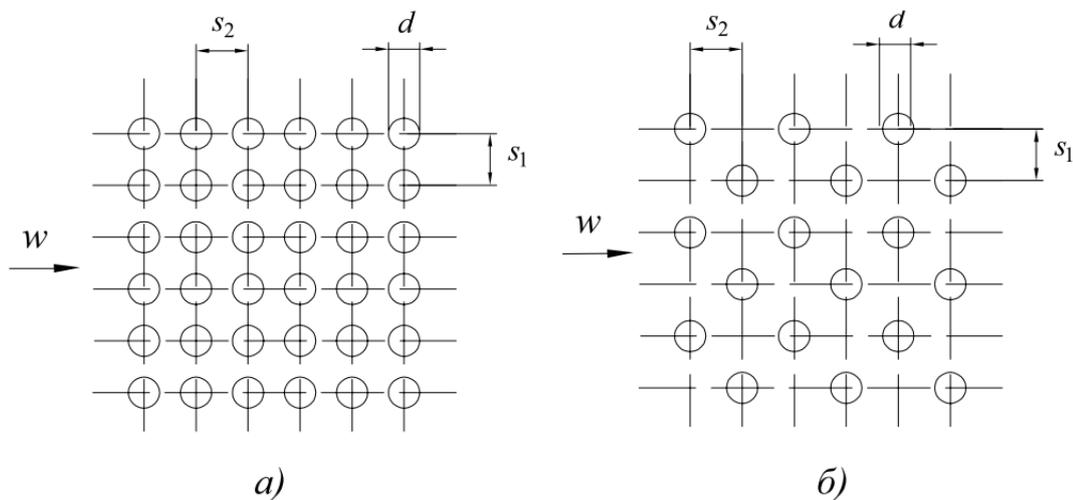


Рисунок 30 – Схема расположения труб в:  
а) коридорном, б) в шахматном пучках труб

Чаще всего трубные пучки котельных агрегатов омываются потоком со смешанным режимом течения. Можно принять в качестве ориентира критическое значение критерия Рейнольдса, при котором наступает турбулентный режим течения на пучке труб  $Re_{кр} > 10^5$ . При меньших значениях режим является смешанным. Смешанному режиму соответствует диапазон  $10^3 < Re < 10^5$ .

Согласно [20], величина среднего коэффициента теплоотдачи для смешанного режима и определенного ряда труб может быть определена по уравнению:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = c Re_{ж,d}^n Pr_{ж}^{0,33} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \varepsilon_c \varepsilon_l, \quad (4.12)$$

где для шахматных пучков  $c = 0,41$ ,  $n = 0,60$ ; для коридорных  $c = 0,26$ ,  $n = 0,65$ . Определяющим размером является диаметр труб.

Скорость жидкости рассчитывается по самому узкому поперечному сечению пучка. Определяющей температурой является средняя температура жидкости.

Поправочный коэффициент  $\varepsilon_s$  учитывает влияние относительных шагов  $s/d$ . Для коридорного пучка  $\varepsilon_s = (s_2/d)^{-0,15}$ , для шахматного пучка при  $s_1/s_2 < 2$ ,  $\varepsilon_s = (s_1/s_2)^{1/6}$ ; а при  $s_1/s_2 \geq 2$ ,  $\varepsilon_s = 1,12$ .

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи всего пучка в целом проводится осреднение средних значений  $\bar{\alpha}_i$  полученных по уравнению (4.12) для отдельных рядов:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \bar{\alpha}_i F_i}{\sum_{i=1}^{i=n} F_i}, \quad (4.13)$$

где  $\alpha_i$  – средний коэффициент теплоотдачи  $i$ -го ряда,  $F_i$  – суммарная поверхность труб  $i$ -го ряда,  $n$  – число трубок в пучке, если  $F_1 = F_2 \dots F_n$ , то формула (4.13) упрощается:

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 + (n-2)\bar{\alpha}_3}{n}. \quad (4.14)$$

При этом  $\bar{\alpha}_1 = \varepsilon_1 \bar{\alpha}_3$ ,  $\bar{\alpha}_2 = \varepsilon_2 \bar{\alpha}_3$ .

При значениях  $s/d < 4$  поправочный коэффициент  $\varepsilon$  может быть найден по диаграмме (рисунок 31).

По сравнению со смешанным режимом течения, турбулентный режим изучен гораздо хуже [21], и для практических задач расчета парогенераторов рекомендована зависимость (4.12), полученная для смешанного режима.

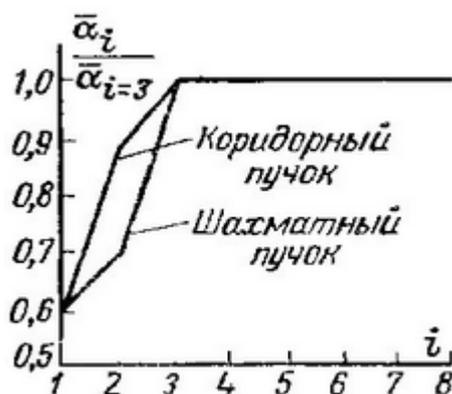


Рисунок 31 – Диаграмма изменения коэффициентов теплоотдачи по рядам пучков

### 4.3.2 Теплоотдача при свободном движении жидкости в большом объеме

Свободное движение возникает за счет массовых сил (объемных). Таковыми являются силы тяжести, центробежные силы и др.

Наиболее хорошо изучено движение за счет сил тяжести. Именно вопросы теплоотдачи при конвекции, обусловленной гравитацией, будут рассмотрены в данной главе.

При теплообмене температура жидкости меняется, поэтому возникает разность плотности и, как следствие, наличие гравитационных сил, обуславливающих движение.

В уравнении движения [20] гравитационная сила, учитывающая членом  $\rho g$  и имеющая размерность силы отнесенной к единице объема.

*Теплоотдача при свободном ламинарном движении у вертикальной стенки.*

Задача теплообмена при свободном движении вдоль вертикальной поверхности решается аналитически при следующих допущениях:

1. силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с силами тяжести;
2. конвективный перенос теплоты вдоль движущегося потока жидкости не учитывается;
3. не учитывается градиент давления;
4. плотность является линейной функцией температуры.

Остальные физические свойства принимаются постоянными. Вывод уравнения приведен в [21].

Результат аналитического решения в размерном виде представлен в виде следующего уравнения:

$$\alpha = 0,473 \sqrt[4]{\frac{c_p \beta \rho_0^2 g v_c \lambda^3}{\mu x}}, \quad (4.15)$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $v_c = t_c - t_0$ ;  $t_0$  – температура в нулевой точке;  $x$  – текущая координата во высоте.

Уравнение (4.15) может быть преобразовано к безразмерному виду:

$$Nu_x = 0,473 (Gr_x Pr)^{0,25}, \quad (4.16)$$

где  $Gr = \frac{g \beta v_c x^3}{\mu^2 / \rho_0^2} = \frac{g \beta v_c x}{v_0^2}$ ;  $Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$ .

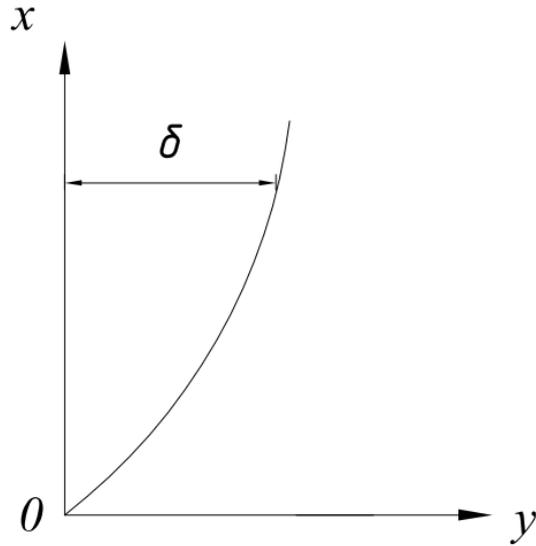


Рисунок 32 – Движущийся слой жидкости толщиной  $\delta$  вдоль поверхности стены

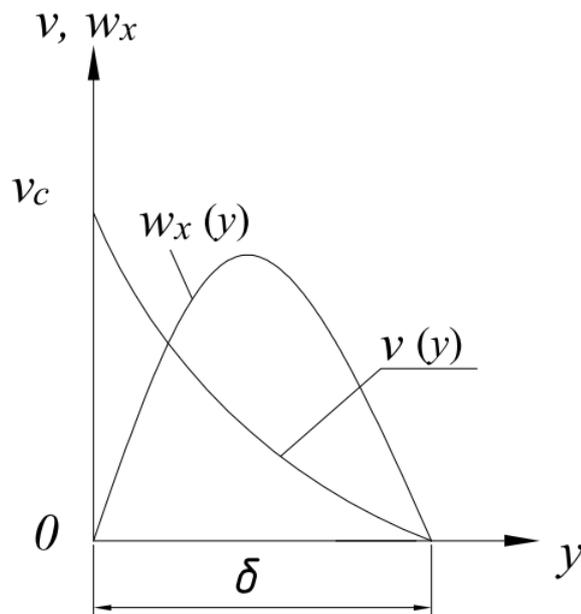


Рисунок 33 – Распределение температур и скорости в движущемся слое жидкости

Величина среднего коэффициента теплоотдачи при течении вдоль вертикальной пластины высотой  $l$  при  $t_c = const$  может быть найдена из выражения:

$$Nu_l = 0,63 (Gr_l Pr)^{0,25} \quad (4.17)$$

Формулы (4.16), (4.17) не учитывают изменение теплофизических свойств по мере удаления от стенки, что приводит к некоторым неточностям. Для расчета можно использовать зависимость:

$$\overline{Nu}_{ж,x} = 0,6 \left( Gr_{ж,x} Pr_{ж} \right)^{0,25} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (4.18)$$

Расчет среднего значения  $\alpha$  с учетом поправки на изменение свойств можно проводить по формуле:

$$\overline{Nu}_{ж,l} = 0,75 \left( Gr_{ж,l} Pr_{ж} \right)^{0,25} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (4.19)$$

*Теплоотдача при свободном турбулентном движении вдоль вертикальной пластины.*

По данным [20], развитое турбулентное движение наступает при значениях  $(Gr_{ж,x} \cdot Pr) \geq 6 \cdot 10^{10}$ .

Установлено, что при развитом турбулентном режиме коэффициент теплоотдачи не зависит от линейного размера, а, следовательно, локальный коэффициент теплоотдачи равен среднему:

$$\overline{Nu}_{ж,x} = 0,15 \left( Gr_{ж,x} Pr_{ж} \right)^{1/3} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (4.20)$$

где  $\overline{Nu}_{ж,x} = \frac{\alpha x}{\lambda_{ж}}$ ;  $Gr_{ж,x} = \frac{g \beta v_c x}{\nu_{ж}^2}$

*Теплообмен при свободном движении около горизонтальной трубы.* В настоящее время наиболее точная методика расчета теплоотдачи при свободном движении у горизонтальной трубы получена для ламинарного режима:

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,5 \left( Gr_{ж,d} Pr_{ж} \right)^{1/3} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (4.21)$$

### 4.3.3 Теплоотдача при свободном движении в ограниченном пространстве

В предыдущих разделах были рассмотрены вопросы теплообмена при свободном движении в неограниченном пространстве.

К этой категории относится теплообмен между стенкой здания и окружающей средой, теплообмен между трубопроводом с горячей водой и окружающим воздухом и т.д.

Часто теплообмен происходит в ограниченном пространстве, например, теплоотдача в пространстве между оконными стеклами, в различных щелевых зазорах и т.д.

Свободное движение в горизонтальной щели схематично представлено на рисунке 34, б.

Движение отсутствует, если температура верхней пластины больше температуры нижней  $t_{c1} > t_{c2}$  (рисунок 34, в). Если температура нижней выше, чем верхней, в щелевом пространстве образуются конвективные потоки (рисунок 34, г). В щелевом зазоре «труба в трубе» характер потоков изображен на рисунке 34, д, е, ж.

В расчетной практике принято заменять сложный процесс конвективной передачи теплоты через щелевой зазор эквивалентным переносом теплопроводности. В этом случае тепловой поток можно определить по формуле:

$$q = (\lambda_{\text{экв}} / \delta) \cdot (t_{c1} - t_{c2}), \quad (4.22.)$$

где  $\lambda_{\text{экв}}$  – так называемый эквивалентный коэффициент теплопроводности.

В предельном случае при сближении стенок и уменьшения щелевого зазора эквивалентный коэффициент теплопроводности приближается к истинному  $\lambda_{\text{экв}} \rightarrow \lambda$ .

Происходит это из-за того, что восходящие и нисходящие конвективные потоки затормаживаются стенками канала.

В общем случае имеет место конвективный перенос теплоты  $\lambda_{\text{экв}} / \lambda = \varepsilon_k > 1$ . В этом выражении  $\varepsilon_k$  – коэффициент конвекции и является функцией  $Gr \cdot Pr = Ra$  (критерий Ралея):

$$Ra_{\text{cp}\delta} = g \frac{\delta^3 \beta \Delta t}{\nu a},$$

где  $\delta$  – размер щелевого зазора;  $\Delta t = t_{c1} - t_{c2}$ .

При значениях  $10^3 < Ra < 10^{10}$  выражение для  $\varepsilon_k$  имеет вид [20]:

$$\varepsilon_k \cong 0,18 Ra_{\text{cp}\delta}^{0,25}$$

При  $Ra < 10^3$ ,  $\varepsilon_k = 1$  и  $\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda$ .

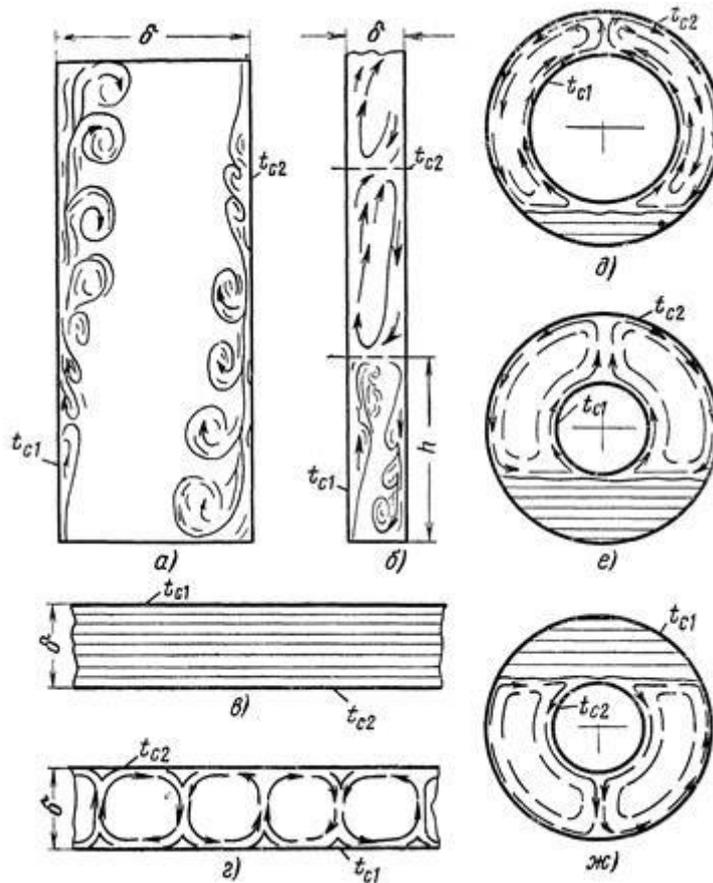


Рис. 34 – Теплоотдача в ограниченном пространстве

### Контрольные вопросы

1. Теплопроводность. Коэффициент теплопроводности.
2. Конвективный теплообмен Коэффициент теплоотдачи.
3. Общий вид уравнения подобия конвективного теплообмена. Критерии подобия.
4. Расчёт теплоотдачи при конвективном теплообмене внутри трубы.
5. Теплоотдача при свободном движении жидкости в большом объеме.
6. Теплоотдача при свободном движении в ограниченном пространстве.

## 4.4 Теплопередача

### 4.4.1 Теплопередача через плоские и цилиндрические поверхности

В предыдущих разделах были рассмотрены две важнейших характеристики теплообменных процессов: коэффициент теплопроводности  $\lambda$  (Вт/(м·К)) как мера хаотичного движения микрочастиц и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) как характеристика конвективного переноса теплоты.

Для практических расчетов интерес, как правило, представляет передача теплоты через твердую теплопередающую поверхность. Почти всегда эта стенка теплообменного аппарата.

Рассмотрим самый общий случай передачи теплоты через плоскую стенку при стационарном режиме, когда  $dt/d\tau = 0$ , то есть температуры не меняются во времени.

В учебниках по теплопередаче [19], [20] вводится понятие граничных условий I, II и III рода. В первом случае задаются температуры теплопередающей  $t'$  и  $t''$  и коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda$  и толщина стенки  $\delta$  (рисунок 35).

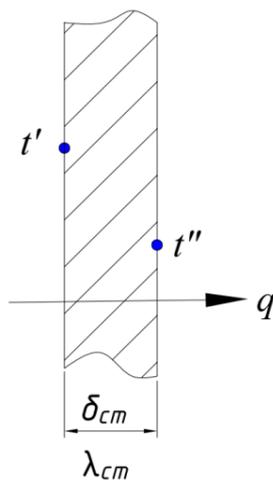


Рисунок 35 – Теплопередача при граничных условиях I рода

При граничных условиях II рода задается плотность теплового потока.

При граничных условиях III рода задается толщина и теплопроводность стенки, коэффициенты теплоотдачи более нагретой жидкости (газа) с одной стороны  $\alpha_1$  и менее нагретой  $\alpha_2$  с другой стороны. А также задаются температуры обеих сред  $t_1$  и  $t_2$ . Таким образом, тепло передается конвекцией от более нагретой жидкости к одной поверхности стенки, затем через стенку теплопроводностью и далее от другой поверхности к менее нагретой жидкости также с помощью конвекции (рис. 36).

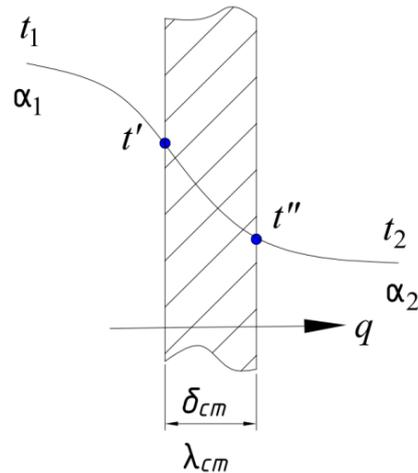


Рисунок 36 – Теплопередача через плоскую стенку при граничных условиях III рода

Рассмотренные случаи именуются теплопередачей. Расчет величины плотности теплового потока через плоскую стенку производится по формуле (Вт/м<sup>2</sup>):

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (4.23)$$

Введем понятие коэффициента теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (4.24)$$

При граничных условиях I рода уравнение (4.24) приводится к виду:

$$k = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2).$$

*Коэффициент теплопередачи  $k$  – это количество теплоты, передаваемой от одной среды к другой через один метр квадратный теплопередающей поверхности в единицу времени при разности температур между средами в один градус. Размерность коэффициента теплопередачи такая же, как и коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).*

Величина, стоящая в знаменателе уравнения (4.24), называется термическим сопротивлением  $R$ . В случае многослойной теплопередающей поверхности величина термического сопротивления имеет вид

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (4.25)$$

Приведённое уравнение (4.23) является формулой общего вида. При этом рассматривается передача теплоты через плоскую поверхность, что в практике теплообменного аппаратостроения встречается достаточно редко. Чаще одна из жидкостей движется внутри труб, а другая обтекает трубу или трубный пучок. Теплопередача через цилиндрическую стенку схематично представлена на рисунке 37.

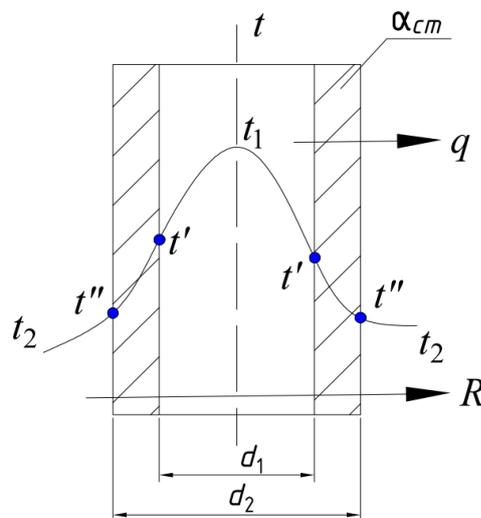


Рисунок 37 – Теплопередача через цилиндрическую стенку

Для этого случая уравнение (4.23) приводится в виде

$$q_l = \frac{\pi (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2 \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_n}} \quad (4.26)$$

Важно отметить, что при теплопередаче через цилиндрическую поверхность плотность теплового потока имеет размерность Вт/м, в отличие от плотности теплового потока через плоскую стенку согласно (4.23) – Вт/м<sup>2</sup>.

Выражение (4.26) описывает теплопередачу через многослойную цилиндрическую стенку (например, внутри трубы движется вода или масло, а снаружи изоляция).

В [21] подробно рассматриваются иные случаи теплопередачи, в частности нестационарный, когда  $dt/d\tau \neq 0$  (нагрев, охлаждение) либо теплообмена через шаровую поверхность.

#### 4.4.2 Теплопередача через оребрённые поверхности

Одним из способов интенсификации теплообменных аппаратов является развитие поверхности со стороны среды, имеющей меньший коэффициент теплоотдачи. Практически это достигается с помощью оребрения теплопередающей поверхности (рис. 38).

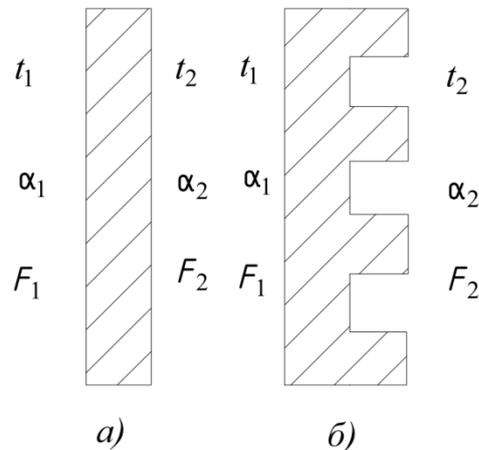


Рисунок 38 – Теплопередача через:  
*a)* плоскую ( $F_1=F_2$ ), *б)* оребренную ( $F_1 < F_2$ ) поверхности

Количество теплоты, передаваемое через любую гладкую поверхность  $F$ , равно:

$$Q = (t_1 - t_2) / R, \quad (4.27)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры греющих сред;  $R$  – полное термическое сопротивление, равное сумме термических сопротивлений первой ( $R_1$ ) и второй ( $R_2$ ) стороны и термического сопротивления стенки  $R$  в соответствии с формулой 4.23. Если стенки выполнены из металла высокой теплопроводности (медь, алюминий), то сопротивлением  $R$  можно пренебречь.

В общем случае сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  зависят не только от коэффициентов теплоотдачи  $1/\alpha_1$  и  $1/\alpha_2$  (уравнение (4.23) и рисунок 38, *a*), но и от формы и размеров поверхности теплообмена. В частности, для цилиндрической поверхности:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 \pi d_1 l}; \quad R_2 = \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2 l}$$

или

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 F_1} \quad R_2 = \frac{1}{\alpha_2 F_2}$$

Полное термическое сопротивление в этом случае равно:

$$R = \frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}.$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}}$$

При этом количество переданной теплоты

$$Q = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}}.$$

Если принять равенство площадей  $F_1 = F_2$  и пренебречь термическим сопротивлением стенки, то количество передаваемой теплоты зависит только от величины коэффициентов теплоотдачи с обеих сторон. При этом коэффициент теплопередачи оказывается меньше меньшего значения  $\alpha$ . Например, если  $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , то  $k = 9,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  (уравнение 4.23). *Иначе говоря, интенсивность теплопередачи через поверхность определяется величиной меньшего коэффициента теплоотдачи*

Уменьшить термическое сопротивление  $R_2$  и, соответственно, увеличить теплопередачу  $k$  при неизменном  $\alpha_2$  можно за счет увеличения поверхности  $F_2$  (рисунок 38, б).

Отношение большей поверхности теплообмена к меньшей называется коэффициентом оребрения  $\beta$ . Из условий равенства  $R_1$  и  $R_2$  следует соотношение  $\beta = F_2/F_1 = \alpha_1/\alpha_2$  или  $R_1 = R_2$ . Общее термическое сопротивление, для выше рассмотренного случая,  $\beta=100$ , а  $k = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

В действительности величина коэффициента оребрения  $\beta$  определяется не только соотношением  $\alpha_1/\alpha_2$ , но и материалом ребра, его формой, размерами.

Для расчета теплообменных аппаратов удобнее иметь дело не с истинными значениями коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а заменив меньшее

значение  $\alpha$  условной величиной, именуемой *приведенным коэффициентом теплоотдачи*.

Эта величина может быть получена, если теплота, переводимая всей оребренной поверхностью, будет отнесена к разности температур между температурой у основания ребра  $t_0$  и температурой жидкости со стороны гладкой поверхности  $t_{ж}$  (рисунок 39).

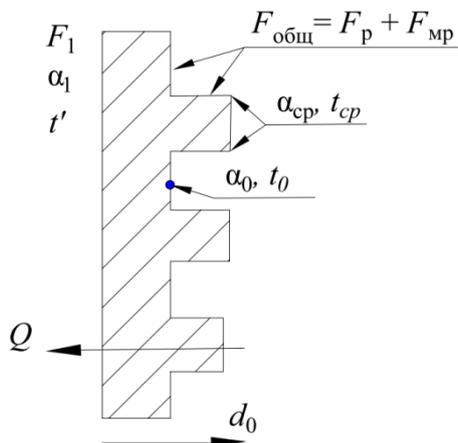


Рисунок 39 – К определению приведенного коэффициента теплоотдачи

В этом случае  $F_{общ.}$  – общая оребренная поверхность, равная сумме поверхности ребер  $F_p$  и межреберных участков  $F_{м.р.}$ :

$$F_{общ.} = F_p + F_{м.р.}$$

Поверхность  $F_0$  – поверхность гладкой трубы у основания ребер.

При  $t_0 > t_{ж}$  общее количество передаваемой теплоты будет равно

$$Q = Q_p + Q_{м.р.} = \alpha(t_{cp} - t_{ж}) F_p + \alpha_0(t_0 - t_{ж}) F_{м.р.}, \quad (4.28)$$

где  $t_{cp}$  и  $\alpha$  – средняя температура поверхности ребра и коэффициент теплоотдачи к поверхности ребра,  $t_0$  и  $\alpha_0$  – температура и коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубы.

Принимаем  $\alpha = \alpha_0$  и заменяем разности температур избыточными температурами, тогда

$$Q = \alpha \theta_{cp} F_p + \alpha \theta_0 F_{м.р.} \quad (4.29)$$

Введем величину коэффициента эффективности ребра  $E = \theta_{cp}/\theta_0$ , тогда

$$Q = \alpha \left( \frac{F_p}{F_{ореб}} E + F_{м.р.} \right) \quad (4.30)$$

В качестве расчетной поверхности может быть принята не  $F_{\text{орёб}}$ , а  $F_0$ , тогда уравнение (4.30) будет иметь вид

$$Q = \alpha \left( \frac{F_p}{F_0} E + F_{\text{м.р}} \right) \quad (4.31)$$

Тогда приведенный коэффициент теплоотдачи для уравнения (4.30) имеет вид

$$\alpha_{\text{пр1}} = \alpha \left( \frac{F_p}{F_{\text{общ}}} E + F_{\text{м.р}} \right) \quad (4.32)$$

В случае использования уравнения (4.31)

$$\alpha_{\text{пр2}} = \alpha \left( \frac{F_p}{F_0} E + F_{\text{м.р}} \right) \quad (4.33)$$

Расчет теплоотдачи через оребренные поверхности труб подробно изложен в [20–21].

#### **Контрольные вопросы**

1. Теплопередача через плоские и цилиндрические поверхности.
2. Коэффициент теплопередачи.
3. Термическое сопротивление.
4. Теплопередача через оребренные поверхности.
5. Коэффициент оребрения, эффективность ребра.
6. Приведенный коэффициент теплоотдачи.

## **4.5 Теплообмен при фазовых переходах**

### **4.5.1 Теплообмен при кипении**

Механизм процесса кипения достаточно подробно изложен в источниках [20]–[23]. Применительно к энергетическим установкам этот процесс происходит в парогенераторах, паровых котлах. В современных конструкциях аппаратов кипение происходит в основном на твердых поверхностях паровых котлов, в том числе на поверхности труб и внутри труб.

При резком сбросе давления возможно также объемное вскипание жидкости.

*Различают два основных режима кипения: пузырьковое и пленочное.* В первом случае паровая фаза образуется в виде отдельных паровых пузырей, растущих и отрывающихся на твердой поверхности. С возрастанием теплового потока до некоторого критического значения паровые пузыри сливаются, образуя паровую пленку, отделяющую объем жидкости от стенки трубы. Этот режим называется пленочным и носит кризисный характер (кризис второго рода).

Кризис кипения наиболее опасен для энергетических установок. Коэффициент теплоотдачи при контакте поверхности теплообмена с паром на несколько порядков ниже, чем при соприкосновении с жидкостью. В этом случае в соответствии с формулой 4.24 резко возрастает термическое сопротивление, снижается коэффициент теплопередачи и, соответственно, увеличивается температура стенки теплопередающей поверхности парогенератора. Температура стенки может даже превысить температуру плавления металла. Применительно к ядерным энергетическим установкам такой сценарий чреват утечкой радиации и, соответственно, катастрофическими последствиями.

Исходя из этого, следует, что важнейшей проблемой энергетического аппаратостроения является возможность прогнозирования кризисного пленочного режима. Для этой цели перспективен метод, основанный на использовании истинного объемного паросодержания двухфазного потока [23].

Методика расчета теплообмена при кипении является важнейшей теоретической и экспериментальной задачей.

Для развитого пузырькового кипения широкое распространение получила теория Г.Н. Кружилина [21].

Физическая модель Г.Н. Кружилина предполагает, что при пузырьковом кипении тепловой поток от поверхности теплообмена передается жидкой фазе. При этом теплотой, воспринимаемой паровой фазой, пренебрегаем.

Рассматривается процесс кипения на ровной плоской поверхности, размер которой несопоставимо велик по сравнению с величиной паровых пузырей.

Рассматривается система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, описывающее температурное поле в жидкой фазе.

Оно включает: уравнение энергии

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{\omega} \text{ grad } t = a \nabla^2 t,$$

уравнение движения

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial \tau} + (\vec{\omega} \text{ grad } p) \vec{\omega} = -\frac{1}{\rho} \text{ grad } p + \nu \nabla^2 \vec{\omega},$$

уравнение сплошности

$$di \text{ v } \vec{\omega} = 0.$$

Система уравнений конвективного теплообмена дополняется уравнениями движения и теплообмена одиночного пузыря.

Условие движения парового пузыря характеризуется равновесием подъемной силы и силы гидравлического сопротивления:

$$\frac{\pi}{6} d^3 g (\rho' - \rho'') = c \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\rho' u^2}{2},$$

где  $d$  – текущее значение диаметра пузыря,  $u = w'' - w'$  – относительная скорость подъема пузыря,  $c$  – коэффициент лобового сопротивления.

Уравнение теплообмена на поверхности парового пузыря характеризует тепловой поток, подводимый к поверхности пузыря за счет теплопроводности жидкости и затрачиваемой на испарение:

$$-\int \lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} dF = r \rho'' \frac{d}{dt} \left( \frac{\pi d^3}{6} \right).$$

В реальных условиях на единице поверхности действует конечное число центров парообразования, и их влияние на теплообмен учитывается функцией

$$Z = f(d_0, R_k),$$

где  $R_k$  – критический радиус пузыря в момент его зарождения на поверхности,  $d_0$  – отрывной диаметр пузыря.

Анализ системы дифференциальных уравнений и условие однозначности (температура жидкости равна температуре насыщения) позволяет получить уравнение подобия в виде:

$$\frac{\alpha d_0}{\lambda'} = \Phi \left( \frac{v'}{a'}, \frac{R_k}{d_0}, \frac{c_p \Delta t}{r}, \frac{\rho'}{\rho''} \right), \quad (4.34)$$

где  $a'$  – коэффициент температуропроводности жидкости.

Считаем, что  $d_0$  пропорционален капиллярной постоянной  $\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' \rho'')}} , R_k = f(\Delta t)$  или  $\Delta t = t_c - t_n$  – перегрев жидкости у поверхности стен.

В результате получаем безразмерные величины:

$$Nu = \frac{\alpha \delta}{\lambda'}; K_z = \frac{R_k c_p \Delta t \rho'}{2 \delta r \rho''} = \frac{l_*}{\delta}; K_q = \frac{q \delta}{\rho'' a' r l_*}.$$

В свою очередь  $l_*$  можно определить по следующему выражению:

$$l_* = \frac{R_k c_p \Delta t \rho'}{2 r \rho''} = \frac{1}{2} R_k Ja$$

где критерий Якоба  $Ja = \frac{c_p \Delta t \rho'}{r \rho''}$ .

Величина  $l_*$  является характерным размером для паровой фазы, критерий Якоба характеризует соотношение энтальпий перегрева к теплоте парообразования.

Уравнение (4.34) может быть приведено к виду:

$$Nu = 0,082 \cdot K_z^{0,33} \cdot K_q^{0,7} \cdot Pr^{-0,45}. \quad (4.35)$$

Принимая автомодельность теплоотдачи относительно ускорения свободного падения, выражение (4.35) упрощается:

$$Nu_* = \Phi(Re_*, Pr'), \quad (4.36)$$

где

$$Nu_* = \frac{\alpha l_*}{\lambda'}; Re_* = \frac{w_* l_*}{\nu}; Pr' = \frac{v'}{a}. \quad (4.37)$$

Используя уравнение (4.36), при обработке опытных данных получаем зависимость:

$$Nu_* = c \cdot Re_*^n \cdot (Pr')^{1/3} \quad (4.38)$$

В таблице 11 приведены к табличному виду величины коэффициентов  $c$  и  $n$  уравнения 4.38.

Значение коэффициентов  $c$  и  $n$ 

$Re^*$	$c$	$n$
$\leq 0.01$	0.0625	0.5
$\geq 0.01$	0.125	0.65

Для кипения воды могут быть использованы эмпирические формулы:

$$\alpha = 3,0 \cdot q^{0,7} \cdot p^{0,15}. \quad (4.39)$$

$$\alpha = 38,7 \cdot \Delta t^{0,33} \cdot p^{0,5}, \quad (4.40)$$

где размерность  $q$  и  $p$  – соответственно, Вт/м<sup>2</sup> и бар.

*Кипение на трубных пучках.*

Поверхностью теплообмена при кипении в реальных парогенераторах могут служить трубные пучки, погруженные в объем жидкости. В этом случае подвод теплоты осуществляется изнутри труб.

При кипении на пучке труб теплоотдача определяется не только условиями парообразования на поверхности, но и конвективным воздействием восходящих двухфазных потоков. Поэтому теплоотдача при кипении на верхних рядах пучка оказывается выше, чем на нижних (рисунок 40) [21].

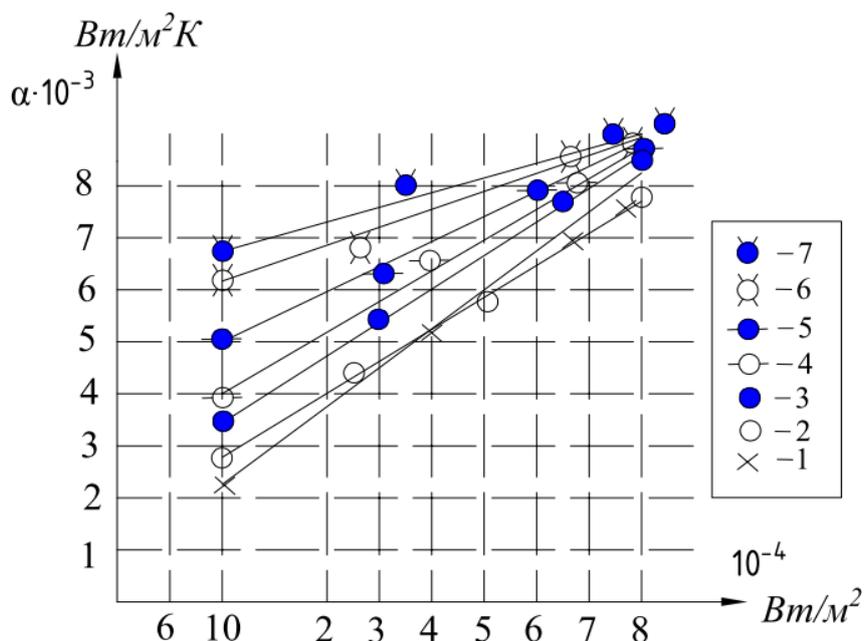


Рисунок 40 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока в трубном пучке (кипение воды)

Характерно, что интенсифицирующее воздействие двухфазного потока проявляется наиболее значительно при меньших значениях  $q$ . При больших  $q$  влияние конвекции не так значительно. По всей видимости при высоких значениях плотности теплового потока доминирующее воздействие оказывает не конвекция, а пузырьковое кипение на поверхности труб.

*Кипение внутри труб.*

Режимы кипения жидкости в трубах и каналах достаточно подробно изложены в [21].

Теплоотдача при вынужденном движении кипящей жидкости в трубах по данным [21] описывается уравнением, аналогичным (4.36).

В критерии Рейнольдса использована скорость циркуляции  $w_0$ , которая является скоростью на входе в трубу до начала кипения. Скорость циркуляции обычно задается либо принимается:

$$w_0 = G/(f \cdot \rho'),$$

где  $f$  – площадь поперечного сечения трубы,  $G$  – массовый расход.

Для практических расчетов теплоотдачи при внутритрубном кипении авторы [21] рекомендуют интерполяционную зависимость:

$$\frac{\alpha}{\alpha_w} = \frac{4\alpha_w + \alpha_q}{5\alpha_w - \alpha_q}, \quad (4.41)$$

где  $\alpha_w$  – коэффициент теплоотдачи при однофазной конвекции внутри трубы;  $\alpha_q$  – коэффициент теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении.

Для пленочного режима кипения и ламинарного режима течения пленки авторы [20] рекомендуют зависимость:

$$\alpha = 0,72 \sqrt[4]{\frac{\lambda'' j^3 \rho'' r (\rho' - \rho'') g}{\mu'' \Delta t d}}. \quad (4.42)$$

Для турбулентного режима при пленочном кипении может быть использована зависимость для расчета средних значений коэффициентов теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = 0,25 \sqrt[4]{\frac{c_p'' \lambda''^2 g (\rho' - \rho'')}{\nu''}}. \quad (4.43)$$

Перспективным для расчета теплогидродинамических характеристик кипящих жидкостей в трубах является комплексный подход, включающий

расчёт истинного объемного паросодержания, локальной теплоотдачи и методики прогнозирования режимов течения. Основы комплексного метода сформулированы в работах [69]–[71], апробированы на хладагентах, но представляют интерес также и для воды. В результате интегрирования уравнения для расчета локальной теплоотдачи получена следующая формула [71]:

$$\alpha = 0,695(\omega p)^{0,85} q^{0,47} (P/P_{кр})^{-1,1} \quad (4.44)$$

#### 4.5.2 Теплообмен при конденсации

Конденсация – процесс перехода из парообразного в жидкое или твердое состояние (в данном разделе рассматривается только переход из пара в жидкость). При конденсации отводится теплота, которая передается охлаждающей среде. Процесс конденсации возможен только при температурах ниже критических [23].

Конденсация может быть капельной либо пленочной. В первом случае жидкий конденсат образуется на несмачиваемой поверхности охлаждения в виде капель. Во втором, наиболее распространенном в теплообменных аппаратах – в виде пленки жидкости. Поскольку теплоотдача при капельной конденсации выше, чем при пленочной, в технике этот процесс создается искусственно с помощью специальных веществ – гидрофобизаторов.

Характер распределения температур при пленочной конденсации показан на рисунке 41.

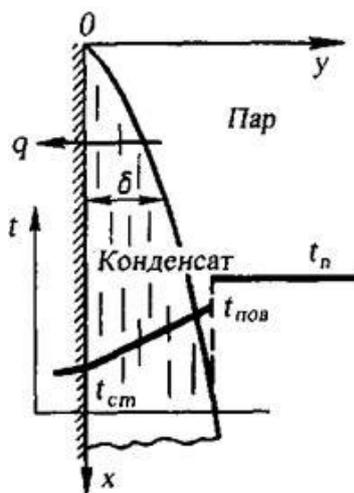


Рисунок 41 – Распределение температур при пленочной конденсации

Пар вдали от охлаждающей поверхности имеет температуру насыщения  $t_0$  на стенке  $t_c$ . Температурный напор между паром и стенкой равен  $\Delta t =$

$t_0 - t_c$ . Термическое сопротивление может быть представлено в виде суммы сопротивлений:

$$R = R_k + R_\phi,$$

где  $R_k$  – термическое сопротивление пленки конденсата, которому соответствует температурный напор между температурой стенки и поверхностью пленки  $\Delta t_k = t_{\text{пов}} - t_{\text{см}}$ ;  $R_\phi$  – термическое сопротивление на границе раздела жидкость – пар.

Наличие  $R_\phi$  обусловлено тем, что не все молекулы пара, соприкасаясь с поверхностью конденсата, поглощаются жидкостью. Часть молекул возвращается в пар. В случае конденсации водяного пара и других неметаллических жидкостей можно принять  $R_\phi = 0$  [20].

Термическое сопротивление пленки конденсации зависит от режима течения. При ламинарном течении можно считать, что теплота через слой конденсата передается теплопроводностью и  $R_k = \delta/\lambda$ . При турбулентном – теплопроводностью и конвекцией. Возможно также волновое течение.

Задача для теплообмена при ламинарном течении пленки аналитически решена В. Нуссельтом в 1916 г. [21],[22].

В результате получена формула для конденсации на вертикальной стенке:

$$\alpha = 0,943 \sqrt[4]{\frac{r g \rho^2 \lambda^3}{\mu \Delta t H}}. \quad (4.45)$$

Для конденсации на горизонтальной трубе также при ламинарном течении формула для коэффициента теплоотдачи имеет вид:

$$\alpha = 0,728 \sqrt[4]{\frac{r g \rho'^2 \lambda^3}{\nu \Delta t d}}. \quad (4.46)$$

Физические свойства в формулах (4.45) и (4.46) относятся к состоянию насыщенной жидкости, а определяющие размеры: в формуле (4.45)  $H$  – высота стенки, в формуле (4.46)  $d$  – наружный диаметр.

При волновом режиме в формулах (4.45) вместо коэффициента 0,943 используется согласно данным П. Капицы значение коэффициента 1,15.

При конденсации на пучке труб вводится величина, характеризующая число рядов в пучке  $n$ . Тогда коэффициент теплоотдачи при конденсации на пучке определяется с учетом поправки:

$$\alpha_{\text{пуч}} = \alpha_0 \cdot \overline{\varepsilon_n}. \quad (4.47)$$

где  $\alpha_0$  определяется по формуле для одиночной трубы (4.46),  $\bar{\varepsilon}_n = n^{-0.25}$  – поправка на рядность.

При конденсации внутри труб при  $Pr > 1$  средняя величина коэффициента теплоотдачи может быть определена по уравнению:

$$\alpha_i = 0,56 \sqrt[4]{\frac{r g \rho^2 \lambda^3}{\mu \Delta t d_{\text{вн}}}}. \quad (4.48)$$

Приведенные выше уравнения позволяют получить приближенные значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации. В специальной литературе, в частности в [21], рассматриваются случаи влияния скорости пара, перегрева, сил инерции, изменения теплофизических свойств и т.д.

#### 4.6 Теплообмен излучением

Тепловое излучение – процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн.

При поглощении электромагнитных волн другими телами происходит трансформация энергии поля (электромагнитная) в тепловую энергию.

Излучение является предметом изучения квантовой физики и имеет достаточно сложную природу.

В прикладном аспекте физический смысл излучения представлен в [21].

В таблице 12 представлены данные классификации электромагнитного излучения в зависимости от длины волн.

Таблица 12

#### Классификация электромагнитных волн (ЭМВ)

Название	Длина волны, м	Частота, Гц
Радиоволны	$3 \cdot 10^5 - 3$	$10^3 - 10^8$
Инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-7}$	$10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$
Видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{14} - 10^{17}$
Рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$
Гамма - излучение	$< 10^{-10}$	$> 3 \cdot 10^{18}$

В процессе лучистого теплообмена участвуют лишь поверхностные слои жидких и твердых тел. Для металлов толщина этого слоя составляет 1 мкм, а для неметаллов порядка 1 мм. Газообразные тела имеют значительно меньшее излучение, и процесс теплового излучения носит объемный характер. *Абсолютно черным телом* называется тело, поглощающее 100% всей энергии ЭМВ. *Абсолютно белым телом* называется тело, полностью отражающее все излучения.

На практике все тела являются серыми, которые характеризуются степенью черноты  $A$ . Для абсолютно черного  $A = 1$ , для абсолютно белого  $A = 0$ , для серых тел – промежуточные значения.

*Законы теплового излучения.*

Одним из основных законов излучения является *закон Планка*, связывающий интенсивность излучения с температурой и длиной волны (Вт/м<sup>2</sup>):

$$J_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}, \quad (4.49)$$

где  $c_1 = 0,374 \cdot 10^{-15}$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ , м<sup>2</sup>·К;  $\lambda$  – длина волны, м;  $T$  – абсолютная температура, К.

*Закон Релея-Джинса.* При значениях  $\lambda T \geq c_2$ , или  $c_2/(\lambda T) \leq 1$  выражение закона Планка упрощается и получает вид:

$$J_{\lambda} = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4}. \quad (4.50)$$

*Закон Вина.* При малых значениях  $\lambda T$  выражение закона Планка приобретает вид:

$$J_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-(c_2/\lambda T)}. \quad (4.51)$$

Для абсолютно черного тела, если  $\lambda = \lambda_{\max}$ , выражение (4.50) упрощается (Вт/м<sup>2</sup>):

$$J_{\max} = 1,307 T^5. \quad (4.52)$$

*Закон Стефана Больцмана.* Закон определяет плотность интегрального излучения во всем диапазоне длин волн. Для серых тел в инженерной практике используется упрощенное выражение закона Стефана Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot c_0 \cdot (T/100)^4, \quad (4.53)$$

где  $\varepsilon = c/c_0 \leq 1$  – степень черноты серого тела,  $c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) – степень черноты абсолютно черного тела.

При более глубоком изучении вопросов теплообмена излучением следует обратить внимание на законы Кирхгофа и Ламберта, которые подробно изложены в источнике [21].

#### **Контрольные вопросы**

1. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении. Модель Г.Н. Кружилина.
2. Теплообмен при кипении в трубах.
3. Теплообмен при конденсации.
4. Теплообмен излучением

## 5 ЦИКЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Тепловые энергоустановки ТЭС предназначены для производства электроэнергии и теплоты для систем бытового и производственного теплоснабжения.

Наиболее распространенные современные ТЭС подразделяются на конденсационные КЭС, теплофикационные ТЭЦ (теплоэнергоцентралы), газотурбинные ГТУ и атомные энергостанции АЭС.

КЭС и ГТУ предназначены только для производства электроэнергии за счет использования теплоты сгорания топлива. ТЭЦ используются для производства электроэнергии и теплоты для нужд теплоснабжения.

Атомные энергостанции в качестве источника теплоты используют ядерную энергию и нужны в основном для выработки электроэнергии.

Энергия, вырабатываемая на паротурбинных установках, составляет до 80% всей вырабатываемой электроэнергии в России.

### 5.1 Циклы Ренкина

Начало теории циклов паросиловых установок (ПСУ) заложено Саади Карно.

Так же, как и ранее рассмотренный цикл Карно для идеального газа, цикл для паросиловой установки обладает максимально возможным КПД для рассматриваемого диапазона температур. Цикл Карно из-за ряда технических сложностей на практике не реализуется, но до сих пор является эталоном термодинамической эффективности. Термический КПД цикла Карно определяется по формуле:

$$\eta_{т.} = 1 - (T_2/T_1).$$

Цикл Ренкина, представленный на рис. 42, отличается от цикла Карно тем, что процесс сжатия осуществляется не в компрессоре, а в водяном насосе. Цикл Ренкина положен в основу работы как КЭС, так и ТЭС.

В парогенераторе 1 вода нагнетается насосом 5, кипит, а образовавшиеся пары расширяются в турбине 2. Работа в результате расширения трансформируется в электроэнергию в электрогенераторе 3. После расширения в турбине образуется жидкая фаза, которая поступает в насос 5 и далее в парогенератор.

Сухой насыщенный пар, полученный в парогенераторе 1, адиабатно расширяется в процессе 1-2. Полученная полезная работа в диаграмме  $P-v$  изображается площадью  $a12в$ .

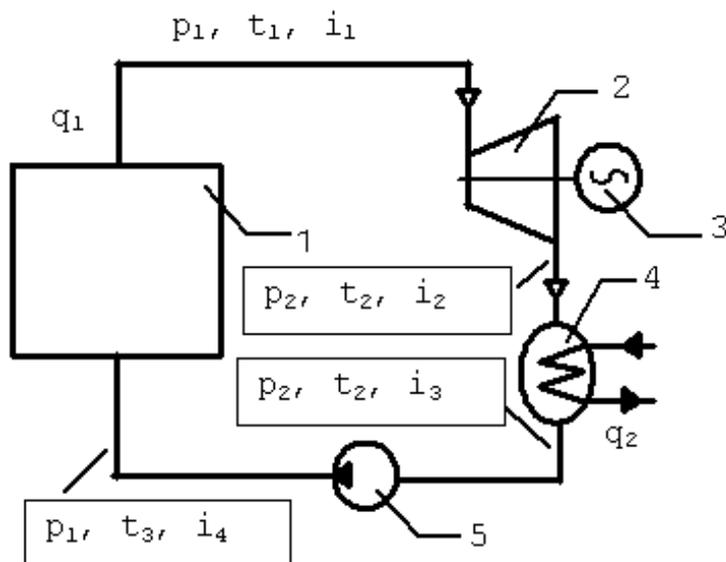


Рисунок 42 – Принципиальная схема ТЭС, работающей по циклу Ренкина

Цикл Ренкина для насыщенного пара изображен на рисунке 43.

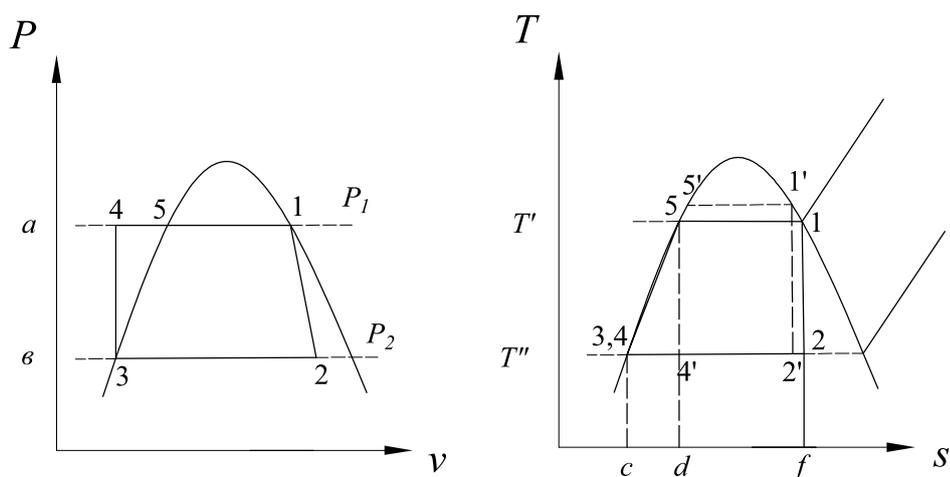


Рисунок 43 – Цикл Ренкина и цикл Карно для насыщенного пара в диаграммах  $P-v$  (рабочая) и  $T-s$  (тепловая)

Влажный пар низкого давления (точка 2) конденсируется в конденсаторе 4 до состояния насыщенной жидкости низкого давления (точка 3). При этом отводится теплота  $q_2$ . В насосе 5 происходит повышение давления жидкости до  $P_1$  (процесс 3–4). Недогретая жидкость (точка 4) поступает в парогенератор 1, где догревается до состояния насыщения (точка 5) и кипит (процесс 5–1).

В реальных паросиловых установках (ПСУ) процесс подогрева 4–5 происходит не в парогенераторе непосредственно, а в отдельном теплообменнике экономайзере.

В процессе 4–1 подводится теплота  $q_1$ , полученная за счет сжигания топлива либо ядерной реакции деления.

Работа цикла представляет собой алгебраическую сумму работы турбины и насоса  $l_{ц} = l_{т} - |l_{н}|$ , выраженную в диаграмме  $P-v$  в виде площади 12345.

В  $T-S$  диаграмме – это площадь, представляющая разность теплот  $q_1$  и  $q_2$ :  $l_{ц} = q_1 - |q_2|$ . Подведенная в парогенераторе теплота  $q_1 = h_1 - h_4$ , а отведенная  $q_2 = h_2 - h_3$ , при этом  $l_{т} = h_1 - h_2$ . Пренебрегаем малой работой насоса, получаем  $l_{ц} = l_{т} = h_1 - h_2 = (p_1 - p_2) v'$ .

Термический КПД:

$$\eta_{т} = l_{ц} / q_1 = [(h_1 - h_2) - (p_1 - p_2) v'] / (h_1 - h_2) \quad (5.1)$$

Термический КПД цикла Ренкина ниже, чем у цикла Карно, что обусловлено большей затратой подведенной теплоты  $q_1$  в первом случае. Теплота  $q_1$  в цикле Ренкина расходуется не только на процесс парообразования 5–1 (цикл Карно 124'5, рисунок 38), но и на подогрев ненасыщенной жидкости 4–5.

### 5.1.1 Методы повышения термического КПД

*Влияние температуры подвода теплоты.*

Одним из методов повышения КПД цикла Ренкина является повышение температуры подвода теплоты, иначе говоря, температуры в паровом котле.

Повышение КПД вытекает из анализа выражения термического коэффициента полезного действия, полученного в результате модификации КПД цикла Карно – уравнение (3.40).

Отличием цикла Карно от цикла Ренкина, как уже говорилось, является то, что в первом случае теплота подводилась при постоянной температуре (процесс 1–5, рисунок 38), а в цикле Ренкина – при переменной (процесс 4,5,1). Исходя из этого, модифицированное уравнение КПД имеет вид:

$$\eta_{т} = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1}, \quad (5.2)$$

где  $\bar{T}_2$  – средние температуры отвода теплоты;  $\bar{T}_1$  – средняя температура подвода.

Очевидно, что при увеличении средней температуры в котле  $\bar{T}_1$  КПД цикла Ренкина возрастает.

Увеличение температуры в котле несколько повышает термодинамическую эффективность цикла, но создает значительные трудности при эксплуатации. Поскольку при увеличении  $\bar{T}_1$ , одновременно возрастает давле-

ние  $P_1$ , а также влажность в конце расширения (точка  $2'$ , рисунок 43). Повышение давления опасно с точки зрения прочности, а повышение влажности в конце расширения влечет за собой повышенный износ лопаток.

*Влияние перегрева пара перед турбиной.*

Более перспективным методом повышения средней температуры подвода теплоты  $\bar{T}_1$  является применение перегретого пара перед турбиной (рисунок 44).

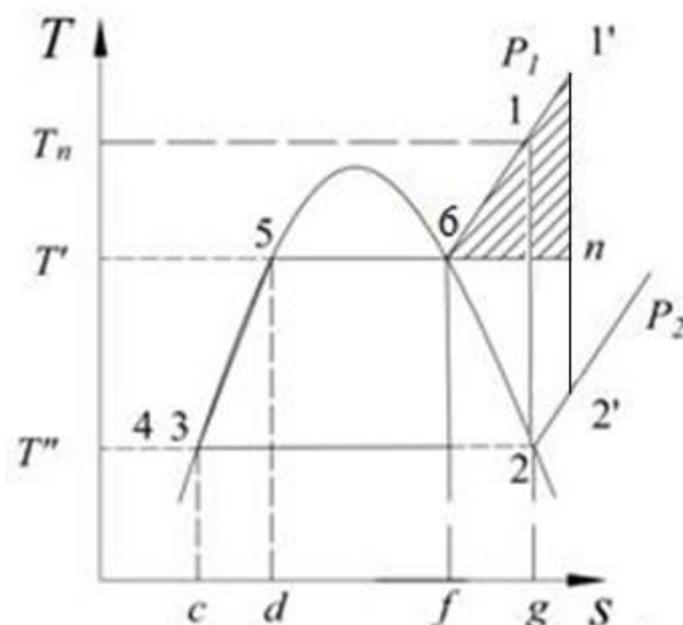


Рисунок 44 – Цикл Ренкина с перегретым паром

Перегрев пара непосредственно в котле осуществить невозможно, поэтому в схему ПСУ вводится дополнительный элемент – пароперегреватель (рис. 45). В пароперегревателе также подводится теплота сгорания топлива, что и в парогенераторе, но при этом осуществляется процесс перегрева  $6-1$ .

В дальнейшем перегретый пар в состоянии 1 поступает в турбину, где адиабатно расширяется, совершая работу  $1-2$ . Теплота  $q_1$  в диаграмме  $T-s$  изображается суммой площадей  $c35d$  (подогрев), парообразование  $d56f$ , перегрев  $f61g$ . Теплота  $q_2$ , отводимая в конденсаторе, изображается площадью  $2gc32$ . Работа цикла изображается площадью  $123(4)561$  и равна разности  $q_1 - q_2$ . Пренебрегая работой насоса, термический КПД цикла Ренкина с перегретым паром будет равен:

$$\eta_T = l_{ц} / q_1 = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_4). \quad (5.3)$$

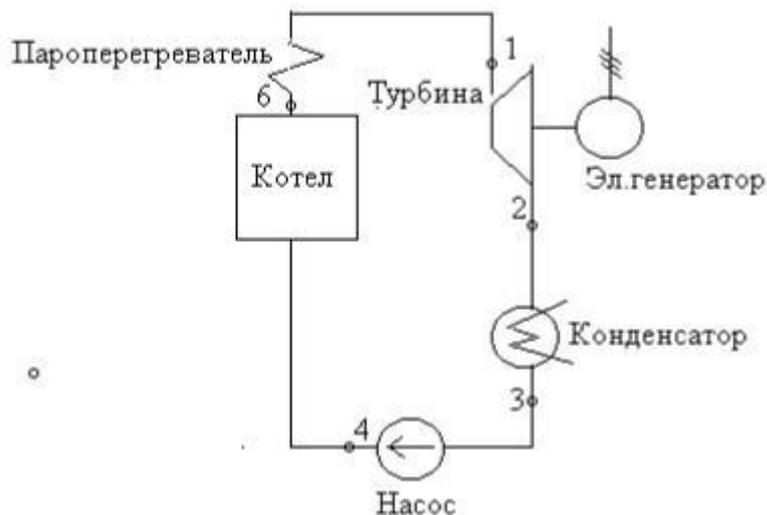


Рис. 45 – Цикл Ренкина с перегретым паром

Согласно формуле (5.2), термический КПД цикла Ренкина с перегретым паром будет выше, чем цикла с расширением сухого насыщенного (рисунок 43), поскольку у первого средняя температура подвода теплоты  $\bar{T}_1$  (процесс 1654, рисунок 44) будет выше, чем у второго (процесс 154, рисунок 43).

Кроме того, в цикле с перегретым паром в конце расширения образуется сухой насыщенный либо перегретый пар (1'–2', рис. 44), вместо влажного пара в случае расширения сухого насыщенного (1–2, рис. 43).

*Влияние температуры перед турбиной.*

Повышение температуры перед турбиной влечет за собой возрастание средней температуры подвода теплоты  $\bar{T}_1$  (рис. 46).

Процесс аналогичен ранее рассмотренному влиянию перегрева пара. Следует отметить, что повышение начальной температуры влияет на КПД тем интенсивнее, чем больше начальное давление.

Так, например, при изменении температуры пара в точке 1 от 350 до 550 °С при давлении 1,96 МПа, термический КПД увеличивается от 0,35 до 0,375, то есть на 7%. При той же разности температур и давлении 13,7 МПа  $\eta_T$  возрастает от 0,4 до 0,45 или на 12,5%.

В настоящее время ПСУ имеют температуру пара перед турбиной до 600 °С. При дальнейшем повышении температуры пара снижается прочность металла.

Влияние начального давления на КПД цикла Ренкина представлено на рис. 47 [1].

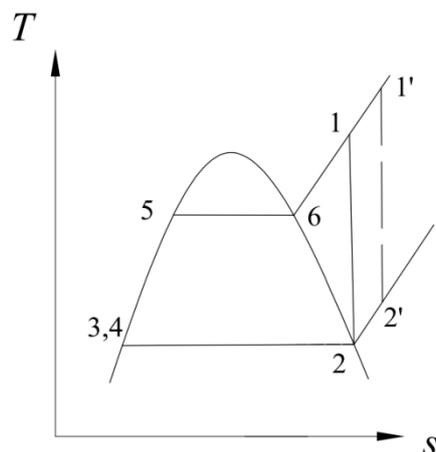


Рис. 46 – Влияние температуры перед турбиной по КПД

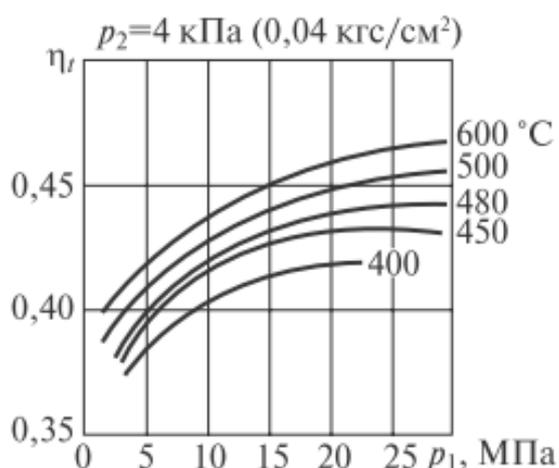


Рис.47 – Влияние начального давления на КПД

*Влияние конечного давления.*

При понижении конечного давления от  $P_2$  до  $P_2'$  (рис. 48) несколько уменьшается средняя температура подвода теплоты  $\bar{T}_1$  за счет того, что подогрев насыщенной жидкости в экономайзерной зоне приходится проводить от более низкой температуры после насоса (точка 4 и точка 4').

На термический КПД в этом случае гораздо большее влияние оказывает снижение средней температуры отвода теплоты (см. формулу 5.2) от значений  $\bar{T}_2$  до  $\bar{T}_2'$ .

Например, при понижении давления  $P_2$  от 0,098 до 0,00392 МПа при  $P_1 = 2,94$  МПа = const термический КПД увеличивается от 0,24 до 0,38, то есть на 60 %.

Минимальное давление  $P_2$  в современных ПСУ достигает 0,0039-0,0034 МПа или температуре  $\bar{T}_2 = 29-26^\circ\text{C}$ . Дальнейшее понижение  $T_2$  нецелесообразно, так как при использовании воды в качестве рабочего вещества

уменьшение конечного давления обуславливает технические трудности, в основном связанные с передачей теплоты  $q_2$  источнику низкой температуры. Помимо этого, с понижением температуры резко возрастает удельный объем водяного пара, что увеличивает габариты теплообменных аппаратов. Влияние понижения давления на КПД иллюстрируется рисунком 49.

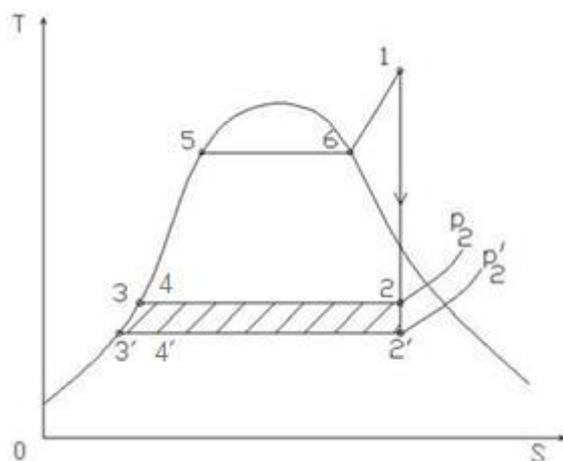


Рис. 48 – Влияние конечного давления на КПД цикла Ренкина

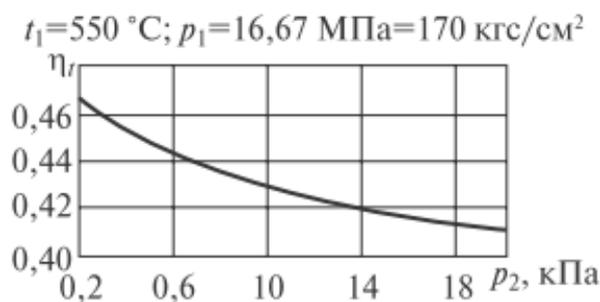


Рисунок 49 – Влияние понижения давления на КПД цикла Ренкина

## 5.2 Регенеративный цикл

Для понимания сущности регенеративного цикла следует рассмотреть самый простой цикл Ренкина (рис.50) [21].

Адиабатное расширение 1–2 заменяется политропным 1–а, причем линия политропного расширения эквидистантно линии подогрева насыщенной жидкости 4–5. В результате может быть осуществлен регенеративный цикл 1а45.

В курсе «Теплотехники» [19] доказывается, что величина КПД регенеративного цикла равна величине КПД цикла Карно для одинакового диа-

пазона температур. При этом в процессе политропного расширения отводится теплота эквивалентная площади  $b-a-z-c$ , которая используется на подогрев ненасыщенной жидкости до состояния насыщения (процесс 4–5).

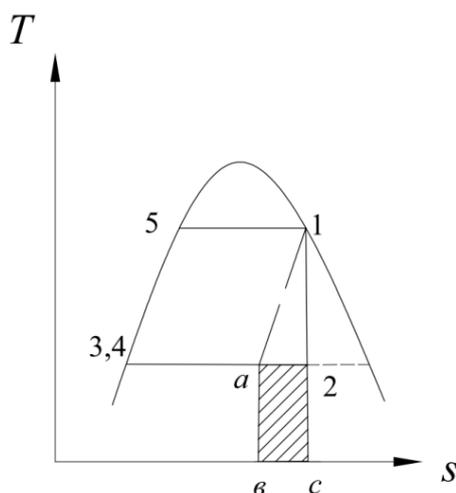


Рисунок 50 – Цикл Ренкина с внутренней регенерацией

Из-за цикличности процессов практическое осуществление такого теплообмена невозможно из-за чрезвычайной сложности непрерывного отвода теплоты в процессе расширения и подвода такого же количества теплоты к нагреваемой воде в процессе 4–5.

Приблизиться к такому процессу можно, осуществляя совокупность процессов адиабатного расширения в цикле изображенном на рисунке 51.

После парогенератора сухой насыщенный пар в состоянии 1 поступает на вход в первую турбину, в которой адиабатно расширяется до давления  $P'$ . Влажный пар в состоянии  $b$  поступает в теплообменник  $F$ , где в изобарном процессе  $b-c$  теплота передается потоку воды и расходуется на ее подогрев в процессе  $n-5$ .

Влажный пар в состоянии  $c$  адиабатно расширяется во второй турбине до давления  $P''$  и после расширения отдает теплоту в теплообменнике  $G$  в процессе  $d-e$ . Теплота передаётся потоку воды, нагревая воду в процессе  $m-n$ .

Пар в состоянии  $e$  расширяется в третьей турбине до состояния  $a'$  и давления  $P_2$ . В теплообменнике  $N$  в процессе  $a'-a$  теплота передается нагреваемой воде в процессе  $o-m$ .

Влажный пар в состоянии  $a$  поступает в конденсатор  $D$ , в котором конденсируется в процессе  $a'-u$  и далее перекачивается насосом в теплообменник  $N$ . При этом давление повышается от  $P_2$  до  $P_1$ .

С увеличением числа ступеней регенеративного цикла конец адиабатного расширения в последней ступени  $a'$  приближается к точке конца политропного расширения  $a$ . Таким образом повышается термодинамическая эффективность цикла, приближаясь к эффективности цикла Карно.

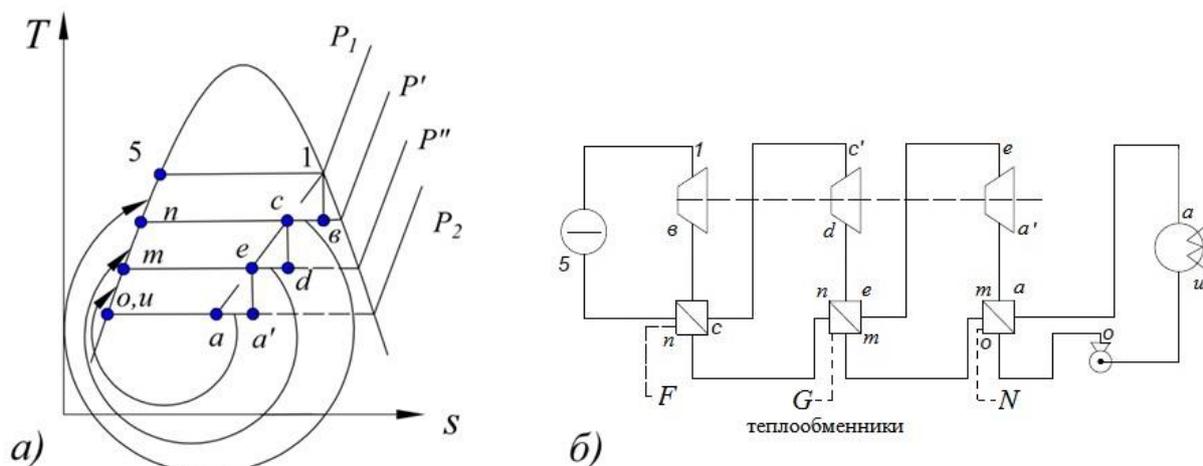


Рис. 51 – Регенеративный цикл ПСУ: *а* – изображения в  $T$ - $s$  диаграмме; *б* – принципиальная схема стенда

Дополнительным преимуществом регенеративного цикла является то, что подогрев воды в процессах:  $n-5$ ,  $m-n$ ,  $o-m$ , осуществляемых за счет теплоты от водяного пара, поступающего в теплообменник, и по завершению этапов поэтапного расширения, происходящих при значительно меньших перепадах температур между средами, чем в процессе подогрева воды в обычном процессе Ренкина, за счет сжигания топлива (процесс 4–5, рис. 48). Снижением перепада температур значительно сокращаются необратимые потери.

В общем, термический КПД цикла с применением регенерации может быть увеличен на 10–12 %.

### 5.3 Бинарные циклы

В разделе 5.1 указывалось, что увеличение термического КПД связано с повышением средней температуры подвода теплоты  $q_1$  и температуры перед турбиной.

При использовании воды в качестве рабочего вещества повышение средней температуры  $\bar{T}_1'$  ограничивается относительно невысокой критической температурой воды  $T_{кр} = 374$  °С при достаточно высоком давлении  $P_{кр} = 22$  МПа. Поскольку температура сгорания топлива около 1000 °С, разность температур сгорания и температуры кипения составляет величину порядка 700 °С, что определяет весьма высокие потери от недорекуперации.

При использовании другого рабочего вещества, например, ртути с критической температурой  $t_{кр} \approx 1400$  °С, такой проблемы не возникает, но появляется существенная сложность осуществления процесса конденсации.

При охлаждении конденсатора водой с температурой порядка 30 °С давление конденсации  $P_2 \approx 0,294$  МПа, что является глубоким вакуумом. Создать конденсатор при таких давлениях практически невозможно, и, кроме того, удельные объемы паров ртути достигают огромных значений.

Таким образом, физические свойства ртути благоприятны при высоких температурах цикла, а воды – при низких.

Сочетание преимуществ двух рабочих веществ привело к созданию бинарного цикла ртуть-вода, схема которого представлена на рисунке 52.

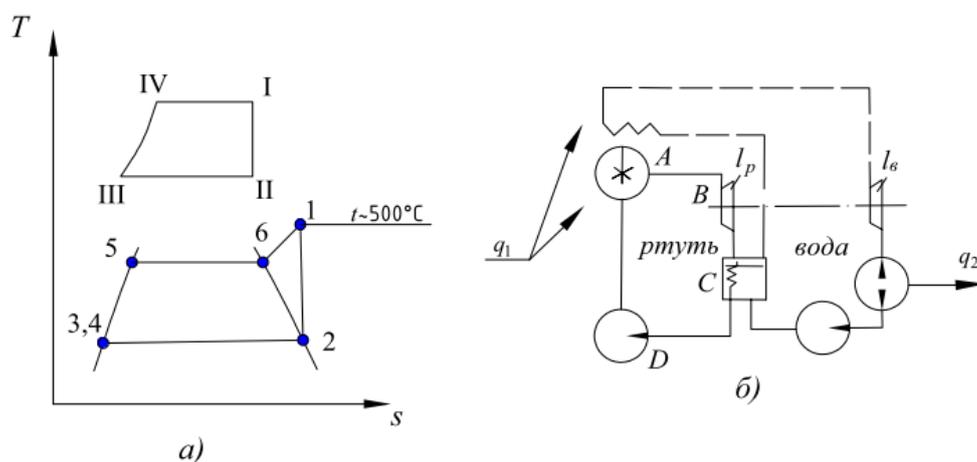


Рис. 52 – Схема бинарного цикла

Ртутный пар, образующийся в ртутном котле А, поступает в ртутную турбину В, где расширяется и производит работу  $l_p$ . Давление  $P_1$  ртутного пара составляет 0,5-0,9 МПа при  $T_1 \sim 400-500$  °С. Ртутный пар низкого давления поступает в конденсатор-испаритель С, где конденсируется, и конденсат перекачивается ртутным насосом D в ртутный котел А.

Водяной контур связан с ртутным через испаритель-конденсатор С. Водяной цикл в принципе ничем не отличается от ранее рассмотренных циклов Ренкина. Специфика бинарного цикла заключается в том, что количество ртути и воды должно быть различным. Связано это с тем, что теплота конденсации ртути много меньше теплоты парообразования воды. Вследствие этого, на 1 кг воды приходится  $m$  кг ртути. Здесь  $m$  именуется кратностью циркуляции, которая находится из уравнения и обычно  $m \approx 10$ :

$$m = (h_6 - h_5) / (h_{II} - h_{III}).$$

Термический КПД бинарного цикла составляет 0,9–0,95 от КПД цикла Карно при сопоставимых условиях. Бинарный цикл, изображенный на рисунке 47, имеет КПД  $\eta_{тп} \sim 0,57-0,58$ .

Широкое использование бинарных циклов на практике сдерживается в первую очередь высокой стоимостью и ядовитостью ртути.

## 5.4 Электростанции, работающие по конденсационному циклу (КЭС)

Как было отмечено в разделе 5.1., понижение средней температуры отвода теплоты  $\bar{T}_2$  в целом способствует повышению термического КПД цикла Ренкина. С учетом этого создаются конденсационные электростанции, предназначенные только для выработки электрической энергии [1].

Технологические параметры конденсационного цикла, согласно источнику [34]:

$$P_1 = 10\text{--}13 \text{ МПа}; T_1 = 250\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$P_2 = 0,003\text{--}0,004 \text{ МПа}; T_2 = 28\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

С такими технологическими параметрами отводимая теплота  $q_2$  является по сути дела «бросовой», так как трудно найти ей применение при такой низкой температуре.

*Тепловой баланс конденсационного цикла:*

Теплота полученная от сгорания топлива – 100 %.

Преобразовано в работу – 40 %.

Потери в конденсаторе – 40 %.

Потери в турбине – 8 %.

Потери в парогенераторе – 12 %.

Термический КПД  $\eta_t = l/q_1 = 40 \text{ } \%$ .

Принципиальная схема энергоблока КЭС представлена на рисунке 53.

Наиболее крупные КЭС время имеют мощность до 4000 МВт. Сооружаются электростанции мощностью до 6,4 тыс. МВт с энергоблоками 500 и 800 МВт.

Предельная мощность КЭС определяется условиями водоснабжения с учетом оценки влиянием выбросов станции в окружающую среду. Современные КЭС весьма негативно воздействуют на окружающую среду: атмосферу, гидросферу и литосферу. Влияние на атмосферу сказывается в большом потреблении кислорода из воздуха для горения топлива и в выбросе значительного количества продуктов сгорания: газообразных окислов углерода, серы и азота. Воздух загрязняет и летучая зола, прошедшая через золоуловители.

Сжигание газа вызывает наименьшее загрязнение атмосферы, а наибольшее возникает при сжигании твердого топлива с низкой теплотворной способностью и высокой зольностью.

Необходимо учитывать также большие уносы тепла в атмосферу, а также электромагнитные поля, создаваемые электрическими установками высокого и сверхвысокого напряжения.

КЭС загрязняет гидросферу большими массами теплой воды, сбрасываемыми из конденсаторов турбин, а также промышленными стоками, хотя они проходят тщательную очистку. Для литосферы влияние КЭС сказывается не только в том, что для работы станции извлекаются большие массы



Этот вид электростанций предназначен не только для выработки электроэнергии, но и для централизованного снабжения промышленных предприятий и жилых зданий крупных городов электроэнергией и теплом.

Являясь, как и КЭС, тепловыми электростанциями, ТЭЦ отличаются от КЭС тем, что в них теплота отработанного в турбинах пара не является «бросовой», а используется для производства, отопления, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения.

При когенерации достигается большая экономия топлива по сравнению с раздельным энергоснабжением: с выработкой электроэнергии на КЭС и получением тепла от местных котельных.

В России в настоящее время на ТЭЦ производится 25–30 % всей вырабатываемой электроэнергии [1].

Технологические параметры теплофикационного цикла:

$P_1 = 10\text{--}13$  МПа;  $T_1 = 250\text{--}350$  °С;

$P_2 = 0,12\text{--}0,15$  МПа;  $T_2 = 105\text{--}115$  °С – для теплоснабжения;

$P_2 = 0,2\text{--}0,4$  МПа;  $T_2 = 120\text{--}150$  °С – для технологических нужд.

Тепловой баланс теплофикационного цикла:

Теплота от сгорания топлива = 100 %.

Работа турбины = 12 %.

Теплоснабжение = 50 %.

Потери в турбине = 4 %.

Потери в трубопроводах = 2 %.

Потери в конденсаторе = 20 %.

Потери в парогенераторе = 12 %.

Простейшая схема теплофикационной установки с основными элементами паросиловой установки показана на рисунке 54.

Охлаждающая вода под действием насоса 8 циркулирует по замкнутому контуру, в который включен потребитель тепла 7. Температура воды на выходе из конденсатора 4 составляет величину порядка 80 – 90 градусов, что достаточно для теплоснабжения и технологических нужд.

Конденсат при температуре насыщения  $t_n$  забирается насосом 5 и после сжатия подается в котел 1 с пароперегревателем 2. Охлаждающая вода нагревается за счет тепла конденсирующегося пара и под напором, создаваемым насосом 8, поступает в отопительную систему 7.

В теплофикационных установках используются турбины трех типов, соответствующие циклы представлены на рис. 55.

Рис.55 б-с противодавлением  $p_2 = 1,2\text{--}12$  бар теплоты, которое нестабильно, так как зависит от сезона, времени суток, климатических условий и др.

Рис.55 в – турбины с ухудшенным вакуумом при отсутствии тепловых потребителей могут работать с расширением пара до глубокого вакуума как конденсационные, но выработка электроэнергии у них тоже зависит от расхода теплоты.

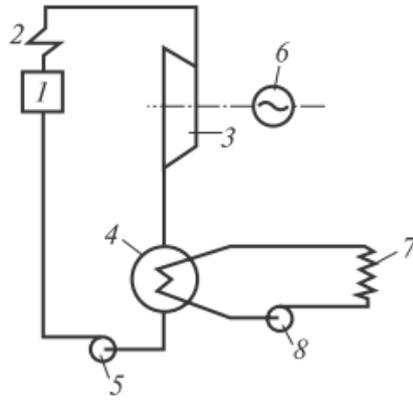


Рисунок 54 – Схема простейшей теплофикационной установки

Рис. 55 г – турбины с регулируемым отбором пара в основном применяются на ТЭЦ, позволяя работать по свободному графику и в широком диапазоне регулировать электрическую и тепловую нагрузки. В такой схеме с помощью клапана 2, в зависимости от потребителей электроэнергии и теплоты, клапан располагается на магистрали между ступенями турбины высокого 1 и низкого 3 давлений.

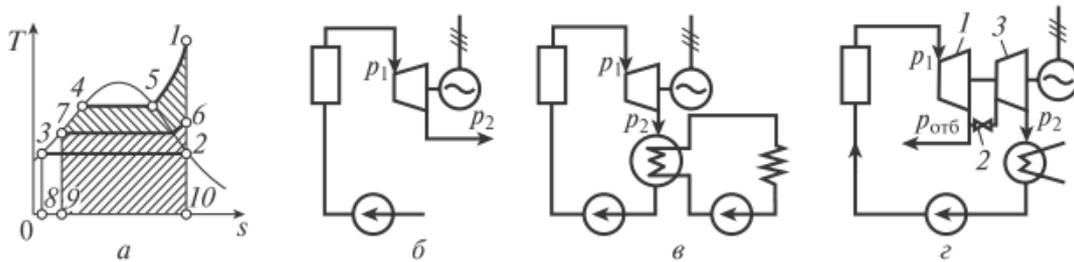


Рисунок 55 – Теплофикационный цикл (а) и три типа установок: с противодавлением (б), с ухудшенным вакуумом (в) и с регулируемым отбором пара (г): 1 – часть турбины высокого давления; 2 – регулятор количества отбираемого пара; 3 – часть турбины низкого давления

Теплофикационный цикл на диаграмме  $T-S$  иллюстрируется на рисунке 55, а. Площадь, образуемая контуром 7–4–5–1–6–7, соответствует теплоте  $q_{\text{пол}}$ , превращенной в турбине в механическую работу. Площадь 7–6–10–9–7 соответствует количеству теплоты  $q_2$ , которая используется для целей отопления.

Термический КПД теплофикационного цикла ниже термического КПД соответствующего конденсационного цикла, в котором пар расширяется в турбине до очень низкого давления ( $p_2 = 3-5$  кПа), производя при этом полезную работу и «бросовую» теплоту.

В теплофикационном цикле конечное давление пара  $p_2$  значительно выше давления  $p_2$  в конденсационном цикле.

Увеличению давления  $p_2$  соответствует сокращение количества теплоты  $q_{\text{пол}}$ , преобразованной в работу паровой турбины (уменьшение площади 3–4–5–1–2–3 на рисунке 55, а), и увеличение теплоты  $q_2$ , уносимой охлаждающей водой (увеличение площади 9–7–6–10–9). В итоге снижается КПД  $\eta_r$ , а теплота  $q_2$  из «бросовой» преобразуется в полезную, используемую для теплоснабжения.

Однако применительно к теплофикационному циклу термический КПД не может служить полноценной мерой экономичности, поскольку этим КПД не учитывается полезное использование потребителем той части теплоты, которая в работу не превращается, но используется потребителями для теплоснабжения, то есть теплоты  $q_2$ .

Поэтому для оценки экономичности теплофикационных циклов используется коэффициент использования теплоты, представляющий собой отношение общего количества полезно использованной теплоты (суммы теплоты, превращенной в работу и теплоты, используемой потребителем для теплоснабжения, то есть  $q_2$ ,) ко всему количеству подведенной к рабочему телу теплоты, то есть

$$\eta_{\text{ит}} = q_{\text{общ}} / q_1 = (l_m + q_2) / q_1. \quad (5.4)$$

В теоретическом случае этот коэффициент равен 1, так как  $q_1 = (l_m + q_2)$ , а практически величина его колеблется от 0,65 до 0,7. В целом же в теплофикационном цикле степень использования теплоты почти вдвое больше, чем в чисто конденсационном цикле, а следовательно, комбинированный способ выработки теплоты и электрической энергии экономичнее их раздельной выработки.

В реальной технологической схеме ТЭЦ, представленной на рисунке 56, в отличие от упрощенной, на отопление и технологические нужды используется не только теплота конденсации, но и теплота пара, отобранного непосредственно после турбины.

Часть пара после расширения в турбине (с  $p_{\text{отб}} = 0,9\text{--}1,2$  МПа) отбирается и отводится на производство.

Другая часть отработанного пара направляется в сетевой пароводяной подогреватель 2 через который с помощью насоса 1 циркулирует вода, используемая для технологических нужд и теплоснабжения.

Использование для теплофикации частично отработавшего пара из промежуточных ступеней турбины уменьшает количество пара, поступающего в ее конденсатор. Очевидно, что экономичность работы теплоэлектроцентрали зависит от величины отбора пара на теплофикацию. С уменьшением количества пара, поступающего на конденсацию, коэффициент использования теплоты теплоэлектроцентрали возрастает.

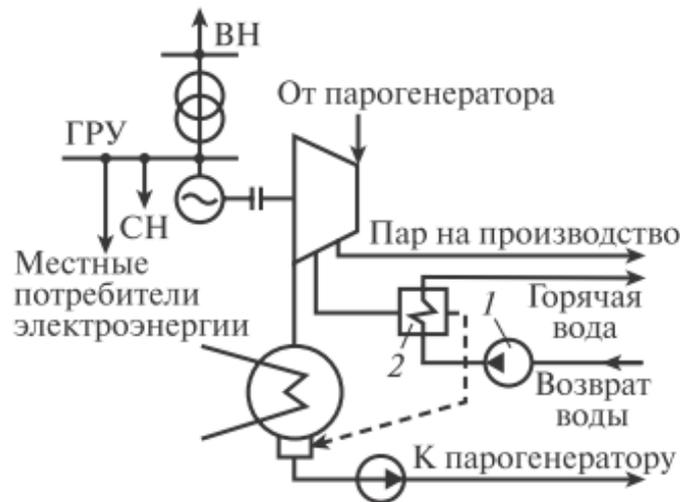


Рисунок 56 – Особенности технологической схемы ТЭЦ:

1 – сетевой насос; 2 – сетевой подогреватель

Из сказанного следует, что наиболее экономичным режимом работы теплоэлектроцентрали является ее работа по графику теплового потребления при минимальном поступлении пара в конденсатор.

Размещение ТЭЦ преимущественно в крупных промышленных центрах повышает требования к охране окружающей среды. Так, для уменьшения вредных выбросов ТЭЦ целесообразно, где это возможно, использовать в первую очередь газообразное или жидкое топливо.

### Контрольные вопросы

1. Циклы Ренкина.
2. Методы повышения термического КПД тепловых энергоустановок (ТЭС)
3. Регенеративный цикл.
4. Бинарные циклы.
5. Электростанции, работающие по конденсационному циклу.
6. Теплоэнергоцентраль.

## 5.6 Газотурбинные установки (ГТУ)

В отличие от паросилового цикла Ренкина для водяного пара, в циклах газотурбинных установок рабочим телом служат сжатые газы, нагретые до высокой температуры. В качестве таких газов чаще всего используют смесь воздуха и продуктов сгорания жидкого (или газообразного) топлива.

Принципиальная схема газотурбинной установки (ГТУ с подводом тепла при  $p = const$ ) представлена на рисунке 57 [37].

Воздушный компрессор КП сжимает атмосферный воздух, повышая его давление с  $p_1$  до  $p_2$ , и непрерывно подает его в камеру сгорания КС. Туда же специальным насосом подается определенное количество газообразного или жидкого топлива. Образующиеся в камере продукты сгорания выходят

из нее с температурой  $t_3$ . Если не учитывать сопротивление, то давление на входе в турбину равно давлению после компрессора  $p_2 = p_3$ . Следовательно, теоретически горение топлива или подвод теплоты происходит при постоянном давлении.

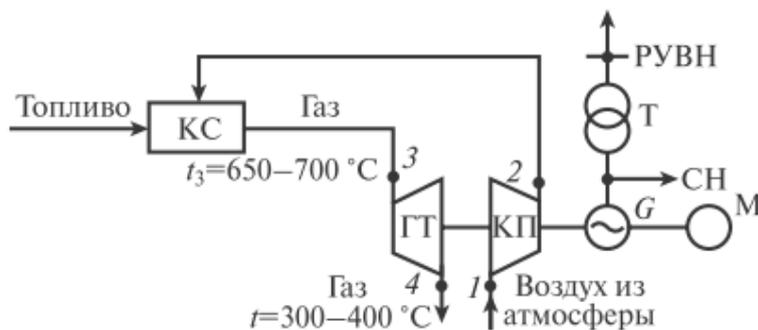


Рисунок 57 – Принципиальная технологическая схема электростанции с газовыми турбинами: КС – камера сгорания; КП – компрессор; ГТ – газовая турбина; G – генератор; Т – трансформатор; М – пусковой двигатель; СН – собственные нужды

В газовой турбине ГТ продукты сгорания адиабатно расширяются, в результате чего их температура снижается до  $t_4$ , а давление уменьшается до атмосферного  $p_0 = p_4$ .

Весь перепад давлений  $p_3 - p_0$  используется для получения работы в турбине  $l_{\text{тех}}$ .

Большая часть этой работы  $l_k$  расходуется на привод компрессора. Разность  $l_{\text{тех}} - l_k$  затрачивается на производство электроэнергии в электрическом генераторе G либо на привод двигателей в транспортных установках. Эта разность и составляет полезную работу цикла. Расход энергии на привод топливного насоса, как правило, не учитывается.

Цикл газотурбинной установки 1–2–3–4 (рис. 58) состоит из изобарного подвода теплоты 2–3 и изобарного отвода теплоты 4–1, а также сжатия 1–2 и расширения 3–4, в процессе которого получается работа.

Полезная работа  $l_{\text{ц}}$  изображается в  $p-v$  диаграмме площадью 1–2–3–4, которая равна разности между работой, полученной в турбине (площадь 6–3–4–5), и работой, затраченной на привод компрессора (площадь 6–2–1–5).

Площадь цикла 1–2–3–4 в  $T-s$  диаграмме отображает теплоту эквивалентную этой же полезной работе. Теплота, превращенная в работу, получается как разность между количествами подведенной  $q_1$  (площадь 8–2–3–7) и отведенной  $q_2$  (площадь 1–4–7–8) теплоты (рисунок 58, б).

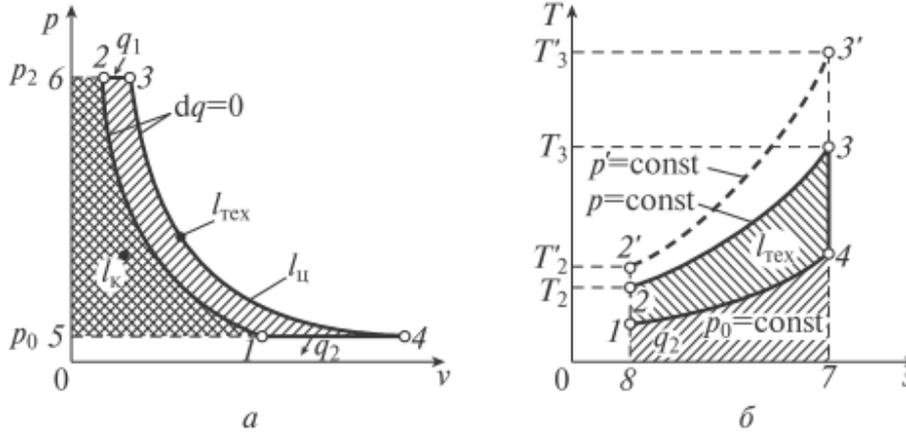


Рисунок 58 – Цикл ГТУ: а) в  $p-v$  диаграмме; б) в  $T-s$  диаграмме

Коэффициент полезного действия идеального цикла ГТУ:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{c_p (T_3/T_2 - 1)}. \quad (5.5)$$

В формуле (5.5) для простоты теплоемкость  $C_p$  принята постоянной.

Одной из основных характеристик цикла газотурбинной установки является *степень повышения давления в компрессоре*  $\pi = p_2 / p_1$ . Выразим отношение температур в формуле (5.5) через степень повышения давления из уравнения адиабаты:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (5.6)$$

Поскольку  $p_4 = p_1$  и  $p_3 = p_2$ , после ряда преобразований из (5.5) получим

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (5.7)$$

Коэффициент полезного действия идеального цикла непрерывно возрастает с увеличением степени повышения давления  $\pi$ . Это связано с увеличением температуры в конце процесса сжатия  $T_2$  и, соответственно, температуры газов перед турбиной  $T_3$ .

Из рисунка 58, б следует, что цикл 1-2'-3'-4, в котором более высокая степень повышения давления, экономичнее цикла 1-2-3-4, поскольку величина теплоты  $q_1$ , подводимая по линии 2'-3', больше теплоты, подводимой

по линии 2–3, при том же количестве теплоты  $q_2$ , отведенной в процессе 4–1. При этом  $T_2'$  и  $T_3'$  больше, чем соответственно  $T_2$  и  $T_3$ .

Максимальная температура газов перед турбиной ограничивается жаропрочностью металла, из которого делают ее основные элементы (в авиационных двигателях 1100–1200 °С, а в стационарных 750–850 °С). Поэтому температура горения топлива ограничивается с помощью регулирования подачи воздуха.

Задачами оптимизации выбора  $\pi$  ГТУ являются: во-первых, повышение КПД, во-вторых, минимизация расхода газа на единицу вырабатываемой мощности.

Оптимальные значения  $\pi = 3–6$ , в некоторых случаях 10–12. Эффективность газотурбинной установки возрастает с понижением температуры воздуха, засасываемого в компрессор, что приводит к увеличению полезной мощности газотурбинной установки и к повышению КПД.

#### *Регенеративный цикл ГТУ.*

Для повышения КПД ГТУ используется способ регенерации тепла (рис. 59) [39]. В схему регенеративного цикла включен теплообменник 2, в котором воздух, идущий от компрессора в камеру сгорания, нагревается отработанными газами, выходящими из турбины в атмосферу. В результате частичного использования теплоты отработанных газов КПД установки повышается.

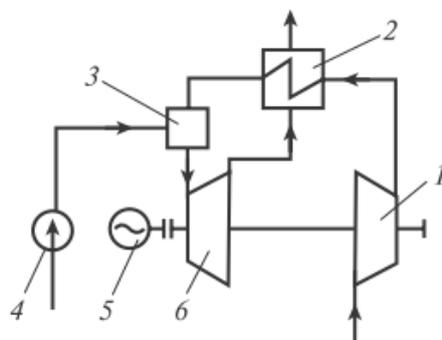


Рисунок 59 – Принципиальная схема газотурбинной установки разомкнутого регенеративного цикла: 1 – компрессор, 2 – регенеративный теплообменник, 3 – камера сгорания, 4 – насос, 5 – генератор, 6 – турбина

Идеальный цикл такой установки в  $p-v$  и  $T-S$  диаграммах представлен на рисунке 60. Линия 1–2 изображает изэнтропное сжатие воздуха в компрессоре, линия 2–3 – изобарный подвод тепла к газу в регенераторе, линия 3–4 – изобарный подвод тепла в камере сгорания, линия 4–5 – изэнтропное расширение в турбине, линия 5–6 – изобарный отвод тепла от продуктов сгорания в регенераторе, линия 6–1 – изобарный отвод тепла от продуктов сгорания в атмосфере.

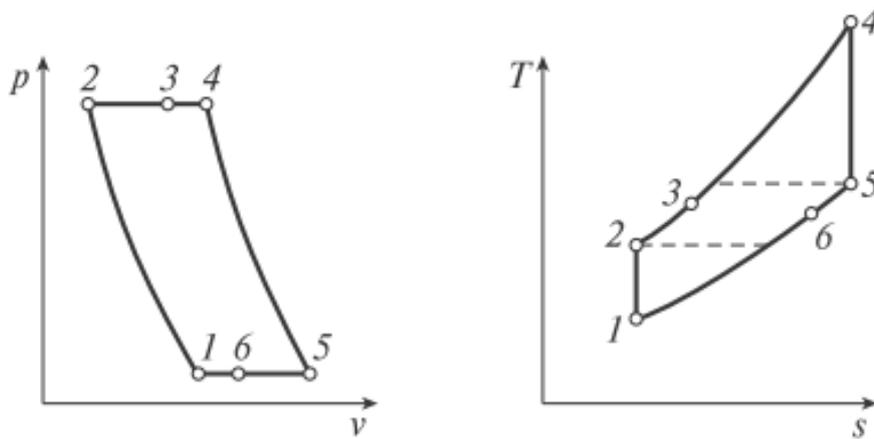


Рисунок 60 – Идеальный цикл газотурбинной установки со сгоранием при постоянном давлении и регенерацией тепла

Отношение количества теплоты, полученной воздухом в регенераторе, к количеству теплоты, необходимой для нагрева воздуха до температуры отработавших в турбине газов, называется степенью регенерации  $\sigma$ . Практически степень регенерации всегда меньше единицы  $\sigma < 1$ , поскольку температура нагретого воздуха на выходе из регенератора всегда ниже температуры отработанных газов на выходе из турбины.

В соответствии с рисунком 60 степень регенерации определяется:

$$\sigma = (T_3 - T_2) / (T_5 - T_2). \quad (5.8)$$

Термический КПД регенеративного цикла может быть получен исходя из следующих соображений, представленных ниже.

Количество, подведенной в регенеративном цикле, теплоты:

$$q_1 = c_p (T_4 - T_3) = c_p [(T_4 - T_2) - (T_3 - T_2)] = c_p [(T_4 - T_2) - \sigma(T_5 - T_2)]. \quad (5.9)$$

Количество отведенной в регенеративном цикле теплоты меньше, чем в цикле без регенерации, на величину теплоты, передаваемой на нагрев в регенераторе, то есть на величину  $c_p (T_3 - T_2)$ .

Количество отводимой в цикле теплоты:

$$q_2 = c_p [(T_5 - T_1) - (T_3 - T_2)] = c_p [(T_5 - T_1) - \sigma (T_5 - T_2)] . \quad (5.10)$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{(T_5 - T_1) - \sigma(T_5 - T_2)}{(T_4 - T_2) - \sigma(T_5 - T_2)}. \quad (5.11)$$

На рисунке б1 представлена зависимость  $\eta_t$  от  $\sigma$  для различных значений степени повышения давления в компрессоре. Из рисунка видно, что  $\eta_t$  повышается с ростом степени регенерации  $\sigma$ , причем это увеличение более значительно при небольших значениях степени повышения давления  $\pi$ . Для получения больших значений степени регенерации требуются регенераторы с большими поверхностями.

С другой стороны, необходимо также учитывать, что помимо положительного термодинамического эффекта, наличие регенератора не только увеличивает габариты и массу газотурбинной установки, но и вызывает дополнительные гидравлические потери.

Поэтому решение задачи повышения эффективности ГТУ требует решения задачи оптимизации с учетом анализа технико-экономических характеристик.

На практике для установок с изобарными процессами подвода и отвода теплоты обычно используется степень регенерации  $\sigma = 0,7-0,8$ .

Для современных газотурбинных электростанций в России чаще всего применяются газовые турбины мощностью 25–100 МВт [37].

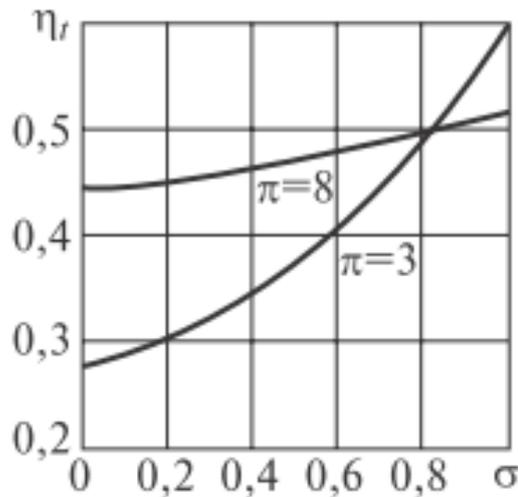


Рисунок б1 – Зависимость  $\eta_t$  от  $\sigma$  при некоторых значениях  $\pi$  для цикла газотурбинной установки со сгоранием при  $p = const$

Газотурбинные установки в настоящее время являются основным типом двигателей в авиации. Первый самолет с ГТУ появился в 1941 году. Помимо этого, такой тип двигателей применяется на железнодорожном транспорте, на судах и в большегрузных автомобилях. Привлекательным для транспорта является простота конструкций, способность быстро набирать

нагрузку, возможность получения больших мощностей при малых габаритах.

ГТУ применяются в химической промышленности, металлургии, в системах переработки газа.

Для базовой энергетики эти преимущества ГТУ в большинстве случаев не являются определяющими. Существенна их более низкая, чем в паросиловых установках, термодинамическая эффективность (КПД ГТУ – 20–30 %, ПСУ – 40–45 %). Между тем пользование ГТУ в энергетике целесообразно во время пиковых нагрузок на электросети. В этом случае оказываются привлекательным возможность быстрого запуска и мобильность энергетических установок с газотурбинным приводом [39].

### 5.7. Парогазовые установки

Одной из задач, решаемых при создании парогазовых установок (ПГУ), является повышение термического КПД, который в газотурбинных системах сдерживает их более широкое использование в первую очередь в энергетике.

По данным [39], в лучших современных образцах ПГУ, применяемых в зарубежной практике, значение  $\eta_t$  достигает 50%. По мнению авторов [40], в обозримой перспективе величина термического КПД может быть повышена до 60%.

Высокий уровень температур при подводе теплоты в газотурбинной установке и низкий уровень отвода теплоты в паротурбинной установке конденсационного цикла, имеющего наибольшую термодинамическую эффективность, привели к развитию комбинированного парогазового цикла.

Парогазовый цикл применяется в сочетаниях двух рабочих тел: газа и водяного пара. Цикл ПГУ включает газотурбинную ступень в области высоких температур и паротурбинную в области низких. Отработанный в ступени газовой турбины газ отдает свою теплоту в паротурбинной ступени для подогрева питательной воды.

На рисунке 62 представлена простейшая схема, а на рисунке 63 в  $T-S$  диаграмме – теоретический цикл парогазовой установки с использованием теплоты из газовой ступени для подогрева питательной воды. В более сложных схемах утилизация теплоты отходящих газов может быть направлена на перегрев пара перед турбиной [38].

В камеру сгорания 2, согласно рис. 57, подается топливо, а компрессором 1 – сжатый воздух. Продукты сгорания, отработав в газовой турбине 3, поступают в подогреватель 10, где нагревают питательную воду, поступающую в котел, и удаляются в атмосферу.

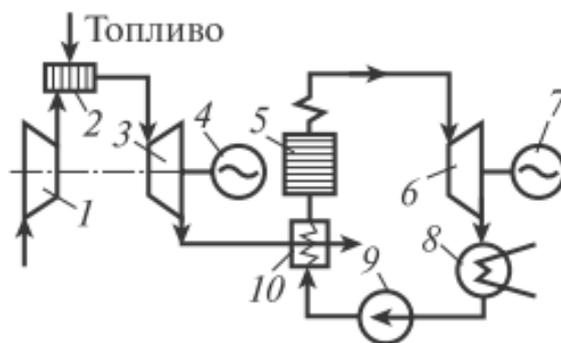


Рисунок 62 – Схема парогазовой установки [36]

Перегретый пар, получаемый в котлоагрегате 5, расширяется в паровой турбине 6 и конденсируется в конденсаторе 8. Конденсат насосом 9 перекачивается в подогреватель 10, где обогревается и поступает затем в котел.

Полезная мощность, вырабатываемая газовой и паровой турбинами, передается генераторам электрического тока 4 и 7.

Соотношение между количеством отработанных газов и количеством обогреваемой питательной воды определяется из условия, что количество тепла, отдаваемого отработавшими газами, должно равняться количеству тепла, необходимого для подогрева питательной воды до расчетной температуры.

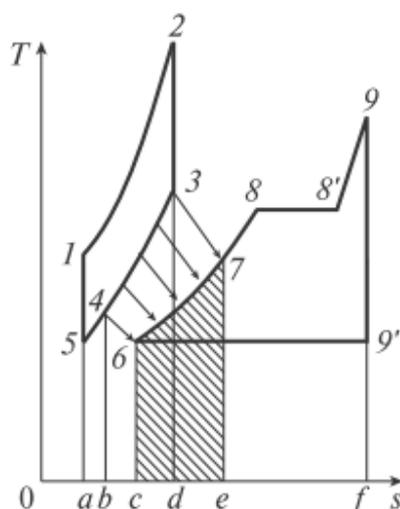


Рисунок 63 – Идеальный цикл парогазовой установки в  $T-s$  диаграмме

Цикл парогазовой установки (рисунок 58) включает цикл газотурбинной части установки – 1–2–3–4–5–1 и цикл Ренкина паротурбинной части –

6–7–8–8'–9–9'–6. При раздельном осуществлении газотурбинной и паротурбинной установок теплота, подводимая в цикле газотурбинной установки, измеряется площадью  $a-1-2-d$ , а полезная работа – площадью  $1-2-3-4-5$ .

Тепло, подводимое в цикле паротурбинной установки, измеряется площадью  $c-6-7-8-8'-9-f$ , а полезная работа – площадью  $6-7-8-8'-9-9'-6$ .

В ранее рассмотренной ГТУ теплота, измеряемая площадью  $3-5-a-d$ , бесполезно отдается отработанными газами окружающей среде в процессе  $3-5$ .

В парогазовой же установке количество тепла, изображаемое площадью  $3-4-b-d$ , передается в процессе  $3-4$  питательной воде. Площадь  $c-6-7-e$  (заштрихована) эквивалентна теплоте, получаемой в процессе  $6-7$  питательной водой.

Таким образом, в результате совместной реализации циклов ГТУ и ПСУ на величину этой площади уменьшается теплота  $q_1$ , подводимая в отдельном цикле паросиловой установки за счет сгорания топлива.

Этот выигрыш в расходе теплоты и определяет эффективность рассматриваемой парогазовой установки.

Как следует из курса «Термодинамики» [20], в парогазовой установке термический КПД общего цикла больше, чем КПД каждого из составных (газового и пароводяного) и, следовательно, наибольшего из них.

Возможен и другой тип парогазовой установки. На рисунке 64 представлена принципиальная схема ПГУ с высоконапорным парогенератором [40].

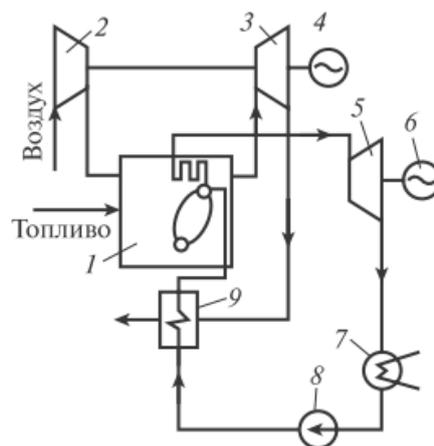


Рисунок 64 – Принципиальная схема парогазовой установки с высоконапорным парогенератором: 1 – парогенератор повышенного давления, 2 – компрессор, 3 – турбина ГТУ, 4 – генератор ГТУ, 5 – турбина ПСУ, 6 – генератор ПСУ, 7 – конденсатор, 8 – насос, 9 – регенеративный теплообменник

В топку парогенератора (котлоагрегата) компрессором 2 подается под давлением воздух. Давление продуктов сгорания в топке котла составляет 0,5–0,6 МПа. Наддув значительно интенсифицирует процесс горения и теплообмена, в результате чего высоконапорный парогенератор 1 имеет высокий КПД. Перегретый пар, получаемый в парогенераторе 1 за счет сжигания жидкого или газообразного топлива, поступает в паровую турбину 5 и после расширения – в конденсатор 7. Конденсат насосом 8 подается в парогенератор, пройдя подогреватель 9, и цикл части ПТУ замыкается. Вал турбины соединен с валом электрического генератора 6.

Продукты сгорания топлива (газы), охлажденные воздухом в поверхностях теплообменника парогенератора до допустимой температуры, направляются в качестве рабочего тела в газовую турбину 3. Отработав в турбине, газы нагревают в подогревателе 9 конденсат, идущий в парогенератор, и удаляются в атмосферу.

Часть механической энергии, вырабатываемой газовой турбиной, затрачивается на привод компрессора 2, оставшаяся часть преобразуется в электрическую энергию с помощью генератора 4. Общая электрическая мощность парогазовой установки складывается из мощностей, вырабатываемых генераторами 4 и 6.

Повышение эффективности этого цикла достигается здесь за счет дополнительной мощности, получаемой в газотурбинной части установки за счет повышения температуры перед турбиной, и регенеративном подогреве воды, подаваемой в парогенератор.

Использование (полное или частичное) отработанного в турбине пара для целей теплофикации также повышает эффективность установки, работающей в когенераторном режиме.

Рассмотренные схемы парогазовых установок могут создаваться на жидком и газообразном топливе для газотурбинной части и твердом топливе – для паротурбинной части установок.

## **5.8 Тепловые насосы**

Тепловой насос (ТН) является установкой малой энергетики и предназначен для отопления помещений. Типы тепловых насосов, вопросы эффективности их применения и конструктивных особенностей изложены в работах И. М. Калниня [49]–[51].

Тепловые насосы (ТН) являются энергоэффективными установками, использующими возобновляемые источники энергии и вторичные энергетические ресурсы [47]. Являясь альтернативой энергоустановок, использующих сжигание топлива, парокомпрессорные ТН сокращают потребление электроэнергии для целей теплоснабжения в 3,0–4,0 раза.

Применение ТН одновременно обеспечивает сбережение первичной энергии, экономическую выгоду и положительный экологический эффект.

Применение тепловых насосов в мировой практике уже сейчас сокращает на 1 % глобальную эмиссию диоксида углерода в атмосферу. Широкомасштабное их распространение позволит к 2030 году увеличить сокращение выбросов до 8 % [48].

Количество установленных тепловых насосов в Европе сейчас приближается к 10 миллионам и в обозримом будущем может вырасти до 60 млн. Эксперты приходят к выводу, что декарбонизация малой энергетики невозможна без использования тепловых насосов.

В последние годы тепловые насосы получили широкое распространение в скандинавских странах с достаточно суровым климатом. Это новая тенденция, поскольку традиционно считались ТН прерогативой регионов с умеренно-теплым климатом.

Так, в Швеции 50 % всего отопления обеспечивают геотермальные тепловые насосы. В Стокгольме 12 % всего отопления обеспечивается геотермальными насосами с общей мощностью 320 МВт с использованием вод Балтийского моря в качестве источника теплоты [72].

В Швейцарии эксплуатируется свыше 60000 тепловых насосов, что составляет более 30 % от общего количества тепловых установок в жилых домах.

В США ежегодно производится более 1 млн. геотермальных тепловых насосов. Федеральное законодательство США при строительстве новых общественных зданий требует использовать геотермальные тепловые насосы в системах отопления.

В Японии ежегодно производится 3 миллиона тепловых насосов.

В Германии предусмотрена государственная дотация в размере 30 евро на 1 кВт установленной тепловой мощности тепловых насосов.

В Китае 20 % климатического оборудования составляют тепловые насосы.

В отличие от прямого цикла Ренкина, положенного в основу теплоэнергетических установок, парокомпрессорный ТН работает по обратному термодинамическому циклу, подобному циклу холодильных машин. Являясь энергетической установкой, ТН предназначен для передачи теплоты от температуры окружающей среды  $T_{oc}$  до температуры греющего источника  $T_{г.и.}$  (рисунок 65).

На рисунке 66 представлена схема регенеративного цикла ТН, включающая компрессор К, конденсатор КД, переохладитель П, регенеративный теплообменник РТ, регулирующий вентиль РУ, испаритель И.

В конденсаторе нагревается вода с  $t_{w1}$ , поступающая после нагрева в отопительные приборы. В испарителе циркулирует жидкость с температурой окружающей среды  $t_{s1}$ ,  $t_{s2}$  (температуры низкопотенциального источника теплоты).

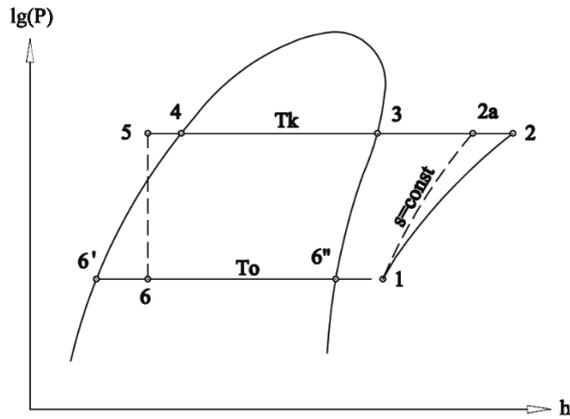


Рисунок 65– Цикл парокompрессорного теплового насоса

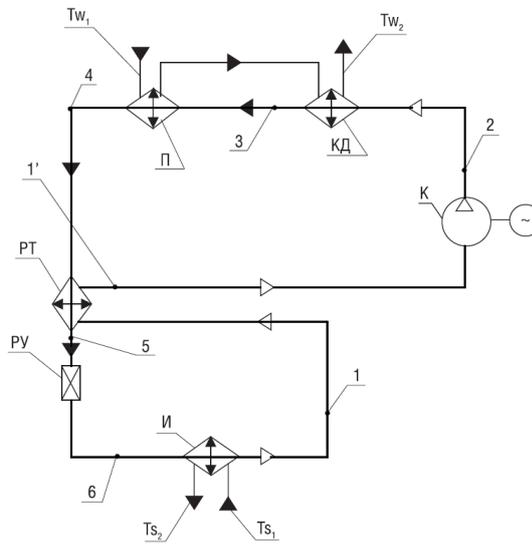


Рисунок 66 – Принципиальная схема парокompрессионного теплового насоса

Для оценки термодинамической эффективности теплового насоса используется коэффициент трансформации (отопительный коэффициент):

$$\mu = q_1/l_{\text{ц}}, \quad (5.12)$$

где  $q_1$  – теплота конденсации;  $l_{\text{ц}}$  – работа цикла.

В основе классификации тепловых насосов заложен выбор температуры низкопотенциального источника теплоты.  $T_{\text{НП}}$ .

Часто понятие температуры низкопотенциального источника заменяется термином *температура окружающей среды*  $T_{oc}$ . Использование каждого из терминов может быть удобным для различных методов термодинамического анализа, но в обоих случаях правомерно.

В зависимости от выбора источника низкопотенциальной теплоты и греющей среды тепловые насосы подразделяются согласно, [49], на:

- грунт – вода;
- грунт – воздух;
- вода – вода;
- вода – воздух;
- воздух – вода;
- воздух – воздух.

Каждый из названных вариантов ТН обладает определенными достоинствами и недостатками, и в основе выбора должны быть заложены соображения экономики, географического положения, наличия топливных ресурсов (в качестве дублирования ТН) и др.

Ниже представлены схемы наиболее распространенных тепловых насосов.

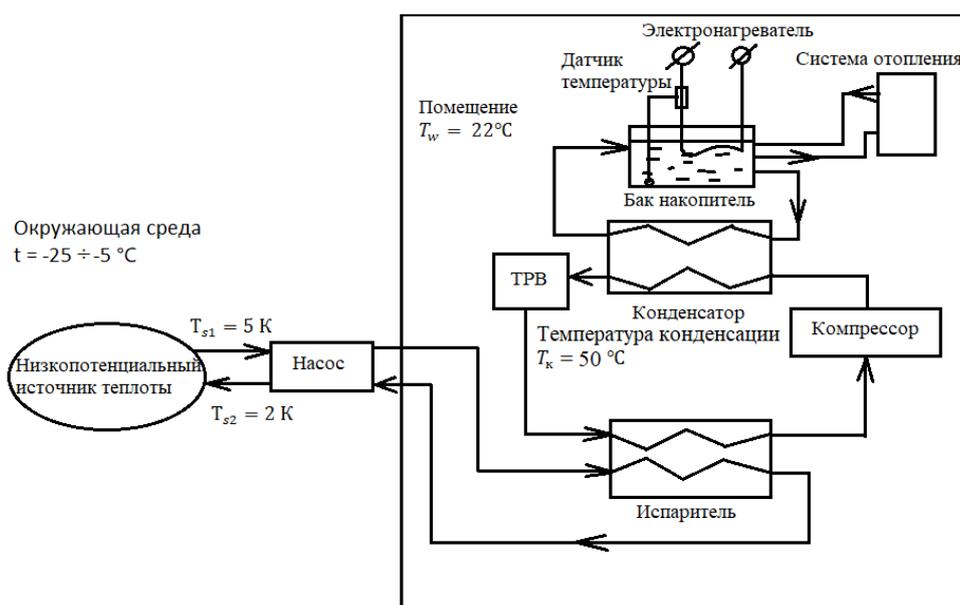


Рисунок 67 – Схема теплового насоса «вода – вода»

Схема ТН, представленная на рисунке 67, реально используется при отоплении малоэтажных зданий в прибрежных районах Швеции.

Вода при температуре 5 °С из Балтийского моря откачивается насосом в контур испарителя, где отдает тепло кипящему хладагенту  $R134a$ . В ком-

прессоре давление повышается с 2,72 до 13–16 бар. В конденсаторе хладагент отдает тепло конденсации воде контура бака накопителя, затем поступает в терморегулирующий вентиль ТРВ и цикл замыкается.

При температуре  $T_{н.п.} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  расчетная температура кипения принимается  $T_0 = -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура конденсации  $T_k = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура воды в баке накопителе может регулироваться датчиком температуры и дополнительно подогреваться электронагревателем в зависимости от нужд системы отопления. Температура воды в охлаждающих приборах при заданной температуре конденсации определяется параметрами охлаждающих приборов.

На рисунке 68 представлена схема ТН «воздух – вода».

В качестве испарителя используется воздухоохладитель с пластинчатым оребрением, снабженный вентилятором. В зимний период возможно образование инея на теплообменной поверхности, что требует периодической оттайки с помощью электронагревателя.

Тепловой насос «воздух – вода» менее экономичен, чем ранее рассмотренный «вода – вода» [50]. Однако этот тип ТН не связан с незамерзающими водоемами и несколько дешевле первого.

Как показывает опыт эксплуатации тепловых насосов «воздух – вода» в коттеджах, этот тип отопления более экономичен, чем котельная, хотя и требует дополнительного источника теплоты в особо холодный период. Часто в этих случаях дополнительно применяются электрокалориферы.

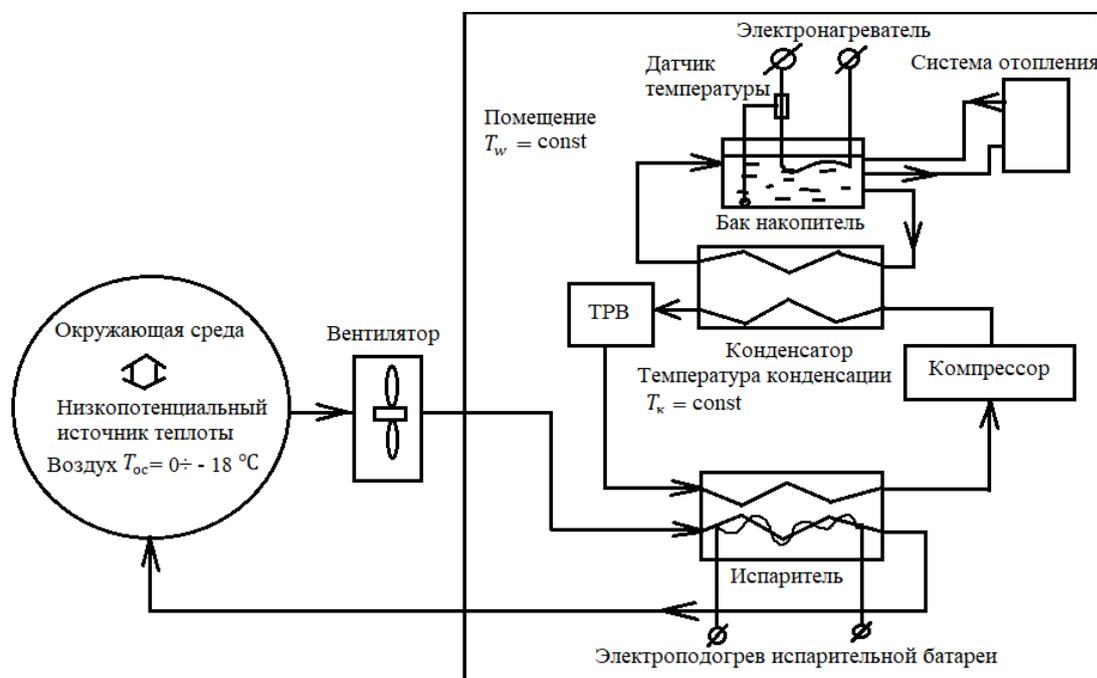


Рисунок 68 – Схема теплового насоса «воздух – вода»

## Контрольные вопросы

1. Схема и цикл газотурбинной установки (ГТУ). Повышение эффективности.
2. Регенеративный цикл ГТУ.
3. Парогазовая установка.
4. Тепловой насос «вода – вода».
5. Тепловой насос «воздух – вода».

## 5.9 Термодинамический анализ циклов

### 5.9.1 Объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики

Второй закон термодинамики, определяющий условия взаимного преобразования работы и теплоты, выражается уравнением [73]:

$$dS \geq \frac{dQ}{T} . \quad (5.13)$$

При этом знак неравенства свидетельствует о необратимости процессов, а равенства – об обратимости.

Тогда для единицы массы:

$$Tds \geq dq . \quad (5.14)$$

Для единицы массы первый закон термодинамики выражается уравнением:

$$dq = du + dl . \quad (5.15)$$

С учетом (5.14) уравнение (5.15) приобретает вид:

$$Tds \geq du + pdv . \quad (5.16)$$

Для термодинамической системы, находящейся в равновесном состоянии для единицы массы, объединенное уравнение имеет вид:

$$Tds = du + pdv . \quad (5.17.)$$

## 5.9.2 Производство работы изолированной термодинамической системой. Полезная работа

На первом этапе рассматриваются изолированные термодинамические системы. Типы различных термодинамических систем представлены в [73].

*Изолированная термодинамическая система (ТДС) может производить работу только при наличии неравновесного состояния.*

Иначе говоря, для производства работы необходимо наличие градиентов температур или давлений внутри системы.

По мере производства работы система переходит в равновесное состояние (если она полностью изолирована).

По определению *параметры окружающей среды (ОС) остаются во всех случаях неизменными:  $P = const$  и  $T = const$ .*

Пусть термодинамическая система состоит из ОС и сжатого воздуха в цилиндре, имеющего одинаковую с окружающей средой температуру  $T_B = T_{oc}$ , но при этом отличное от ОС давление  $P_B > P_{oc}$  (механическое неравновесие). При наличии разности потенциалов давления система производит работу, и в результате чего давление воздуха и окружающей среды выравниваются.

Допустим, в системе находятся два источника теплоты с разными температурами и рабочее тело, помещенное в механическое устройство способное производить работу. В результате осуществления цикла Карно производится работа и осуществляется передача теплоты от одного источника к другому.

Если система изолированная, то нарушенное термическое неравновесие приведет к выравниванию температур и к прекращению термодинамического процесса. Дальнейшее производство работы невозможно.

Наличие только термического неравновесия не является единственным условием производства работы. Теоретически в придельном случае работа вообще может и не производиться (рисунок 69).

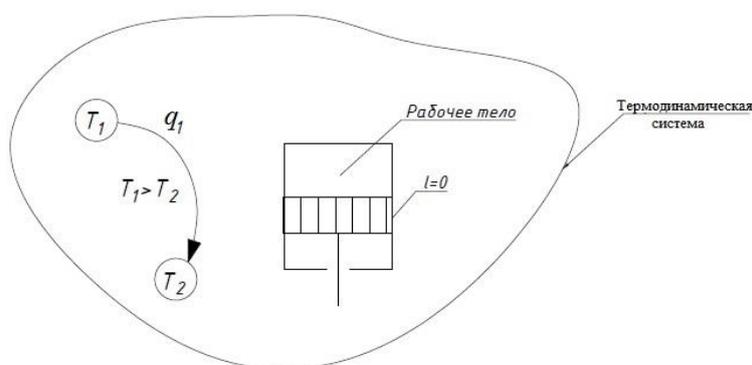


Рисунок 69 – Неравновесная ТДС, не производящая работу

В другом предельном случае максимальная работа будет произведена в результате реализации цикла Карно при условии термического неравновесия (наличия разности термических потенциалов), когда максимальная температура рабочего тела  $T_{max}$  будет равна температуре греющего источника  $T_{г.и}$ , а минимальная температура  $T_{min}$  – холодного источника  $T_{х.и}$  (рис. 70).

Учитывая, что цикл Карно имеет максимальную термодинамическую эффективность, условием максимальной работы является наличие только обратимых процессов, что и свойственно этому циклу.

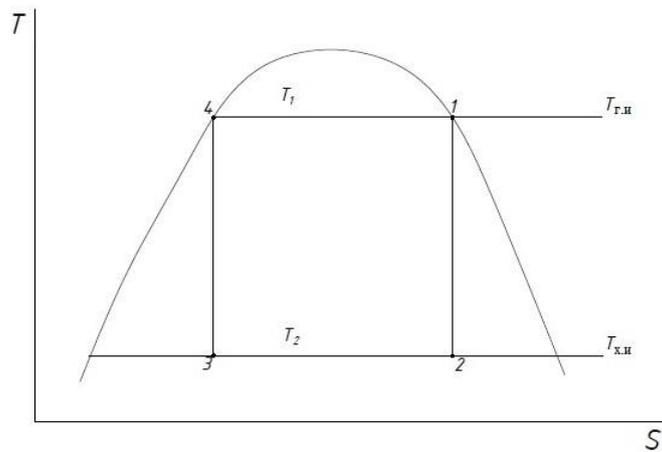


Рисунок 70 – Условия производства максимальной работы

Из сказанного следуют два принципиальных вывода:

– Производство работы возможно только при *неравновесном состоянии* термодинамической системы (наличия разности потенциалов).

При достижении равновесия производство работы невозможно. Для обеспечения постоянного производства работы необходимо поддерживать неравновесное состояние в течение всего периода работы системы.

– Получение *максимально возможной работы* при переходе из неравновесного состояния в равновесное возможно только при наличии *обратимых процессов* в термодинамической системе.

Далее необходимо определиться с понятиями не только максимальной, но и *максимально полезной работы*.

Дано: изолированная система, включающая окружающую среду ОС, тело (несколько тел), имеющее температуру или давление, отличное от параметров ОС. Такое тело (группа тел) именуется *источником работы ИР*.

Таким образом, имеется термическое и (или) механическое неравновесие в ТДС, что является условием производства работы.

Обозначим:  $U_1$  и  $V_1$  – внутренняя энергия и объем источника работы в начальном неравновесном состоянии, а  $U_2$  и  $V_2$  – те же параметры источника работы в конечном состоянии равновесия с ОС.

Обозначим *начальные давление и температуру* источника работы  $p$  и  $T$ , а *конечные*  $p_0$  и  $T_0$  (в состоянии равновесия параметры источника работы и окружающей среды равны).

Начальная внутренняя энергия *окружающей среды* –  $U_{01}$ , конечная  $U_{02}$ .

Суммарная *начальная внутренняя энергия термодинамической системы (ТДС)* в неравновесном состоянии  $U_{\text{сист}}$ , конечная – в равновесном состоянии –  $U'_{\text{сист}}$ . Это выражается уравнениями (5.18) и (5.19):

$$U'_{\text{сист}} = U_1 + U_{01}, \quad (5.18)$$

$$U''_{\text{сист}} = U_2 + U_{02}. \quad (5.19)$$

Так как рассматриваются только замкнутые и изолированные ТДС, то работа может производиться только за счет внутренней энергии ТДС, тогда:

$$L = U'_{\text{сист}} - U''_{\text{сист}} \quad (5.20)$$

или с учетом (5.18) и (5.19):

$$L = (U_1 - U_2) + (U_{01} - U_{02}) \quad (5.21)$$

Обмен энергии между источником работы и ОС может осуществляться в виде передачи теплоты  $Q_0$  (при термическом неравновесии) и совершением работы над ОС в виде ее сжатия  $L_0$  в случае, если начальное давление источника работы окажется выше давления ОС (механическое неравновесие).

Внутренняя энергия ТДС изменится на величину

$$U_{02} - U_{01} = Q_0 + L_0. \quad (5.22)$$

Поскольку давление ОС неизменно по определению, то

$$L_0 = p_0 (V_2 - V_1). \quad (5.23)$$

Тогда изменение внутренней энергии ОС будет

$$U_{01} - U_{02} = -Q_0 - p_0 (V_2 - V_1). \quad (5.24)$$

Подставляя величину изменения внутренней энергии ОС в выражение работы (5.21), получаем:

$$L = (U_1 - U_2) - Q_0 - p_0(V_2 - V_1). \quad (5.25)$$

Поскольку температура окружающей среды не меняется по определению  $T_0 = \text{const}$ , то теплота, подведенная от источника работы к окружающей среде может быть выражена через изменение энтропии окружающей среды:

$$Q_0 = T_0(S_{02} - S_{01}). \quad (5.26)$$

С учетом уравнений 5.25 и 5.26 выражение работы имеет вид

$$L = (U_1 - U_2) - T_0(S_{02} - S_{01}) - p_0(V_2 - V_1). \quad (5.27)$$

Полученное уравнение выражает величину *полезной работы* изолированной термодинамической системы при переходе из неравновесного состояния к полному равновесию с окружающей средой.

Теплота, передаваемая от источника работы к окружающей среде, является сопутствующим эффектом, вызванным термическим неравновесием в соответствии со вторым законом термодинамики. Эта теплота может быть «бросовой», как в конденсационном цикле, а может быть использована, как в теплофикационном.

В отличие от полезной работы, работа сжатия среды не является полезной, поскольку направлена только на преодоление сопротивления со стороны окружающей среды.

Для нахождения величины *максимально полезной работы* необходимо исходить из известного положения термодинамики о том, что в изолированных системах при наличии только обратимых процессов энтропия постоянна. Тогда при уменьшении энтропии источника работы на величину энтропия окружающей среды увеличится на такую же величину:

$$(S_{02} - S_{01}) = (S_1 - S_2). \quad (5.28)$$

С учетом этого величина максимально полезной работы будет иметь вид:

$$L^{\max} = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) - p_0(V_2 - V_1). \quad (5.29)$$

Отметим, что, как следует из (5.29), *максимально полезная работа* определяется динамикой изменения параметров источника работы (измене-

нием внутренней энергии, изменением энтропии, изменением объема источника работы. Под источником работы можно представить газ под поршнем идеального цилиндра) по отношению к окружающей среды с постоянным давлением и температурой.

### 5.9.3 Максимально полезная работа теплоты (работоспособность теплоты)

Максимально полезная работа теплоты или работоспособность теплоты имеет большое практическое значение в теплоэнергетике.

Рассматривается изолированная система, состоящая из ОС с постоянными параметрами  $T_0$  и  $p_0$ , которая выполняет функции источника низкой температуры, и источник высокой температуры, имеющий бесконечно большую массу. В этом случае температура горячего источника  $T_1$  остается также постоянной.

*Работоспособностью теплоты называется та максимально полезная работа  $L^{\text{макс}}$ , которая может быть получена за счет теплоты, передаваемой от горячего источника к ОС.*

Следует вспомнить, что если между источниками теплоты размещено механическое устройство, совершающее прямой термодинамический цикл (рисунок 20 а), то доля теплоты, превращаемой в работу прямо пропорциональна разности температур между источниками.

В ранее рассмотренном процессе перехода от неравновесного состояния к равновесному работа совершалась за счет внутренней энергии термодинамической системы (5.20). Если же рассматривается цикл, то есть круговой процесс, то внутренняя энергия остается неизменной. В этом случае работа может совершаться только за счет теплоты  $Q_1$ , передаваемой рабочему веществу цикла от источника высокой температуры.

В отличии от уравнения (5.29), в случае осуществления цикла, объем рабочего тела остается неизменным и, следовательно, окружающая среда не подвергается сжатию и последнее слагаемое из уравнения (5.29) исключается.

*Таким образом, вся работа, произведенная рабочим веществом при осуществлении цикла, является полезной.* В соответствии со вторым законом термодинамики доля теплоты, превращенной в работу, определяется коэффициентом полезного действия цикла.

Как было сказано в главе 3, максимальным КПД в определенном диапазоне температур обладает цикл Карно, полностью состоящий из обратимых процессов (рис. 26).

Отсюда следует:

$$L^{\text{Т макс}} = Q_1 \eta^{\text{К}} = Q_1 \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right), \quad (5.30)$$

где  $\eta^k$  – термический КПД обратимого цикла Карно в интервале температур  $T_1 - T_2$ .

Наличие необратимостей в системе будет снижать термический КПД и соответственно величину полезной работы теплоты.

При наличии необратимостей выражение (5.28), определяющее связь изменения энтропии окружающей среды и рабочего тела, будет преобразовано к виду:

$$(S_{02} - S_{01}) > (S_1 - S_2) . \quad (5.31)$$

Разность величин максимально полезной работы и полезной работы определяется величиной необратимых потерь или степенью обратимости.

$$L^{\text{макс}} - L = \Delta L = T_0 [(S_{02} - S_{01}) - (S_1 - S_2)] = T_0 \Delta S_{\text{сист}} . \quad (5.32)$$

Величина  $\Delta L$  называется энергетической потерей. Связь энергетической потери с разностью энтропий определяется уравнением Гюи-Стодола, в честь французского физика М. Гюи и словацкого теплотехника А. Стодола.

$$\Delta L = L_{\text{полезн}}^{\text{макс}} - L_{\text{полезн}} = T_0 \Delta S_{\text{сист}} . \quad (5.33)$$

Уравнение Гюи-Стодола имеет универсальное значение как для случая перехода из неравновесного состояния к состоянию равновесия с ОС, так и для цикла, совершающего работу за счет подвода теплоты при различных методах термодинамического анализа систем.

### Контрольные вопросы

1. Объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики.
2. Полезная работа.
3. Максимально полезная работа.
4. Величина энергетических потерь. Уравнение Гюи-Стодола.

### 5.9.4 Метод сравнения термических КПД циклов

Вводятся следующие понятия, необходимые для анализа эффективности циклов с помощью *сравнения термических КПД*.

*Термический КПД:*

$$\eta_{\tau} = \frac{l_{\text{ц}}^{\text{обр}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2^{\text{обр}}}{q_1} = 1 - \frac{q_2^{\text{обр}}}{q_1} . \quad (5.34)$$

*Внутренний КПД:*

$$\eta_i = \frac{l_{\text{ц}}^{\text{действ}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2^{\text{действ}}}{q_1} = 1 - \frac{q_2^{\text{действ}}}{q_1}. \quad (5.35)$$

*Термический КПД*  $\eta_{\text{T}}$  характеризует степень термодинамического совершенства обратимого цикла в рассматриваемом интервале температур (например цикл Карно) (5.34).

*Внутренний КПД*  $\eta_i$  (5.35) оценивает степень совершенства реального цикла (например, цикл Ренкина). Однако этот внутренний КПД не дает ответа на вопрос о величине необратимых потерь.

В определенной степени необратимые потери учитываются *внутренним относительным КПД*  $\eta_{0i}$ , показывающим, в какой степени реальный цикл менее совершенен образцового обратимого:

$$\eta_{0i} = \frac{l_{\text{ц}}^{\text{действ}}}{l_{\text{ц}}^{\text{обр}}}. \quad (5.36)$$

С учетом этого внутренний КПД приобретает вид:

$$\eta_i = \eta_{0i} \eta_{\text{T}}. \quad (5.37)$$

*Внутренний относительный КПД* лишь косвенно оценивает потери термодинамического цикла, обусловленные как внутренней, так и внешней необратимостью.

Следует напомнить, что *внешняя необратимость* обусловлена, например, разностью температур в теплообменных аппаратах, то есть условиями передачи теплоты от рабочего вещества к внешним источникам: окружающей среде, греющим или охлаждающим источникам.

*Внутренняя необратимость* связана с внутренними процессами течения рабочего вещества в отдельных элементах установки. Внутренняя необратимость в основном связана с внутренними потерями, например, на трение при дросселировании, потери при сжатии в компрессоре или расширении в турбине.

На вопрос, в каком именно элементе установки имеются максимальные необратимые потери и на какой узел надо обращать внимание при конструировании установки, *внутренний относительный коэффициент полезного действия* ответа не дает.

Необратимые потери в каждом отдельном элементе установки в первом приближении могут быть оценены *КПД этого элемента*.

Например, в цикле паросиловой установки процесс расширения в турбине теоретически считается адиабатным, и работа будет равна  $l_a = h_{1a} - h_{2a}$ .

В реальном процессе расширение проходит по политропе, и работа выражается уравнением  $l_p = h_{1p} - h_{2p}$ .

Разность энтальпий во втором случае меньше, чем при теоретическом процессе расширения, и соответственно меньше и величина полученной полезной работы  $l_a > l_p$ . Снижение эффективности процесса расширения обусловлена внутренней необратимостью при газодинамическом процессе расширения.

Необратимые потери в каждом из элементов установки имеют различную природу. Могут быть механические потери в двигателе, обусловленные трением, электрические потери в генераторе, связанные с нагревом и резистивным сопротивлением, тепловые потери в аппаратах, тепловые и гидравлические потери в трубопроводах и т.д.

Величина потерь в отдельных элементах характеризуется так называемым *эффективным КПД элемента*  $\eta_e$ . Эффективный КПД элемента зависит от физической природы процессов, происходящих в элементе и от его назначения.

Так, эффективный КПД турбины будет получен методом сопоставления реального процесса с идеальным:

$$\eta_e^{\text{тур}} = \frac{l_{\text{расш}}^{\text{действ}}}{l_{\text{расш}}^{\text{теор}}} . \quad (5.38)$$

Эффективный КПД теплоиспользующего теплообменного аппарата определяется отношением полезного эффекта к затраченной энергии (например, испаритель холодильной машины):

$$\eta_{\text{т.а}} = \frac{q_{\text{отв}}}{q_{\text{подв}}} , \quad (5.39)$$

где  $q_{\text{отв}}$  – отведенная теплота охлаждаемого объекта,  $q_{\text{подв}}$  – подведенная теплота к рабочему веществу.

Эффективный абсолютный КПД всей установки будет определяться произведением внутреннего относительного КПД и эффективных КПД отдельных элементов:

$$\eta_e^{\text{уст}} = \eta_{0i} \eta_{\text{т}} \prod_{j=1}^n \eta_e(j) . \quad (5.40)$$

Эффективный КПД установки показывает, какая доля теплоты, введенной в установку, превращается в полезную работу.

$$l_{\text{полез}} = \eta_e^{\text{уст}} q_1 . \quad (5.41)$$

Понятие полезной работы в прямых энергетических циклах может быть разная. В паросиловой установке – это произведенная электроэнергия, а для двигателя это крутящий момент вала автомобиля.

Представляет интерес также и величина доли теплоты  $q_1$ , не превращенной в работу:

$$\Delta q = (1 - \eta_e^{\text{уст}}) q_1 . \quad (5.42)$$

Величина  $\Delta q$  включает в себя и теплоту  $q_2$ , переданную холодному источнику (в конденсационном цикле), и необратимые потери теплоты от всех отдельных элементов:

$$\Delta q_{\text{пот}} = l_{\text{ц}}^{\text{обр}} - l_{\text{полез}} . \quad (5.43)$$

С учетом (5.41):

$$\Delta q_{\text{пот}} = (\eta_{\text{т}} - \eta_e^{\text{уст}}) q_1 . \quad (5.44)$$

### Контрольные вопросы

1. Термический, внутренний, внутренний КПД.
2. Внешняя и внутренняя необратимости.
3. Эффективный КПД элемента.
4. Эффективный абсолютный КПД всей установки.

## 5.9.5.Энтропийный метод анализа потерь работоспособности

В предыдущем разделе было показано, что уравнение Гюи-Стодолы является универсальным для оценки потери работоспособности как отдельных процессов, так и циклов.

В уравнении (5.33) увеличение энтропии  $\Delta S$  свидетельствует о величине потерь, обусловленных необратимыми процессами.

По определению, *под работоспособностью понимается максимальная полезная работа, которая может быть получена в рассматриваемом температурном диапазоне.* При этом наибольшей эффективностью обладает цикл Карно, который соответственно имеет и максимальную работоспособность.

Тогда работоспособность теплоты  $q_1$  будет определяться выражениями (5.45) и (5.46):

$$l_{\text{полез}}^{\text{макс}} = \eta_{\text{т}}^{\text{к}} q_1, \quad (5.45)$$

где  $\eta_{\text{т}}^{\text{к}}$  – термический КПД цикла Карно:

$$\eta_{\text{т}}^{\text{к}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (5.46)$$

Следовательно, если минимальной температурой является температура окружающей среды, или  $T_2 = T_{\text{ос}}$ , то максимальная полезная работа будет равна:

$$l_{\text{полез}}^{\text{макс}} = q_1 \left( 1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \quad (5.47)$$

Поскольку в данном случае рассматривается цикл Карно, состоящий только из обратимых процессов (рисунок 65), то температура греющего источника  $T_{\text{г.и}}$  равна температуре  $T_1$  цикла, а температура холодного источника (часто температура окружающей среды)  $T_{\text{х.и}}$  равна температуре  $T_2$  цикла.

Если в установке осуществляется реальный необратимый цикл, то полезная работа будет равна:

$$l_{\text{полез}} = q_1 \eta_e^{\text{уст}}, \quad (5.48)$$

где  $\eta_e^{\text{уст}}$  – эффективный абсолютный КПД установки.

С учетом (5.47) и (5.48) потеря работоспособности будет равна:

$$\Delta l = l_{\text{полезн}}^{\text{макс}} - l_{\text{полезн}} = q_1 (\eta_{\text{т}}^{\text{к}} - \eta_e^{\text{уст}}). \quad (5.49)$$

Полученное уравнение является, по сути дела, реализацией рассмотренного в разделе 5.9.4. метода сравнения термических КПД циклов.

Практический интерес представляет несколько иной подход к анализу. Общее изменение энтропии системы равно сумме изменения энтропий каждого отдельного элемента:

$$\Delta S_{\text{сист}} = \sum_{j=1}^n \Delta S_j. \quad (5.50)$$

Умножая правую и левую части уравнения на температуру окружающей среды  $T_0$ , в соответствии с 5.33, получаем выражение потери работоспособности.

$$\Delta L_{\text{сист}} = \sum_{j=1}^n \Delta L_j. \quad (5.51)$$

Вычисление прироста энтропии каждого элемента  $S_j$  в каждом конкретном случае представляет отдельную задачу.

С позиции анализ эффективности циклов неважно, производится ли работа либо не производится. Если полезная работа не производится то  $l_{\text{полезн.}}=0$ , а, согласно 5.33,  $\Delta L=l_{\text{макс. полезн.}}$ .

Следует напомнить, что уравнение Гюи-Стодола имеет универсальное значение как для отдельных процессов, так и для циклов.

*Суть энтропийного метода анализа иллюстрируется следующими соображениями.*

Рассматривается *изолированная система*, состоящая из двух тел, имеющих температуры  $T_1$  и  $T_2$ , причем  $T_1 > T_2$ , и окружающей среды с постоянной температурой  $T_0$ .

При наличии градиента температур между телами происходит теплообмен, и передается теплота  $Q$ . Работа при этом не совершается.

Процесс *необратимый*, энтропия первого тела уменьшается на величину  $\Delta S_1 = \frac{Q}{T_1}$ , а второго тела возрастает  $S_2 = \frac{Q}{T_2}$  (чтобы исключить нестационарность, условно принимается постоянство температур).

Общее изменение энтропии определяется уравнением:

$$\Delta S_{1,2} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1}. \quad (5.52)$$

В результате перехода теплоты на более низкий температурный уровень (от  $T_1$  до  $T_2$ ) работоспособность теплоты  $Q$  уменьшается.

Так на уровне  $T_1$  работоспособность системы будет:

$$l_{\text{полезн.1}}^{\text{макс}} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right), \quad (5.53)$$

а на уровне  $T_2$ :

$$l_{\text{полезн.2}}^{\text{макс}} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right). \quad (5.54)$$

Потеря работоспособности при переходе из состояния 1 к состоянию 2 будет:

$$\Delta L = l_{\text{полезн.1}}^{\text{макс}} - l_{\text{полезн.2}}^{\text{макс}} = T_0 \left( \frac{Q}{T_2} - \frac{Q}{T_1} \right), \quad (5.55)$$

или с учетом 5.33

$$\Delta L = T_0 \Delta S_{1,2}. \quad (5.56)$$

Далее рассматривается случай обратимого перехода из состояния 1 в состояние 2.

Очевидно, что единственным путем обратимого перехода от более высокого температурного уровня к более низкому при постоянных источниках температур является осуществление обратимого цикла Карно.

В результате реализации этого цикла часть теплоты будет превращена в работу.

$$l_{\text{полезн.1-2}} = Q \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (5.57)$$

В этом уравнении  $(T_1 - T_2)/T_1$  — термический КПД цикла Карно.

Количество теплоты  $Q_2$ , переданное источнику низкой температуры, равно:

$$Q_2 = Q - l_{\text{полезн.1-2}} = Q \frac{T_2}{T_1}. \quad (5.58)$$

Работоспособность теплоты  $Q_2$ , на уровне низкопотенциального источника  $T_2$  равна:

$$l_{\text{полезн.2}}^{\text{макс}} = Q_2 \left( 1 - \frac{T_0}{T_2} \right) = Q \frac{T_2}{T_1} \left( 1 - \frac{T_0}{T_2} \right). \quad (5.59)$$

Работоспособность на уровне температуры высокопотенциального источника  $T_1$  будет такой же, как и при рассмотрении необратимого процесса (уравн. 5.53).

Отсюда следует, что уменьшение работоспособности системы в результате рассмотрения обратимого процесса перехода от состояния 1 к состоянию 2 будет равно:

$$l_{\text{полезн.1}}^{\text{макс}} - l_{\text{полезн.2}}^{\text{макс}} = Q \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (5.60)$$

или с учетом 5.59 уменьшение работоспособности равно работе в процессе 1–2:

$$l_{\text{полезн.1}}^{\text{макс}} - l_{\text{полезн.2}}^{\text{макс}} = l_{\text{полезн.1-2}}. \quad (5.61)$$

В случае необратимого процесса:

$$(l_{\text{полезн.1}}^{\text{макс}} - l_{\text{полезн.2}}^{\text{макс}}) > l_{\text{полезн.1-2}}. \quad (5.62)$$

Для оценки различных методик определения потерь работоспособности термодинамических систем необходимо определить *классификационные признаки необратимых потерь*.

В энергетических установках существует необратимость двух видов:

- *внутренняя необратимость*, вызванная трением при течении рабочего вещества в элементах установки;
- *внешняя необратимость*, вызванная наличием конечной разности температур между рабочим телом и внешними источниками.

В зависимости от вида необратимых потерь разделяются и термодинамические циклы:

- *полностью обратимый цикл*, в котором отсутствует как внутренняя, как и внешняя необратимость;
- *внутренне необратимый*, в котором имеют место только потери на трение в элементах и отсутствует внешняя необратимость;
- *внешне необратимый*, в котором присутствует только внешняя необратимость.

Как следует из уравнения 5.42, *метод коэффициентов полезного действия учитывает только внутреннюю необратимость*, но никак не учитывает влияние разностей температур между рабочим веществом и внешними источниками. Несмотря на несовершенства этого метода, он находит достаточно широкое практическое использование, поскольку позволяет в первом приближении оценить *потери теплоты* от рабочего вещества в окружающую среду.

*Внешняя необратимость оценивает потерю работоспособности системы* в соответствии со вторым законом термодинамики.

В качестве примера оцениваем эффективность котла паросиловой установки.

*Рассматривается паровой котел паротурбинной установки.*

Согласно [21], современные паровые котлы имеют минимальные тепло потери и КПД может достигать 90%.

При давлении порядка 100 бар температура пароводяной смеси в трубах парогенератора достигает 580 К. При этом температура горячего источника (продукты сгорания) составляет величину порядка 2000 К.

Принимается в качестве холодного источника окружающая среда с температурой  $T_0 = 20^{\circ}\text{C} = 293 \text{ К}$ . Теплота сгорания условного топлива равна 29000 кДж/кг.

В соответствии с уравнением Гюи-Стодола изменение энтропии будет равно:  $S = 29000(1/593 - 1/2000) = 34,2 \text{ кДж/кг град}$ .

Потеря работоспособности парогенератора равно  $\Delta L = T_0 \Delta S$ , или  $293 \cdot 34,2 = 10026 \text{ кДж/кг}$  или 2,78 кВт час /кг.

Приведенные цифры свидетельствуют о следующем: результаты использования метода КПД, основанного на первом законе термодинамики, показывают высокую тепловую эффективность парогенератора.

Применение энтропийного метода вскрывает значительные внешние необратимые потери от недорекуперации в соответствии со вторым законом термодинамики. Таким образом, энтропийный метод имеет значительно большие возможности при проведении анализа, чем метод КПД.

### 5.9.6 Эксергетический метод анализа потерь работоспособности

В разделе 5.9.3 рассматривалась изолированная система, состоящая из источника работы и окружающей среды. Было введено понятие работоспособности системы.

При рассмотрении энтропийного метода индекс  $1$  относился к начальному неравновесному, а индекс  $2$  – к конечному равновесному.  $U$ ,  $S$ ,  $V$  – соответственно внутренняя энергия, энтропия, объём источника работы,  $p_0$  и  $T_0$  – давление и температура окружающей среды (далее среды). Параметры среды остались постоянными. Давление источника работы в начальном состоянии обозначено  $p_1$ .

В конечном состоянии параметры среды и источника работы равны между собой.

При вышерассмотренном энтропийном методе расчета потерь работоспособности установка рассматривалась как изолированная система, определялась работоспособность установки в целом, а затем по отдельным мелодикам потери работоспособности в отдельных элементах.

Преимущество *эксергетического* метода заключается в том, что он дает возможность оценить работоспособность отдельного элемента без предварительного анализа работоспособности установки в целом. При этом, как и в случае энтропийного метода, работоспособность оценивается по отношению к параметрам окружающей среды  $p_0$   $T_0$ .

*При эксергетическом подходе каждый элемент рассматривается как самостоятельная термодинамическая система, причём система неизолированная, поскольку через элемент протекает рабочее тело, которое обменивается энергией с остальными частями установки или с окружающей средой.*

Понятие эксергии применимо как для ранее рассмотренной замкнутой системы рабочего вещества, так и для потока РВ.

В энергетических установках в большинстве случаев циркулирует непрерывной поток рабочего вещества. Поэтому в данном разделе рассматривается работоспособность системы для потока рабочего вещества.

В отличие от раздела 5.9.2, рассматривается *неизолированная система*, состоящая из потока рабочего вещества с параметрами  $p_1$  и  $T_1$  и среда с параметрами  $p_0$  и  $T_0$ . (рис. 71). Процессы обратимые.

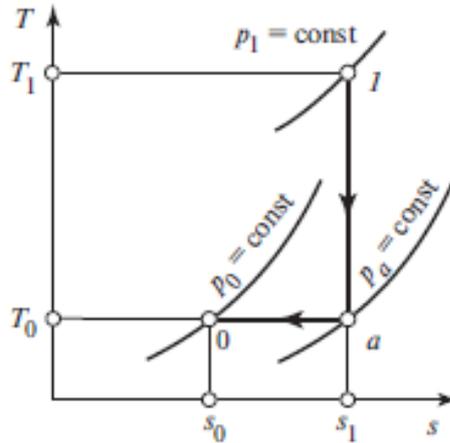


Рисунок 71 – К расчету работоспособности потока

Проводится расчет работоспособности потока.

При наличии механического неравновесия осуществляется адиабатный процесс расширения, связанный с снижением давления 1-а (первый этап). В результате адиабатного процесса температура рабочего вещества (РВ) понижается до  $T_0$ .

Учитывая, что процесс расширения происходит изоэнтропно, давление понижается до промежуточного давления  $p_a$ , которое ниже давления окружающей среды  $p_0$ . Поскольку механическое равновесие на первом этапе не достигнуто, а установилось только термическое равновесие, на втором этапе проводится обратимый, изотермический отвод теплоты а-0, в результате которого достигается полное равновесие РВ и ОС.

Работа, получаемая в процессе адиабатного расширения, равна:

$$l_{1-a}^{\text{обр}} = h_1 - h_a. \quad (5.63)$$

Согласно первому закону термодинамики, энтальпия превращается в кинетическую энергию потока, или:

$$q_{1-a} = (h_a - h_1) + \frac{\omega_a^2 - \omega_1^2}{2g}. \quad (5.64)$$

В адиабатном процессе, при  $q=0$ :

$$l_{1-a}^{\text{обр}} = \frac{\omega_a^2 - \omega_1^2}{2g} = h_1 - h_a. \quad (5.65)$$

Работа, затраченная потоком в процессе изотермического отвода теплоты, равна:

$$l_{a-0}^{\text{обр}} = (h_a - h_0) + q_{a-0}. \quad (5.66)$$

Где  $q_{a-0}$  – теплота, отводимая от рабочего вещества в процессе a-0, которая равна:

$$q_{a-0} = T_0(S_a - S_0). \quad (5.67)$$

Из уравнения 5.64 следует:

$$l_{a-0}^{\text{обр}} = (h_a - h_0) + T_0(S_a - S_0). \quad (5.68)$$

Работа, совершаемая потоком в результате обратимого перехода из состояния 1 в состояние полного равновесия с окружающей средой (точка 0), равна сумме работ в процессах 1-a и a-0:

$$l_{1-0}^{\text{обр}} = (l_{1-a}^{\text{обр}} - l_{a-0}^{\text{обр}}). \quad (5.69)$$

Поскольку  $S_1=S_a$ , выражение для работы в обратимом процессе 1-0 равно:

$$l_{1-0}^{\text{обр}} = (h_1 - h_0) + T_0(S_1 - S_0). \quad (5.70)$$

Работа в обратимом процессе является максимально полезной, уравнение 5.70 является выражением работоспособности потока:

$$l_{\text{полезн}}^{\text{макс}} = (h_1 - h_0) + T_0(S_1 - S_0). \quad (5.71)$$

Работоспособность единицы массы потока именуется *эксергией потока*:

$$e = (h - h_0) + T_0(S - S_0). \quad (5.72)$$

Эксергетический метод анализа целесообразно применять при оценке степени термодинамического совершенства тепловых элементов. Под тепловым элементом понимаются узлы установки (ПСУ, холодильной машины и др.), через которые движется поток рабочего вещества и осуществляется трансформация энергии.

Рассматривается тепловой элемент, на входе в который рабочее вещество имеет параметры  $p_1$  и  $T_1$ , а на выходе –  $p_2$  и  $T_2$ . Внутри элемента РВ производит полезную работу  $l_{\text{полезн}}$ .

Если процесс, происходящий внутри элемента, необратимый, то имеется потеря работоспособности потока  $\Delta L$ :

$$\Delta L = (e_1 - e_2) - l_{\text{полезн}} \quad (5.73)$$

Иначе говоря, в необратимом процессе разность энтропий на входе и выходе теплового элемента равна полезной работе, произведенной рабочим веществом, за вычетом потерь работоспособности из-за необратимости.

Если все процессы, происходящие в элементе, обратимые и  $\Delta L=0$ , то уравнение 5.71 приобретает вид:

$$l_{\text{полезн.1-2}}^{\text{макс}} = e_1 - e_2. \quad (5.74)$$

Уравнение 5.74 является основным выражением эксергетического анализа. Задача сводится к анализу необратимых потерь в каждом элементе, что дает возможность определения путей совершенствования конструкции.

Величина эксергии однозначно определяется параметрами рабочего вещества  $p$  и  $T$  и параметрами окружающей среды  $p_0$  и  $T_0$ . Исходя из этого, эксергия может рассматриваться как параметр состояния неравновесной системы, состоящей из источника работы (РВ) и среды.

Наряду с эксергией потока рабочего вещества введено понятие эксергия потока теплоты. Эксергия теплоты особенно важна для анализа эффективности теплообменных аппаратов т.е. элементов установки, не производящих работу.

Эксергия потока теплоты, передаваемой РВ при температуре  $T$ , определяется по уравнению 5.75, аналогичному 5.53:

$$e_q = q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right). \quad (5.75)$$

Эта аналогия не носит формальный характер, а имеет принципиально важное значение. Дело в том, что применительно к потоку теплоты эксергетический и энтропийный методы анализ не имеют различия. Одинаковы и задачи обоих методов: расчет потерь работоспособности, обусловленных необратимыми процессами.

Допустим, в тепловой аппарат входит поток рабочего вещества с параметрами  $p_1$  и  $T_1$  подводится теплота  $q_1$  при той же температуре, а выходит из аппарата этот же поток с  $p_2$  и  $T_2$ , и при этом совершается полезная работа  $l_{\text{полезн}}$ . Потеря работоспособности в этом случае определяется из уравнения:

$$\Delta L = [(e_{\text{вх}} + e_{q,\text{вх}}) - e_{\text{вых}}] - l_{\text{полезн}}. \quad (5.76)$$

Если в тепловом элементе работа не совершается, то уравнение упрощается:

$$\Delta L = (e_{\text{вх}} + e_{q,\text{вх}}) - e_{\text{вых}}. \quad (5.77)$$

В этих уравнениях  $e_{\text{вых},q}$  - энтропия потока подведенной теплоты.

Величина  $\Delta L$  учитывает различные виды потерь, включая внутренние потери от трения и ускорения, внешние, обусловленные перепадом температур в теплообменных аппаратах.

Для оценки степени термодинамического совершенства теплового элемента, производящего полезную работу, используется эксергетический КПД:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{e_{1,\text{полезн}}}{e_{\text{вх}} + e_{\text{вых}}}. \quad (5.78)$$

При отсутствии необратимых потерь и условии  $l_{\text{полезн}} = l_{\text{макс полезн}}$ , КПД равен единице.

Для тепловых элементов, не производящих работ, уравнение 5.78 теряет смысл, и используется следующее выражение эксергетического КПД:

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{e_{\text{ВЫХ}}}{e_{\text{ВХ}}}. \quad (5.79)$$

В уравнениях 5.78 и 5.79 под величиной  $e_{\text{ВХ}}$  подразумевается сумма эксергии рабочего вещества и окружающей среды.

#### **Контрольные вопросы**

1. Суть энтропийного метода анализа;
2. Уравнение Гюи-Стадола;
3. Работоспособность потока;
4. Понятие эксергии;
5. Преимущество экзегетического анализа.

## 6 ЯДЕРНАЯ, ПЛАЗМЕННАЯ И ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКИ

### 6.1 Атомные реакторы

Основные физические принципы реакции деления, положенной в основу атомной энергетики, изложены в главе 2.

Атомная (ядерная) энергетика является одним из направлений ТЭС, работающих на основе циклов, подобных ранее рассмотренным циклам ПСУ. Специфика циклов ядерных энергетических установок будет рассмотрен далее.

Главным элементом (ЯЭУ) является ядерный реактор (рис.73) [28].

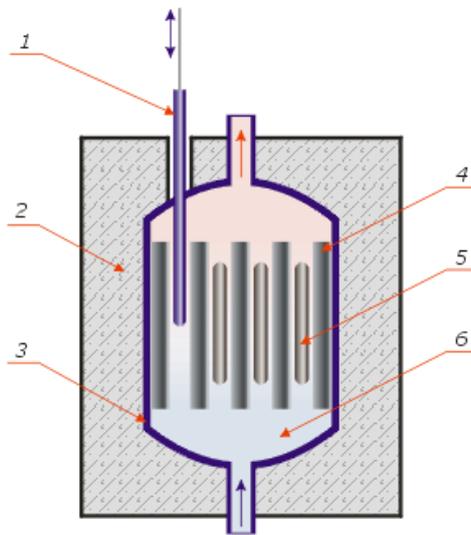


Рисунок 73 – Схематическое устройство реактора на тепловых нейтронах:  
1 – управляющий стержень; 2 – радиационная защита;  
3 – теплоизоляция; 4 – замедлитель; 5 – ядерное топливо;  
6 – теплоноситель.

Ядерный реактор состоит из следующих основных частей: активная зона с ядерным топливом и замедлителем; отражатель нейтронов, окружающий активную зону; теплоноситель; система регулирования цепной реакции (на схеме это подвижной управляющий стержень, связанный с замедлителем нейтронов); радиационная защита; система дистанционного управления.

Состояние ядерного реактора можно охарактеризовать эффективным коэффициентом размножения нейтронов [27]:

$$\rho = (k - 1) / k, \quad (6.1)$$

где  $\rho$  – реактивность реактора;  $k$  – коэффициент размножения.

При  $k > 1$  цепная реакция развивается во времени, реактор находится в не-докритическом состоянии, его реактивность  $\rho > 0$ .

При  $k < 1$  реакция затухает, реактор – подкритичен  $\rho < 0$ .

При  $k = 0$ ,  $\rho = 0$  – реактор находится в стабильном критическом состоянии.

Исходя из этих соотношений, возникает понятие критического объема ядерного реактора.

*Критический объем* – это объем активной зоны в критическом состоянии.

*Критическая масса* – масса делящегося вещества, находящаяся в критическом состоянии.

Рабочий объем современных ядерных реакторов определяется не только критическим объемом, но и возможностями теплосъема.

В качестве примера можно привести критические массы некоторых реакторов на различных видах топлива. Согласно [24], наименьшей критической массой обладают реакторы, в которых топливом служат водные растворы солей чистых делящихся потоков с водяными отражателями нейтронов [24]. Для  $^{235}\text{U}$  масса равна 0,8 кг, для  $^{239}\text{Pu}$  – 0,5 кг.

### 6.1.1 Классификация атомных реакторов

По характеру использования ядерные реакторы делятся [24] на:

- энергетические, предназначенные для получения электрической и тепловой энергии;
- транспортные – для энергоснабжения транспорта;
- исследовательские, в которых потоки нейтронов и гамма-лучей используются в исследовательской практике ядерной физики;
- промышленные (оружейные), используются для наработки изотопов, применяемые в различных отраслях, в т. ч. и в оборонной промышленности.

По спектру нейтронов реакторы делятся на:

- реакторы на тепловых нейтронах (тепловой реактор);
- реакторы на быстрых нейтронах (быстрые реакторы);
- реакторы на промежуточных нейтронах;
- реакторы со смешанными нейтронами.

По виду топлива:

- изотопы урана  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ;
- изотопы плутония  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ;
- изотопы тория  $^{232}\text{Th}$ .

По степени обогащения:

- природный уран;
- слабообогащенный уран;
- высокообогащенный уран.

По виду теплоносителя:

- водо-водяной (теплоноситель вода);
- газовый (графито-газовый);
- тяжеловодный (тяжелая вода D<sub>2</sub>O);
- реактор с жидко-металлическим теплоносителем;
- реактор на расплавах солей;
- реактор с твердым теплоносителем.

По конструкции:

- корпусные;
- канальные.

По способу генерации пара:

- реактор с внешним парогенератором (водо-водяной, в котором пар генерируется во втором контуре);
- кипящий реактор (пар генерируется непосредственно в реакторе).

В настоящее время широко используется международная классификация МАГАТЭ [25].

Материалы, из которых изготавливают реакторы, работают при высоких температурах в поле нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Поэтому не все материалы пригодны для изготовления реакторов.

Широко используется алюминий, магний, цирконий, нержавеющая жаропрочная аустенитная сталь X18H10T и др.

## 6.2 Атомные электростанции

На атомных станциях России используют ядерные реакторы следующих основных типов [19]:

- РБМК (реактор большой мощности, канальный) — реактор на тепловых нейтронах, водографитовый;
- ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) — реактор на тепловых нейтронах, корпусного типа;
- БН (быстрые нейтроны) — реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим натриевым теплоносителем.

Единичная мощность ядерных энергоблоков достигла 1500 МВт. В настоящее время считается, что единичная мощность энергоблока АЭС ограничивается не столько техническими соображениями, сколько условиями безопасности при авариях с реакторами.

Действующие в настоящее время АЭС по технологическим требованиям работают главным образом в базовой части графика нагрузки энергосистемы с продолжительностью использования установленной мощности 6500—7000 ч/год.

Технологическая схема АЭС зависит от типа реактора, вида теплоносителя и замедлителя, а также от ряда других факторов. Схема может быть одноконтурной, двухконтурной и трехконтурной.

На рисунке 74 в качестве примера представлена двухконтурная схема АЭС для электростанций с реакторами ВВЭР. Видно, что эта схема близка к схеме КЭС, однако вместо парогенератора на органическом топливе здесь используется ядерная установка.

АЭС, так же как и КЭС, строятся по блочному принципу как в тепло-механической, так и в электрической части. Ядерное топливо обладает очень высокой теплотворной способностью (1 кг  $^{235}\text{U}$  заменяет 2900 т угля), поэтому АЭС особенно эффективны в районах, бедных топливными ресурсами, например, в европейской части России.

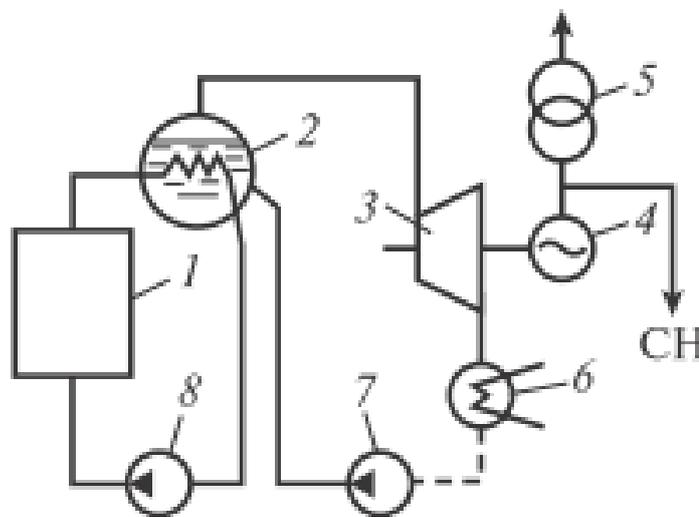


Рисунок 74 – Принципиальная технологическая схема АЭС с реактором типа ВВЭР:

- 1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — турбина; 4 — генератор;
- 5 — трансформатор; 6 — конденсатор турбины;
- 7 — конденсационный (питательный) насос;
- 8 — главный циркуляционный насос; СН — собственные нужды

АЭС целесообразно оснащать энергоблоками большой мощности. Тогда по своим технико-экономическим показателям они не уступают КЭС, а в ряде случаев и превосходят их. В настоящее время разработаны реакторы электрической мощностью 440 и 1000 МВт типа ВВЭР, а также 1000 и 1500 МВт типа РБМК.

Перспективными являются АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (БН), которые могут использоваться для получения тепла и электроэнергии, а также для воспроизводства ядерного горючего. Технологическая схема энергоблока такой АЭС представлена на рис.75.

Реактор типа БН имеет активную зону, где происходит ядерная реакция с выделением потока быстрых нейтронов. Эти нейтроны воздействуют на элементы из  $^{238}\text{U}$ , который обычно в ядерных реакциях не используется,

и превращают его в плутоний  $^{239}\text{Pu}$ , который может быть впоследствии использован на АЭС в качестве ядерного горючего. Тепло ядерной реакции отводится жидким натрием и используется для выработки электроэнергии.

Схема АЭС с реактором БН, трехконтурная, в двух из них используется жидкий натрий (в контуре реактора и промежуточном). Жидкий натрий бурно реагирует с водой и водяным паром. Поэтому, чтобы избежать при авариях контакта радиоактивного натрия первого контура с водой или водяным паром, выполняют второй (промежуточный) контур, теплоносителем в котором является нерадиоактивный натрий.

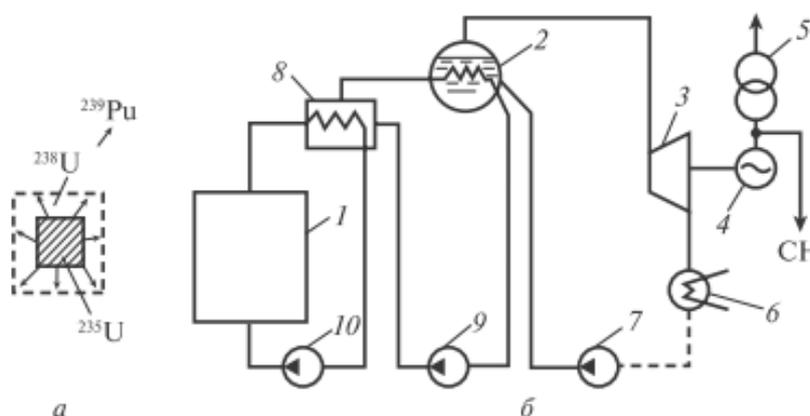


Рисунок 75– Принципиальная технологическая схема АЭС с реактором типа БН:

*а* — принцип выполнения активной зоны реактора;

*б* — технологическая схема:

*1—7* — аналогичны указанным на рис. 6.2; *8* — теплообменник

натриевых контуров; *9* — насос нерадиоактивного натрия;

*10* — насос радиоактивного натрия

Рабочим телом третьего контура являются вода и водяной пар. В настоящее время в эксплуатации находится ряд энергоблоков типа БН, из них наиболее крупный БН-600.

АЭС не имеют выбросов дымовых газов и не имеют отходов в виде золы и шлаков. Однако удельные тепловыделения в охлаждающую воду у АЭС больше, чем у ТЭС, вследствие большего удельного расхода пара, а, следовательно, и больших удельных расходов охлаждающей воды. Поэтому на большинстве новых АЭС предусматривается установка градирен, в которых теплота от охлаждающей воды отводится в атмосферу.

Важной особенностью возможного воздействия АЭС на окружающую среду является необходимость захоронения радиоактивных отходов. Это делается в специальных могильниках, которые исключают возможность воздействия радиации на людей.

Чтобы избежать влияния возможных радиоактивных выбросов АЭС при авариях, применены специальные меры по повышению надежности оборудования (дублирование систем безопасности и др.), а вокруг станции создается санитарно-защитная зона.

Атомная энергетика относится к базовой энергетике, и ее значение в энергообеспечении человечества будет постоянно возрастать по мере истощения углеводородных энергоресурсов. Дальнейшее развитие и совершенствование ЯЭУ позволит снизить стоимость электрической энергии, уменьшить загрязнение атмосферы и снизить «парниковый эффект», разгрузить транспорт от перевозки топлива, повысить энергоемкость новых «прорывных» направлениях наукоемких отраслей экономики, характерных для шестого технологического уклада.

В связи с проблемой загрязнения воздушной среды, которая является основной при использовании углеводородных тепловых станций в больших городах, перспективно создания атомных ТЭЦ, максимально приближенным к потребителям.

### 6.2.1 Эффективность АЭС

Как уже отмечалось, на ядерной энергетической установке (ЯЭУ) ядерный реактор подобен паровому котлу, являющемуся источником теплоты для осуществления известных циклов ПСУ или ГТУ. Поэтому теоретические циклы ядерных тепловых установок подобны рассмотренным выше циклам паротурбинных и газотурбинных двигателей, и к ним применимы те же оценочные критерии. Однако существуют и некоторые особенности:

- 1) возможность широко изменять тепловую мощность реактора;
- 2) ограниченность ее максимальной величины термостойкостью оболочек тепловыделяющих элементов — ТВЭЛов (сплавы из Al и Mg — до 450 °С, нержавеющая сталь — до 600 °С, другие материалы — до 1000 °С) и термостойкостью ядерного топлива (металлический уран — до 600 °С, диоксид урана  $UO_2$  — 2760 °С);

- 3) небольшая доля топливной составляющей в балансе стоимости вырабатываемой энергии (10—15% против 50—60% на ТЭС), которая при воспроизводстве ядерного топлива становится совсем ничтожной. Это, во-первых, связано с тем, что, в отличие, от традиционных ПСУ, в ЯЭУ используется многоконтурная система теплоотвода, дорогостоящие системы управления и защиты, а также и система обеспечения радиационной безопасности. Эта специфика предъявляет к АЭС не только требование высокого термического КПД цикла, но и максимальной единичной мощности, позволяющей снизить капиталовложения в строительство электростанций и транспортных энергосиловых установок.

Если обозначить тепловую мощность реактора  $Q_T$ , то максимальная теоретическая мощность АЭС, ( кВт):

$$N_T^{\text{макс}} = Q_T \cdot \eta_t, \quad (6.2)$$

где  $\eta_t$  — термический КПД цикла АЭС.

Тепловая мощность реактора выражается через уравнение теплопередачи ядерного реактора:

$$Q_T = K_T \cdot K_{\text{нр}} \cdot F (T_{0\text{пр}} - T_{1\text{ср}}), \quad (6.3)$$

где  $K_T$  — коэффициент теплопередачи от ядерного топлива к теплоносителю;

$K_{\text{нр}}$  — коэффициент неравномерности тепловыделения по радиусу реактора;  $T_{0\text{пр}}$  — предельно допустимое значение температуры наиболее напряженной поверхности ТВЭЛ;

$F$  — омываемая площадь поверхности тепловыделяющих элементов реактора (ТВЭЛ).

Термический КПД цикла ЯЭУ:

$$\eta_t = 1 - (T_{2\text{ср}} / T_{1\text{ср}}), \quad (6.4)$$

где  $T_{1\text{ср}}$  — средняя температура подвода теплоты в цикле;  $T_{2\text{ср}}$  — средняя температура отвода теплоты в цикле.

Следовательно,

$$Q_T = K_T \cdot K_{\text{нр}} \cdot F (T_{0\text{пр}} - T_{1\text{ср}}) \cdot [1 - (T_{2\text{ср}} / T_{1\text{ср}})]. \quad (6.5)$$

Из формулы (6.5) следует, что с повышением температуры  $T_{1\text{ср}}$  подвода теплоты в цикле тепловая мощность реактора  $Q_T$  уменьшается, а термический КПД цикла  $\eta_t$  возрастает. Отсюда можно найти оптимальную среднюю температуру подвода теплоты в цикле, взяв первую производную выражения (6.5) и приравняв ее к нулю. В результате получим:

$$T_{1\text{ср}}^{\text{опт}} = 1 - \sqrt{T_{0\text{пр}} \cdot T_{2\text{ср}}} \quad (6.6)$$

и соответственно ей оптимальное значение термического КПД

$$\eta_t^{\text{опт}} = 1 - \sqrt{T_{2\text{ср}} / T_{0\text{пр}}}. \quad (6.7)$$

Из полученных результатов очевидна роль значения предельной температуры тепловыделяющих элементов  $T_{0\text{пр}}$ . Из выражений (6.3) и (6.7) следует, что чем больше  $T_{0\text{пр}}$ , тем больше оптимальный КПД  $\eta_t^{\text{опт}}$ , тем больше оптимальная средняя температура подвода теплоты в цикле  $T_{1\text{ср}}^{\text{опт}}$ . При этом

с повышением  $T_{\text{опр}}$  выделение теплоты  $Q_T$ , согласно уравнению (6.3), увеличивается. Таким образом, повышается электрическая мощность атомной установки.

В зависимости от допускаемой предельной температуры  $T_{\text{опр}}$ , различают реакторы низкотемпературные и высокотемпературные.

Высокотемпературные реакторы позволяют повысить давление и температуру пара в цикле АЭС. Они обеспечивают наибольшую эффективность при более простой схеме станции и рассчитаны на применение воды в качестве теплоносителя.

Одним из путей повышения параметров пара АЭС является использование газовых ( $\text{CO}_2$ , воздуха, гелия, аргона) и жидкометаллических (натрия, сплава натрия с калием) теплоносителей в реакторе, позволяющих достигнуть высоких параметров пара непосредственно во вторичном контуре двух контурной АЭС.

Электрическая мощность атомной установки определяется из выражения

$$N_{\text{э}} = Q_T \cdot \eta_T \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{с.н.}}, \quad (6.8)$$

где  $\eta_{oi}$  — относительный внутренний КПД турбины;  $\eta_m$  — механический КПД;  $\eta_{\text{г}}$  — КПД электрического генератора;  $\eta_{\text{с.н.}}$  — КПД оборудования собственных нужд установки.

В настоящее время наиболее широко применяются паротурбинные ядерные установки, реже — газотурбинные. Для повышения эффективности в них используются все рассмотренные выше усовершенствования (способы): регенерация теплоты, промежуточный перегрев пара, парогазовые и бинарные циклы и т.д.

Основное назначение ядерных установок — выработка электроэнергии на электростанциях, но они устанавливаются также на крупных судах и на подводных лодках.

В России применяют и строят главным образом паротурбинные установки.

### 6.3 Термоядерные энергетические установки

Представления о процессах, происходящих в термоядерных реакторах, представлены в главе 2. Для более детального ознакомления с проблемами термоядерной энергетики может быть рекомендован доклад академика Е.П.Велихова [53].

В качестве примера рассматривается схема реактора дейтерий – тритий как наиболее распространенного и достаточно эффективного (гл.2).

Работа D-T-реактора наиболее проста из всех известных типов термоядерных реакторов. Принципиальная схема термоядерного реактора, работающего на смеси дейтерия с тритием, показана на рис.76 [53].

Энергия термоядерной реакции переносится из плазмы нейтронами, которые поглощаются в blankets. Теплота, выделяемая в blankets, отводится теплоносителем первого контура и используется для выработки электроэнергии.

Реактор требует наличия дейтерия и лития. Тритий нарабатывается из лития в процессе работы реактора. Энергия термоядерных реакций выделяется в виде энергии нейтронов (14.1 МэВ) и энергии ионов гелия - альфа-частиц (3.5 МэВ).

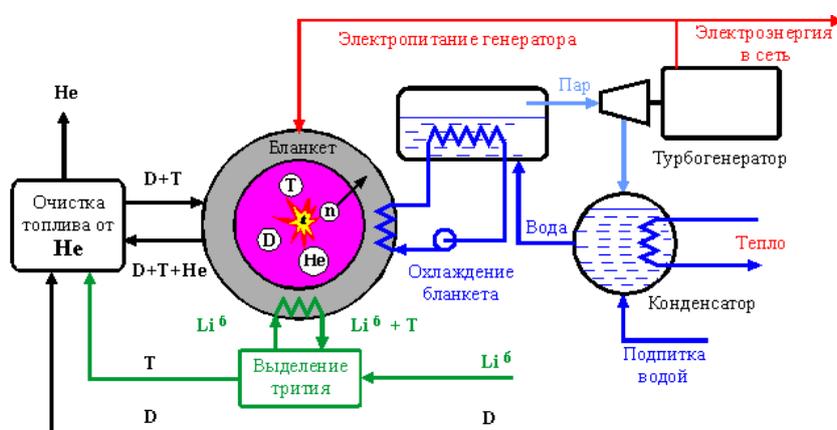


Рисунок 76 – Схема основных технологических контуров термоядерного реактора

Как видно из Таблицы 2.7., реакции 6 и 7 производит тритий. В случае использования Li<sup>6</sup> в blankets, помимо выработки трития, выделяется дополнительная энергия в количестве 4.8 МэВ на каждый произведенный атом трития.

Для цикла D - T энергетические ресурсы ограничиваются запасами лития. По данным, представленным в работе [53], рудные запасы лития составляют 8-10 • 10<sup>6</sup> тонн. Только этих запасов хватит на многие сотни лет. Кроме того, литий в меньшем количестве, чем дейтерий, содержится в морской воде.

Использование D-T-цикла будет начальным этапом промышленного применения термоядерной энергетики. Более перспективными в будущем следует считать, по-видимому, такие виды топлива, как D-D, D-He<sup>3</sup>[53].

Основным преимуществом D-D-реакции является наличие огромных природных ресурсов дейтерия на Земле, отработанная технология его производства и отсутствие необходимости воспроизводства трития, несмотря

на то, что, как следует из таблицы 2.7., энергетический выход реакции D-D меньше, чем при реакции D-T.

Значительный интерес для будущего представляет реализация реакции D-He<sup>3</sup>. Реакция обеспечивает максимальный энергетический выход, 18,4 МэВ (реакция №4 табл.2.7) и значительно меньший нейтронный поток по сравнению с реакцией D-T, что существенно снижает требования к стойкости материалов первой стенки.

По мнению Е. П. Велихова, «недостатком этой реакции является практическое отсутствие He<sup>3</sup> на Земле, что делает освоение этой реакции в Земных условиях практически безнадежным делом. В то же время, этого изотопа много на поверхности Луны, и некоторые проекты, пользуясь тем, что потребление невелико, предлагают добывать это топливо на Луне и доставлять его на Землю. Этот цикл можно замкнуть энергетически даже с учетом энергии, затрачиваемой на доставку топлива, хотя сомнительно, что эта схема будет осуществлена в ближайшем обозримом. Значительный интерес для будущего представляет реализация реакции».

#### *Магнитное удержание плазмы [55]*

Одной из возможностей удержания высокотемпературной плазмы относительно низкой плотности на время не менее нескольких секунд (рис.2.5.) является применение мощного электромагнитного поля.

Поскольку ни один из существующих материалов не может выдержать температуру порядка 10<sup>8</sup>К, магнитное поле необходимо не только для удержания, но и термоизоляции плазмы от стенок реактора

В целом это направление термоядерной энергетики получило название «управляемый термоядерный синтез с магнитным удержанием».

*Основными задачами этого направления является обеспечение длительного времени удержания плазмы и термоизоляция от стенок конструкции [54].*

Для предотвращения соприкосновения со стенками рабочего объема используются магнитные поля различной конфигурации.

Экспериментальные устройства, которые в настоящее время считаются наиболее перспективными в этом отношении (магнитные ловушки), предложены в 1950 г. в СССР будущими академиками А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом [33] и получили название «ТОКАМАК» - Тороидальная камера с магнитными катушками.

Первый ТОКАМАК был разработан под руководством академика Л.А. Арцимовича.

Его первичная обмотка-индуктор присоединена к батарее конденсаторов большой емкости. В результате разряда батареи в индукторе возникает мощный импульс тока, наводящий в тороидальной камере вихревое электрическое поле[57]. Камера заполняется дейтерий-тритиевой смесью.

В процессе воздействия электромагнитного поля и смеси происходит ионизация атомов смеси с образованием плазмы в виде газового разряда. Плазменное течение образует вторичную обмотку трансформатора, которая обеспечивает разогрев плазмы и, кроме того, создает полоидальное магнитное поле (рис.77).

Это поле необходимо для стабилизации плазменного шнура и эффективного управления его положением в тороидальной камере.

Основное магнитное поле, обжимающее плазму и изолирующее её от стенок камеры, создается тороидальными катушками.

В результате суперпозиции тороидального и полоидального полей силовые линии результирующего магнитного поля имеют вид бесконечных спиралей, охватывающих центральную линию плазменного тора - его магнитную ось [54].

Линии индукции образуют в Токамаке замкнутые магнитные поверхности, предотвращающие вытекание плазмы на стенки камеры [57].

Поскольку плазменный ток создается вихревым электрическим полем, а вихревое поле обусловлено магнитным полем индуктора, поддержание плазменного тока в Токамаке возможно лишь в течение конечного промежутка времени.

Опыт показывает, что омический нагрев плазмы явно недостаточен для достижения необходимых температур (100-150 млн. градусов, или 10-15 кэВ). По мере увеличения температуры быстро падает электрическое сопротивление плазмы. Поэтому используется дополнительный нагрев плазмы пучками горячих нейтральных частиц дейтерия либо трития, а также электромагнитными волнами в разных диапазонах частот [57].

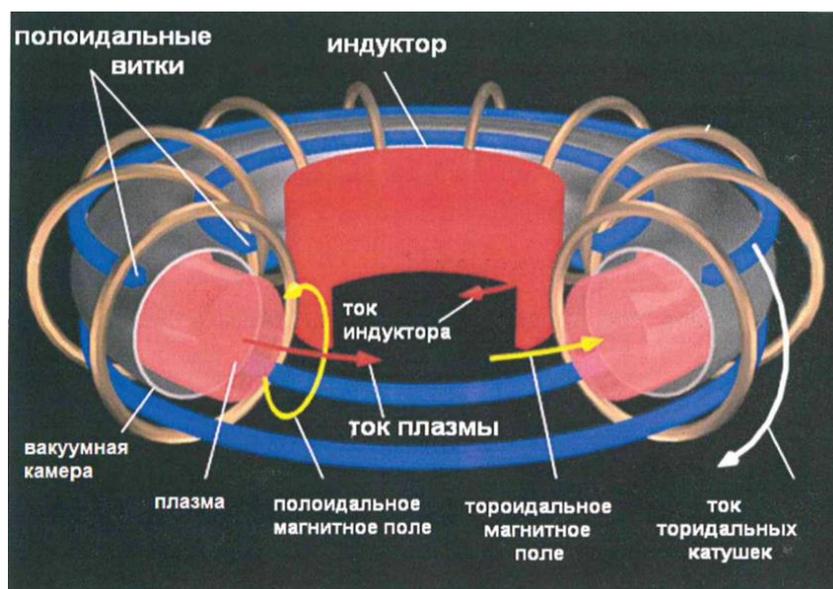


Рисунок 77 – Принципиальная схема ТОКАМАКА

## 6.4 МГД-генераторы

МГД-генераторы являются одним из направлений плазменной энергетики, основанных на законе электро-магнитной индукции применительно к движущимся текущим средам [56].

При пересечении газообразным (жидким) проводником магнитных силовых линий в нем генерируется электродвижущая сила.

*Принцип действия МГД-генерации [55].*

В МГД-генераторе осуществляется прямое преобразование тепловой энергии в электрическую энергию постоянного тока. Принцип действия МГД-генератора заключается в следующем [55]. Рабочее вещество, а именно ионизированный газ или электропроводная жидкость, движется по каналу шириной  $b$ , который находится в поперечном магнитном поле. В потоке рабочего вещества индуцируется электрическое поле с напряженностью  $E=ub$ , где  $u$  – скорость потока,  $B$  – магнитная индукция.

На электродных стенках канала возникает электродвижущая сила равная  $E=ub$ . При замыкании цепи в жидкости (ионизированном газе) течет индуцированный ток  $I = \frac{E(1-m)}{R_r}$  (рис.78).

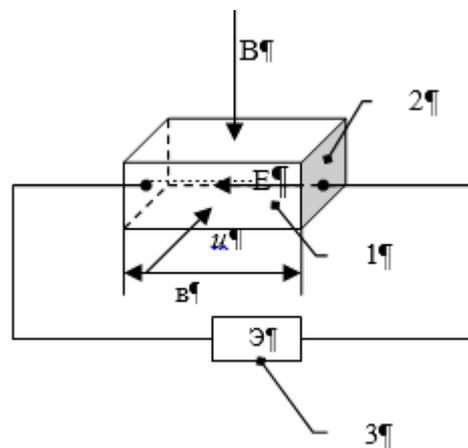


Рис.78 Принципиальная схема МГД генератора

$R=1/\delta$  - внутреннее сопротивление генератора;

$\delta$ -электрическая проводимость рабочего вещества;

$m=V/E$  - коэффициент нагрузки;

$V$ - Напряжение на электродах при замыкании цепи;

На проводник длиной  $l$  (в данном случае длина канала) при протекании в нем индуцированного тока  $I$  действует сила  $F=l I B$ .

Удельная мощность генератора равна:

$$N=u^2 \delta B^2 m (1-m)$$

Из приведенных уравнений следует, что увеличение проводимости рабочего тела позволяет снизить омические потери при заданной мощности  $N$  и уменьшить размеры канала генератора либо повысить мощность установки при определенных габаритах.

Электропроводимость является важнейшим параметром, учитываемом при выборе рабочего вещества.

По этой причине в МГД генераторах часто используется низкотемпературная плазма. Плазма может быть продуктом сгорания органического топлива, а также, полученная в результате ядерных или термоядерных реакций.

Степень ионизации плазмы в значительной степени определяет величину электропроводимости.

Электропроводимость горючих углеводородов оказывается достаточной при 1–2 % ионизации их атомов. Такая степень ионизации достигается при температуре 3500–4000 градусов, при том, что температура сгорания топлива в воздухе не превышает 2000–2500°C. Поэтому в газ добавляют ионизирующие присадки в виде солей щелочных металлов:  $Ka$ ,  $Na$ ,  $Cs$ ,  $Li$ , и др. При этом повышается температура сгорания до 3000 за счет подогрева воздуха и добавления к воздуху кислорода.

Метод магнито-гидродинамического превращения теплоты в электрическую энергию можно использовать в транспортной, космической, а также в крупной стационарной энергетике.

Сравнение известного принципа генерации электроэнергии при помощи турбогенератора и МГД-генератора представлен на рис.79.

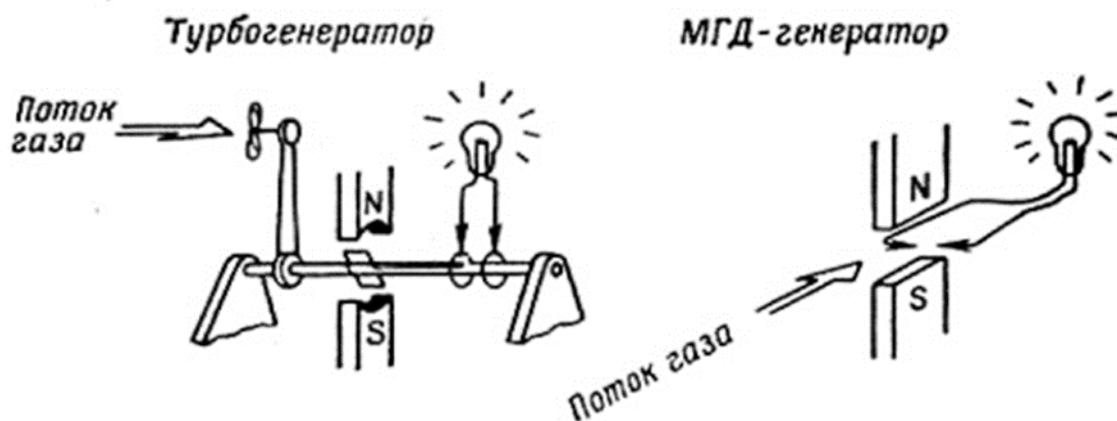


Рисунок 79 Сравнение турбогенератора и МГД-генератора

- В турбогенераторе внутренняя энергия газа преобразуется в кинетическую энергию вращающегося устройства – пропеллера, а затем кинетическая энергия преобразуется в механическую и далее – в электрическую.

- В МГД-генераторе движущейся газ сам является проводником. В результате внутренняя энергия электропроводного газа преобразуется в электрическую энергию.[55].

МГД-преобразователь (МГДП) является электроэнергетическим устройством, в котором на основе законов магнитной гидродинамики происходит прямое преобразование тепловой и (или) кинетической энергии электропроводящей среды в электрическую энергию постоянного тока.

На рис. 80 представлены схемы МГД-генератора, использующего углеводородное топливо.[55]

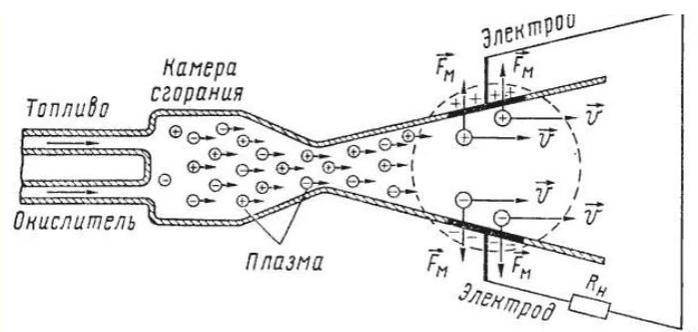


Рисунок 80 Принципиальная схема МГД-генератора

Рис. 80 – Принципиальная схема МГД-генераторов.[55]

а) – установка из МГД и паротурбинной энергоустановки на угольном горючем

На рис.81 наглядно изображена совмещенная схема МГД- генератора и паросиловой установки.

К классу МГД- преобразователей энергии относятся: МГД-генератор, МГД-ускоритель (МГДУ), МГД-компрессор (насос, дроссель).

К настоящему времени наиболее исследованы МГД-генераторы и жидкометаллические МГД-насосы, которые доведены до опытно-промышленного производства [56].

Достоинства МГД-генераторов

- позволяет повысить КПД тепловых электростанций до 50-60%;
  - генерировать мощности до 2 ГВт при небольших размерах;
  - отсутствуют силы трения;
  - МГД-генераторы – это машины большой объемной мощности. С ростом мощность возрастает эффективность;
  - привлекает перспектива сочетания МГД-генераторов с ЯЭУ и ТЯУ.
- Недостатки МГД-генераторов
- дорогостоящие материалы;
  - получение постоянного тока (для получения переменного необходим инвертор);
  - наличие вредных выбросов цезия;

- быстрый выход из строя электродов;
- необходимость мощных магнитов;

В настоящее время рассматривается вопрос использования жидкометаллических теплоносителей в МГД-генераторах.

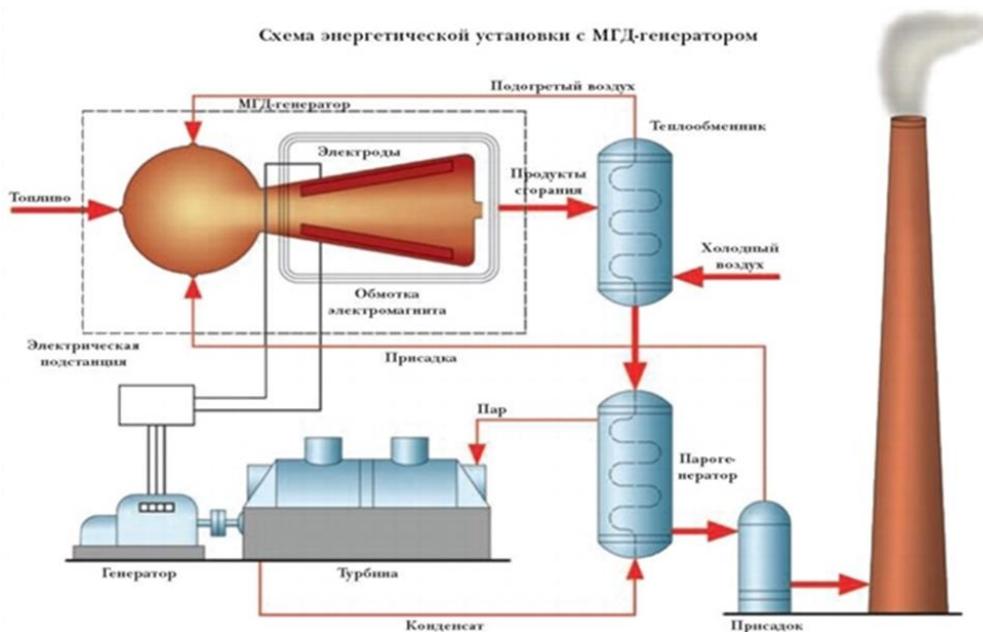


Рисунок 81 – Схема энергетической установки с МГД- генератором

Возможность и перспективность применения жидкометаллических МГД-преобразователей в ядерной и космической энергетике, а также на транспорте обусловлена следующими причинами:

- возможностью работы с агрессивными, радиоактивными и высокотемпературными средами;
- жидкие металлы обладают электропроводностью на 4–5 порядков выше, чем низкотемпературная плазма, что позволяет создавать индукционные МГД-генераторы переменного тока повышенного напряжения.

### Контрольные вопросы

1. Классификация атомных реакторов;
2. Атомные электростанции;
3. Схема основных технологических контуров термоядерного реактора;
4. Назначение и принцип работы ТОКОМАКа4
5. Принцип работы МГД-генератора;

## 6.5 Водородная энергетика

Анализ водорода как энергоресурса был приведен в главе 2.  
Использование водорода в качестве моторного топлива [63]

Благодаря высокой теплотворной способности водорода (120,1Мдж/кг) известны попытки его использования в двигателях внутреннего сгорания. При этом возникает множество вопросов, связанных с обеспечением техники безопасности, компоновки транспортных средств, хранения и ожижения водорода. В частности, для ожижения водорода потребуются дополнительные затраты энергии (до 17 кВтч/кг), хранение его возможно в компактных теплоизолированных сосудах.

Достаточно сложна конструкция водородного оборудования двигателей внутреннего сгорания. Топливные баки состоят из многослойного сосуда, выполняемого из коррозионно-стойкой стали или алюминиево-магние-вых сплавов с вакуумной изоляцией пространства между стенками бака

Схема водородного двигателя представлена на рис. 82 [65].

При смесеобразовании используется водород как в чистом виде, так и в сочетании с другими топливами.

В случае смесей водород добавляется в небольших количествах для улучшения сгорания основного топлива и уменьшения токсичности газовых выбросов.

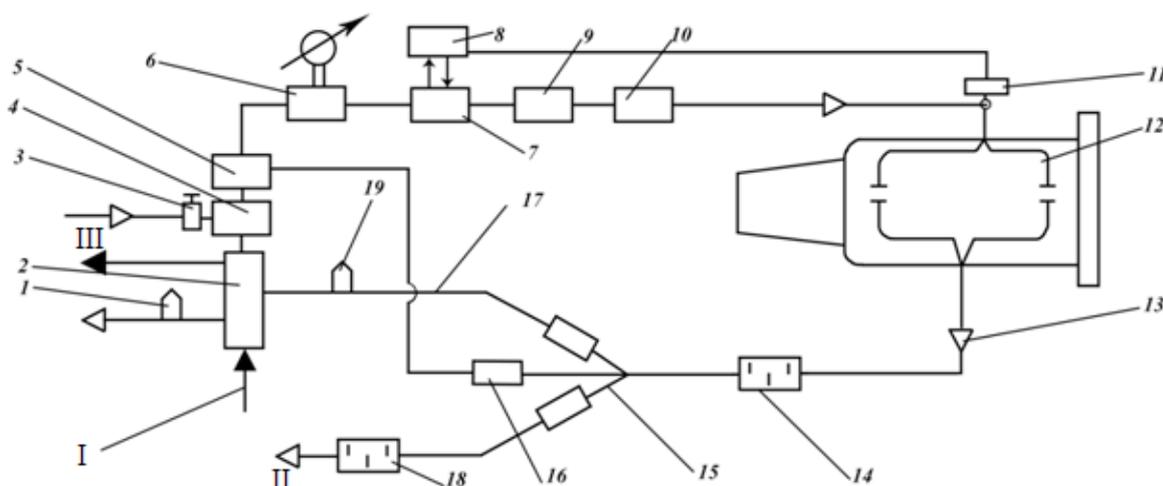


Рисунок 82 – Схема водородного двигателя [63] :

1 и 19 – термопары, 2 – бак, 3 – запорный вентиль, 4 – предохранительный клапан, 5 – реле давления, 6 – датчик давления, 7 – электромагнитный клапан подачи водорода в двигатель, 8-блок электронного управления расходом водорода, 9-редукционный клапан высокого давления, 10 – всережимный вакуумный редуктор расхода водорода, 11 – карбюратор, 12 – двигатель, 13 – выпускной трубопровод, 14 – первый глушитель шума, 15 – трубопровод отвода отработанных газов, 16 – электромагнит, управляющий заслонками в трубопроводах, 15 и 17 – трубопроводы, 18 – второй глушитель шума и III – подвод и отвод воды для охлаждения; II – выпуск отработавших газов из бака.

Летучесть водорода улучшает смесеобразование, и водород в необходимых количествах может быть введен через штуцер непосредственно во впускную систему двигателя.

*Производство электроэнергии с помощью топливных элементов.*

Признано, что широкое использования водорода как горючего не достаточно обоснованно экономически. Как отмечалось в главе 2, при оценке экономической целесообразности использования  $H_2$ , необходимо оценивать стоимость этапов производства водорода.

С учетом этого наиболее перспективным направлением считается применение топливных водородных элементов ТЭ.

Коэффициент полезного действия топливного элемента в 1,5–3 раза выше, чем у двигателя внутреннего сгорания.

Топливный элемент – это электрохимическое устройство, типа гальванического элемента. В отличие от последнего, в котором электроэнергия накапливается в результате зарядки и расходуется вплоть до истощения энергоемкости, в ТЭ рабочее вещество для электрохимической реакции непрерывно поступает извне в течении всего рабочего процесса.

Принципиальным отличием водородного ТЭ от традиционной тепловой энергостанции является то, что в топливном элементе осуществляется *непосредственное превращение химической энергии топлива в электрическую*, минуя малоэффективный процесс горения, минуя рабочий цикл преобразования тепловой энергии в механическую работу и электрическую энергию (рис.83).



Рисунок 83 – Схема преобразования химической энергии традиционным и электрохимическими способами

В отличие от лимитированной энергоемкости гальванического элемента, топливные элементы не имеют ограничения на коэффициент полезного действия как теплосиловые установки, эффективность которых ограничивается циклом Карно. В ТЭ коэффициент преобразования химической энергии в электрическую может достигать 90%.

Топливные элементы имеют большой срок службы из-за применения не расходуемых в процессе реакции электродов.

В процессе длительной эксплуатации выходят из строя только емкости с топливом, а основным продуктом реакции является обычная вода.

Конструкция топливного элемента включает анод, катод и электролит между ними (Рис. 84). Электролит обеспечивает перемещение ионов от одного электрода к другому и блокирует движение электронов. Для повышения скорости реакции в электродах нередко используют катализаторы. Движение потока электронов во внешней цепи создает электродвижущую силу постоянного тока.

Работа топливных элементов осуществляется путем подачи двух компонентов: топлива-водорода и окислителя. Кроме водорода, в ТЭ могут применяться природный газ, а также жидкое углеводородное топливо. В роли окислителя обычно используется чистый кислород, либо кислород в составе воздуха.

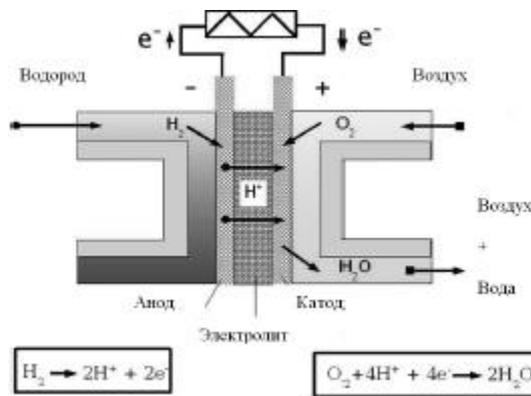


Рисунок 84 – Принцип действия топливного элемента.

В зависимости от применяемого электролита, принята следующая классификация топливных элементов [63]:

- PEM – топливный элемент с протон-обменной мембраной (ProtonExchangeMembraneFuelCell);
- AFC – щелочной топливный элемент(AlkalineFuelCells);
- DMFC – топливный элемент прямого действия на метаноле (DirectMethanolFuelCell);
- PAFC – топливный элемент на фосфорной кислоте (DirectMethanolFuelCell);

- MCFC – топливный элемент на расплаве карбоната (MoltenCarbonateFuelCell);
  - SOFC – топливный элемент на твердомоксиде (SolidOxideFuelCell).
- В ближайшей перспективе ТЭ будут находить применение во многих направлениях экономики (рис.85).

*Использование ТЭ в автомобильном транспорте.*

Водородные топливные элементы практически не оказывают негативного влияния на окружающую среду

Согласно данным Министерства энергетики США [65], цены на автомобильное водородное топливо были максимально низкими – 2,6 американских цента на милю. У наиболее экономичных бензиновых автомобилей этот показатель превышает 10 центов на милю.

Эти рекламные цифры стимулируют крупные американские автомобильные компании на разработку опытных образцов водородных автомобилей. По данным [65] в 2005 г. было запущено в эксплуатацию около 100 различных транспортных средств снабженных топливными элементами.



Рис.85 Области применения топливных элементов[64]

К началу 2008 г. в мире эксплуатировалось свыше 620 единиц транспортных средств. Имеются тенденции к снижению и стоимости автомобильных топливных элементов. Так, цены на ТЭ снизились с 275 долл./кВт мощности в 2002 году до 110 долл./кВт в 2005 г. Министерство энергетики США планирует снизить цены ТЭ до \$30/кВт мощности к 2020 году [65].

Приведенные цифры отнюдь не свидетельствуют о полном и ближайшем переходе на водородное топливо. Во-первых, создание широкой водородной сети автозаправочных станций при современном уровне крайне дорого (порядка 5 млрд. долл.). И это только для обеспечения 10% автомобилей США. Полностью не решена проблема обеспечения безопасности, поскольку опасность взрывов «гремучей смеси» в случае утечки водорода и его соединения с кислородом воздуха достаточно высока.

Следует также иметь в виду, что приведённые цифры не учитывают стоимости производства и хранения водорода, которые, как отмечалось, весьма значительны. Поэтому следует напомнить, что при оценке целесообразности использования ТЭ необходимо учитывать масштабы производства водорода для различных отраслей экономики.

#### *Стационарные энергетические установки [65]*

В 2005 г. в мире эксплуатировалось 3800 стационарных водородных энергетических установок на топливных элементах. В основном они используются в США, Японии и Европе. В большинстве случаев применяются топливные элементы с протонно-обменными мембранами типа PEM (ProtonExchangeMembrane). Это установки небольшой мощности, и применяются они в основном в быту и на малых предприятиях.

#### **Контрольные вопросы**

- 1.Использование водорода как моторного топлива.
- 2.Преимущества водородной энергетики.
- 3.Принцип действия топливного элемента.
- 4.Области применения топливных элементов.

## 7 ЭНЕРГЕТИКА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

### 7.1 Гидроэлектростанции

Гидроэлектрическая станция (ГЭС) — это комплекс сооружений и оборудования, посредством которых энергия водотока преобразуется в электрическую энергию. ГЭС состоит из гидротехнических сооружений, обеспечивающих необходимую концентрацию потока воды и создание сосредоточенного напора, и энергетического оборудования, преобразующего энергию движущейся под напором воды в электрическую энергию.

В современном мире гидроэнергетика играет заметную роль в общем энергетическом балансе. Ниже представлены характеристики технического гидроэнергетического потенциала крупнейших стран [42] (ТВт ч/ год):

Китай – 2500; Россия – 1670; Бразилия – 1250; Индия – 660; США – 528.

*Освоение гидротехнического ресурса (%):*

Китай – 17; Россия – 11; Бразилия – 31; Канада – 36; Индия – 17; США – 51;

Очевидно, что Россия, являясь страной, обладающей значительными запасами разнообразных энергоресурсов, имеет в том числе и большой гидроэнергетический потенциал.

Кроме того, можно констатировать, что у большинства стран достаточно низкий процент освоения гидротехнических ресурсов (у России всего 11%). Такая ситуация вполне объяснима, поскольку в настоящее время основная ставка делается на традиционные углеводородные энергоносители.

Согласно программе развития гидроэнергетики России [41]–[43], в условиях глобального экономического кризиса, экологических проблем и поставленных задач развития отечественной экономике, развитию гидроэнергетики России предается особое значение. Так, по плану развития до 2040 года предполагается увеличение установленных мощностей на основе ГЭС в Европейской части России и Урала в 2,6 раз, а в Сибири и на Дальнем Востоке в 40 раз.

Далее представлены основные типы и характеристики ГЭС и методы их расчета.

По напору ГЭС разделяют на [41]:

- высоконапорные (более 80 м);
- средненапорные (от 25 до 80 м);
- низконапорные (до 25 м).

Совокупность гидротехнических сооружений, энергетического и механического оборудования именуется *гидроэнергетической установкой* (ГЭУ).

Существуют следующие основные типы гидроэнергетических установок:

- гидроэлектростанции (ГЭС);
- насосные станции (НС);
- гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС);
- приливные электростанции (ПЭС).

Основными сооружениями ГЭС на равнинной реке являются *плотина*, образующее водохранилище и перепад уровней, или *напор*. В состав ГЭС входят и производственные помещения, в которых размещаются гидравлические турбины, генераторы, электрическое и механическое оборудование. В случае необходимости строятся водосбросные и судоходные сооружения, рыбопропускные сооружения и т.п.

Общий вид ГЭС приплотинного типа представлен на рис. 86.

С гидроэнергетикой связаны следующие понятия: *Бьеф* – часть водного объекта, прилегающее к гидротехническому сооружению. *Верхний бьеф* расположен вверх по течению, *нижний бьеф* – вниз по течению.

Вода по водоводам движется из верхнего *бьефа* в нижний, вращая рабочее колесо турбины и преобразуя кинетическую энергию потока в механическую. Гидравлическая турбина соединена валом с ротором электрического генератора. Турбина и генератор образуют гидрогенератор.

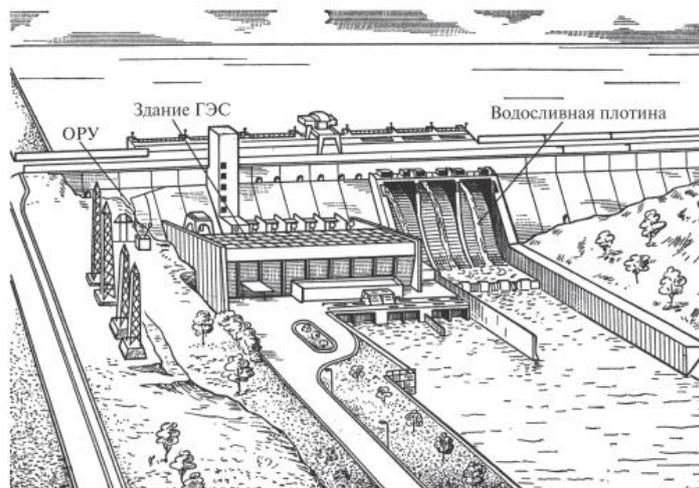


Рисунок 86 – Общий вид ГЭС приплотинного типа

Гидроэлектростанции как источники электрической энергии имеют определенные преимущества перед тепловыми и атомными электростанциями. Они лучше приспособлены для автоматизации и требуют меньшего количества эксплуатационного персонала. Показательны следующие средние значения численности персонала станций различного вида на 1 млн кВт установленной мощности, которые составляют для ГЭС — 300, для ТЭС — 1400, для АЭС — 1800 чел.

В России построены и эксплуатируются крупные ГЭС: каскад Волжских ГЭС, каждая мощностью 2530 МВт, Братская ГЭС — 4500 МВт, Красноярская ГЭС — 6000 МВт, Саяно-Шушенская ГЭС — 6400 МВт и много других.

*Малые ГЭС (мощностью до 30 МВт).* Гидроэлектростанции большой мощности могут строиться на крупных полноводных реках. Часто возможные для строительства ГЭС районы расположены вдали от крупных потребителей электроэнергии, что создает технические сложности энергоснабжения и большие потери при передаче электрических мощностей.

В настоящее время мировой тенденцией является создание малых ГЭС. Они могут создаваться в короткие сроки с использованием унифицированных гидроагрегатов с высоким уровнем автоматизации и управления и возведением облегченных строительных конструкций.

Экономическая эффективность их использования существенно возрастает при комплексном использовании малых водохранилищ, включая рыборазведение, водозабора для орошения полей бытового и промышленного и водоснабжения.

*Гидроаккумулирующая электростанция* предназначена для перераспределения во времени энергии и мощности в энергосистеме. В часы пониженных нагрузок ГАЭС работает как насосная станция, перекачивая воду из нижнего бьефа в верхний и создает запасы гидроэнергии благодаря повышению уровня верхнего бьефа.

В часы максимальной нагрузки ГАЭС работает в режиме выработки электроэнергии. В процессе работы за счет разности тарифов ГАЭС потребляет дешевую электроэнергию при пониженных нагрузках и выдает более дорогую в пиковый период.

Заполняя провалы нагрузки в энергосистеме, АЭС позволяет работать атомным и тепловым электростанциям в оптимальном режиме,

Схема работы ГАЭС показана на рис. 86 д.

*Приливные электростанции* сооружаются на побережье открытых морей и океанов со значительными приливно-отливными колебаниями уровня воды.

Естественный залив отделяется от моря плотиной. При приливе уровень моря будет выше уровня воды в отделенном от него заливе, а при отливе, наоборот. (рис.86 г). Перепады этих уровней создают напор, который используется при работе гидротурбин ПЭС. В некоторых морских заливах приливы достигают 10—12 м, а наибольшие приливы наблюдаются в заливе Фанди (Канада) и достигают 19,6 м.

Технические ресурсы приливной энергетики России оцениваются в (200—250)  $10^6$  МВтч в год и в основном сосредоточены у побережья Охотского, Берингова и Белого морей.

### 7.1.1 Энергия водяного потока [41]

Территория, с которой вода стекает в реку, называется водосборным бассейном. Линия, отделяющая друг от друга соседние бассейны, называется водораздельной линией или водоразделителем.

К водосборному бассейну моря относятся водосборные бассейны всех рек, впадающих в море. Количество воды, протекающей через поперечное сечение водотока в 1 с, называется *расходом воды*  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$  или л/с).

Хронологический график изменения расходов воды во времени называется гидрографом. Его строят по результатам регулярных измерений расходов воды в реке.

Суммарный объем воды, прошедший через поперечное сечение водотока от начального момента времени  $t_0$  до конечного  $t_k$ , называется *стоком*  $W$ .

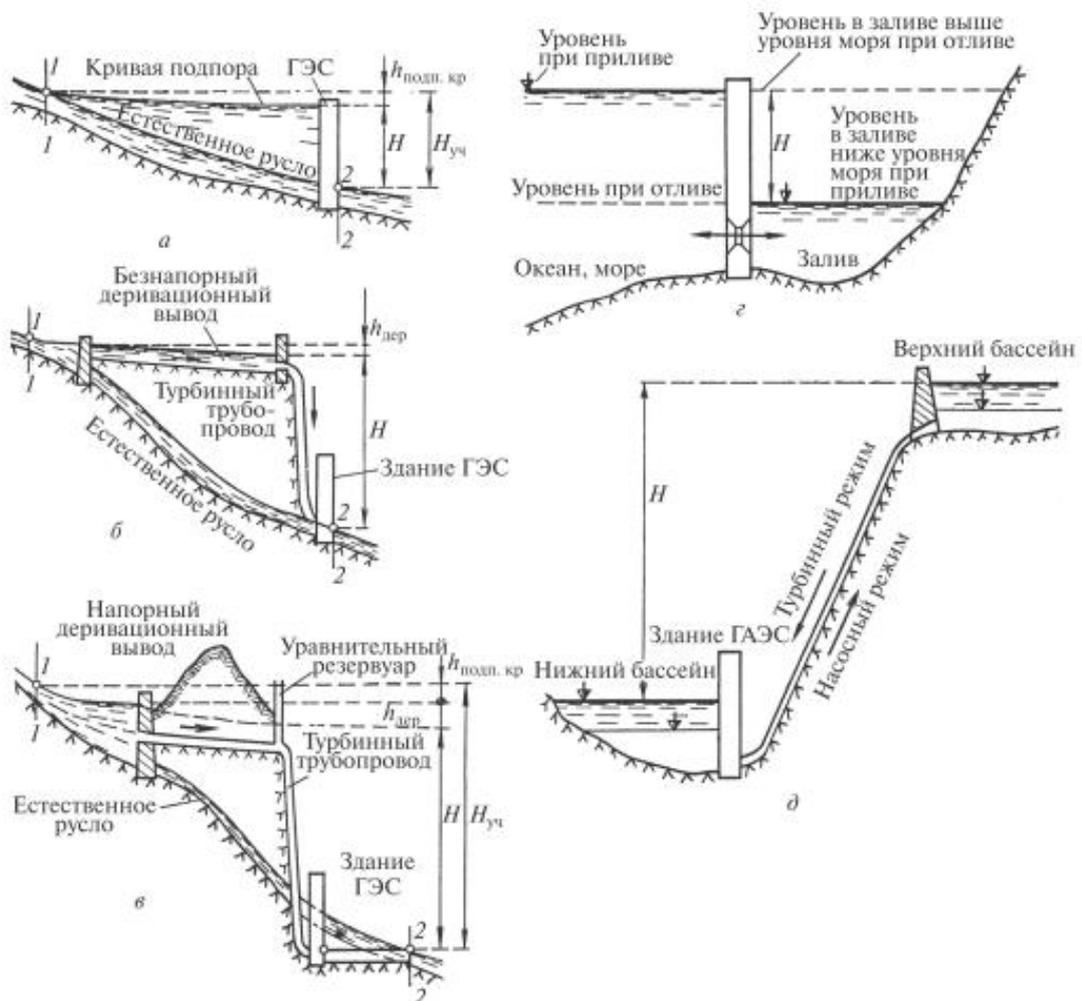


Рисунок 86 — Принципиальные схемы создания напора

Величина стока реки за сутки, месяц или любой другой промежуток времени, в течение которого расход воды  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), сохраняет постоянное значение, равна

$$W = Q \cdot t, \quad (7.1)$$

где  $t$  — время в секундах.

При различном расходе воды в течение всего рассматриваемого интервала времени от  $t_0$  до  $t_k$  (по гидрографу) объем стока определяется как

$$W = \int_{t_0}^{t_k} Q(t) dt. \quad (7.2)$$

Запасы поверхностного стока по территории России распределены неравномерно, что весьма неблагоприятно для энергетики.

Более 80% речного стока российских рек приходится на малоосвоенные территории бассейнов Северного Ледовитого и Тихого океанов.

Особенностью стока реки является его неравномерное распределение как по годам, так и в течение года. Многолетняя неравномерность стока неблагоприятна для энергетики. Различают многоводные, средневодные и маловодные годы. В маловодные годы обычно значительно снижается выработка энергии на гидроэлектростанциях.

Для большинства рек России маловодный период наблюдается зимой, когда потребность в электроэнергии наибольшая.

Полная энергия водотока определяется в виде разности энергий потока жидкости в начальном  $\mathcal{E}_1$  и конечном  $\mathcal{E}_2$  створах. При большой протяженности реки водоток разбивают на ряд участков, начиная от истока до устья, и определяют полную энергию участка, используя известное уравнение Бернулли. Потеря энергии на рассматриваемом участке будет равна разности  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$

$$\mathcal{E}_{\text{уч}} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \rho g W \left( z_1 - z_2 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right). \quad (7.3)$$

где  $W$  - объем стока воды ( $\text{м}^3$ );  $g$  - ускорение свободного падения ( $\text{м}/\text{с}^2$ );  $\rho$  - плотность жидкости ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $z_1$  и  $z_2$  — геометрическая высота над уровнем моря (м);  $p_1$  и  $p_2$  — давление (Па);  $v_1$ ,  $v_2$  — средние скорости (м/с);  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициент кинетической энергии, представляющий собой отношение действительной кинетической энергии к ее величине, полученной по средней скорости.

Разделив выражение (7.3) на время  $t$ , получим среднюю мощность водотока на данном участке

$$N_{\text{уч}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{уч}}}{t} = \rho g Q \left( z_1 - z_2 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right), \quad (7.4)$$

Учитывая, что разность кинетических энергий  $\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$  пренебрежимо мала, а давление может быть принято неизменным, выражения (7.3) и (7.4) упрощается:

$$\mathcal{E}_{\text{уч}} = \rho g W H_{\text{уч}}; \quad (7.5)$$

$$N_{\text{уч}} = \rho g Q H_{\text{уч}}, \quad (7.6)$$

где  $H_{\text{уч}} = z_1 - z_2$  — разность уровней (падение уровней) свободной поверхности водотока в пределах рассматриваемого участка ( м).

Для водотоков с чистой пресной водой при  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  формула (7.6) приводится к виду (кВт):

$$N_{\text{уч}} = 9,81 Q H_{\text{уч}}. \quad (7.7)$$

Формулы (7.5) и (7.7) выражают теоретическую (потенциальную) энергию и мощность на рассматриваемом участке. Суммируя потенциальные энергетические ресурсы по участкам водотока, можно определить потенциальные энергетические ресурсы реки.

Гидроэнергетические ресурсы подразделяются на теоретические (потенциальные), технические и экономические.

Теоретические гидроэнергетические ресурсы определяются по формуле

$$\mathcal{E} = 8760 \sum_{i=1}^n 9,81 Q_i H_i, \quad (7.8)$$

где 8760 — число часов в году;  $\mathcal{E}$  — энергия (кВт·ч);  $Q_i$  — средний годовой расход реки на  $i$ -м рассматриваемом участке ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $H_i$  — падение уровня реки на этом участке (м);  $n$  — число участков.

Расчет проводится при допущении, что вся энергия потока будет преобразована в электроэнергию без потерь.

Мировые потенциальные гидроэнергетические ресурсы оцениваются в  $35 \cdot 10^3$  млрд кВтч в год.

*Экономические гидроэнергетические ресурсы* — это часть технических ресурсов, которую по современным представлениям целесообразно использовать в обозримой перспективе. Они существенно зависят от технического уровня энергетики, удаленности ГЭС от места подключения к энергосистеме, обеспеченности региона другими энергоресурсами.

Наиболее эффективное использование энергии водотока возможно при концентрации перепадов уровней воды на относительно коротком

участке. Для использования перепадов уровней рек, рассосредоточенных на значительную длину водотока, прибегают к искусственному созданию необходимого перепада.

Существуют две основные схемы:

- плотинная, при которой напор создается плотиной;
- деривационная, где напор создается преимущественно с помощью деривации (отведения, отклонения), выполняемой в виде канала, туннеля или трубопровода.

## 7.2. Ветроэнергетика

Ветроэнергетика – отрасль энергетики, основанная на преобразовании кинетической энергии воздушных масс в энергетическую. Такое преобразование осуществляется в ветрогенераторах.

К началу 2014 года установленная мощность всех ветрогенераторов мира превышала установленную мощность всех атомных электростанций, но фактическое их использование оказалось намного ниже поскольку атомная энергетика всегда работает в режиме установленной мощности, а ветроэнергетика, как правило, работает ниже установленной мощности [14].

Многие страны весьма интенсивно развивают ветроэнергетику. В частности, на 2000 год в Дании с помощью ветрогенераторов производится 42 % всей производимой электроэнергии, в Португалии – 27 %, в Никарагуа – 21 %, в Испании – 20 %, в Германии – 8 % [29]. В России наиболее крупные ветроэнергостанции расположены в Крыму. В общей сложности на полуострове расположено 522 ветрогенератора мощностью 59 мВт. Существуют ветроэнергостанции на Чукотке, в Башкирии, Калининградской области, в Калмыкии и Республике Коми.

Считается что оптимальная высота ветрогенератора должна быть не менее 100 м, что связано с турбулизацией воздушных потоков у поверхности Земли. Ветрогенераторы начинают производить ток при скорости ветра 3 м/с и отключаются при 25 м/с. Оптимальной является скорость ветра 15 м/с.

Мощность ветрогенераторов зависит от длины лопасти (таблица 7.1).

По данным фирмы Emerson, диаметр ротора ветрогенератора мощностью 6 мВт составит 114 м при высоте башни 114 м. По данным [31], в 2014 году компания Vestas начала тестировать турбину мощностью 8 мВт. На сегодняшний день это самый мощный ветрогенератор в мире. Ведется разработка более мощного – на 10 мВт.

Энергия ветра является возобновляемым источником энергии. Суммарные запасы ветровой энергии значительно превышают общую величину запасов невозобновляемых энергоресурсов.

С одной стороны, ветрогенераторы не загрязняют окружающую среду, отсутствует влияние на тепловой баланс планеты, отсутствует потре-

бление кислорода и выбросы углекислого газа.

Таблица 7.1

**Зависимость мощности ветрогенераторов от геометрических параметров**

Параметр	1 мВт	2 мВт	2,3 мВт
Высота мачты	50-60 м	80 м	80 м
Длина лопасти	26 м	37 м	40 м
Диаметр ротора	54 м	76 м	82 м
Полный вес машинного отделения	40 т	82 т	83 т

С другой стороны, энергия ветра неравномерно распределена по территории Земли и крайне нестабильна. Параметры ветра – скорость и направление – меняются часто и не прогнозируются. Поэтому ветровые установки (ВЭУ), как правило, ставят в регионах, где средняя скорость ветра не менее 6 м/с.

Одной из проблем, связанных с нестабильностью ветра, является избыток электроэнергии в ветряную погоду и ее недостаток в период без ветра. Возникает необходимость ее аккумуляции. Существует множество способов, среди которых существует методика аккумуляции, которая состоит в том, что ветряное колесо движет насос, который закачивает воду в резервуар, расположенный на достаточной высоте. Поток воды приводит в действие турбину и электрогенератор. Существуют и другие способы – аккумуляторные батареи или даже производство водорода за счет ВЭУ с последующим его использованием в качестве энергоносителя.

ВЭУ также оказывают также и отрицательное воздействие на среду обитания человека и животных. Крупные ветрогенераторы на расстоянии порядка 0,5 км отражают электромагнитные волны и влияют на телесигнал. ВЭУ мощностью более 20 кВт генерируют инфразвук, влияющий на состояние людей и животных. Имеются неподтвержденные данные о влиянии ВЭУ на миграцию перелетных птиц.

Тем не менее, ветроэнергетика признана весьма перспективным направлением. Данные, представленные в таблице 7.2, свидетельствуют о возрастании интереса человечества к этому виду энергоресурсов.

### 7.2.1. Энергия воздушного потока

Кинетическая энергия  $\mathcal{E}_{\text{кин}}$  воздушного потока (Дж):

$$\mathcal{E}_{\text{кин}} = mv^2 / 2, \quad (7.9)$$

где  $m = \rho v F$  — масса воздуха (кг);  $v$  — средняя скорость потока, проходящего через поперечное сечение  $\rho$  перпендикулярное вектору средней скорости (м/с);  $\rho$  — плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>).

Таблица 7.2

**Рост установленной мощности ветроустановок в странах мира,  
подключенных к электрическим сетям, МВт**

Страна	1998 г.	2001 г.
Дания	130	2417
Германия	2875	8754
Италия	178	697
Испания	834	3337
Швеция	174	290
Англия	333	474
Финляндия	17,4	39
Португалия	60	125
Россия	4,15	7
Канада	82	142
США	1820	2525
Китай	214	328
Япония	40	142
Всего в мире	9665	24 000

Обычно в расчетах принимают  $\rho = 1,226$  кг/м<sup>3</sup>.

Мощность, развиваемой потоком воздуха:

$$N = 0,5 \rho v F. \quad (7.10)$$

Для  $F = 1$  м<sup>2</sup> значение удельной мощности ветрового потока:

$$N_{уд} = 0,5 \rho v^3. \quad (7.11)$$

Обычно в ветроэнергетике используется рабочий диапазон скоростей ветра, не превышающих 25 м/с. Эта скорость соответствует 9-балльному шторму по 12-балльной шкале Бофорта.

Преобразование кинетической энергии ветра в электрическую происходит с помощью ветроэнергетических установок, которые можно классифицировать по следующим признакам:

- по мощности — малые (до 10 кВт), средние (от 10 до 100 кВт), крупные (от 100 до 1000 кВт), сверхкрупные (более 1000 кВт);

- по числу лопастей рабочего колеса — одно-, двух-, трех- и многолопастные;
- по отношению рабочего колеса к направлению воздушного потока — с горизонтальной осью вращения, параллельной (рис.87 а) или перпендикулярной вектору скорости (ротор Дарье) (рис.87 б).

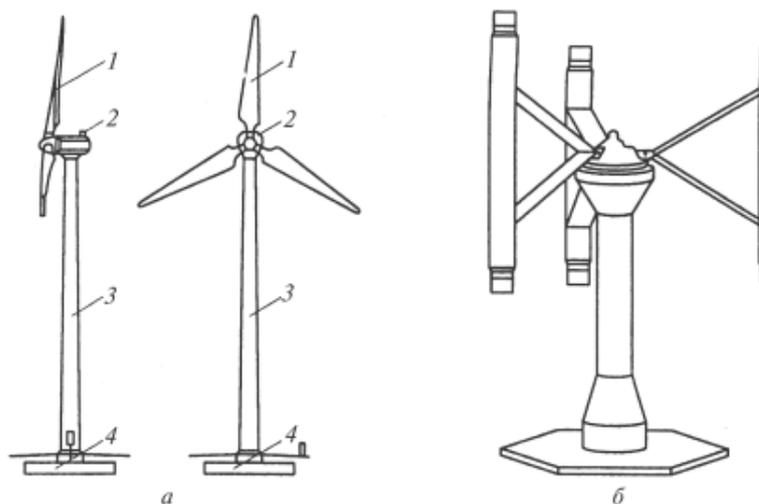


Рис.87 Виды ветроэнергетических установок:  
 а — ВЭУ с горизонтальной осью вращения; б — ВЭУ с вертикальной осью вращения;  
 1 — рабочее колесо; 2 — гондола с генератором и редуктором;  
 3 — башня; 4 — фундамент установки

В настоящее время в мире и в России наибольшее распространение получили трехлопастные ВЭУ с горизонтальной осью вращения, в состав которых входят следующие основные компоненты: рабочее колесо 1, гондола 2 с редуктором и генератором, башня 3 и фундамент 4.

В башне размещается основное энергетическое, механическое и вспомогательное оборудование ВЭУ. В качестве генератора могут использоваться синхронные и чаще асинхронные генераторы

Для каждой ветроэнергетической установки можно выделить следующие характерные значения рабочей скорости ветра:

- $v_p^{\min}$ , при которой  $0 \leq v \leq v_p^{\min}$  и мощность ВЭУ равна нулю;
- $v_p^N$ , при которой скорость ветра  $v_p^{\min} \leq v \leq v_p^N$  и мощность ВЭУ меняется в зависимости от скорости ветра и частоты вращения ротора;
- $v_p^{\max}$ , при скорости ветра  $v > v_p^{\max}$  возникает опасная ситуация и применяется принудительное торможение ротора. ВЭУ не работает.

– Для ориентировочных расчетов в диапазоне рабочих скоростей ветра от  $v_p^{\min}$  до  $v_p^N$  полезная мощность ВЭУ  $N_{\text{ВЭУ}}$  (кВт) для заданной скорости ветра  $v$  (м/с) на высоте башни  $H_6$  (м) и диаметре ротора ВЭУ  $D_1$  (м) рассчитывается по формуле:

$$N_{ВЭУ} = N_{уд} \cdot F_{ВЭУ} \cdot \eta_p \cdot \eta_r \cdot \zeta \cdot 10^{-3}, \quad (7.12)$$

где  $N_{уд}$  (Вт/м<sup>2</sup>) определяется по формуле 7.11.);  $F_{ВЭУ}$  (м<sup>2</sup>) — «ометаемая» площадь ВЭУ с горизонтальной осью вращения, определяемая по формуле  $F_{ВЭУ} = (\pi D_1^2) / 4$ ;  $\eta_p$  — КПД ротора (порядка 0,9);  $\eta_r$  — КПД электрогенератора (порядка 0,95);  $\zeta = 0,45$  — коэффициент мощности, учитывающий долю получаемой мощности ветродвигателем от воздушного потока.

Полученное в результате преобразований уравнение, рекомендуется для ориентировочных расчетов:

$$N_{ВЭУ} = 1,85 D_1^2 \cdot v^3. \quad (7.13)$$

### Контрольные вопросы

1. Классификация гидроэлектростанций;
2. Энергия водяного потока;
3. Геометрические параметры ветрогенераторов;
4. Энергия воздушного потока;

## 7.3. Солнечная энергетика

Первые опыты использования солнечной энергии в технике относятся к XVII веку. В частности, в 1600 г. во Франции был создан первый солнечный двигатель, работавший на нагретом воздухе и использовавшийся для перекачки воды [45].

В конце XVII в. ведущий французский химик А. Лавуазье создал первую солнечную печь, в которой достигалась температура в 1650 °С в 1833 г.

В США Дж. Эриксон построил солнечный воздушный двигатель с параболоцилиндрическим концентратором размером 4,8 × 3,3 м.

*Классификация солнечных энергетических установок (СЭУ) и их особенности.*

Солнечная энергия (СЭ) весьма универсальна с точки зрения возможностей использования. СЭ легко преобразуется в другие виды энергии: в тепловую, механическую и электрическую энергию, может быть использована в химических и биологических процессах. Солнечные энергетические установки (СЭУ) [31] работают в системах теплоснабжения, кондиционирования воздуха, обеспечивая любые температуры: от очень низких до высоких.

### 7.3.1. Основные схемы солнечных энергоустановок

Существует различные технологические схемы преобразования СЭ в электрическую, в т.ч. и на основе использования известных циклов Ренкина,

а также термоэлектрических либо термоэмиссионных циклов. В последние годы большой интерес проявляется к использованию фотоэлектрических преобразователей энергии[44].

Учитывая рассеянный характер солнечной энергии, первоочередной задачей является разработка эффективной технологии концентрации СЭ.

С учетом многообразия способов использования солнечной энергии и присущих каждому способу особенностей необходимо классифицировать признаки современных СЭУ[45]:

1. *По виду преобразования СЭ в другие виды энергии:*
  - работающие на большую энергосистему;
  - на локальную энергосеть;
  - на автономного потребителя;
2. *По месту размещения:*
  - наземные;
  - космические;
3. *По степени мобильности:*
  - Переносные;
  - Передвижные;
4. Стационарные;
5. *По виду ориентации на Солнце:*
  - с постоянной ориентацией относительно Солнца (обычно на крышах домов);
  - 6. с системой слежения за Солнцем;
  - 7. по степени сложности СЭУ:
    - простые, бытовые (нагреватели воды, воздуха, сушильные установки);
    - сложные, предназначенные для промышленного преобразования солнечной энергии в электрическую;

*Бытовые СЭУ.* К этому классу установок в первую очередь относятся простейшие нагреватели воды, окрашенные в черный цвет с целью максимального поглощения СИ. Бытовые СЭУ, как правило, закрыты для исключения испарения воды.

Солнечные коллекторы предназначены для нагрева теплоносителя (рис. 88).

В солнечном коллекторе (СК), представленном на рис.88, осуществляется свободная циркуляция теплоносителя под действием разности давлений:

$$\Delta p = g \cdot H \cdot (\rho' - \rho'') \quad (7.14)$$

Коллектор представляет собой систему труб, размещенных в корпусе с покрытием высокой степени прозрачности. Солнечные водонагреватели могут быть передвижными и стационарными.

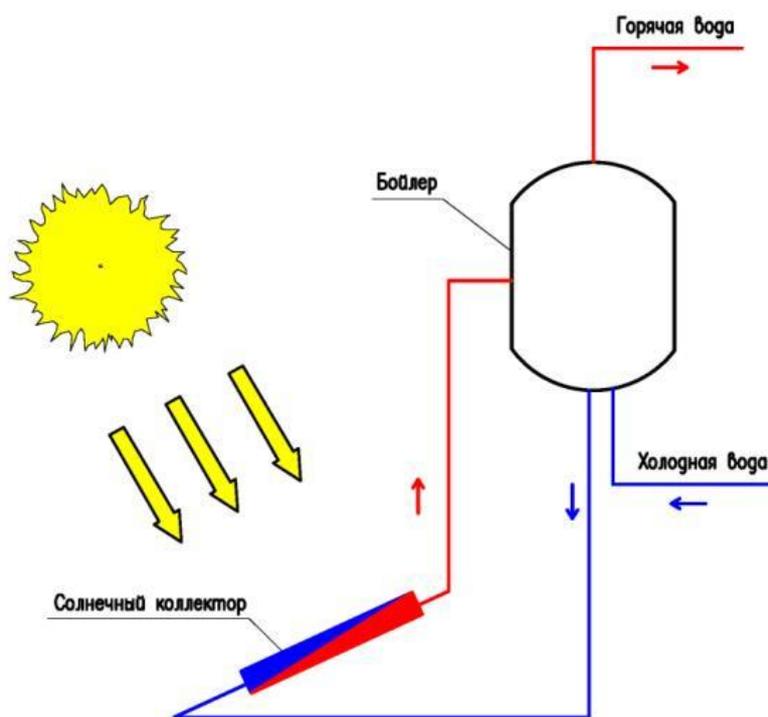


Рис.88 – Солнечный коллектор с естественной циркуляцией[46].

Нередко в СЭУ применяются плоские солнечные коллекторы, представляющие собой теплообменные аппараты с циркуляцией теплоносителя в плоских щелевых каналах или трубах.

Получение низкотемпературной теплоты в плоском коллекторе заключается в том, что солнечные лучи, падающие на поверхность коллектора, покрытого прозрачным материалом (стеклом), проникают внутрь СК и, попадая в теплоприемник, нагревают его.

Расположенный в нижней части СК, теплоприемник представляет собой абсорбирующее покрытие с высокой степенью черноты, поглощая до 90% солнечного излучения.

Поглощая солнечное излучение, абсорбирующее покрытие может нагреваться до 50–80 °С. Полученное в коллекторе тепло аккумулируется в бойлере (рис.88).

Для спектрального диапазона, соответствующего инфракрасному излучению, стекло обладает низким коэффициентом пропускания и приводит к тепличному эффекту, в результате чего энергия накапливается под стеклом, и температура теплоприемника может повыситься до 160°С, если теплота не отводится из коллектора.

При заданной величине СИ плоского СК эффективность процесса преобразования СИ в тепло будет зависеть от коэффициентов полезного действия всех основных элементов солнечного коллектора.

$$\eta_{СК}^{СИ} = \eta_{СПП} \cdot \eta_{ТМ} \cdot \eta_{ТИ} \cdot \eta_{К} \quad (7.15)$$

где  $\eta_{СК}^{СИ}$  – КПД солнечного коллектора;  $\eta_{СПП}$  – коэффициент прозрачности покрытия;  $\eta_{ТИ}$  – КПД теплоизоляции;  $\eta_{К}$  – коэффициент потерь через корпус;  $\eta_{ТМ}$  – потери теплоносителя.

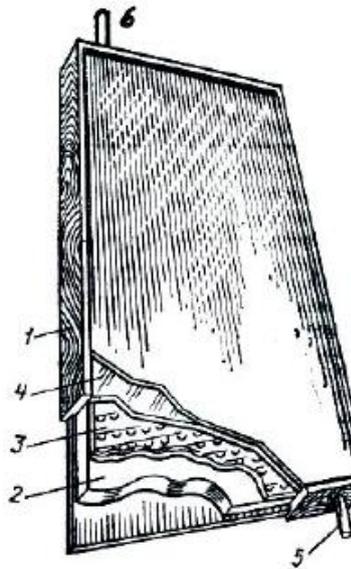


Рисунок 89 – Плоский коллектор солнечной энергии [45]: 1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – лучеплгщающая поверхность; 4 – двухслойное очехление; 5 –подвод теплоосителя; 6 – отвод теплоосителя.

Для системы горячего водоснабжения крупных потребителей используются многоконтурные СЭУ на базе коллекторов с насосной циркуляцией воды или теплоносителя.

*Аккумуляторы солнечной энергии.* Солнечные энергетические системы часто используются в системах аккумуляции теплоты.

Аккумуляторы по виду физико-химических процессов можно разделяются на следующие виды.

а) Наиболее простыми являются ёмкостные аккумуляторы, использующие естественную теплоемкость материала-аккумулятора без изменения агрегатного состояния. Аккумуляторами могут быть вода, природный камень, галька, водные растворы солей и т.д.

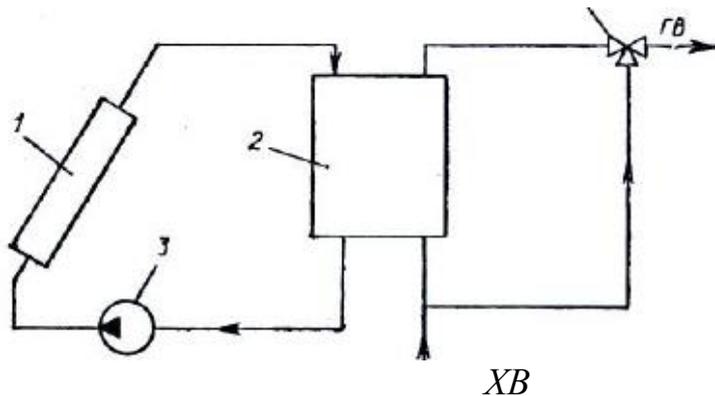


Рис.90 – Двухконтурная СЭУ с принудительной циркуляцией теплоносителя: 1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – насос; 4 – клапан холодный и горячий теплоноситель-ХВ и ГВ

Аккумулятированной теплота определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{АКИ} = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (7.16)$$

где  $m$  – масса теплового аккумулятора;  $C_p$ , - удельная теплоемкость материала аккумулятора;  $T_2 - T_1$  – разность температур материала.

б) Аккумуляторы на основе использования фазового перехода вещества

В аккумуляторах этого типа используется теплота фазовых переходов, например теплота плавления: парафин, лед, гидраты солей неорганических кислот и т.д.

Количество аккумулятированной теплоты в этом типе аккумулятиоров будет равна:

$$\mathcal{E}_{акф} = \beta m \quad (7.17)$$

где  $\beta$  – теплота фазового перехода (кДж/кг).

Эффективность этих аккумулятиоров определяется более высокими значениями теплоты плавления, чем теплоёмкости. Так теплота плавления парафина  $\beta = 150$  кДж/кг, теплоемкость  $C_p = 2.3$  кДж/кг<sup>0</sup>С, воды соответственно:  $\beta = 150$  кДж/кг,  $C_p = 4.19$  кДж/кг<sup>0</sup>С.

*Башенные БСЭУ.*

В основе БСЭУ лежит известный термодинамический цикл тепловых электростанций ТЭС, где вместо парового котла, нагреваемого за счет сжигания топлива, используется котел с разными жидкими или парообразными теплоносителями, нагреваемыми за счет тепла солнечного излучения.

Приемник солнечной энергии размещается над Землей на башне. На приемнике концентрируется энергия солнца с помощью автоматически управляемых зеркал (гелиостатов).

Солнечная энергия концентрируется на теплопоглощающей поверхности приемника-котла, в котором генерируется пар, далее поступающий в паровую турбину или в теплообменники.

В схемах БСЭУ, представленных на рис. 91, предусмотрены теплообменники-аккумуляторы 3, предназначенные для повышения эффективности работы.

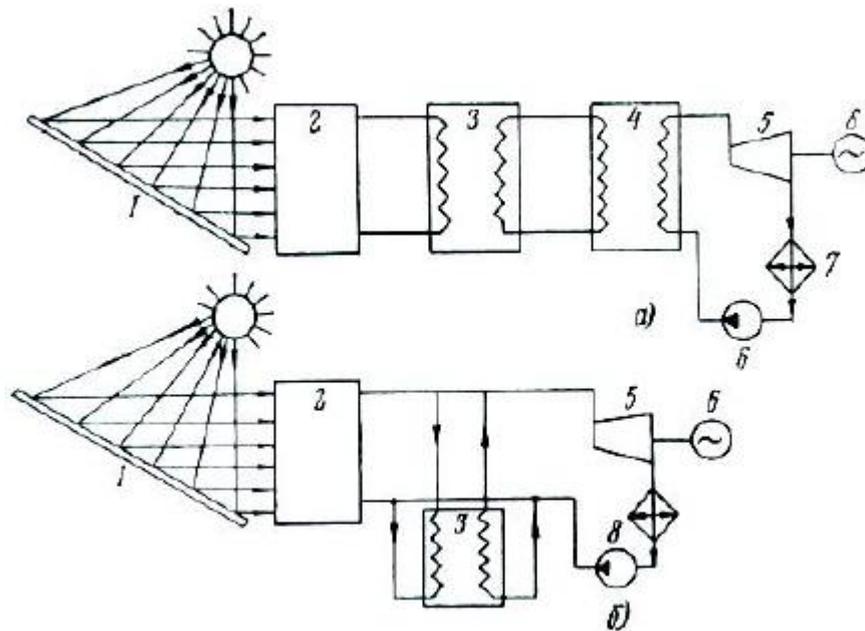


Рисунок 91 – Схема башенной солнечной электростанции БСЭУ.  
1-гелиостаты; 2-котел; 3-тепловой аккумулятор; 4-теплообменник; 5-паровая турбина; 6-генератор; 7-конденсатор; 8-насос

**Мощность БСЭУ определяется высотой башни с котлом-приемником. Высота башня исключает эффект взаимного затенения гелиостатов. Так для мощности БСЭУ в 50–100 МВт необходима башня высотой 200–300 м, с используемой площадью полей гелиостатов в 2–3 км<sup>2</sup>. В Сицилии с 1981 г работает БСЭУ мощностью 1 МВт с башней в 50 м. В теплоприемнике генерируется пар с температурой 600 °С, который затем расширяется паровой турбине.**

### 7.3.2 Космические солнечные электростанции

Как отмечалось в главе 2, несмотря на мощнейший энергоресурс Солнца, до поверхности Земли доходит менее 0,0001% солнечной энергии. Кроме того, использование солнечной энергии в значительной степени зависит от географического расположения, и погоды. Между тем, по утверждению академика Ж. Алферова, к 2030 году солнечная энергетика станет одной из основных ресурсов в энергоснабжении человечества

Одним из способов повышения эффективности солнечной энергетики является ее аккумуляция в космосе и передача на землю с помощью электромагнитных волн.

Спутник-солнечные электростанции (Solar Power Satellites, SPS) основаны на использовании солнечной энергии космоса и передаче ее с помощью крупномасштабной фотоэлектрической системы из космоса на Землю с применением микроволнового или лазерного луча [73]. У такой технологии есть большой потенциал для крупномасштабной системы получения «чистой энергии». Солнечная энергетика в таком случае переходит из разряда вспомогательной и локальной в разряд базовой энергетика (см. гл. 1). На рисунке 92 показана конфигурация космических солнечных энергетических систем, состоящих из SPS и связанных наземных сегментов.

Средняя мощность солнечной батареи на единицу площади в космосе на порядок больше, чем на Земле, в то время как потеря мощности при беспроводной передаче энергии ожидается не более 50%.

Системы SPS, впервые предложенные Питером Глейзером в 1968 году, в 1970-х годах были исследованы НАСА. В последние годы в мире системы SPS были реализованы более чем в 30 экспериментальных проектах.

В системах SPS для беспроводной передачи могут быть использованы лазеры и микроволновые трансформаторы энергии. Коэффициент полезного действия при микроволновой передаче как правило выше, чем при лазерной, а ослабление в атмосфере для СВЧ ниже по сравнению с лазером.

Системы SPS подразделяются на неконцентрирующие и концентрирующие.

Примером неконцентрирующего SPS является проект Tethed-SPS, состоящий из большой солнечной панели с возможностью выработки и передачи электроэнергии через множество модулей, соединенных в единую систему управления. Электроэнергия, генерируемая солнечными элементами на поверхности каждого модуля, преобразуется в микроволны в том же модуле. Управление модулей осуществляется шиной с использованием беспроводной локальной сети.

Примером перспективного проекта концентрирующей системы является JAXA L-SSPS. Это система с использованием лазерного излучения в

качестве среды передачи энергии. В проекте JAXA планируется использовать инфракрасный волоконный CW лазер с полосой излучения 1,07 мкм, что ниже традиционного микроволнового диапазона в полосе 1,55 мкм. Выбранный волновой диапазон обеспечивает большую выходную мощность. Недостатками диапазона 1.07 мкм является повышенная опасность для глаз, Схема L-SSPS показана на рисунке 93 [74].

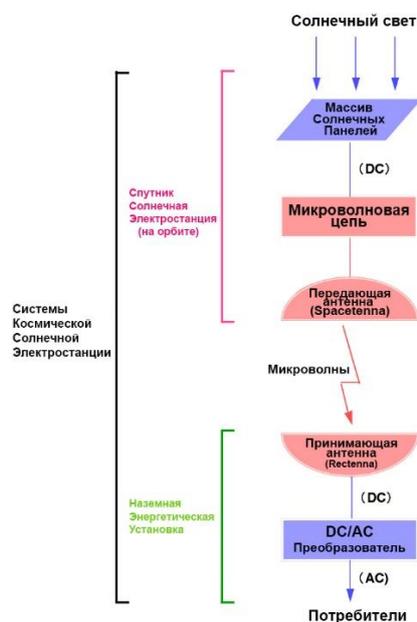


Рисунок 92 - Конфигурация космических солнечных энергетических систем, состоящих из спутника солнечной электростанции и наземных сегментов [73].

Солнечная энергия преобразуется в электрическую с помощью фотоэлементов солнечных панелей (СП) и передается лазерному лучу в инфракрасном диапазоне частот. Направление лазерного луча на наземные СП фиксируется быстро наводящимся зеркалом, управляемым пилотным лазерным лучом с земли. Мощность лазерного излучения передается на наземный приемник и преобразуется в электроэнергию.

Одной из проблем передачи энергии солнца из космоса являются атмосферные возмущения, приводящие к рассеянию лазерного луча или смещению его направления.

Для компенсации влияния атмосферных помех применяются различные технологические решения, но главным из которых является то, что мощность лазера L-SSPS намного превышает мощность лазера для передачи информации (основной лазерный луч на рис. 9), оптические системы должны быть рассчитаны на более высокие энергии. Выходная апертура основного лазерного луча (атмосферный сегмент) должна быть определена так, чтобы максимизировать энергию, получаемую наземными солнечными панелями под воздействием атмосферных возмущений и диффузии лазерного луча.

## Контрольные вопросы

- 1.Классификация солнечных энергоустановок.
- 2.Схема солнечного коллектора с естественной циркуляцией.
- 3.Двухконтурная солнечная энергетическая система.
- 4.Схемы космических солнечных электростанций.

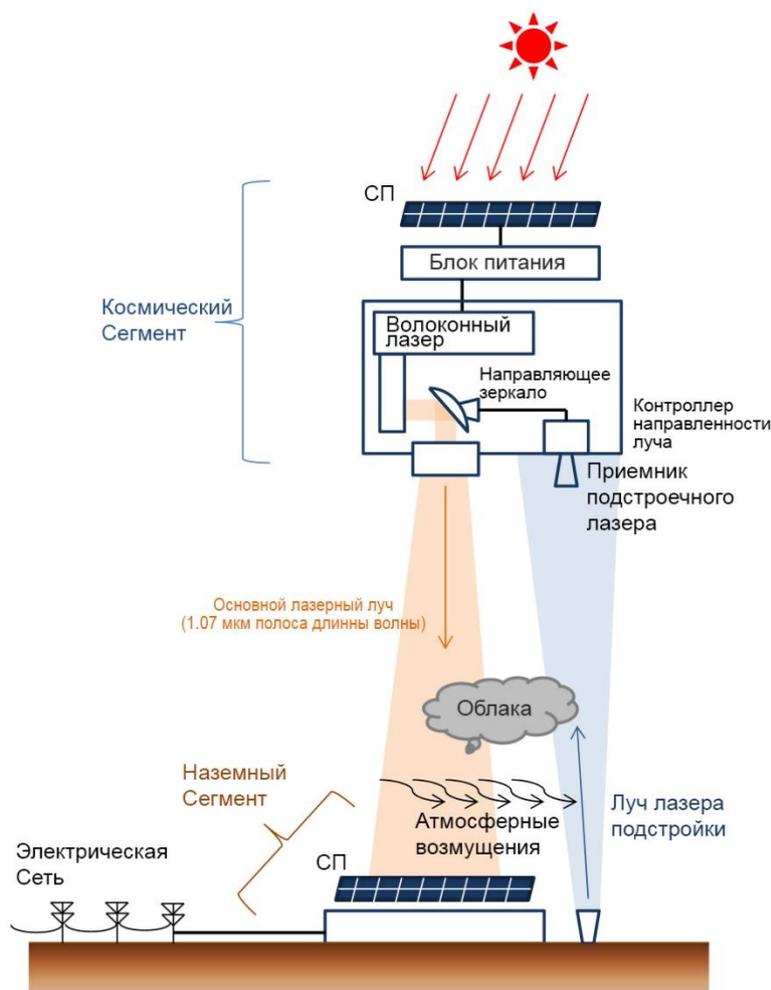


Рис.93 - Концептуальная схема L-SSPS[15]

### 7.3.2.Нетрадиционные технологии прямого преобразования солнечной энергии в электрическую

#### *Термоэмиссионный генератор*

Процесс термоэлектронной эмиссии подобен испарению жидкости с поверхности и иногда именуется «испарением электронов».

Структура металла представляет собой кристаллическую решетку, в узлах которой расположены ионы, совершающие колебательное движение, а также свободные электроны, движущиеся хаотично, с различными скоростями

В результате взаимодействия разнозаряженных частиц на поверхности металла электроны, выходящие из него, и ионы, расположенные на поверхности, образуют тонкий двойной слой положительных и отрицательных зарядов. (рис.94.).

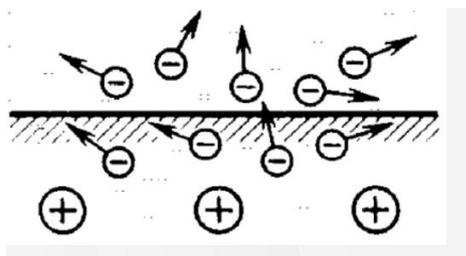


Рис.94 Термоэлектронная эмиссия

Работой выхода электрона называется работа, которую должен совершить электрон для преодоления сил притяжения к металлу. При повышении температуры металла увеличивается эмиссия или, другими словами, количество электронов, которые способны совершить работу выхода.

Термоэлектронная эмиссия была математически описана О. Ричардсоном в 1902 году

$$I = AT^2 e^{-W/kT} \quad (7.18)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $A$  — постоянный множитель,  $W$  — работа выхода, характерная для данного металла, зависящая от состояния его поверхности.

*Термоэмиссионные (термоионные) генераторы (ТЭГ).*

Термоэмиссия используется в технике в установках прямого преобразования теплоты в электричество. Такое преобразование осуществляется в термоэмиссионных генераторах рис. 95 [75].

Термоэмиссионный генератор (ТЭМГ) состоит из двух плоских электродов, установленных с зазором  $\delta = 0,1$  до  $0,001$  мм и включенных в цепь с нагрузочным резистором. Катодом подогревается до  $1500-3000\text{K}$ , а анод охлаждается. В результате нагрева происходит эмиссия тепловых электронов. Эмитирующие электроны попадают, на близко расположенный анод, в котором создается избыток электронов, создается отрицательный потенциал и отводится теплота. Если электроды соединены внешней сетью в ней возникает электрический ток.

Термические циклы термоэмиссионного генератора осуществляются при наличии не менее двух источников теплоты разной температуры, замкнутой электрической цепи и при наличии постоянного источника теплоты, обеспечивающего поддержание изотермических условий на катоде при достаточно высокой температуре.

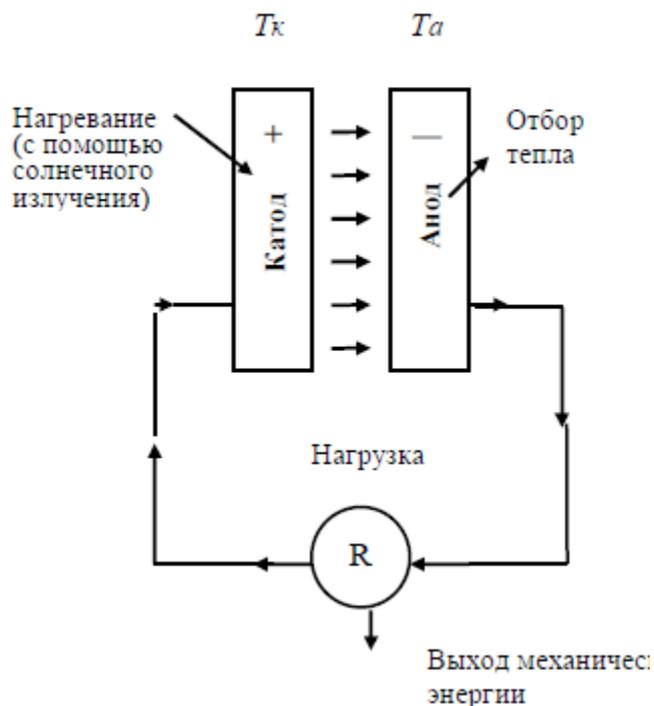


Рисунок 95 – Термоэмиссионный генератор

Соблюдение условий изотермичности катода при температурах порядка 3000 К и изотермичности отвода теплоты на аноде являются главными условиями высокой эффективности термоэмиссионных генераторов.

Важным преимуществом термоэмиссионных генераторов по сравнению с традиционными термопреобразователями являются меньшие габаритные размеры, высокая надёжность, отсутствие движущихся частей, а также возможность эксплуатации без систематического обслуживания.

Эти преимущества были использованы в космических ядерных энергетических установках.

В Советском союзе в 1970–1973 гг. были созданы несколько прототипов космических ЯЭУ с термоэмиссионными энергоустановками, обеспечивающими электроснабжение приборного отсека спутника общей мощностью до 10 кВт.

Общий вид такой ядерной энергетической установки представлен на рисунке 96.

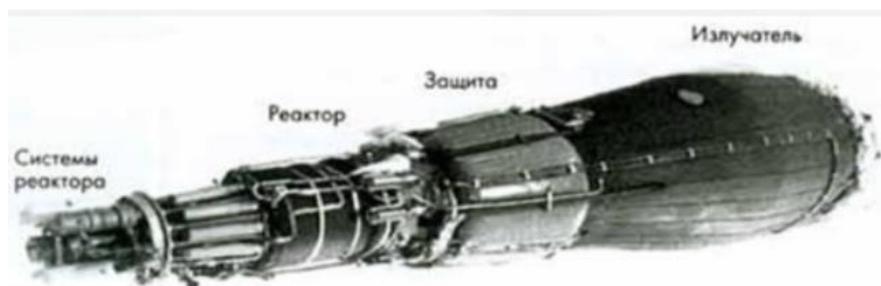


Рисунок 96 – Космическая ядерная энергетическая установка

### Термоэлектрический генератор ТЭЛГ

В основу принципа действия ТЭЛГ положено открытие Вольта в конце XVIII века.

Смысл явления термоэлектричества заключается в возникновении разности потенциалов при контакте двух проводников из разных материалов.

Теория термоэлектричества была создана немецким ученым Зеебеком в конце XIX века. Эффект Зеебека напоминает ранее рассмотренную термоэмиссию, с той лишь разницей, что в последнем случае обеспечивается полный контакт спаев разнородных материалов.

Полезная мощность ТЭЛГ определяется по уравнению:

$$N = S(T_1 - T_2)I - I^2R \quad (7.19)$$

где  $S$  – коэффициент Зеебека (мкВ/К);  $T_1 - T_2$  - разность температур спаев;  $I$  - электрический ток в цепи;  $R$  - сопротивление цепи.

Правая часть (7.19.) включает в себя две составляющие – подведенную мощность -  $S \cdot (T_1 - T_2) \cdot I$  и потери в цепи с сопротивлением  $R$  и током  $I$ .

Эффективность ТЭЛГ невелика, даже при разности температур спаев в 700 К эффективность не превышает 10 %, притом, что эффективность термоэмиссионных преобразователей может достигать 40 и более процентов.

Невысокая эффективность ТЭДТ обусловлена тем, что с увеличением разности температур, с одной стороны, увеличивается поток электронов за счет электропроводности, а с другой стороны, возникает обратный процесс перетока электронов за счет теплопроводности материалов, что снижает общую эффективность.

ТЭЛГ обладает примерно теми же преимуществами, что и термоэмиссионный преобразователь – компактность, бесшумность, надежность, долговечность, но, в отличие от ТЭГ, может функционировать при более низких температурах (до 1000К).

Термоэлектронные преобразователи перспективны в гелеоустановках.

В настоящее время продолжают поиски новых материалов для ТЭЛГ с целью повышения их КПД. В этом отношении перспективно использование нано-технологий.

### Контрольные вопросы

1. Физический смысл термоэлектронной эмиссии.
2. Термоэмиссионный генератор.
3. Термоэлектрический генератор.

### Пример расчета паросиловой установки

*Задание №1: произвести расчет паросиловой установки, работающей по обратимого цикла Ренкина при следующих условиях.*

*Дано:* Давление пара, поступающего в турбину  $p_1=170$  бар. , температура пара на входе в турбину  $T_1=600^\circ\text{C}$ .

*Давление в конденсаторе  $p_2=0,004$  бар. ( $T_2=29^\circ\text{C}$ )*

Для построения цикла удобно использовать диаграмму h-S (рис.1) и таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения.

- 1) **Точка 1:**  $p_1 = 170\text{бар.}, T_1 = 600^\circ\text{C}, h_1 = 3448\text{кДж/кг}, S_1 = 6,4\text{кДж/кг К}$
- 2) **Точка 2:**  $p_2 = 0,004\text{бар.}, T_2 = 29^\circ\text{C}, h_2 = 1948\text{кДж/кг}, S_2 = 6,4\text{кДж/кг К}$   
При нахождении параметров точек 3,4,5 удобнее пользоваться таблицами термодинамических свойств воды и водяного
- 3) **Точка 3:**  $p_3 = 0,004\text{бар.}, T_3 = 29^\circ\text{C}, h_3 = 125\text{кДж/кг}, S_3 = 0,42\text{кДж/кг К}$
- 4) **Точка 4:**  $p_4 = 170\text{бар.}, T_4 = 29^\circ\text{C}, h_4 = 125\text{кДж/кг}, S_4 = 0,42\text{кДж/кг К}$
- 5) **Точка 5:**  $p_5 = 170\text{бар.}, T_5 = 352^\circ\text{C}, h_5 = 1689\text{кДж/кг}, S_5 = 3,8\text{кДж/кг К}$
- 6) **Точка 6:**  $p_6 = 170\text{бар.}, T_6 = 352^\circ\text{C}, h_6 = 2552\text{кДж/кг}, S_6 = 5,1\text{кДж/кг К}$   
Работа цикла  $l_u = 3448 - 1948 = 1500\text{кДж/кг}$   
Подведенная теплота  $q_1 = 3448 - 125 = 3323\text{кДж/кг}$   
Термический КПД  $\eta_m = 1500 / 3323 = 0,45$

*Задание №2 произвести расчет паросиловой установки, работающей по Циклу Карно*

Параметры цикла аналогичны заданию №2.

$$T_1 = 352^\circ\text{C} = 625\text{K}$$

$$T_2 = 290^\circ\text{C} = 302\text{K}$$

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

Таким образом, КПД цикла Карно выше, чем цикла Ренкина.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы энергетики: учебник / Г. Ф. Быстрицкий. — 3-е изд., стер. — М. : КНОРУС, 2012. — 352 с. — (Для бакалавров).
2. Львов Д.С. Эффективное управление техническим развитием. - М.: Экономика, 1990.
3. Львов Д.С. Soviet Market Economy. Challenge and Reality - Amsterdam-London-New York-Tokyo: North-Holland, 1991.
4. Львов Д.С. Свободная экономика России: взгляд в XXI век - М.: "Экономика", 2000.
5. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. - М.: Экономика, 2010. - 255 с. .
6. Дегтярев К.С., Соловьев А.А. Энергообеспечение России, проблемы и возможности решения // Молодой ученый – 2011. №8, Т.1. С.107-112
7. 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)
8. Норман Дж. Хайн Геология, разведка, бурение и добыча нефти // Олимп-Бизнес, Москва, 2008 г., 726 стр., ISBN: 978-5-9693-0135-1
9. Ахатов А.Г., Ильинский А.А. Ресурсы нефти и газа на рубеже веков (экономико-экологические аспекты). — М.: Недра, 1998. 432 с.
10. Дэниел Ергин. Добыча: Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть = The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power. — М.: «Альпина Паблишер», 2011. — 944 с. — ISBN 978-5-9614-1252-9.
11. Кондранова А. М., Куимова М. В. О достоинствах и недостатках гидроэлектростанций // Молодой ученый. — 2015. — №9. — С. 465-467. — URL <https://moluch.ru/archive/89/18498/> (дата обращения: 07.08.2019).
12. Сидорович В. Мировая энергетическая революция. Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир – М: Альпина Паб-лишер. 2015. С.208
13. Холманский В. Г. Чирков, Ю. А. Кожевников А.С. Оценка теплотворной способности органических компонентов биотоплива // Экология промышленного производства. (2016). №1
14. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12. 2009
15. В. С. Вовк, А. И. Новиков, А. И. Глаголевидр. Мировая индустрия и рынки сжиженного природного газа: прогнозное моделирование – Монография. 2015. С.2015

16. BP Statistical Review of World Energy June 2010 <http://www.antjeschupp.de/files/bpstatisticreview.pdf>

17. Плакиткин, Ю.А. Плакиткина Л.С, Дьяченко К.И., Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития. Уголь № 7-/1084/,2016. -12-16 с.

18. Ф.Г. Гайнуллин, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский Природный газ как моторное топливо на транспорте. - М: Издательство «Недра», 1986. -255 с.

19. Теплотехника: Учеб. для вузов / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Н. Афанасьев и др.; Под ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. – М.: Изд-во МГУ им. Баумана, 2004. – 712 с.

20. Теоретические основы хладотехники. Техническая термодинамика. Часть I./Под ред. Э.И.Гуйго. - М., "Колос". 1994. 288 с.

21. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. - М.: «Энергия», 1975. - 488 с.

22. Теоретические основы хладотехники. Часть II. Тепломассообмен / С.Н. Богданов, Н.А. Бучко, Э.И. Гуйго, Г.Н. Данилова, В.Т. Плотников, В.Н. Филаткин, О.Б. Цветков; Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 368 с.

23. Малышев А.А., Мамченко В.О., Киссер К.В. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков хладагентов: Учеб. -метод. пособие. СПб. Университет ИТМО, 2016. 116 с.

24. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрушечко, 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. Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках. Учебное пособие для вузов. 2-е издание, переработанное. - Москва: ИздАТ, 2008

26. Грешилов А.А.Ядерный щит / Н.Д. Егупов, А.М. Матущенко, А.А. Грешилов.— М. : Логос, 2008.— 210 с. : ил.— ISBN 978-5-98704-272-0

27. Jr. Joseph A. Angelo Nuclear Technology. - Greenwood Press. 2009. – p.65627.

28. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 280 с., ил.

29. 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)

30. Remard Chabot Analysis of the Global Electricity Production unto 2014. Ren21: Renewables Global Status,Report,2015

31. Основы энергетики (конспект лекций): учебное пособие. –Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011 - 80 с.

32. Энергетика сегодня и завтра / Под ред. А.Ф. Дьякова. -М.: Энергоатомиздат, 1990. - 344с.
33. Тамм И. Е., Теория магнитного термоядерного реактора, ч. 1, в сборнике: Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, т. 1, М., 1958
34. Морозенко М.И., Григорьев В.Г., Землянский А.В. Определение оптимальных размеров поверхности теплообмена конденсационных теплоутилизаторов когенерационных ГТУ// Математическое моделирование сложных технических систем: Сборник статей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 56-60
35. Каплунов Ю.В., Климов С.Л., Красавин А.П. Экология угольной промышленности России на рубеже XXI века; Под общей ред. С.Л. Климова. - М.: Изд-во Академии горных наук, 2006. - 295 с
36. Щуровский В.В. Применение показателя стоимости жизненного цикла ГТУ // Газотурбинные технологии. 2004. № 5. С. 30-31.
37. «Газотурбинные установки. Конструкции и расчет»: Справочное пособие/ Под общ. ред. Л.В. Арсеньева и В.Г. Тырышкина, - Л.: Машиностроение, 1978. С. 37-41
38. Фаворский О.Н., Батенин В.М., Зейгарник Ю.А. Комплексная парогазовая установка с впрыском пара и теплонасосной установкой (ПГУ МЭС-60) для АО "Мосэнерго" // Теплоэнергетика. 2001. № 9. С. 50-58.
39. Цанев С.В., Буров В.Д. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. Учебное пособие для вузов –М.: МЭИ 2012-584с.с ил.
40. Зысин Л. В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: учеб. пособие. – СПб. : Изд.-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с. ISBN 978-5-742241. Г. Г. Лапин, В. В. Смирнов, Е. И. Ваксова. О состоянии и перспективах развития гидроэнергетики России. «Гидротехническое строительство» № 6 2007
41. Г. Г. Лапин, В. В. Смирнов, Е. И. Ваксова. О состоянии и перспективах развития гидроэнергетики России. «Гидротехническое строительство» № 6 2007
42. Брызгалов В.И., Гордон Л.А. Гидроэлектростанции ИПЦКГТУ Красноярск 2002-541с. ISBN 5-7536-0437-7
43. Богущ, Р.М. Хазиахметов, В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, Е.Н. Беллендир, Е.И. Ваксова, В.И. Чемоданов, С.В. Подковальников. Основные положения программы развития гидроэнергетики России до 2013 года и на перспективу до 2050 года. Энергетическая политика России №1- 2016 43
44. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. «Солнечная энергетика» МЭИ, 2008-317 с.

45. Кобрянский В. М. Многослойные гибридные солнечные батареи на основе кристаллического кремния и сопряженных полимеров / Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность. – 2016. -№1. – С 22-26
46. Безруких П. П. Анализ развития возобновляемой энергетики мира / Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность. – 2016. -№1. – С 105-111
47. А.В.Бараненко Доклад президента МАХ А.В.Бараненко на годовом собрании МАХ. Холодильный бизнес-2017. -№5.с.41-45.
48. Бараненко А.В. К 25-летию Международной академии холода. Технологии охлаждения в мировой экономике // Вестник международной академии холода. 2018. №2.с.4-9.
49. Калнинь И.М. Перспективы применения тепловых насосов // Холодильная техника. 1994. № 1. С. 4-8.
50. Калнинь И.М., Савицкий А.И., Пустовалов С.Б. Тепловые насосы нового поколения //Холодильная техника. 2007. № 1. С. 46-50.
51. Калнинь И.М., Савицкий А.И. Тепловые насосы вчера, сегодня, завтра // Холодильная техника. 2000. № 10. С. 2-6.
52. Бекман И.Н. Атомная и ядерная физика и ионизирующее излучение: учебное пособие для бакалавров и магистров/ И.Н.Бекман-2 изд.исп.доп.-М:издательствоЮрайт,2016,-398с.-Серия Университеты России.
53. СергеевИ.И. Управляемый термоядерный синтез: учебное пособие по курсу «Физика» для студентов всех специальностей форм обучения//Минск БГУИР, 2014. -27с.
54. Термоядерная энергетика. Статус и роль в долгосрочной перспективе. Е.П. Велихов, С.В. Путвинский. Докладот 22.10.1999, выполненный в рамках Energy Center of the World Federation of Scientists
- 55.Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. В.Е.Фортова : “Наука”,2000,т.IV, 507 с
- 56.Панченко В.П. Низкотемпературная плазма как рабочее тело МГД-преобразователей энергии. Учебное пособие. Часть 1. Равновесная плазма. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 г. – 58 с.
- 57.Сергеев, И.И. Управляемый термоядерный синтез: Учебное пособие по курсу «Физика» для студентов БГУИР всех специальностей и формобучения // Минск: БГУИР, 2014. - 27 с.
- 58.Аль-Бермани А.Г. Создание водородной энергетики. Молодой ученый Ежемесячный журнал. №18(77) -2014.-217-219 с.
59. 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».
60. <http://protown.ru / information / doc / 4295. Html>

61. Г.А.Месяц, М.Д.Прохоров. Вестник Российской академии наук, 2004, том 74, М7, с.579-597
62. . Водород в металлах. Под редакцией Г.Алефельда, И.Фелькля.-
63. Жарков В.В., Назаров С.К. Особенности топливных систем двигателей, работающих на водороде. Молодой ученый. Ежемесячный научный журнал №11(46) /2012/с 40-42/
64. А.М.Обельницкий Топливо и смазочные материалы М. «Высшая школа» 1982. с. 208
65. Кондратьев Д., Черепенин В., Поспелов Б., Овчинников А. Выбор топлива и окислителя для топливных элементов энергоустановки автомобиля/ Альтернативная энергетика и экология. 2005. №4.
66. Статья PRoAtom (<http://www.proatom.ru>)
67. Байков Н.М., Гриневиц Р.Н. Прогноз развития отраслей ТЭК по основным регионам до 2030 г. ИМЭМО РАН, 2009. -82с. ISBN 978-5-9535-0214-6
68. Плакиткин, Ю.А. Плакиткина Л.С, Дьяченко К.И., Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития. Уголь № 7-
69. Малышев А.А. Локальные тепло- гидродинамические характеристики двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах: автореф. дисс... канд. техн. наук / А.А. Малышев. – СПб. 1982
70. Малышев А.А., Киссер К.В., Зайцев А.В. Истинные параметры кипящих хладагентов в трубах и каналах // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С
71. Малышев А.А., Горячевская А.Н., Яковлева М.В. Расчет коэффициента теплоотдачи при внутритрубном кипении фреонов // Вестник международной академии холода 2009 №3 (32) с.18-21.
72. Малышев А. А., Татаренко Ю.В., Киреев В.С. Эксергетический анализ теплонасосных установок для различных климатических условий // Вестник международной академии холода 2019 №1 с.22-27.
73. Jassim J. M., Salman Q. M., Naji A. Z. Study to Transform the Laser Beam Transmitted Through Free Space into Electrical Energy Using Solar Cells // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Т. 12, № 24. – С. 14865-14868..
74. 1 Goto D., Yoshida H., Suzuki H., Kisara K., Ohashi K., Arimoto Y. The overview of JAXA laser energy transmission R&D activities and the orbital experiments concept on ISS-JEM // Proc. international conference on space optical systems and applications (ICSOS) –, 2014. – С. 7-9.
75. Потёмкина, М. Д. Термоэмиссионные генераторы / М. Д. Потёмкина, Н. Г. Геворгян, К. Н. Михайлова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 48 (182). — С. 42-45. — URL: <https://moluch.ru/archive/182/46789/> (дата обращения: 16.03.2022)

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **ФАКУЛЬТЕТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Современная цивилизация не может существовать и развиваться без техники низких температур.

Факультет низкотемпературной энергетики один из старейших факультетов университета. Факультет выпускает бакалавров и магистров по направлениям, связанным с производством и применением искусственного холода и низко потенциальной энергетики. На факультете имеется аспирантура, магистратура и бакалавриат.

Основным направлением работы факультета, является проведение образовательного процесса на основе фундаментальных и поисковых научных исследований и проектно-конструкторских работ, направленных на энергосбережение и обеспечение экологической безопасности тепло-хлад энергетических комплексов в различных отраслях экономики, включая энергетику, агропромышленный комплекс, газо-нефтепереработку, металлургию, строительство, оборонный комплекс, судостроение и др.

Главной задачей научно-образовательного процесса факультета является выполнение исследований и обучение студентов на уровне лучших мировых достижений с широким использованием информационных технологий и современного оборудования.

Основными приоритетами подготовки специалистов являются: владение современными методами компьютерного проектирования и научных исследований, глубокая теоретическая подготовка, знание мировых тенденций развития индустрии низких температур и энергетики, знание английского языка на уровне профессиональных коммуникаций.

Мальшев Александр Александрович  
Татаренко Юлия Валентиновна  
Киссер Кристина Владимировна

## **ЭНЕРГЕТИКА**

### **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, Кронверкский проспект, 49