

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

---

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

**В.Д. ИВАНОВ**

# **ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ**

**ЧАСТЬ 1. ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ,  
СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Санкт-Петербург  
2020

УДК 620.9(075)

ББК 31я7

И 201

Иванов В.Д. Введение в специальность. Часть 1. История возникновения, становления и развития энергетики: учебное пособие/ ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2020. – 146 с. – ISBN 978-5-91646-231-9

В 1-й части учебного пособия изложена история зарождения, становления и развития энергетики. Описаны открытия и изобретения, которые послужили базой для создания паровых машин, паровых турбин и котлов, газотурбинных и парогазовых установок, двигателей внутреннего сгорания, тепловых электрических станций. Приведены краткие биографические сведения об ученых, изобретателях и конструкторах – подвижниках энергетики.

Учебное пособие «Введение в специальность. Часть 1. История возникновения, становления и развития энергетики» предназначено для бакалавров направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и магистров направления подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиля «Технология производства электрической и тепловой энергии» очной и заочной форм обучения. Материал, изложенный в учебном пособии, может быть использован бакалаврами направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» при изучении дисциплин: «Термодинамика»; «Нагнетатели и тепловые двигатели в промышленной теплоэнергетике»; «Промышленные тепловые электростанции»; «Теплоснабжение», а также магистрами направления подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» при изучении дисциплин «Парогазовые энергетические установки в производстве электрической и тепловой энергии».

Учебное пособие печатается в авторской редакции.

Рецензенты:

Заместитель генерального директора АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз» по энергетическим установкам, судовым системам и устройствам, д-р техн. наук, профессор В.В. Барановский; доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент В.Н. Белоусов.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-91646-231-9

© Высшая школа технологии и энергетики  
СПбГУПТД, 2020

© Иванов В.Д., 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>1. Состояние отечественной энергетики</b> .....	5
1.1. Обзор современного состояния энергетики России.....	5
1.2. Состояние энергетического комплекса Санкт-Петербурга.....	38
<b>2. История возникновения энергетики</b> .....	45
2.1. Освоение огня, энергии воды, ветра и пара.....	45
2.2. Первые шаги человечества. Паровые машины.....	48
<b>3. Становление и развитие энергетики</b> .....	67
3.1. Появление теплотехнических наук .....	67
3.2. Паровые турбины .....	77
3.3. Котельные агрегаты для получения пара или горячей воды..	93
3.4. Газотурбинные установки .....	103
3.5. Парогазовые установки .....	117
3.6. Двигатели внутреннего сгорания и газопоршневые электростанции .....	126
3.7. Тепловые электростанции: КЭС и ТЭЦ .....	138
<b>Перечень принятых сокращений</b> .....	144
<b>Библиографический список</b> .....	145

## ВВЕДЕНИЕ

Промышленная теплоэнергетика является одной из самых востребованных отраслей в настоящее время.

Энергетическая отрасль сегодня – это бурно развивающаяся сфера человеческой деятельности, использующая самые современные достижения науки, передовые технологии, в том числе и компьютерные. Энергоэффективность является одним из основных критериев проектирования, строительства и эксплуатации источников тепловой и электрической энергии и систем теплоснабжения.

В настоящем издании показаны основные вехи развития энергетики на всех исторических этапах технических революций и промышленных переворотов, вплоть до энергетической революции постиндустриально-ноосферного типа.

Учебное пособие состоит из двух частей.

Первая часть содержит обзор современного состояния энергетики России, а также энергетического комплекса Санкт-Петербурга. Кроме того, в ней описаны первые шаги человечества по пути освоения огня, энергии воды, ветра и пара, создания паровых машин.

Вторая часть посвящена истории становления и развития основных видов энергетического оборудования: паровых турбин, котельных агрегатов, газотурбинных и парогазовых установок, двигателей внутреннего сгорания, тепловых электрических станций.

Во второй части дана характеристика мирового топливного баланса и возобновляемых энергоресурсов. Рассмотрены методы защиты окружающей среды от загрязняющих воздействий энергетических объектов. Описаны основные направления перспективного развития энергетики: водородная энергетика, управляемый термоядерный синтез и др.

# 1. Состояние отечественной энергетики

## 1.1. Обзор современного состояния энергетики России

*Энергетикой называется базовая отрасль промышленности, объединяющая предприятия по преобразованию первичных энергоресурсов в виды энергии, необходимые для народного хозяйства и населения, а также сети, передающие энергию от источников ее производства до объектов использования.*

Экономика нашей страны полностью базируется на собственных топливно-энергетических ресурсах.

Из всех видов вырабатываемой энергии наиболее широкое применение находят два вида – электрическая энергия и теплота низкого (с температурой до 150 °С) и среднего (до 350 °С) потенциалов, на выработку которых затрачивается в настоящее время более 55 % всех используемых первичных топливно-энергетических ресурсов страны.

В области электрификации наша страна прошла огромный путь. В начале XX в. Россия по производству электроэнергии занимала одно из последних мест среди промышленно развитых стран мира.

В настоящее время по масштабам производства электроэнергии Россия занимает первое место в Европе и пятое место в мире (после Китая, США, Японии и Индии). В электроэнергетический комплекс ЕЭС России входит около **700 электростанций** мощностью свыше 5 МВт. По состоянию на 1 января 2019 года общая установленная мощность электростанций ЕЭС России составила **243,243 ГВт**.

Единая энергетическая система России (ЕЭС России) состоит из 69 региональных энергосистем, которые, в свою очередь, образуют 7 объединенных энергетических систем: Востока, Сибири, Урала, Средней Волги, Юга, Центра и Северо-Запада. Все энергосистемы соединены межсистемными высоковольтными линиями электропередачи напряжением 220-500 кВ и выше и работают в синхронном режиме.

Совокупная установленная мощность электростанций в России с учетом технологически изолированных энергосистем по состоянию на 1 января 2019 года составила **251,343 ГВт**. К изолированным относятся энергорайоны, расположенные в энергосистемах Чукотского автономного округа, Камчатской, Сахалинской и Магаданской областей, Норильско-

Таймырского и Николаевского энергорайонов, энергосистемы центральной и северной частей Республики Саха (Якутия).

В 2018 году все станции (включая промышленные ТЭС) выработали **1 091,7 млрд кВт·ч** или около одного триллиона кВт·ч электроэнергии.

Сетевое хозяйство ЕЭС России насчитывает более **10 700 км** линий электропередачи напряжением 110 – 1150 кВ.

Основными типами энергопредприятий являются **тепловые электростанции (ТЭС)**, на долю которых приходится **67,66 % установленной мощности** и 63,45 % вырабатываемой электроэнергии. Первичным ресурсом для выработки электрической и тепловой энергии на ТЭС является органическое топливо (природный газ, мазут, уголь, торф, сланцы, древесные отходы и др.).

Тепловые электростанции подразделяются на:

- **конденсационные электростанции (КЭС)**, на которых осуществляется выработка только одного вида энергии – электрической (около 2/3 от общей выработки электроэнергии на ТЭС); конденсационные электростанции называют еще ГРЭС – государственные районные электростанции. Самой крупной в России и третьей в мире электростанцией данного типа является Сургутская ГРЭС-2. Установленная мощность станции составляет 5,6 ГВт, в том числе 0,8 ГВт – мощность двух новых парогазовых энергоблоков, введенных в 3-м квартале 2011 года (рис. 1.1 – 1.3).



Рис. 1.1. Сургутская ГРЭС-2. Общий вид (г. Сургут Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Тюменская область)



Рис. 1.2. Сургутская ГРЭС-2. Производственные корпуса



Рис. 1.3. Сургутская ГРЭС-2. Машинный зал, где расположены 6 паровых турбин К-800-240-5

Самые крупные ГРЭС в мире: Туокетуо, Китай – установленная мощность 6,6 ГВт (рис. 1.4). и Тайджунская ГРЭС, Тайвань Китай – установленная мощность 5,824 ГВт.



Рис. 1.4. Самая крупная ГРЭС в мире Tuoketuo, Китай, мощностью 6,6 ГВт

- **теплоэлектростанции (ТЭС)**, на которых осуществляется комбинированная, т.е. совместная выработка двух видов энергии: тепловой и электрической (около 1/3 от общей выработки электроэнергии на ТЭС) (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Минусинская ТЭС ПАО «Енисейская ТГК (ТГК-13)»

Кроме тепловых электростанций важную роль в энергобалансе страны играют **атомные электростанции (АЭС)**, на долю которых приходится **11,98 % установленной мощности** и 18,71 % вырабатываемой электроэнергии. Обычно для получения ядерной энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер урана-235 или плутония. Ядра делятся при попадании в них нейтрона, при этом получаются новые нейтроны и осколки деления. Нейтроны деления и осколки деления обладают большой кинетической энергией. В результате столкновений осколков с другими атомами эта кинетическая энергия быстро преобразуется в тепло.

На АЭС энергия ядерного топлива преобразуется в электрическую энергию, при этом в качестве энергопреобразующих установок используются паровые турбогенераторы влажного пара. Возможна выработка тепловой энергии для теплоснабжения потребителей на атомных теплоцентралях (АТЭЦ). В настоящее время они не получили широкого распространения. В России с 1974 года работает Билибинская АТЭЦ электрической мощностью 48 МВт, единственная атомная электростанция, расположенная в зоне вечной мерзлоты. С конца 2018 года идёт процесс вывода из эксплуатации 1-го блока Билибинской АЭС. Вывод из эксплуатации оставшихся трех энергоблоков планируется в 2019 – 2021 г.г.

АО «Концерн Росэнергоатом» (электроэнергетический дивизион Госкорпорации "Росатом") на октябрь 2019 года на 10 АЭС России эксплуатирует 36 энергоблоков суммарной установленной мощностью 30 ГВт, из них:

- 21 реактор с водой под давлением – 13 ВВЭР-1000 (12 блоков 1000 МВт и 1 блок 1100 МВт), 3 ВВЭР-1200 (1200 МВт), 5 ВВЭР-440 (4 блока 440 МВт и 1 блок 417 МВт);
- 13 канальных кипящих реакторов – 10 РБМК-1000 (1000 МВт каждый) и 3 ЭГП-6 (12 МВт каждый);
- 2 реактора на быстрых нейтронах – БН-600 (600 МВт) и БН-800 (885 МВт).

В настоящее время "Росатом" продолжает строительство 6 новых энергоблоков на российской территории, кроме того, участвует в реализации 33 крупных проекта за рубежом.

В их числе строительство энергоблока на АЭС «Аккую» в Турции, строительство также ведется в Беларуси, в Китае и других странах. Предприятие работает со странами Ближнего Востока, Латинской, Америкой – "Росатом" стал одним из крупнейших игроков на мировом

рынке. В мае 2017 года Россия и Египет заключили соглашение о создании ядерной электростанции «Эль-Дабаа», она должна быть возведена неподалеку от Каира.

Самые крупные АЭС в России: Балаковская АЭС (рис. 1.6), Калининская АЭС, Кольская АЭС, Курская АЭС, Ростовская АЭС с установленной мощностью по 4,0 ГВт.



Рис. 1.6. Балаковская АЭС, Саратовская область мощностью 4 ГВт

В Санкт-Петербурге на Балтийском заводе в апреле 2018 года были завершены комплексные швартовые испытания первого в мире плавучего атомного энергоблока "Академик Ломоносов" (рис. 1.7) и началась его буксировка в Мурманск для загрузки топлива. Сама загрузка состоялась 25 июля 2018 года.

Плавучий энергетический блок (ПЭБ) «Академик Ломоносов» – это головной проект серии мобильных транспортабельных энергоблоков малой мощности. ПЭБ предназначен для работы в составе плавучей атомной электростанции (ПАЭС) в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока и представляет собой новый класс энергоисточников на базе российских технологий атомного судостроения. ПАЭС разработана с большим запасом прочности для противодействия внешним угрозам. Станция оснащена двумя водо-водяными реакторными установками ледокольного типа КЛТ-40С, разработанными в ОКБМ имени И.И. Африкантова и изготовленными на

Нижегородском машиностроительном заводе. Их совокупная *электрическая мощность 70 МВт и тепловая 50 Гкал/ч*, что достаточно для обеспечения энергопотребления региона с населением около 100 тыс. человек, близлежащих рудников и горно-обогатительных комбинатов.

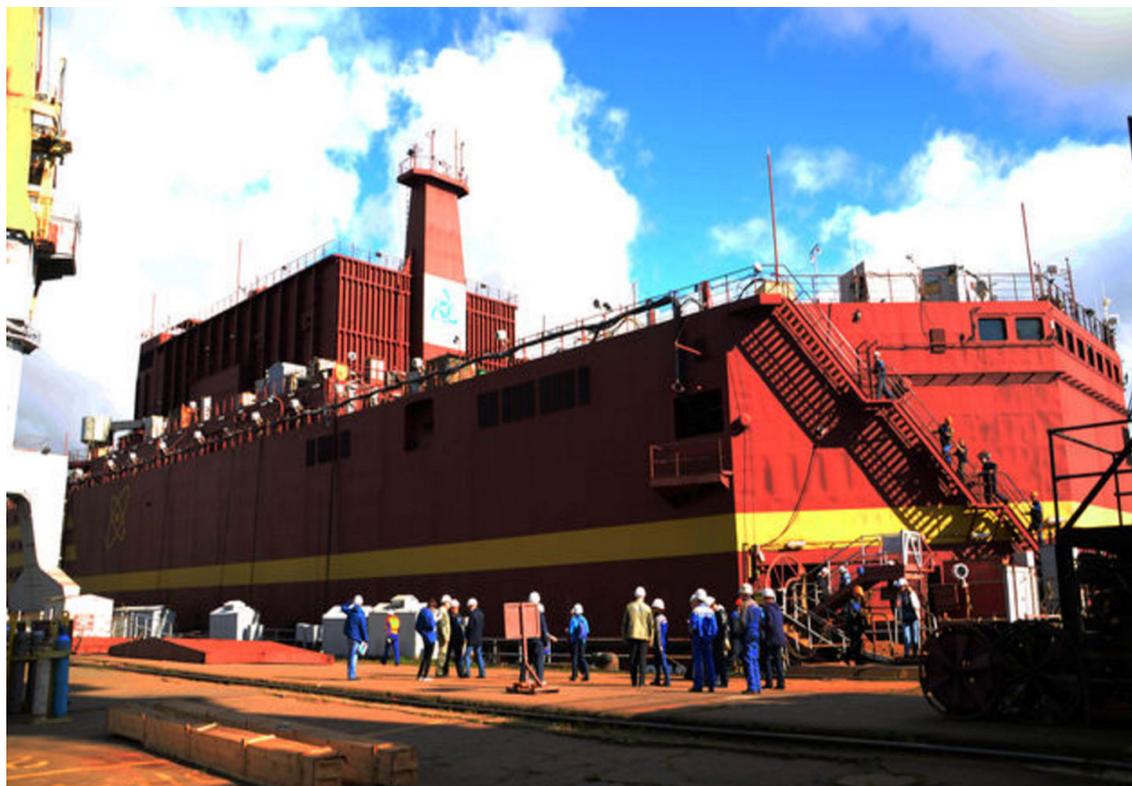


Рис. 1.7. Плавающая атомная электростанция "Академик Ломоносов" на стапеле Балтийского завода в Санкт-Петербурге

Плавающая атомная теплоэлектростанция "Академик Ломоносов" создана, чтобы дать тепло и свет в самый северный город-порт Певек, который находится в Чукотском автономном округе на берегу Восточно-Сибирского моря (нынешняя ТЭЦ почти исчерпала свой ресурс и должна быть заменена). Строительством судна занимается госкорпорация "Росатом".

Проект плавучей атомной электростанции был создан в 2006 году. Длина судна - 144 метра, ширина - 30 метров. Водоизмещение - 21,5 тысячи тонн. Судно не может передвигаться само, поэтому после завершения строительства оно было отбуксировано к месту работы. Судно рассчитано на четыре двенадцатилетних цикла работы, планируется, что ПАЭС сможет давать энергию Певеку и всей Чукотке до 2066 года.

В настоящее время ПЭБ "Академик Ломоносов" прибыл в порт г. Певек и находится в специальном доке для плавучей электростанции (рис. 1.8).

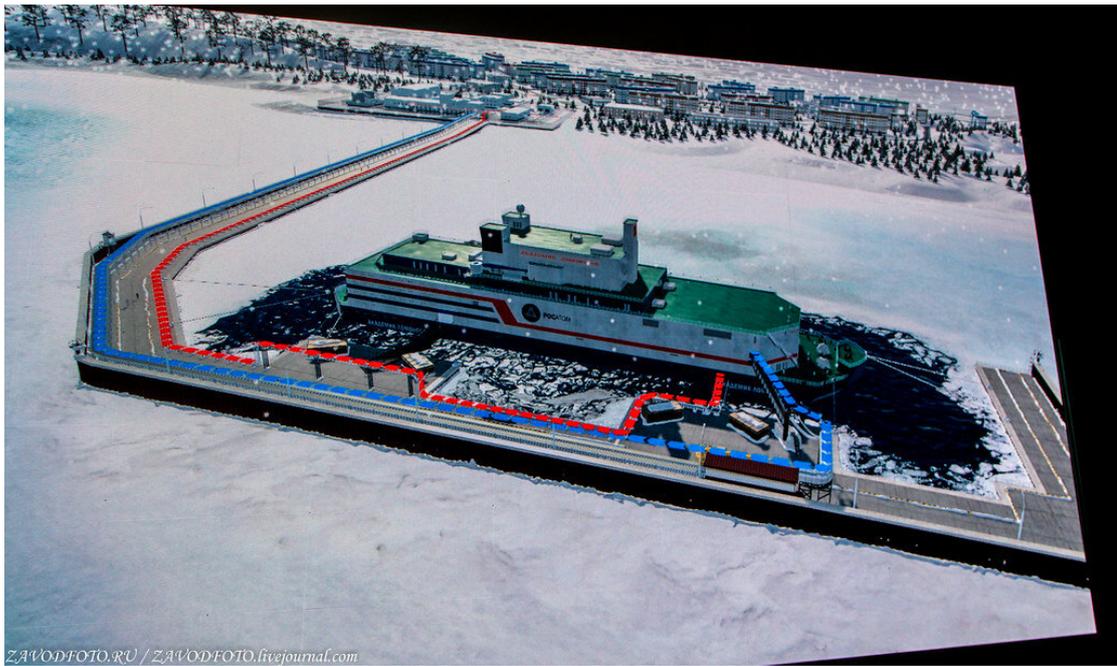


Рис. 1.8. ПАЭС "Академик Ломоносов" в порту назначения Певек

Самая крупная АЭС в мире – Касивадзаки-Карива в Японии, ее установленная мощность 8,212 ГВт (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Самая крупная в мире АЭС Касивадзаки-Карива в Японии мощностью 8,212 ГВт

Электростанции, на которых первичным видом природной энергии, преобразуемой в электрическую, является энергия падающей воды,

называются **гидроэлектростанциями (ГЭС)**. На долю ГЭС приходится **19,94 % установленной мощности** и **17,74 %** вырабатываемой электроэнергии в общем энергобалансе России.

Наиболее крупными в России в настоящее время являются: Саяно-Шушенская ГЭС - установленная мощность 6,4 ГВт (рис. 1.10); Красноярская ГЭС - установленная мощность 6 ГВт (рис. 1.11); Братская ГЭС - установленная мощность 4,5 ГВт; Усть-Илимская ГЭС - установленная мощность 4,32 ГВт.



Рис. 1.10. Саяно-Шушенская ГЭС мощностью 6,4 ГВт на реке Енисее, на границе между Красноярским краем и Хакасией, у посёлка Черёмушки возле Саяногорска

Самые крупные ГЭС в мире находятся в Китае (рис. 1.12), Бразилии, Венесуэле, Канаде.



Рис. 1.11. Красноярская ГЭС мощностью 6 ГВт,  
на реке Енисее, вблизи города Дивногорска Красноярского края



Рис. 1.12. Самая большая в мире ГЭС «Три ущелья» мощностью 22,4 ГВт,  
река Яндзы, Китай

К числу энергопредприятий малой энергетики, обеспечивающих местное электроснабжение, относятся следующие типы электростанций и энергоустановок: приливные, геотермальные, солнечные, ветровые.

- **Приливные электростанции (ПЭС)**, используют энергию приливов и отливов Мирового океана. По принципу действия приливных электростанций различают:
  - **генераторы приливного потока** – генераторы электроэнергии, которые используют кинетическую энергию воды, подобно тому, как ветряки используют энергию ветра. Некоторые из приливных генераторов могут быть встроены в опоры мостов, не создавая эстетических проблем. Целесообразна установка таких турбин в проливах, где скорость потока воды увеличивается. Приливные турбины могут быть вертикальные и горизонтальные, открытые или в обтекателе (рис. 1.13);



Рис. 1.13. Генераторы приливного потока ПЭС

- **приливные плотины** – технология использует потенциальную энергию разности уровней воды во время приливов и отливов. Плотины захватывают воду во время приливов и удерживают её. Во время отлива, вода возвращается в океан, приводя в движения турбины генераторов и вырабатывая электроэнергию (рис. 1.14).

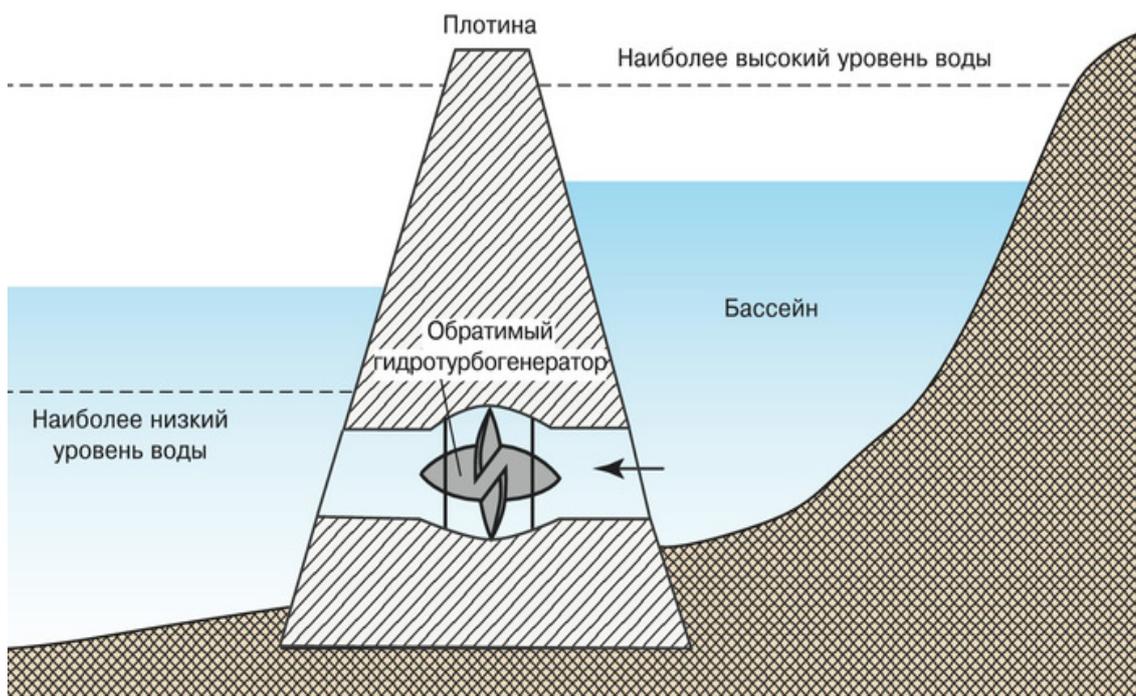


Рис. 1.14. Приливная плотина ПЭС

Единственная в стране опытно-промышленная Кислогубская ПЭС на Кольском полуострове в Кислой губе Баренцева моря пущена в эксплуатацию в 1968 году (рис. 1.15).

Мощность станции – 1,7 МВт (первоначально 0,4 МВт). Напор воды 4,7 м. Станция установлена в узкой части губы Кислая, высота приливов в которой достигает 5 метров. Конструктивно станция состоит из двух частей – старой, постройки 1968 года, и новой, постройки 2006 года. Новая часть присоединена к одному из двух водоводов старой части. В здании ПЭС размещено два ортогональных гидроагрегата – один мощностью 0,2 МВт (диаметр рабочего колеса 2,5 м, находится в старом здании) и один ОГА-5,0 мощностью 1,5 МВт (диаметр рабочего колеса 5 м, находится в новом здании).

Гидротурбины изготовлены ФГУП «ПО Севмаш», генераторы – ООО «Русэлпром». Кислогубская ПЭС принадлежит ПАО «РусГидро».

В России существует проект создания Мезенской ПЭС мощностью **11,4 ГВт** в Мезенском заливе Белого моря.



Рис. 1.15. Кислогубская ПЭС

Крупнейшая в мире приливная электростанция мощностью 398 МВт, находится на северном побережье Шотландии в проливе Пентленд-Ферт. Энергия океана сможет обеспечить электричеством примерно 175 тысяч домохозяйств. Вырабатывать электроэнергию будут 269 приливных турбин высотой 15 метров и весом 18 тонн. Электростанция находится в процессе строительства. На старте было установлено шесть генераторов мощностью 9 МВт (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Самая крупная в мире ПЭС мощностью 398 МВт в Шотландии

Крупнейшая в мире на настоящий момент действующая приливная электростанция – Сихвинская ПЭС, расположена в искусственном заливе Сихва на северо-западном побережье Южной Кореи в провинции Кёнгидо на западе от города Ансан примерно в 40 км к юго-западу от столицы Сеула. Она использует энергию приливов Жёлтого моря, расположенного между Корейским полуостровом и Китаем. По причине большой площади залива и относительно небольшой глубины возникают сильные приливы. В бухте Асан, от которой отделен залив Сихва, высота приливов составляет около 8 метров.

Сихвинская ПЭС была запущена в августе 2011 года и обладает установленной мощностью 254 МВт. Она оттеснила с первого места многолетнего лидера – французскую приливную электростанцию Ля Ранс мощностью 240 МВт.

- **Ветровые электростанции (ВЭС) или электроустановки (ВЭУ)** используют энергию ветра.

Технический потенциал ветровой энергии России оценивается свыше 50000 млрд кВт·ч/год. Экономический потенциал составляет примерно 260 млрд кВт·ч/год, то есть около 30 % производства электроэнергии всеми электростанциями России.

Энергетические ветровые зоны в России расположены, в основном, на побережье и островах Северного Ледовитого океана от Кольского полуострова до Камчатки, в районах Нижней и Средней Волги и Дона, побережье Каспийского, Охотского, Баренцева, Балтийского, Чёрного и Азовского морей. Отдельные ветровые зоны расположены в Карелии, на Алтае, в Туве, на Байкале.

Максимальная средняя скорость ветра в этих районах приходится на осенне-зимний период – период наибольшей потребности в электроэнергии и тепле. Около 30 % экономического потенциала ветроэнергетики сосредоточено на Дальнем Востоке, 14 % – в Северном экономическом районе, около 16 % – в Западной и Восточной Сибири.

Самые крупные ветроэлектростанции (ветропарки) России: Адыгейская ВЭС – 150 МВт, Ульяновская ВЭС-2 – 50 МВт, Ульяновская ВЭС – 35 МВт, в Крыму: Останинская ВЭС – 26 МВт, Тарханкутская ВЭС – 22,5 МВт, Донузлавская ВЭС – 18,7 МВт, Мирновская ВЭС – 18,46 МВт (рис. 1.17) и др.



Рис. 1.17. Мирновская ВЭС расположена в западной части Крыма недалеко от пос. Мирный; здесь установлены 155 ВЭУ общей мощностью 18,46 МВт

Некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику, в частности, в Дании с помощью ветрогенераторов производится 42 % всего электричества; в Португалии – 27 %; в Никарагуа – 21 %; в Испании – 20 %; в Ирландии – 19 %; в Германии – 8 %; в ЕС – 7,5 %

Самые крупные ВЭС в мире находятся в Китае, Индии, США.

В последние годы ветровая энергетика Китая развивается буквально ураганными темпами, оставив далеко позади все остальные страны. Неудивительно, что именно в Поднебесной функционирует крупнейший в мире комплекс ветровых электростанций – «Ганьсу». Его проектная мощность составляет 20 ГВт, что сопоставимо с крупнейшими ГЭС (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Комплекс ВЭС «Ганьсу», г. Цзюцюань, провинция Ганьсу, Китай; установленная мощность 20 ГВт

- **Солнечные электростанции (СЭС или ГелиоТЭС)** используют солнечную энергию. Солнечные электростанции оснащены следящими системами, которые позволяют концентрировать солнечное излучение на протяжении всего дня в одном направлении.

Все солнечные электростанции (СЭС) подразделяются на несколько типов:

- СЭС башенного типа
- СЭС тарельчатого типа
- СЭС, использующие фотоэлектрические модули (фотобатареи)
- СЭС, использующие параболические концентраторы
- Комбинированные СЭС и другие.

#### **СЭС башенного типа**

*Данные электростанции основаны на принципе получения водяного пара с использованием солнечной радиации. В центре станции стоит башня высотой от 18 до 24 метров (в зависимости от мощности и некоторых других параметров высота может быть больше либо меньше), на вершине которой находится резервуар с*

водой. Этот резервуар покрашен в чёрный цвет для поглощения теплового и видимого излучения. Также в этой башне находится насосная группа, доставляющая воду в резервуар от турбогенератора, который находится вне башни. По кругу от башни на некотором расстоянии располагаются гелиостаты.

Гелиостат – зеркало площадью в несколько квадратных метров, закреплённое на опоре и подключённое к общей системе позиционирования. То есть, в зависимости от положения солнца, зеркало будет менять свою ориентацию в пространстве. Основная и самая трудная задача — это позиционирование всех зеркал станции так, чтобы в любой момент времени все отраженные лучи от них попали на резервуар. В ясную солнечную погоду температура в резервуаре может достигать 700 °С. Такие температурные параметры используются на большинстве традиционных тепловых электростанций, поэтому для получения энергии используются стандартные турбины. Фактически на станциях такого типа можно получить сравнительно большой КПД (около 20 %) и высокие мощности.

#### **СЭС тарельчатого типа**

Данный тип СЭС использует принцип получения электроэнергии, схожий с таковым у башенных СЭС, но есть отличия в конструкции самой станции. Станция состоит из отдельных модулей. Модуль состоит из опоры, на которую крепится ферменная конструкция приемника и отражателя. Приёмник расположен примерно в области концентрации отраженного солнечного света. Отражатель состоит из зеркал в форме, напоминающей тарелки (отсюда название), радиально расположенных на ферме. Диаметры этих зеркал достигают 2 метров, а количество зеркал — нескольких десятков (в зависимости от мощности модуля). Такие станции могут состоять как из одного модуля (автономные), так и из нескольких десятков (работа параллельно с сетью).

#### **СЭС, использующие фотоэлектрические модули (солнечные батареи)**

СЭС этого типа в настоящее время очень распространены, так как в общем случае СЭС состоит из большого числа отдельных модулей (фотобатарей) различной мощности и выходных параметров. Данные СЭС широко применяются для энергообеспечения как малых, так и крупных объектов (частные коттеджи, пансионаты, санатории, промышленные здания и т. д.). Устанавливаться фотобатареи могут практически везде, начиная от кровли и

фасада здания и заканчивая специально выделенными территориями. Установленные мощности тоже колеблются в широком диапазоне, начиная от снабжения отдельных насосов, заканчивая электроснабжением городов.

### **СЭС, использующие параболоцилиндрические концентраторы**

Принцип работы данных СЭС заключается в нагревании теплоносителя до параметров, пригодных к использованию в турбогенераторе.

На данной СЭС устанавливается параболоцилиндрическое зеркало большой длины, а в фокусе параболы размещается трубка, по которой течет теплоноситель (чаще всего масло). Пройдя весь путь, теплоноситель разогревается и в теплообменных аппаратах отдаёт теплоту воде, которая превращается в пар и поступает на турбогенератор.

### **Комбинированные СЭС**

Часто на СЭС различных типов дополнительно устанавливаются теплообменные аппараты для получения горячей воды, которая используется как для технических нужд, так и для горячего водоснабжения и отопления. В этом и состоит суть комбинированных СЭС. Также на одной территории возможна параллельная установка концентраторов и фотобатарей, что тоже считается комбинированной СЭС.

В солнечных тепловых электростанциях башенного типа солнечное излучение концентрируется на центральный теплоприемник при помощи огромного количество плоских отражателей (зеркал), которые в течение светового дня автоматически изменяют угол установки. Это позволяет достичь значительно более высокую концентрацию по сравнению с системами с линейными концентраторами. При этом температура на теплоприемнике достигает 700 – 1000 °С. Такие температуры значительно увеличивают эффективность работы станции.

По данному типу в 1985 году в Крыму в городе Щёлкино была построена первая в СССР солнечная электростанция СЭС-5 мощностью 5 МВт (рис. 1.19).

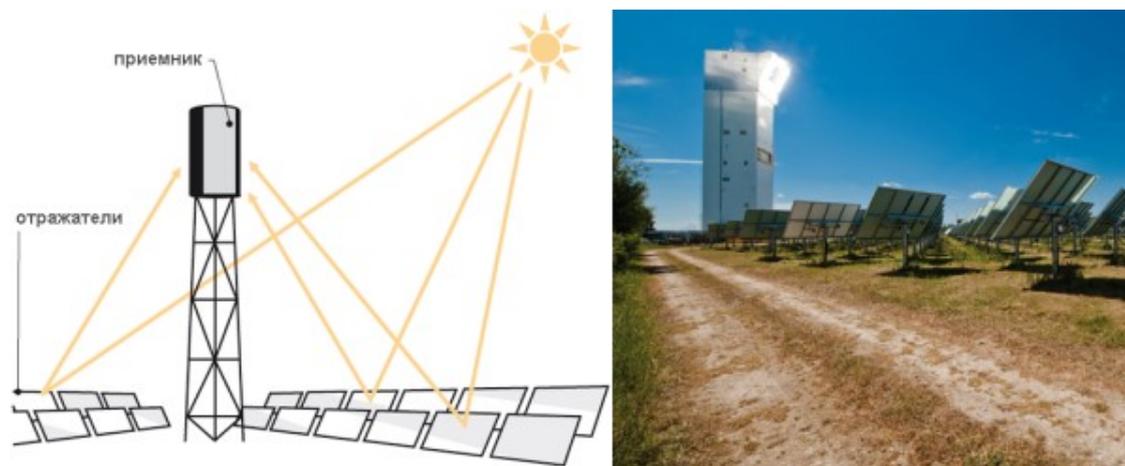


Рис. 1.19. Крымская СЭС-5 башенного типа

Солнечные электростанции с параболическими линейными концентраторами (рис. 1.20) состоят из многочисленных расположенных параллельно рядов параболоцилиндрических отражателей. Эти отражатели концентрируют солнечное излучение вдоль теплоприёмной трубки. В данной трубке циркулирует теплоноситель на основе масла, разогреваясь до  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Разогретая жидкость поступает на теплообменный аппарат, где вода преобразовывается в пар при температуре около  $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Этот пар поступает на парогенератор, где происходит процесс преобразования электроэнергии так же, как на обычных электростанциях.

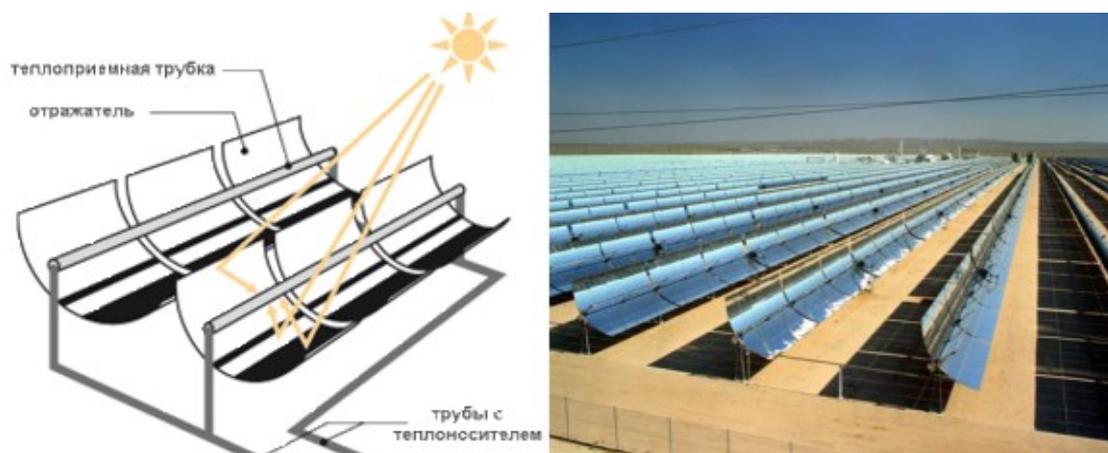


Рис. 1.20. СЭС с параболическими линейными концентраторами

Самые крупные в России солнечные электростанции – это СЭС, возведённые Activ Solar на Крымском полуострове, – станции «Владиславовка» (110 МВт), «Перово» (105,56 МВт), «Охотниково» (80 МВт), «Николаевка» (70 МВт), «Родниковое», «Митяево» и др.

Суммарная потребность республики Крым в электроэнергии – около 1200 МВт.

Самые крупные в мире солнечные электростанции находятся в США в Калифорнии: первая – СЭС Star, расположенная в Долине Антилоп в западной части пустыни Мохаве в южной Калифорнии, ее мощность 579 МВт (рис. 1.21), другая – Айванпа в Сан-Бернардино в 70 км к юго-западу от Лас-Вегаса, ее мощность 392 МВт (рис. 1.22); еще одна – расположена также в пустыне Мохаве, ее мощность 354 МВт, площадь составляет 14,24 квадратных километра.

СЭС в районе Долины Антилоп в западной части пустыни Мохаве в южной Калифорнии использует порядка 3,8 миллиона солнечных панелей. Около 20 % из них установлены на базе шасси с системой слежения за Солнцем. При мощности 579 МВт СЭС может обеспечивать электрической энергией потребности 75 000 жителей и тем самым уменьшить выброс загрязнений в окружающую среду, который эквивалентен тому, как если бы убрать с дорог 30 000 автомобилей.



Рис. 1.21. СЭС в районе Долины Антилоп в западной части пустыни Мохаве в южной Калифорнии, мощностью 579 МВт, используется 3,8 миллиона солнечных панелей

На СЭС в пустыне Мохаве мощностью 354 МВт установлено

девять блоков, которые собирают солнечную энергию с помощью 936 384 зеркал. Данная СЭС производит электроэнергию для обеспечения нужд 232 500 жителей и предотвращает выброс 3 800 тонн загрязнений окружающей среды ежегодно за счет отказа от использования традиционных видов топлива, например, таких, как нефть.



Рис. 1.22. СЭС Айванпа в Сан-Бернардино мощностью 392 МВт

В мае 2016 г. на СЭС Айванпа произошел пожар, который возник из-за неправильного расположения зеркал, направляющих солнечный свет на бойлерную вышку.

В итоге сконцентрированный солнечный свет попал не в положенное место, на вышке возник пожар, который расплавил и сжег паропроводы, повредил электрические кабели.

Самая крупная в мире плавучая электростанция на солнечной энергии начала работу в 2017 году на востоке Китая. Мощность СЭС составляет 40 МВт (рис. 1.23).

Плавучую СЭС построили на территории, где ранее располагались шахты по добыче угля. Местность была затоплена дождями за несколько лет, и теперь глубина, образовавшаяся на месте, достигает 10 метров. Данная СЭС может обеспечивать

электроэнергией 100 тысяч человек.



Рис. 1.23. Самая большая в мире плавучая СЭС на востоке Китая, мощностью 40 МВт

- **Геотермальные электростанции (ГеоТЭС)** используют энергию подземных теплых вод. Энергия геотермальных источников, заставляющая вращаться лопасти турбин и вырабатывать электрическую энергию, стала использоваться в России сравнительно недавно. Первые российские геотермальные электростанции (Паужетская ГеоТЭС и Паратунская ГеоТЭС) были построены в 1966 году на Камчатке. И хотя мощность станций невелика – 12 МВт, они сыграли историческую роль в развитии камчатской энергетики и российской геотермии. По результатам успешной эксплуатации Паужетской ГеоТЭС было решено продолжить развитие геотермальной энергетики на Камчатке (рис. 1.24).

Ученые и геологи провели геолого-разведочные изыскания на Мутновском месторождении, где впоследствии были построены две геотермальные электростанции: Верхне-Мутновская ГеоТЭС мощностью 12 МВт (1999) и Мутновская ГеоТЭС мощностью 50 МВт (2002). Реализацией этих крупнейших проектов занималось акционерное общество «Геотерм» (рис. 1.25).



Рис. 1.24. Паужетская ГеоТЭС мощностью 12 МВт



Рис. 1.25. Мутновские ГеоТЭС суммарной мощностью 62 МВт, обеспечивают 30 % выработки электроэнергии в Центральном камчатском энергоузле

Крупнейшая в мире ГеоТЭС, мощность которой составляет 303 МВт (по электроэнергии) и 400 МВт (по тепловой энергии) – ГеоТЭС Хедлисхейди в Исландии находится около вулкана Хенгидль (рис. 1.26). ГеоТЭС Хедлисхейди имеет 50 скважин глубиной 2 – 5 км. На такой глубине подземные воды находятся в состоянии флюида или сверхкритической жидкости с температурой от 400 до 1000° С при давлении около 200 атмосфер, что вносит дополнительные сложности в проект.

ГеоТЭС Хедлисхейди (рис. 1.27) начала работать в 2006 году с двумя генераторами по 45 МВт. В 2007 году был введен дополнительный генератор низкого давления мощностью 33 МВт. В 2008 году были введены в эксплуатацию два генератора мощностью 45 МВт, последние два генератора мощностью 45 МВт были запущены в октябре 2011 года.

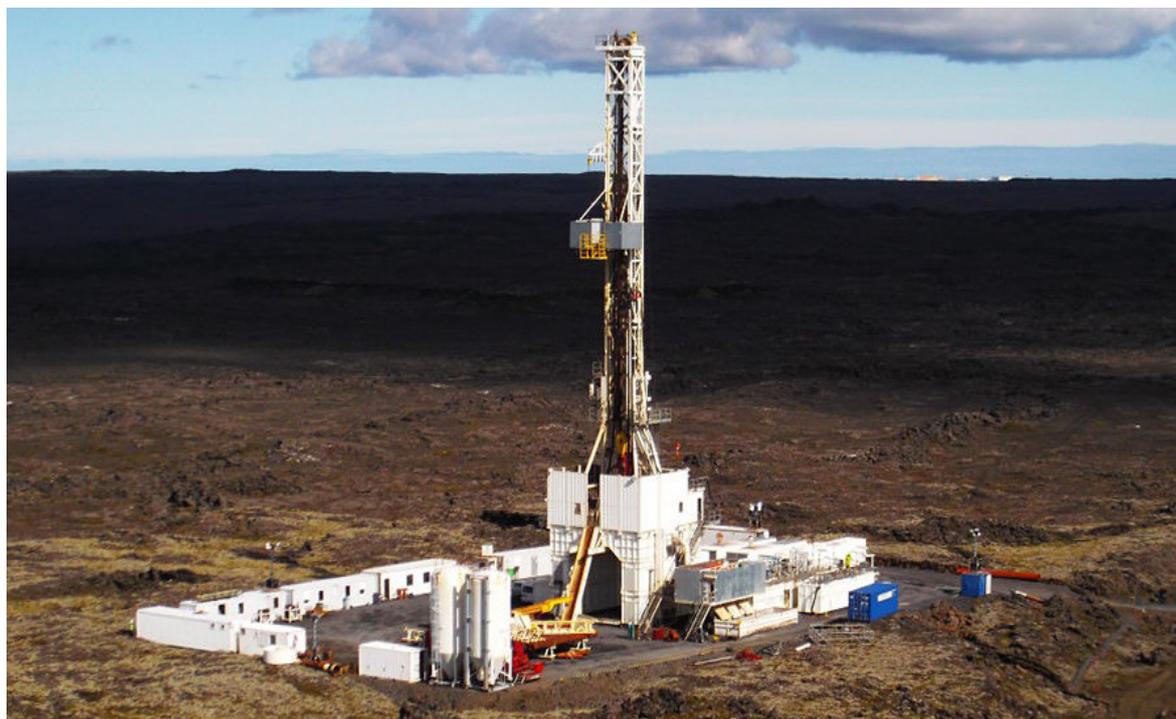


Рис. 1.26. Крупнейшая в мире ГеоТЭС Хедлисхейди мощностью 303 МВт в Исландии



Рис. 1.27. ГеоТЭС Хедлискейди обеспечивает теплом столицу Рейкьявик

Одна из крупных ГеоТЭС, мощность которой составляет 140 МВт, пущена в эксплуатацию в 2014 г. в Кении (рис. 1.28).



Рис. 1.28. ГеоТЭС мощностью 140 МВт в Кении

На ГеоТЭС производится выработка электроэнергии, однако кроме этого, в районах, богатых подземными теплыми водами (Камчатка, Ставропольский край и др.), создаются энергоисточники для обеспечения потребителей теплом без выработки электроэнергии – *геотермальные котельные*.

Помимо паротурбинного цикла, широко используемого на ТЭС, в настоящее время при реконструкции действующих и строительстве новых электростанций используются парогазовый цикл (ПАО «Северо-Западная ТЭЦ», ПАО «Юго-Западная ТЭЦ», Правобережная ТЭЦ-5, Первомайская ТЭЦ-14, Южная ТЭЦ-22 Санкт-Петербург), а также газотурбинный цикл.

*Для покрытия пиков электропотребления и выравнивания суточной неоднородности графика нагрузок* создаются так называемые гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС). Основным энергоагрегатом на ГАЭС является насос-гидротурбина, который в часы пик работает в режиме гидротурбины, выдавая электроэнергию в энергосистему за счет сброса запаса воды из верхнего водоема (бьефа) в нижний, а в часы малого электропотребления работает в режиме насоса, осуществляя перекачку воды из нижнего водоема в верхний. Во время ночного провала энергопотребления ГАЭС закупает дешёвую электроэнергию, закачивая воду в верхний бьеф. Во время утреннего и вечернего пика энергопотребления ГАЭС продаёт дорогую пиковую электроэнергию. Опыт эксплуатации ГАЭС и её использования в целях регулирования электрических режимов показал, что она является не обычным генерирующим источником, а скорее многофункциональным источником оказания системных услуг, способствующих не только оптимизации суточного графика нагрузок, но и повышению надёжности и качества электроснабжения. Загорская ГАЭС мощностью 1200 МВт входит в состав ПАО «РусГидро» на правах филиала (рис. 1.29). Потребляемая мощность из энергосистемы в режиме закачки воды в верхний бьеф 1320 МВт. Актуальность привлечения Загорской ГАЭС к оптимизации режимов энергообъединения подтверждается тем, что число пусков обратимых гидроагрегатов ГАЭС достигает 440 в месяц, а иногда составляет около 30 пусков в сутки. Набор полной мощности с нуля осуществляется за 1-2 минуты.

Также Загорская ГАЭС играет важную роль в создании аварийного резерва энергосистемы. В настоящее время ведется строительство 2-й очереди Загорской ГАЭС мощностью 840/1000 МВт (рис. 1.30).



Рис. 1.29. Загорская ГАЭС на реке Кунья в Московской области, Сергиево-Посадском районе



Рис. 1.30. Загорская ГАЭС-1 и ГАЭС-2

Самая крупная ГАЭС в мире – мощностью 3003 МВт находится в Бас Каунт, США.

В качестве верхних бассейнов ГАЭС можно использовать акваторию реки, протекающей в черте города или вблизи него, либо другой естественный водоем достаточной емкости; нижние бассейны и машинные

залы могут быть подземными. Такая компоновка не повлияет на наземные экосистемы города и не потребует отведения больших площадей.

Характерным примером такого подхода является строительство двух ГАЭС вблизи Нью-Йорка (США): Бленхейм-Джилльбао (1000 МВт, 1973) и Корнуэлл (2000 МВт, 1982), сооруженных после знаменитой аварии 1965 года в дополнение к введенной в 1961 году ГЭС–ГАЭС Льюистон-Тусканора мощностью 2200 МВт. Кроме того, в непосредственной близости, в штате Массачусетс, соответственно, в 1972 и 1974 гг. введены ГАЭС Нордфильд установленной мощностью 1000 МВт и Бер-Свемп мощностью 600 МВт.

Развитие экономики страны очень отчетливо прослеживается по развитию энергетической отрасли, поскольку выработка электроэнергии определяется ее потреблением промышленностью, транспортом, коммунальным хозяйством и другими сегментами, ввиду того, что накопление электрической энергии в промышленных масштабах на современном этапе не освоено (табл. 1.1).

Таблица 1.1

**Прирост установленной мощности электростанций промышленно развитых стран мира в 2012 г. к 1992 г. и в 2018 г. к 2012 г., ГВт**

№	Страна	1992 г.	2012 г.	Прирост мощности	Прирост мощности, % 2012 г./ 1992 г. (% в год)	2018 г.	Прирост мощности, % 2018 г./ 2012 г. (% в год)
1	Китай	166,55	1174,3	1007,76	605,1 % (30,3%)	1899,7	61,8 % (10,3 %)
2	США	746,51	1063,0	316,526	42,45 % (2,1%)	1094,7	3,0 % (0,5 %)
3	Индия	81,953	254,68	172,731	210,8 % (10,5%)	374,22	46,9 % (7,8 %)
4	Япония	205,16	293,31	88,153	43,0 % (2,1 %)	300	2,3 % (0,38%)
5	Бразилия	55,098	121,69	66,587	120,9 % (6,0 %)	167,48	37,6 % (6,3%)
6	Канада	108,99	135,04	26,049	23,9 % (1,2 %)	150,89	11,7 % (2,0 %)
7	Россия	211,76	234,43	22,677	10,7 % (0,5 %)	251,34	7,2 % (1,2 %)

Динамика роста энергетики промышленно развитых стран характеризуется, в частности, следующими показателями прироста установленной мощности электростанций, приведенными в табл. 1.1, что наглядно свидетельствует о темпах развития экономики стран.

Электроэнергетика – одна из наиболее быстрорастущих отраслей в развитых странах. В СССР она развивалась опережающими темпами. В 1990-х годах в результате реформ прирост мощности электростанций в России прекратился, производство электроэнергии уменьшилось, ее стоимость существенно увеличилась, приблизившись к показателям в США (рис. 1.31) [5].

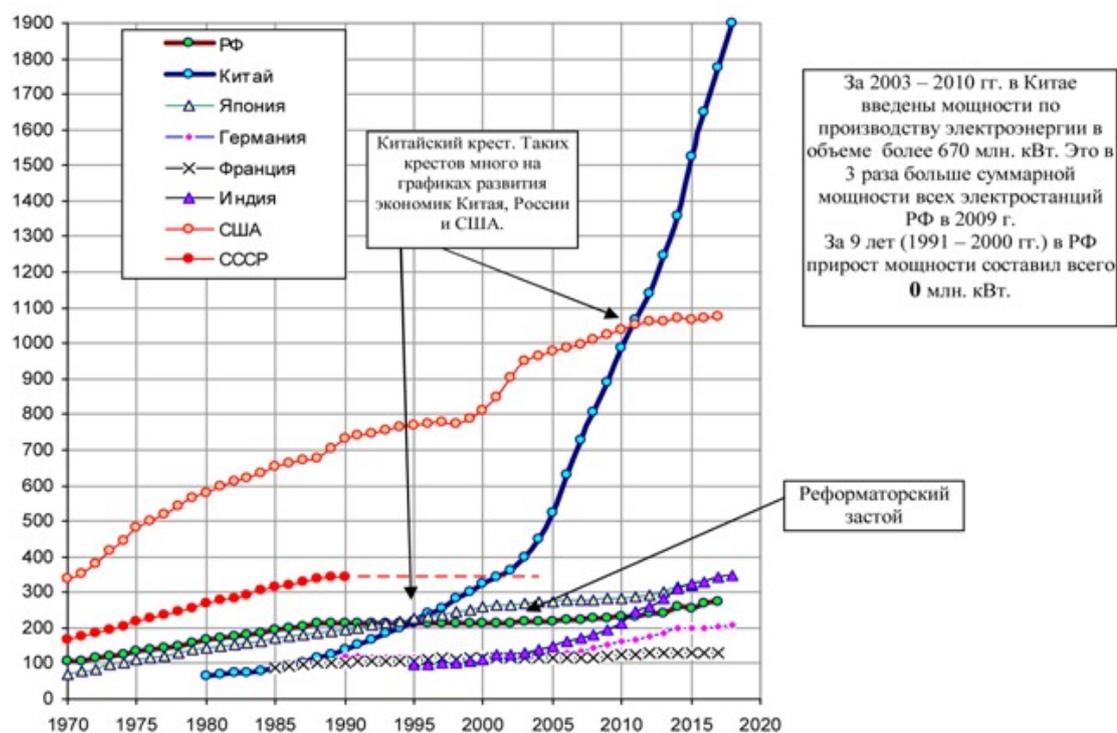


Рис. 1.31. Установленная мощность электростанций технически развитых стран, ГВт.

Первой теплофикационной системой, заработавшей в России в 1903 году, считается теплофикационная система детской больницы им. принца Ольденбургского (ныне детская больница им. К.А. Раухфуса). Автором проекта был А.К. Павловский, под наблюдением которого осуществлялось и изготовление всего оборудования. Экспертом по проекту и оборудованию местной ТЭЦ был профессор В.В. Дмитриев.

Исходя из положительных результатов работы теплофикационных блок-станций, В.В. Дмитриев стал пропагандировать идею создания тепло-электрических станций. С концепцией сплошной теплофикации крупных

городов с интенсивной застройкой В.В. Дмитриев выступает в 1920 году на Всероссийском электротехническом съезде в Москве.

Днем рождения советской теплофикации и централизованного теплоснабжения считается 25 ноября 1924 года. В этот день в Ленинграде был введен в строй первый теплопровод общего пользования, сооруженный по проекту и под руководством "пионеров советской теплофикации" – инженера Л.Л. Гинтера и профессора В.В. Дмитриева.

По этому теплопроводу теплота от ЛГЭС-3 (Ленинградской государственной электростанции № 3, впоследствии ТЭЦ им. Л.Л. Гинтера) была передана в жилой дом № 96 по набережной р. Фонтанки, а затем в Казачьи бани и другие здания.

### ***План ГОЭЛРО - советское экономическое чудо***

План ГОЭЛРО – первый единый государственный перспективный план развития народного хозяйства Советской республики на основе электрификации страны, разработанный в 1920 году по заданию и под руководством В. И. Ленина Государственной комиссией по электрификации России (ГОЭЛРО).

К разработке плана было привлечено свыше 200 деятелей науки и техники. Среди них И. Г. Александров, Г. О. Графтио, А. Г. Коган, К. А. Круг, Б. И. Угримов, М. А. Шателен и др. Возглавлял комиссию Г.М. Кржижановский.

Комиссия ГОЭЛРО определяла основные принципиальные положения плана электрификации страны. К концу 1920 года комиссия проделала огромную работу и подготовила «План электрификации РСФСР» – том в 650 стр. текста с картами и схемами электрификации районов (рис. 1.32).

Планы по электрификации страны предлагались немецкими инженерами и при императоре Николае II, но они были гораздо скромнее и не были утверждены государем. Ленинское правительство было первым в России, поставившим перед собой подобную задачу. Осуществление плана казалось трудновыполнимым в условиях послевоенной разрухи и политической изоляции СССР. Герберт Уэллс, писатель-фантаст, посещавший Россию в годы Гражданской войны, после личной беседы с Лениным о будущем России и об электрификации назовет его "Кремлёвским мечтателем", не веря в возможность осуществления этого предприятия.



Рис. 1.32. На VIII Всероссийском съезде Советов 22 декабря 1920 года был принят Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО)

План ГОЭЛРО, рассчитанный на 15 лет, предусматривал строительство 30 районных электрических станций (20 ТЭС и 10 ГЭС) общей мощностью **1,75 ГВт**. В числе прочих намечалось построить Каширскую, Шатурскую, Горьковскую, Челябинскую и Штеровскую ГРЭС, а также ГЭС — Нижегородскую, Волховскую, Днепровскую, две станции на реке Свирь и др.

ГОЭЛРО был планом развития не одной энергетики, а всей экономики. В нем предусматривалось строительство предприятий, обеспечивающих эти стройки всем необходимым, а также опережающее развитие электроэнергетики. План ГОЭЛРО не имел аналогов в мировой экономической и научно-технической практике.

Проект электрификации положил основу индустриализации в России. План ГОЭЛРО был выполнен к 1931 году. Выработка электроэнергии в 1932 году по сравнению с 1913 годом (пик развития в дореволюционной России) увеличилась не в 4,5 раза, как планировалось, а почти **в 7 раз: с 2 до 13,5 млрд. кВт·ч**. План ГОЭЛРО был перевыполнен по добыче угля, нефти, торфа, железной и марганцевой руды, производству чугуна и стали.

План ГОЭЛРО сыграл в жизни нашей страны огромную роль: без него

вряд ли удалось бы вывести СССР в столь короткие сроки в число самых развитых в промышленном отношении стран мира. Реализация этого плана сформировала, по сути дела, всю отечественную экономику и до сих пор в значительной мере определяет ее.

*Отечественное энергомашиностроение является "пионером" создания эффективного энергетического оборудования.*

**Паровые турбины** выпускают: ПАО «Силовые машины» - ЛМЗ (Санкт-Петербург), ПАО «Калужский турбинный завод» (г. Калуга), ЗАО «Уральский турбинный завод» (Екатеринбург) и др.

**Газотурбинное оборудование** выпускают ЗАО «Интертурбо», ПАО «Невский машиностроительный завод» (оба в Санкт-Петербурге) и др.

**Крупные паровые котлы** в России выпускают: ПАО «Белгородский завод энергетического машиностроения», ПАО «Сибэнергомаш» (г. Барнаул), ПАО «Бийский котельный завод», ПАО ТКЗ «Красный котельщик» (г. Таганрог) и др.

**Гидротурбины** в России выпускают: ПАО «Силовые машины» - ЛМЗ, АО «ИНСЭТ» (оба в Санкт-Петербурге), АО «Тяжмаш», г. Сызрань, АО «Уралгидромаш», г. Сысерть.

**Электрогенераторы** производит ПАО «Электросила» (Санкт-Петербург), ПАО «Привод» (Пермская обл., г. Лысьва) и др.

Однако с сожалением приходится констатировать, что Россия в XXI веке является очень расточительной страной. Энергоемкость экономики России в 3 раза выше энергоемкости мировой экономики, а по сравнению с передовыми странами – в 7 раз больше, чем в Японии, в 4,5 раза больше, чем в США. В жилищно-коммунальном секторе фактический расход тепла и воды в 4 ÷ 5 раз больше, чем в Финляндии и Норвегии. Потенциал энергосбережения России составляет более 400 млн тонн условного топлива в год.

Важным звеном теплофикационной системы являются **тепловые сети**, по которым теплота транспортируется от источников теплоснабжения до тепловых потребителей.

В связи с повышением требований к качеству планировки и чистоте воздушного бассейна городов многие мощные ТЭЦ размещаются на значительном расстоянии от районов теплового потребления, часто за пределами городской черты.

*В настоящее время фактические средневзвешенные теплопотери в тепловых сетях в России составляют 16,5 % от передаваемого теплового потока, что эквивалентно перерасходу 81 млн тонн условного топлива в год. Нормативные теплопотери составляют 8 %.*

В последние годы находят широкое применение конструкции теплопроводов индустриального изготовления с тепловой изоляцией из пенополиуретана, имеющего теплопроводность  $\lambda = 0,03 \div 0,05$  Вт/(м · °С), что примерно втрое меньше, чем у широко использовавшихся теплоизоляционных конструкций из армопенобетона. Снаружи пенополиуретановая изоляция дополнительно защищена от увлажнения полиэтиленовой оболочкой. Такая конструкция не только сокращает тепловые потери, но и защищает стальной трубопровод от наружной коррозии и блуждающих токов (рис. 1.33).

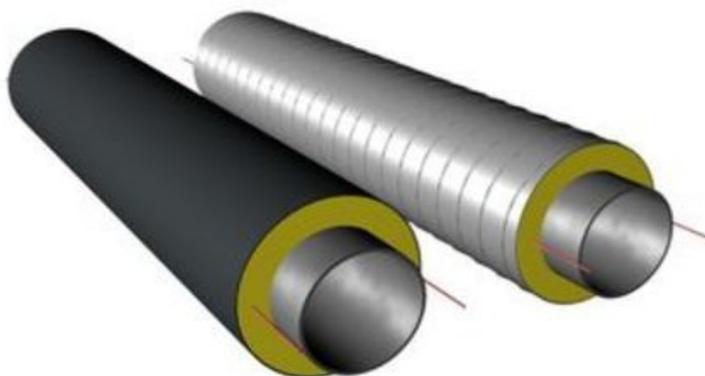


Рис. 1.33. Стальные трубы в ППУ изоляции:  
в полиэтиленовой защитной оболочке для подземной бесканальной прокладки;  
в стальной защитной оболочке для надземной прокладки и подземной прокладки  
в проходных каналах

Указанные теплопроводы укладываются в грунт бесканально. Следует отметить, что радикально проблема надежности и долговечности теплопроводов может быть решена только за счет комплексного подхода, когда все без исключения элементы тепловой сети (прямолинейные участки, углы поворотов, тройники и крестовины, запорная и регулирующая арматура, компенсаторы) изолируются пенополиуретаном и полиэтиленом на заводах, а на трассе строительства выполняется минимум строительномонтажных работ (рис. 1.34 и 1.35).



Рис. 1.34. Стальные отводы в ППУ изоляции в полиэтиленовой и стальной защитной оболочке

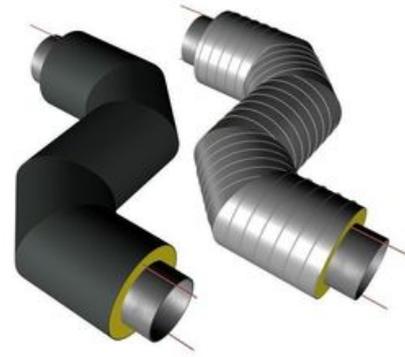


Рис. 1.35. Стальные Z-образные элементы в ППУ изоляции в полиэтиленовой и стальной защитной оболочке

*Помимо централизованных систем в настоящее время в теплообеспечении потребителей получило развитие **децентрализованного теплоснабжения** от локальных источников: автоматизированных котельных и мини-ТЭЦ. Локальные котельные предназначены для теплоснабжения, как правило, одного здания и производятся в контейнерном либо крышном исполнении, могут размещаться в подвалах здания или в пристройке рядом со зданием. При использовании локальных котельных отпадает необходимость сооружения тепловых сетей, за счет чего снижаются тепловые потери, повышается надежность и качество теплоснабжения. Однако при повсеместном использовании децентрализованного теплоснабжения существенно возрастают суммарные капитальные затраты, ухудшается экологическая ситуация в регионе, исчезает возможность использования преимуществ теплофикации.*

*Наиболее правильным является оптимальное сочетание централизованного и децентрализованного теплоснабжения, взаимно дополняющих друг друга, исходя из конкретных условий данного региона.*

## 1.2. Состояние энергетического комплекса Санкт-Петербурга

Санкт-Петербург является мегаполисом с населением 5,28 млн человек, развитым промышленным сектором, крупным портовым городом, научным и культурным центром России – городом мирового значения. Для

обеспечения его жизнедеятельности и дальнейшего развития требуется, в частности, надежное энергоснабжение всей городской инфраструктуры.

Главной целью развития энергетики Санкт-Петербурга на рассматриваемом этапе является *обеспечение надежного и устойчивого энергоснабжения промышленности и городского хозяйства при снижении удельных энергозатрат до уровня технически развитых стран.*

### ***Электроснабжение***

Электроснабжение потребителей Санкт-Петербурга, а также Ленинградской области осуществляется централизованно ПАО «ТГК-1» филиалом «Невский». Всего в составе ПАО «ТГК-1» имеются 3 филиала: «Невский», «Карельский» и «Кольский».

Электростанции, входящие в филиал "Невский":

- Центральная ТЭЦ (ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ЭС-3) (Санкт-Петербург),
- Правобережная ТЭЦ-5 (Санкт-Петербург),
- Василеостровская ТЭЦ-7 (Санкт-Петербург),
- Первомайская ТЭЦ-14 (Санкт-Петербург),
- Автоовская ТЭЦ-15 (Санкт-Петербург),
- Выборгская ТЭЦ-17 (Санкт-Петербург),
- Северная ТЭЦ-21 (Ленинградская область),
- Южная ТЭЦ-22 (Санкт-Петербург),
- Дубровская ТЭЦ-8 (Ленинградская область),
- Каскад Свирских ГЭС (ГЭС-6, ГЭС-9, ГЭС-12) (Ленинградская область),
- Нарвская ГЭС-13 (Ленинградская область),
- Каскад Вуоксинских ГЭС (ГЭС-10, ГЭС-11) (Ленинградская область).

Установленные энергетические мощности и расположение ТЭЦ ПАО «ТГК-1» филиала «Невский» и ведомственных ТЭЦ Санкт-Петербурга представлены в табл. 1.2.

Энергоснабжение города осуществляют 10 ТЭЦ ПАО «ТГК-1», входящих в филиал «Невский», суммарной электрической мощностью около 3 570 МВт, а также ведомственные ТЭЦ суммарной электрической мощностью около 1 600 МВт. Кроме этого в настоящее время идет процесс преобразования котельных в мини-ТЭЦ для выработки электроэнергии на собственные нужды и выдачи избыточной мощности в сеть.

Таблица 1.2

## Установленные электрическая и тепловая мощности ТЭЦ Санкт-Петербурга

Название ТЭЦ	Расположение ТЭЦ	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, Гкал/ч	Новое оборудование
<b>ТЭЦ ПАО «ТГК-1» филиала «Невский»</b>				
ТЭЦ-1	СПб, Обводный канал, 76	100	100	2 ГТУ SGT-800 по 50 МВт и 2 ВКУ по 50 Гкал/ч
ТЭЦ-2	СПб, Новгородская ул., 11	53	1 340	
ЭС-3	СПб, наб. Фонтанки, 104	переведена в режим насосной станции		
Правобережная ТЭЦ-5	СПб, Октябрьская наб., 108	643	1 283	Т-180/210 - 180 МВт и 260 Гкал/ч, ПГУ - 450 МВт и 316 Гкал/ч.
Василеостровская ТЭЦ-7	СПб, В.О., Кожевенная линия, 33	135	1 113	
Первомайская ТЭЦ-14	СПб, Корабельная ул., 4	360	928	2 ПГУ - 180 МВт
Автовская ТЭЦ-15	СПб, ст. Броневая, 6	321	1 849	
Выборгская ТЭЦ-17	СПб, ул. Жукова, 26	250,5	1 056	
Северная ТЭЦ-21	Пос. Ново-Девяткино, Ленинградской области	500	1 188	
Южная ТЭЦ-22	СПб, Рыбацкое, Софийская ул., 96	1 207	2 530	ПГУ-450: 2 ГТЭ-160 и Т-125/150-7,4 (2011 г.)
	<b>ВСЕГО:</b>	<b>3 569,5</b>	<b>11 387</b>	
<b>Ведомственные ТЭЦ</b>				
ТЭЦ-4 ЦКТИ	СПб, Атаманская ул., 3/6	18	364	3 турбины по 6 МВт, 8 парогенераторов и 1 водогрейный котел
ТЭЦ-23 ОАО «Северо-Западная ТЭЦ» (1-я очередь)	СПб, пос. Ольгино, 3-я Конная Лахта, 34	900	700	Первая в России ТЭЦ с ПГ циклом 2 блока ПГУ-450
ТЭЦ-24 ОАО «Юго-Западная ТЭЦ» (2 очереди)	СПб, ул. Доблести, 1	500	470	ПГУ-200 и ПГУ-300
ТЭЦ «Обуховоэнерго» ООО «ГКО»	СПб, пр. Обуховской обороны, 120	24,9	285	2 паровых турбины: 12 МВт и 12,9 МВт
ТЭЦ «Ижорских заводов» ЗАО «УК ГСР-Энерго» (1-я очередь)	СПб, г. Колпино, Финляндская ул. .5	124,3	77	Паровая турбина ПР-20-29/13/0,8 и ПГУ-110
ГТ ТЭЦ Пивоваренная компания «Балтика»	СПб, Парнас, 6-й Верхний пер., 3	7,1	4	
ГУП «ТЭК СПб»	Приморская котельная, Котельная «Парнас»	21		2 ПТ по 3,5 МВт, 4 ПТ по 3,5 МВт
Станция дегазации полигона ТБО "Новоселки"	СПб, пос. Левашово, Новоселки, д. 18, корп. 5	5,6		
	<b>ВСЕГО:</b>	<b>1 600,9</b>	<b>1 900</b>	

Так, в 2007 году была создана мини-ТЭЦ на базе Приморской котельной ГУП «ТЭК СПб» путем установки 2-х турбин ТГ–3,5–АС/10,5–Р12/1,2 суммарной мощностью 7 МВт; в 2013 году завершена реконструкция котельной «Парнас-4» с установкой 4-х паровых турбин, каждая мощностью по 3,5 МВт и дополнительного парового котла. По итогам 2016 года объем потребления электрической энергии по Санкт-Петербургу составил 25 108 млрд кВт·ч.

В настоящее время ликвидирован дефицит электрической и тепловой мощности.

На территории города расположены 5 электрических подстанций напряжением 330 кВ - ПС 330 кВ, 8 - ПС 220 кВ, 80 - ПС 110 кВ, 25 - ПС 35 кВ. Всего на территории Санкт-Петербурга функционирует 10 390 трансформаторных подстанций, протяженность электрических сетей всех классов напряжения составляет 33 141 км.

Основная системообразующая электросеть Санкт-Петербурга имеет вид кольца из высоковольтных линий ВЛ-330 кВ, проходящего по окраинам города от южного берега Финского залива (ПС Западная) через ПС Южная и Восточная до северного берега Финского залива (ПС Северная). От этого кольца электроэнергия передается по воздушным и кабельным линиям через ПС 220, 110 и 35 кВ в городскую питающую сеть напряжением 6-10 кВ. Колпинский район получает электроэнергию через ПС 330 кВ Колпинская. Электроснабжение пригородов Санкт-Петербурга, административно подчиненных городу: Красносельского (южная часть), Курортного, Петродворцового и Пушкинского районов, осуществляется по сетям 110 и 35 кВ города и области. Кронштадт получает электроэнергию по кабельным линиям КЛ-35 кВ, проложенным по дну Финского залива.

Системообразующая сеть Санкт-Петербурга связана с ЛАЭС тремя ВЛ-330 кВ, приходящими на ПС Западная, Южная и Восточная; с Киришской ГРЭС – двумя ВЛ-330 кВ на ПС Восточная; с ПС 750 кВ Ленинградская – четырьмя ВЛ-330 кВ, приходящими на ПС Южная (три) и ПС Восточная через ПС Колпинская (одна). Таким образом, город обеспечивается электроэнергией (кроме внутригородских ТЭЦ) от трех внешних независимых энергоисточников, расположенных с восточной, южной и западной сторон города.

Регион (Санкт-Петербург и Ленинградская область) имеет

электрические связи с Карелией, Новгородской и Тверской областями и Эстонией.

Существующую схему электроснабжения города следует признать достаточно надежной, отвечающей принципам построения схем электроснабжения крупных городов и позволяющей ее дальнейшее развитие без принципиальных изменений. Дальнейшее развитие сетей 35 и 220 кВ признано нецелесообразным.

### *Теплоснабжение*

Производство тепловой энергии в Санкт-Петербурге осуществляют 16 ТЭЦ и 1077 котельных:

- ПАО "ТГК-1" в составе 10 ТЭЦ филиала «Невский» с установленной тепловой мощностью около 11 400 Гкал/ч;
- 6 ведомственных ТЭЦ, в том числе: ТЭЦ ОАО "НПО ЦКТИ", Северо-Западная ТЭЦ, Юго-Западная ТЭЦ, ТЭЦ ООО "ГКО", ГСР ТЭЦ, ГТ ТЭЦ «Пивоваренная компания «Балтика» с установленной тепловой мощностью около 1 900 Гкал/ч;
- ГУП «ГЭК СПб» в составе 278 котельных: в том числе 40 крупных котельных (с установленной мощностью более 50 Гкал/ч), каждая из которых снабжает тепловой энергией целые городские районы или кварталы и малые котельные с присоединенными к ним теплопроводами, в зоне обслуживания которых находятся одно или несколько зданий с установленной тепловой мощностью 9 364 Гкал/ч;
- ООО «Петербургтеплоэнерго» в составе 256 котельных с установленной тепловой мощностью 1 646 Гкал/ч;
- ООО «Теплоэнерго» в составе 23 котельных;
- 520 ведомственных котельных непрофильных теплоснабжающих организаций (164 производственно-отопительных котельных 80 котельных военно-промышленного комплекса и 276 крышных котельных).

Суммарная установленная тепловая мощность источников теплоснабжения Санкт-Петербурга, обеспечивающая балансы покрытия присоединенной тепловой нагрузки, составляет 26 400 Гкал/ч, (из них доля ТЭЦ - 56 %, котельных с различной установленной мощностью - 44 %), при

этом по расчетам энергетиков к 2025 году она возрастет до 31 400 Гкал/ч. Население Санкт-Петербурга является основным и наиболее крупным потребителем тепловой энергии в городе.

Общий объем выработки тепловой энергии в 2016 году составил 43,6 млн Гкал; объем полезного отпуска тепловой энергии потребителям - 38,1 млн Гкал.

Передача тепловой энергии осуществляется посредством 9 344 км тепловых сетей в однотрубном исчислении диаметром от 57 до 1400 мм.

Большая часть применяемых в Санкт-Петербурге систем теплоснабжения – открытые с непосредственным водоразбором из тепловых сетей на нужды горячего водоснабжения.

### *Топливоснабжение*

*Природный газ* потребителям Санкт-Петербурга и пригородных районов поступает из месторождений Республики Коми и северных районов Тюменской области по системе магистральных газопроводов: Уренгой - Надым - Пунга - Ухта - Грязовец - Торжок и далее по газопроводам Грязовец - Санкт-Петербург, Серпухов - Санкт-Петербург, Торжок - Санкт-Петербург (участок газопровода Белоусово - Санкт-Петербург), Ям-Ижора - Кипень - Сланцы, а также Санкт-Петербург - Выборг – Госграница.

Газопроводы, по которым осуществляется газоснабжение региона, имеют следующие диаметры:

<i>Газопровод</i>	<i>Условный диаметр, мм</i>
Серпухов - Санкт-Петербург	720
Белоусово - Санкт-Петербург	1020
Грязовец - Санкт-Петербург:	
1-я нитка	1020
2-я нитка	1220

Рабочее давление в газопроводах 5,4 МПа.

Ресурсоснабжающими организациями, осуществляющими поставку природного газа потребителям Санкт-Петербурга, являются ООО "Газпром межрегионгаз Санкт-Петербург", АО "Самаранефтегаз", ПАО "НОВАТЭК".

Газораспределительными организациями, осуществляющими транспортировку природного газа потребителям Санкт-Петербурга,

являются ООО "ПетербургГаз", АО "Газпром газораспределение Ленинградская область".

Поставщиком *сжиженного газа* для городских потребителей является кустовая база, расположенная в пос. Саперный Колпинского района. Сжиженный газ на кустовую базу поступает с Киришского нефтеперерабатывающего завода в железнодорожных цистернах. Распределение сжиженного газа от кустовой базы потребителям осуществляется автотранспортом: автоцистернами - к емкостным установкам и в баллонах - на групповые и индивидуальные установки.

Основными поставщиками *топочного мазута* в Санкт-Петербург являются АО "Киришинефтеоргсинтез" и заводы по переработке нефти Уфы, Перми, Ярославля, Грозного. Топочный мазут поставляется в Санкт-Петербург по железной дороге в железнодорожных цистернах. Мазутные хозяйства электростанций ОАО "Ленэнерго", расположенных в Санкт-Петербурге, суммарной мощностью около 260 тысяч тонн, находятся в удовлетворительном техническом состоянии, выполнены как в виде металлических резервуаров, так и железобетонных емкостей.

Эксплуатационные подразделения ГУП "ТЭК СПб" имеют мазутные емкости суммарной мощностью 130 тысяч тонн, резервуары металлические.

Промышленные предприятия города имеют мазутные емкости суммарной мощностью около 270 тысяч тонн.

*Уголь* в Санкт-Петербург доставляется железнодорожным транспортом (полувагонами) из Кузнецкого (в основном) и Печорского угольных бассейнов. Основными потребителями угля являются некоторые промышленные и отопительные котельные города.

Потребители, не имеющие собственных железнодорожных путей, обеспечиваются углем автомобильным транспортом со складов ПАО "Гортоп - Санкт-Петербург", которое располагает двумя складами: один - в южной части города с возможностью одновременного хранения 150 тысяч тонн угля, второй - на севере в поселке Белоостров, в двадцати километрах от Санкт-Петербурга, с возможностью размещения после его расширения одновременно 80 тысяч тонн угля. Склады снабжены железнодорожными подъездными путями, повышенными эстакадами для выгрузки угля.

Основным видом котельно-печного топлива в городском балансе является в настоящее время природный газ, доля которого в суммарном

топливопотреблении возросла за последние 20 лет с 75 до 99 %, в то время как доли мазута и угля сократились до 1 %.

Основными потребителями котельно-печного топлива в городе являются предприятия электро- и теплоснабжения, на долю которых приходится 60 % общего топливопотребления, (в том числе ПАО “ТГК-1” филиала «Невский» – 40 %, ГУП “ТЭК СПб” – 20 %); доля топливопотребления промышленности составляет 35 %, доля населения – 5 %.

## 2. История возникновения энергетики

### 2.1. Освоение огня, энергии воды, ветра и пара

Полтора миллиона лет назад человек укротил **огонь**. Это было, пожалуй, самое выдающееся событие в истории человечества: огонь давал свет и тепло, отгонял диких зверей и делал мясо вкуснее. Он был великим волшебником: вел от дикости к цивилизации, от природы к культуре [4].

История развития человечества – это история выживания людей в окружающем мире.

Все достижения культуры, техники и хозяйствования обязаны комплексному использованию огня. Керамическое производство, металлургия, стекловарение, **паровые машины**, химическая промышленность, механический транспорт, наконец, **ядерная энергетика** есть результат применения высоких и сверхвысоких температур, то есть результат использования огня на более высокой, качественно отличной технической основе.

Возникает металлургия на основе меди и медного сплава – бронзы. Начинает развиваться мелкая торговля, транспорт – расширяется круг общения людей, что приводит к интенсивному обмену идеями, знаниями, умениями. Растут и потребности человека и, конечно, в первую очередь энергетические.

И тут разразился *первый в истории человечества энергетический кризис* – обнаружилась катастрофическая нехватка энергии. Орошаемое земледелие требовало строительства сложных сооружений, усложнялась

добыча руд, росли потребности, связанные с войнами, нужно было все больше продукции для обмена.

Использование мускульной силы рабов намного увеличило энергетические возможности общества, позволило сделать шаг вперед: совершенствуются ремесла, начинает развиваться техника, появился гончарный круг, примитивный ткацкий станок. Переворот в строительной технике совершило изобретение блока, египтяне изобрели шадуф – древнейшее водоподъемное сооружение, собственно говоря, просто ведро на конце рычага. Жители Вавилона стали широко использовать для освещения жилищ светильники, заполненные нефтью (вавилонское название «нафту»).

Рождается и стремительно развивается наука благодаря величайшим умам человечества – Аристотелю, **Архимеду**, Филону и многим другим великим ученым.

Рабский труд подневолен, а потому раб нерадив, ленив, Рабовладельческое хозяйство приходит в упадок. Рабство как источник энергии изживает себя. Человек начинает искать новые источники энергии: **воду и ветер**. Было изобретено **водяное колесо** и **парус**.

Строились плотины и водохранилища в Египте, Месопотамии, Индии, Китае и в других странах за 4000–3500 лет до н.э.

Древнейшей в мире считается плотина Кошиш (Kosheish) высотой 15 м, построенная в Египте при фараоне Менесе (примерно 3000 лет до н.э.).

Используя водяное колесо, энергию потока воды направляли, в первую очередь, для полива полей, далее для привода ткацких, токарных станков, мельниц и т. д.

В период XVII–XVIII вв. все возрастающую потребность развивающейся промышленности в энергии могло обеспечить только водяное колесо. Водяные двигатели становились все более мощными и более совершенными, их КПД достигал 60–70 %.

Однако не все производства можно было разместить у реки, при эксплуатации водяных колес возникали трудности, связанные с изменчивостью стока реки в течение года, особенно при использовании водяного колеса на северных реках зимой.

Изобретение парового двигателя и его триумфальное шествие с конца XVIII в. существенно снизило использование водяных колес в производстве XIX в. *Возрождение водяного колеса на новой основе в виде*

*гидравлической турбины произошло в XX в., когда наступила эпоха электроэнергетики, и водяную мельницу заменила ГЭС.*

**Герон Александрийский** – автор многочисленных трактатов, дошедших до нас, в одном из них описывает изобретенный им знаменитый «эолипил» – шар, вращающийся под действием пара, вытекающего из двух изогнутых трубок (рис. 2.1). Многие ученые считают «эолипил» прототипом современной паровой турбины [3].



Рис. 2.1. Герон Александрийский (10 – 70 н.э.) – греческий математик и механик, изобретатель, автор многочисленных трактатов

**Герона** относят к величайшим инженерам за всю историю человечества. Он первым изобрёл автоматические двери, автоматический театр кукол, автомат для продаж, скорострельный самозаряжающийся арбалет, паровую турбину, автоматические декорации, прибор для измерения протяжённости дорог (древний одометр) и др.

**Эолипил** – самый древний паровой двигатель. Это сфера, способная вращаться вокруг своей оси. Двигалась сфера благодаря пару, выбрасываемому под давлением из пары сопел, направленных в противоположные стороны, в результате чего образовывался крутящий момент, который и заставлял сферу крутиться вокруг своей оси (рис. 2.2).

Пар генерировался кипячением воды либо внутри сферы или под ней. Если котел находится под сферой, то он подключается к ней с помощью пары труб, которые одновременно служат для нее осями. Воспроизведенная современная копия парового двигателя Герона способна разгоняться до 1500 об/мин при относительно низком давлении пара 0,1 бар.

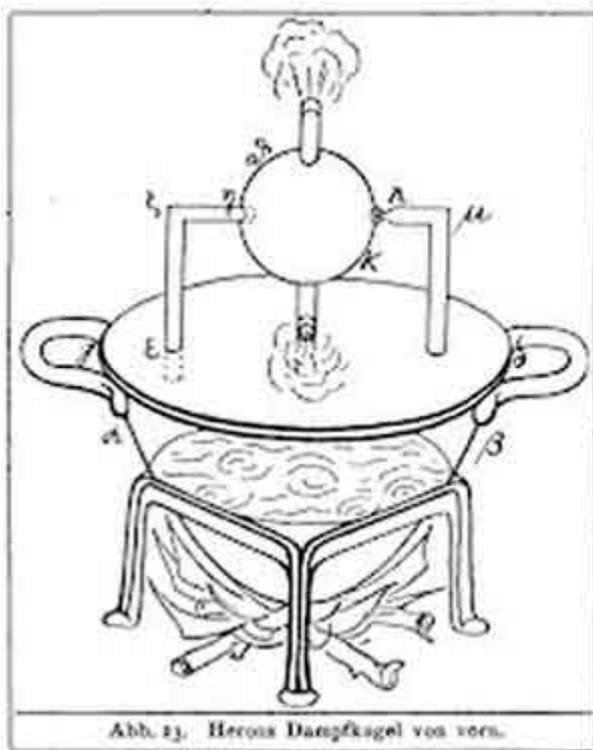


Рис. 2.2. Эолипил Герона Александрийского

## 2.2. Первые шаги человечества. Паровые машины

Впервые в 1690 г. идею паровой машины (рис. 2.3) изложил **Дени Папен**.

В вертикальный цилиндр *1* под поршень *3* заливалась вода; поршень опускался до соприкосновения с ее поверхностью; воздух из под поршня отводился через специальный кран *2*; под цилиндром разводился огонь, часть воды испарялась, пар поднимал поршень до определенной высоты, на которой он фиксировался чекой *4*; огонь убирали, цилиндр охлаждали водой, пар, в нем конденсируясь, создавал разрежение под поршнем; освобожденный от фиксатора *4* поршень под действием атмосферного давления опускался вниз; движение поршня через систему передач приводило в движение желаемый механизм или поднимало груз *5*. В паровой машине Папена цилиндр был и котлом, и исполнительным механизмом.

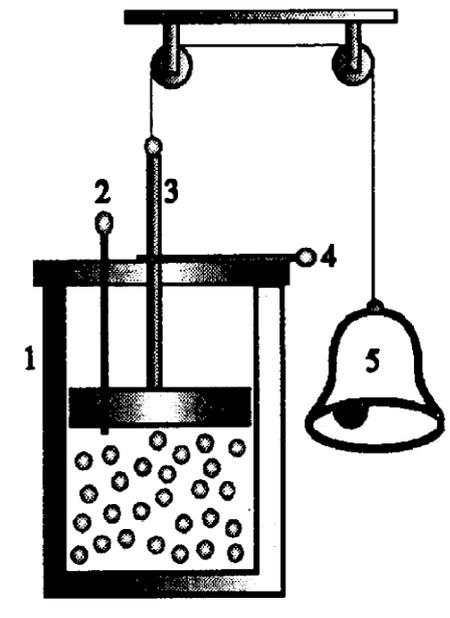


Рис. 2.3. Схема паровой машины Д. Папена

**Дени Папен** — известный французский ученый, физик, механик, талантливый изобретатель, намного опередивший свое время, внесший важную лепту в развитие технического прогресса (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Дени Папен (1647 – 1712) – известный французский ученый, физик, механик, талантливый изобретатель

В 1690 году он изобретает паровой двигатель, полностью описывает его замкнутый термодинамический цикл. Свой паровой двигатель ученый предлагал установить на самоходной повозке, на речном самоходном судне. Воплотить идею парового двигателя ему не удалось.

Ученым разработаны конструкции печи для плавки стекла, доменной печи, идея длительного хранения продуктов с использованием вакуума, оригинальные идеи подводной лодки, баллисты или пушки, способной метать заряды на большие расстояния.

В 1704 году на заводе «Veskeithagen» Папен отлил первый в мире цилиндр для паровой машины и в том же году построил катер на паровой тяге.

Идею паровой машины Папена усовершенствовал и реализовал английский инженер **Томас Севери**. В его машине, котел уже отделен от исполнительного механизма. Пар конденсируется в результате охлаждения холодной водой извне.

Машина Севери – это паровой насос, а не двигатель: в нем не было цилиндра с поршнем, который при своем перемещении приводил бы что-то в движение. Самое важное в этом устройстве было то, что пар, необходимый для работы насоса, приготавливался в отдельном котле.

Машина Севери была пригодна только для одной цели – подъема воды. Она потребляла огромное количество топлива, имела КПД около **0,3 %**. Но машина очень была нужна для откачки воды из шахт, поэтому на расход топлива и на низкий КПД не обращали внимания.

**Томас Севери** родился в 1650 году в деревне Шилстон, Великобритания (рис. 2.5).

Томас Севери являлся членом Королевского общества (английской академии наук). Он был первым инженером, использовавшим термин *«лошадиная сила»*.

В 1698 году Севери запатентовал первый паровой двигатель, предназначенный для подъема воды из шахт. Двигатель Севери работал по принципу засасывания воды за счет атмосферного давления в камеру, где создавалось разрежение при конденсации пара холодной водой.

Машина Т. Севери была усовершенствована англичанами **Томасом Ньюкоменом** и Джоном Калли. Они, по сути, объединили идеи Д. Папена и Т. Севери, предложив конденсировать водяной пар в вытеснительном баке путем впрыскивания холодной воды в бак.

Машина Т. Ньюкомена получила широкое распространение и, конечно,

в первую очередь в Англии. В 1770 году только на оловянных рудниках работало 70 машин.

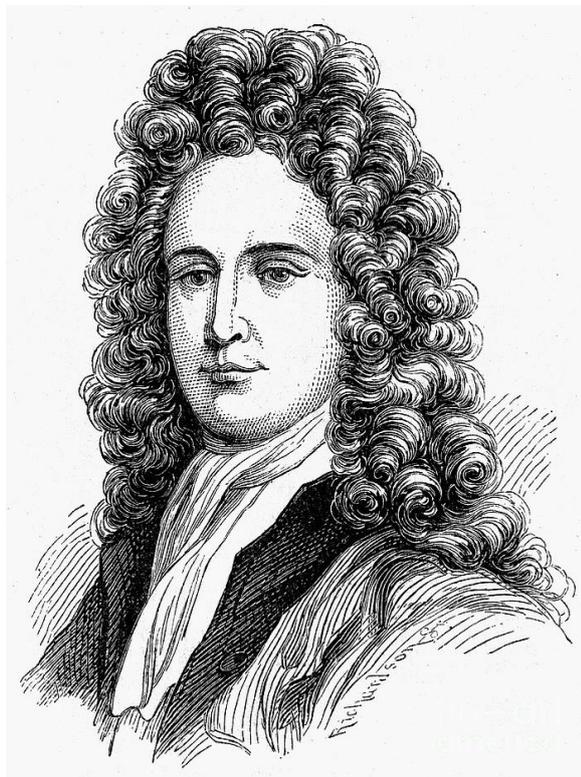


Рис. 2.5. Томас Севери (1650 – 1715) – английский механик, изобретатель, один из создателей первого парового двигателя

**Томас Ньюкомен** родился 28 февраля 1663 года в Дартмуте, Великобритания (рис. 2.6). В юности работал кузнецом и механиком.

В 1705 году совместно с Джоном Колли построили первую паровую (пароатмосферную) машину, отличающуюся от машины Севери наличием цилиндра с поршнем и тем, что конденсация пара производилась обливанием цилиндра снаружи водой. В 1711 году Ньюкомен изменил технологию конденсации пара с внешнего обливания цилиндра водой на впрыскивание воды внутрь цилиндра, что значительно ускорило ход машины, но машина всё ещё оставалась вакуумной, то есть рабочий ход совершался не высоким давлением пара, а низким давлением вакуума, образующегося после впрыска холодной воды в цилиндр с горячим водяным паром.

Заслуга Ньюкомена в том, что он одним из первых осуществил замысел использования пара для получения механической работы.

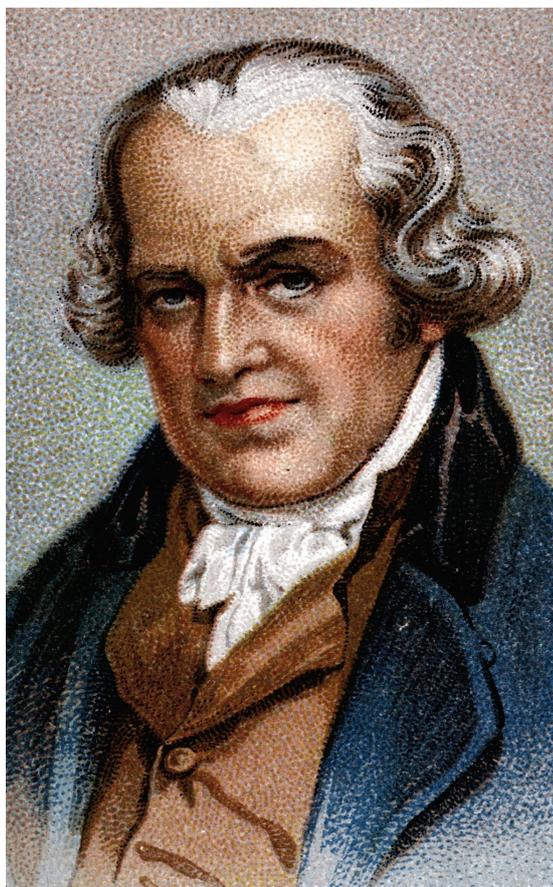


Рис. 2.6. Томас Ньюкомен (1663 – 1729) – английский изобретатель; один из создателей первого парового двигателя, известного как паровая машина Ньюкомена

Первым по пути создания двухцилиндрового парового двигателя пошел русский изобретатель **Иван Иванович Ползунов**

**Иван Ползунов** (рис. 2.7) родился 14 марта 1728 года в Екатеринбурге в семье солдата государственных строительных работ Ивана Алексеевича Ползунова.

Ползунов доработал идею парового двигателя Ньюкомена. Машина Ползунова имела два цилиндра, которые функционировали по очереди, за счёт чего работа двигателя была плавной, непрерывной и обладала мощностью в 32 л.с. Это был гигантский прорыв по меркам Европы. К сожалению, после недолгой работы паровая машина была разобрана.

Сегодня имя И. И. Ползунова носит Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский котлотурбинный институт в Санкт-Петербурге, Алтайский государственный технический университет, рядом с ним установлен памятник выдающемуся изобретателю.



Рис. 2.7. И.И. Ползунов (1728 – 1766) – русский изобретатель, создатель первой в России паровой машины и первого в мире двухцилиндрового парового двигателя

Иначе было в Англии. В 1765 году **Джеймс Уатт** предложил конденсировать отработанный пар не в цилиндре машины, а вне ее, в конденсаторе. Это было великое, по тем временам, открытие.

Дж. Уатт строит последовательно одну за другой несколько машин, постепенно совершенствуя их. Машина, получившая название «Вельзевул», была построена быстро и заработала уже в 1777 году. Результаты испытаний были превосходными. Машина потребляла топлива в два раза меньше, чем машина Ньюкомена.

**Джеймс Уатт (Ватт)** – шотландский инженер-изобретатель, механик, создатель универсального парового двигателя (рис. 2.8). Родился 19 января 1736 года в г. Гриннок на юго-западе Шотландии.

В процессе работы над конструкцией паровой машины Джеймс Уатт исследует свойства водяного пара, в частности зависимость температуры насыщенного пара от давления. Он проводит ряд опытов над кипением воды, изучает упругость водяных паров при различных температурах.

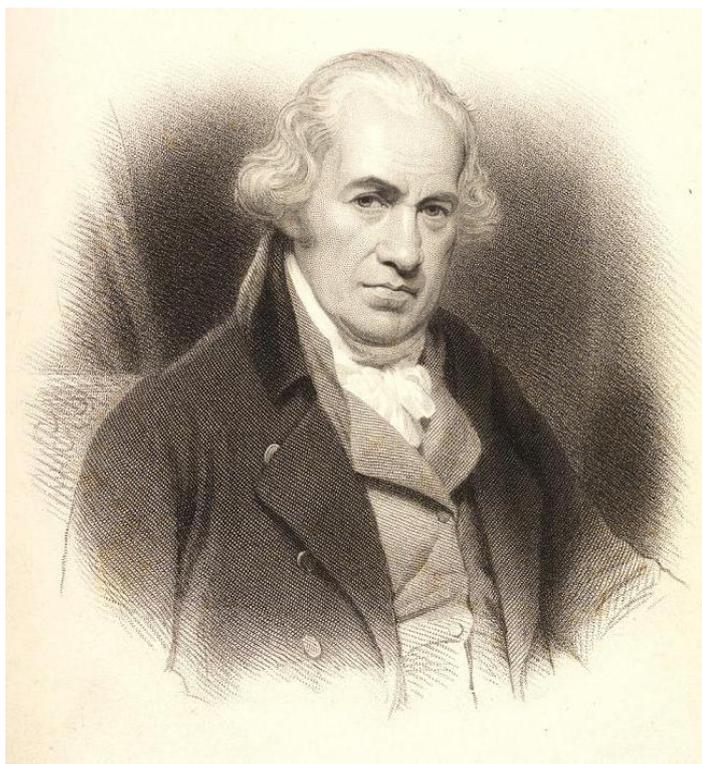


Рис. 2.8. Джеймс Уатт (1736 – 1819) – шотландский инженер-изобретатель, создатель универсального парового двигателя

Теоретические и опытные изыскания приводят его к пониманию важности скрытой теплоты парообразования. Он устанавливает, что вода, превращённая в пар, может нагреть до кипения в шесть раз большее количество воды. Уатт приходит к выводу, что для улучшения паровой машины необходимо, чтобы цилиндр был всегда так же горяч, как и входящий в него пар.

Основная сложность заключалась в том, чтобы заставить работать поршень и цилиндр. Обработка металлов того времени не обеспечивала нужную точность изготовления.

Проблема изготовления цилиндра большого диаметра и соответствующего поршня с необходимой точностью была решена Джоном Уилкинсоном, который разработал соответствующую технологию.

В 1774 году Уатт построил первую свою паровую машину простого действия, которая оказалась более чем в 2 раза эффективнее лучших машин Ньюкомена.

Машина Ньюкомена была, прежде всего, машиной водоподъемной и применялась главным образом в горном деле. Между тем и для других отраслей быстроразвивающейся промышленности требовался механический двигатель.

Детальное изучение паровой машины Ньюкомена привело Уатта к введению в неё многих усовершенствований. Он изобрёл конденсатор – третий основной элемент тепловой машины (1765), центробежный регулятор ввода пара, золотник, паровую рубашку вокруг цилиндра, изобрёл и применил принцип «двойного действия», преобразовал качательное движение балансира в непрерывное вращение вала, т.е. создал механизм передачи движения от поршня к балансиру (параллелограмм Уатта), выдвинул идею применения расширения пара в цилиндре (1782).

В 1782 году Уатт получил английский патент на универсальный паровой двигатель «двойного действия» с непрерывным вращением (*паровая машина Уатта*), экономичный и эффективный, получивший широкое распространение и сыгравший большую роль в переходе к машинному производству.

Среди новшеств, внесённых в неё, были следующие (рис. 2.9):

- **цилиндр двойного действия**, в котором пар подавался попеременно по разные стороны от поршня, при этом отработанный пар поступал в конденсатор;
- **жаровая рубашка**, окружавшая рабочий цилиндр для снижения тепловых потерь, **и золотник**;
- преобразование возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение вала сначала посредством **шатунно-кривошипного механизма**;
- **центробежный регулятор** для поддержания постоянства числа оборотов вала и **маховик** для уменьшения неравномерности вращения.

В 1782 году эта первая универсальная паровая машина «двойного действия» была построена. Крышку цилиндра Уатт оснастил изобретенным незадолго до того сальником, который обеспечивал свободное движение штока поршня, но предотвращал утечку пара из цилиндра. Пар поступал в цилиндр попеременно, то с одной стороны поршня, то с другой, создавая вакуум с противоположной стороны цилиндра. Поэтому поршень совершал и рабочий и обратный ход с помощью пара, чего не было в прежних машинах.

Двигатель Дж. Уатта годился для любой машины. Так паровая машина пришла на транспорт (пароход Фултона, 1807; паровоз Стефенсона, 1814). Благодаря преимуществу в средствах передвижения, Англия стала ведущей державой мира.

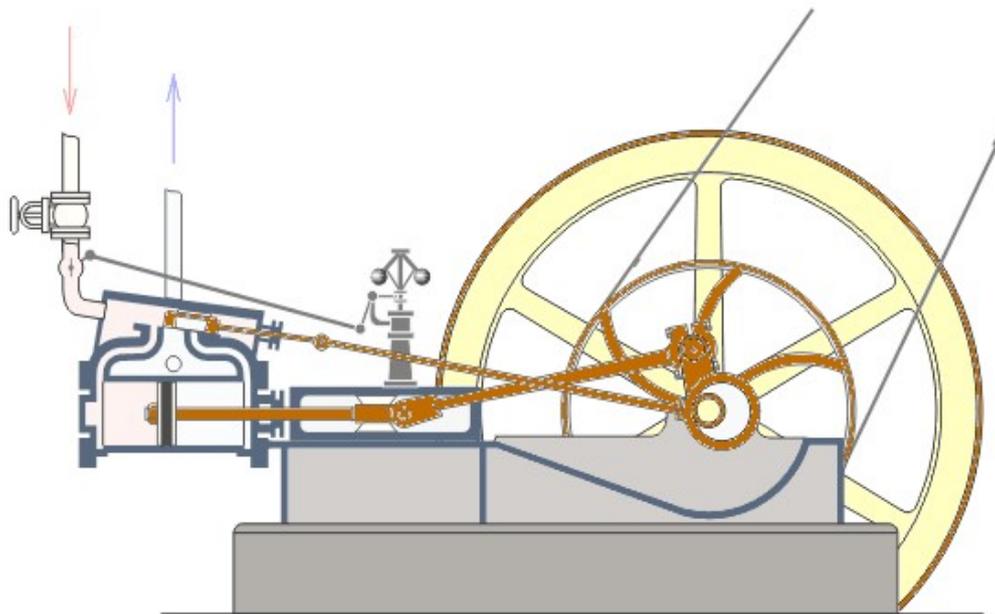


Рис. 2.9. Запатентованный двигатель Дж. Уатта (1781 г.)

Уатт ввёл первую единицу мощности – лошадиную силу (позднее его именем была названа другая единица мощности – **ватт**).

Это был первый в истории техники случай присвоения собственного имени единице измерения. С этого случая и началась традиция присвоения собственных имен единицам измерения.

Уатт сконструировал также ряд приборов: ртутный открытый манометр, ртутный вакуумметр в конденсаторе, водомерное стекло в котлах, индикатор давления. Изобрел копировальные чернила (1780), установил состав воды (1781).

Тысячи фабрик, заводов, судов нуждались в паровой машине.  
***Произошел великий промышленный переворот.***

Совершенствование паровой машины продолжалось.

В 1804 году **Оливер Эванс** (США) получил патент на паровую машину, работающую на паре высокого давления (около 3,5 бар). Машина обладала большей мощностью и меньшими габаритами, меньшим весом. Ее можно было ставить на транспортную машину.

**Оливер Эванс** (13 сентября 1755 г. – 15 апреля 1819 г.) американский изобретатель, инженер и бизнесмен родился в Ньюпорте штат Делавер (рис. 2.10).

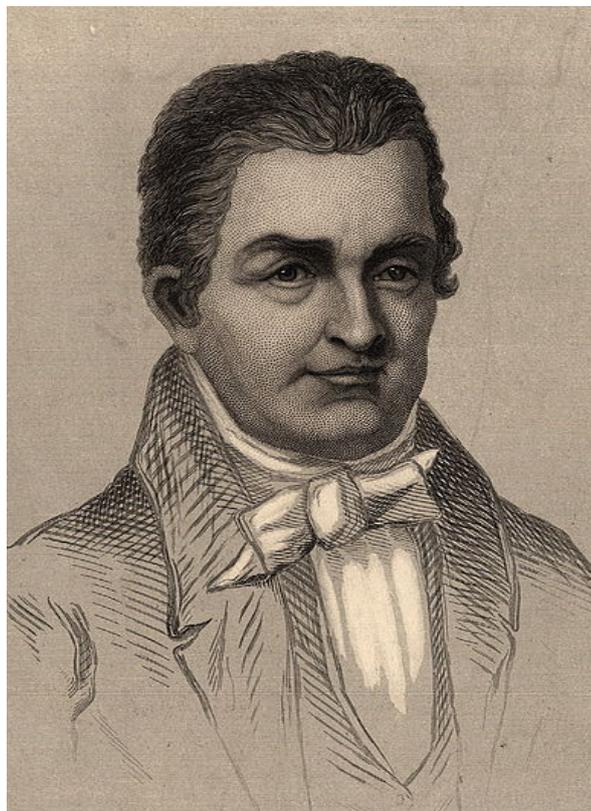


Рис. 2.10. Оливер Эванс (1755 – 1819) – американский изобретатель, инженер и бизнесмен

Оливер Эванс оставил после себя длинный ряд достижений, в первую очередь проект и построенную первую полностью автоматизированную линию производственного процесса, первый паровой двигатель высокого давления, первый американский автомобиль-амфибию (рис. 2.11).

Он создал паровую землечерпательную машину, работавшую при помощи колеса с лопатками. В лодке, стоявшей на колесах, помещалась паровая машина очень высокого по тем временам — до десяти атмосфер — давления пара. Машина приводила в движение землечерпательное колесо. По воде судно двигалось той же машиной. При помощи канатов с этой машиной соединялись и сухопутные колеса, так что землечерпалка самостоятельно двигалась и по воде и по суше. Ввиду этого она и была названа изобретателем «Амфибией».

Рис. 2.11. Первый американский автомобиль-амфибия О. Эванса

Свой автомобиль Эванс оснастил 5-сильным паровым двигателем, который приводил в движение два из четырех колес, установленных в нижней части корпуса, выполненного в форме лодки, а также гребное колесо, смонтированное на корме.

В течение десяти лет завод Эванса выпустил около 50 паровых машин высокого давления, большая часть которых использовалась для привода насосных установок.

**Ричард Тревитик** (13 апреля 1771 г. – 22 апреля 1833 г.) британский изобретатель и горный инженер из Корнуолла, Англия (рис. 2.12) вошёл в историю как модернизатор парового двигателя и паровоза.

Работы ученого позволили усовершенствовать двигатель внутреннего сгорания до того состояния, в котором его привыкли видеть сейчас. Тревитик не был единственным изобретателем, совершенствовавшим паровой двигатель, но его имя в истории техники занимает одно из ведущих мест.



Рис. 2.12. Ричард Тревитик (1771 – 1833) – британский изобретатель, модернизатор парового двигателя, двигателя внутреннего сгорания, изобретатель паровоза

Р. Тревитик строил модели паровых повозок, а в 1801 году начал строить оригиналы повозок, последняя из которых прошла успешные испытания (рис. 2.13).

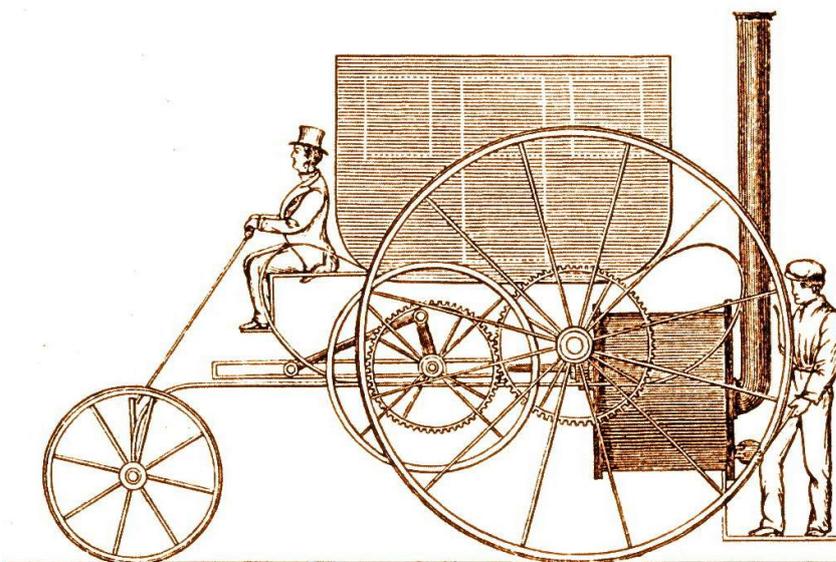


Рис. 2.13. Паровой дилижанс Р. Тревитика

В 1801 году построил первый в истории паровоз «Puffing Devil», затем в 1802 году паровоз «Coalbrookdale». В это же время он создал дорожный паровой экипаж. В 1804 году он при помощи Дж. Стила построил узкоколейный паровоз Пенидаррен («Pen-y-Darren») для железной дороги в южном Уэльсе. В этом локомотиве применен цилиндр высокого давления без конденсатора, с использованием отработанного пара для увеличения тяги в топке, тем самым ещё больше повышая эффективность механизма. Эти усовершенствования паровой машины остались неизменны до конца использования паровозов (рис. 2.14).



Рис. 2.14. Паровоз «Pen-y-Darren»

«Pen-y-Darren» – первый в мире запатентованный паровоз. Часто годом его постройки указывается **1804 год**, когда на данный паровоз был получен патент. Этот же год считается годом рождения паровозов вообще.

В 1808 году Ричард Тревитик построил паровоз более совершенной конструкции, развивавший скорость до 30 км/ч. Но, не получив поддержки от крупных финансистов, Тревитик в 1811 году разорился.

**В 1814 году Джордж Стефенсон** спроектировал локомотив для буксировки вагонеток с углём для рудничной рельсовой дороги. Этот паровоз двигался не больше 1 км/ч.

**Джордж Стефенсон** (9 июня 1781 г. Уилэм, графство Нортамберленд – 12 августа 1848 г., Честерфилд, графство Дербишир) – английский изобретатель, инженер-механик (рис. 2.15).

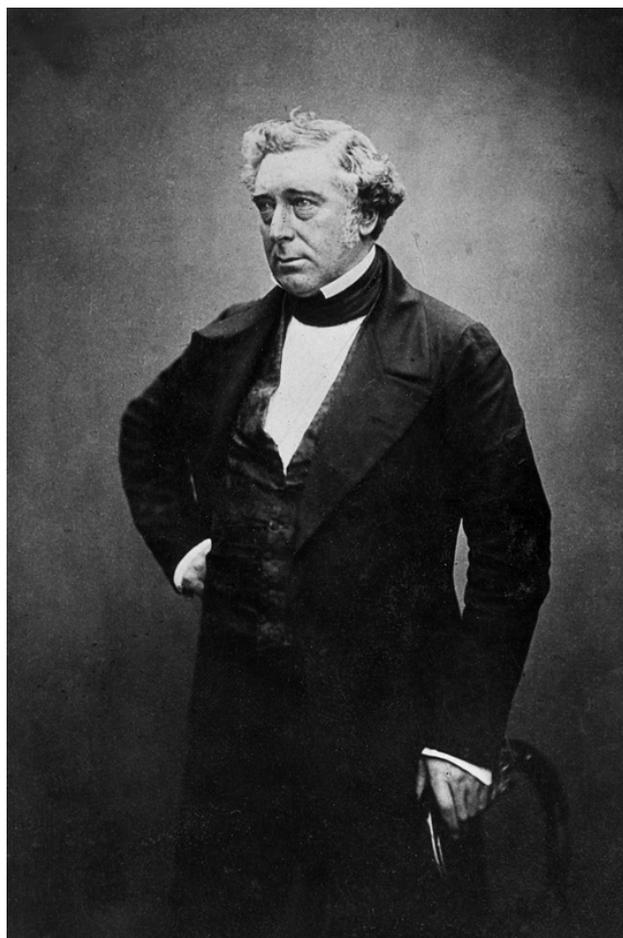


Рис. 2.15. Джордж Стефенсон (1781 – 1848) – английский изобретатель, инженер-механик

Всемирную известность Стефенсон приобрел благодаря изобретенному им паровозу. Он считается одним из «отцов» железных дорог, а выбранная им ширина колеи рельсового пути (1435 мм), так называемая «Стефенсоновская» или «нормальная колея», стала самой распространённой в Западной Европе и до сих пор является стандартом на железных дорогах многих стран мира (в России 1520 мм).

Стефенсон предложил употреблять стальные рельсы (вместо чугунных), а подушки делать деревянными, которые превратились в шпалы.

К 1825 году Стефенсон построил 16 паровозов.

В 1829 году его паровоз «Ракета» (рис. 2.16) выиграл конкурс, вошедший в историю, как «Рэйнхильские испытания».

Паровоз Стефенсона оказался единственным, успешно завершившим все испытания. Он показал среднюю скорость 12 миль в час (19 км/ч) с грузом 13 тонн. При этом максимальная скорость достигала 30 миль в час (48 км/ч). Блистательная победа стефенсоновской «Ракеты» сделала ее, пожалуй, самым знаменитым механизмом в истории техники.

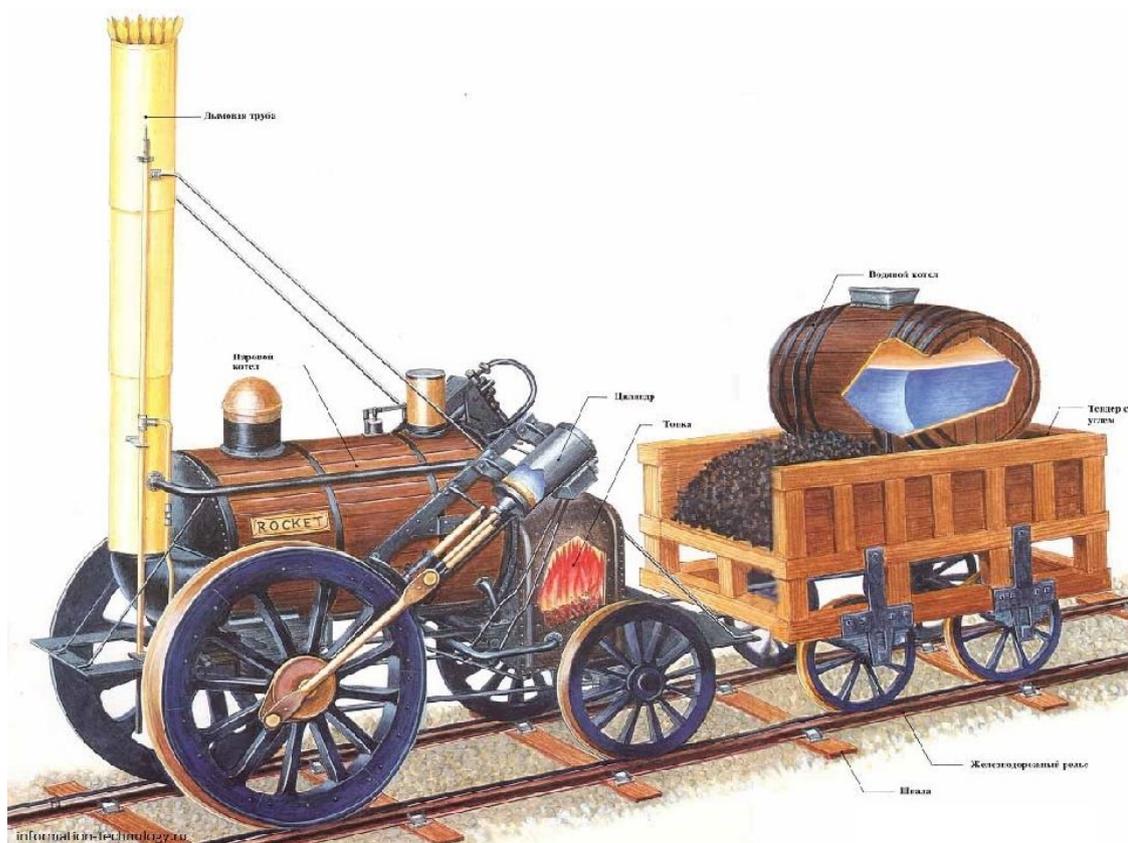


Рис. 2.16. Паровоз Джорджа Стефенсона «Ракета»

Паровоз Стефенсона явился настоящим чудом. Он мог вести состав общим весом до 30 тонн.

Стефенсон использовал гладкие рельсы, в противовес бытующему мнению, что на гладких рельсах недостаточно трения и колеса будут проворачиваться.

Это был первый в мире удачный опыт постройки локомотива, использующего для создания тягового усилия силу трения между гладкими колёсами с ребрами и гладкими металлическими рельсами.

Первые паровозы России были построены Ефимом и Мироном отцом и сыном **Черепановыми**. Первый паровоз был построен в 1833 году, второй – в 1835 году (рис. 2.17). Железнодорожный путь, по которому ходили паровозы, имел ширину колеи 1645 мм.



Рис. 2.17. Создатели первых в России паровозов Ефим (1774 – 1842) и Мирон (1803 – 1849) Черепановы

Наибольший интерес Черепановы проявили при внедрении паровых машин в промышленное производство. Начиная с 1820 года, Черепановы построили около 20 паровых машин мощностью от 2 до 60 л.с.

В 1836 году под их руководством построили чугунную дорогу от Медного рудника до Выйского завода для подвоза руды протяжённостью в 3 км.

В качестве топлива в паровозах Черепановых использовались дрова. «Сухопутный пароход» потреблял их в таком количестве, что очень скоро встала проблема с подвозом. За годы эксплуатации весь лес в окрестностях железной дороги был вырублен, и дрова приходилось доставлять издалека на той же конной тяге. Это негативно повлияло на судьбу паровоза в отличие от паровозов главного инженера угольных копей Дж. Стефенсона.

**В 1807 году Роберт Фултон** строит пароход «Клермонт», на котором два гребных колеса приводятся в движение паровой машиной Джимса Уатта мощностью 18 л. с. (рис. 2.18).



Рис. 2.18. «Пароход Северной реки Клермонт» Роберта Фултона

**Роберт Фултон** (14 ноября 1765 г., Литтл-Бритн – 24 февраля 1815 г., Нью-Йорк) родился на ферме в штате Пенсильвания (рис. 2.19).

Уже в 12 лет он изучал паровой двигатель.

В 1795 году появляются первые проекты парохода Фултона, а через два года во Франции он представил экспериментальную модель торпеды.

Несколько лет он занимается конструированием подводной лодки и в 1800 году показывает готовую модель «Наутилус» (рис. 2.20) Наполеону Бонапарту.

Корпус подлодки изготовили из дерева и обшили медными пластинами. В надводном положении у нее раскрывался парус, под водой винт приводили в движение два члена экипажа. При первом испытании в гавани Гавра подводная лодка Фултона проплыла 460 метров на глубине 7,6 метра. Всего построили три лодки, но в военных действиях они участия не принимали, а сам Р. Фултон переключился на строительство пароходов.



Рис. 2.19. Роберт Фултон (1765 – 1815) американский инженер и изобретатель, создатель одного из первых пароходов и проекта одной из первых подводных лодок

Первое надводное судно с паровым двигателем Фултон испытал в 1803 году на реке Сене. Катер длиной 20 метров развил скорость против течения в 3 узла.

В 1812 году Р. Фултон построил для ВМФ Соединенных Штатов первый в мире паровой военный корабль «Demologos». Окончательно его достроили уже после смерти изобретателя и переименовали в его честь.

В России получил от императора Александра I монопольное право на постройку и эксплуатацию паровых судов на линии Санкт-Петербург – Кронштадт и на реках России, которую так и не осуществил.

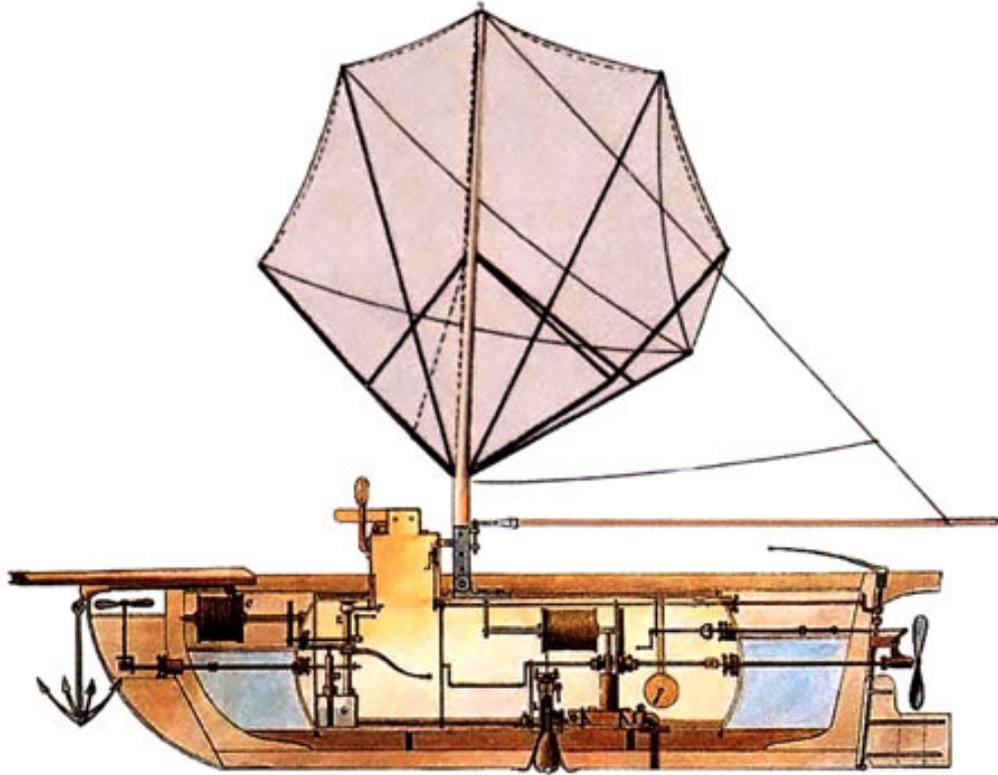


Рис. 2.20. Деревянная подводная лодка «Наутилус» Роберта Фултона

Его Величество **водяной пар** становится удобным и выгодным источником энергии в промышленности и на транспорте.

Совершенствование паровых машин непрерывно продолжалось до 2-й половины XX века. Росла мощность машин за счет увеличения давления и температуры перегрева пара, повышалась их надежность, уменьшались габаритные размеры машин. Наиболее полное развитие паровые машины получили в паровозостроении. КПД этих машин достигал значения **15...18 %**, мощность 250...300 л.с. (КПД паровой машины Т. Севери составлял **0,3 %**).

В Советском Союзе решением правительства производство паровозов и паровых машин было прекращено. Паровые машины повсеместно были заменены двигателями внутреннего сгорания с КПД **32...34 %** и электродвигателями.

В теплоэнергетике в качестве резервного двигателя для привода питательных насосов котельных установок продолжается выпуск паровых машин небольшой мощности до настоящего времени.

## Значение паровых машин

**Паровые машины** использовались как приводной двигатель в насосных станциях, локомотивах, на паровых судах, тягачах, паровых автомобилях и других транспортных средствах. Паровые машины способствовали широкому распространению коммерческого использования машин на предприятиях и явились энергетической основой промышленной революции XVIII века.

Позднее паровые машины были вытеснены двигателями внутреннего сгорания, паровыми турбинами, электромоторами и атомными реакторами, КПД которых выше.

**Паровые турбины**, формально являющиеся разновидностью паровых машин, до сих пор широко используются в качестве приводов генераторов электроэнергии. Примерно 75 % электроэнергии, производимой в мире, вырабатывается с использованием паровых турбин.

# 3. Становление и развитие энергетики

## 3.1. Появление теплотехнических наук

Итак, промышленность получила универсальный тепловой двигатель – паровую машину (рис. 3.1).

Достоинства паровой машины были оценены мгновенно. Она стала главным двигателем, применяемым в промышленности и на транспорте. Машину устанавливали на фабриках, заводах, отказываясь от тихоходного, малопроизводительного водяного колеса.

Предприятиям нужно было высокоскоростное, большей производительности технологическое оборудование. Строились новые машиностроительные заводы, требуя от металлургии иных металлов и материалов, новых марок стали, увеличения объемов выпуска продукции.

Машины использовали на паровозах. Интенсивно строились железные дороги, нужны были рельсы, паровозы, подвижной состав, станционное оборудование. И в этой отрасли росли новые машиностроительные предприятия, продукция которых пользовалась большим спросом у строителей железных дорог.

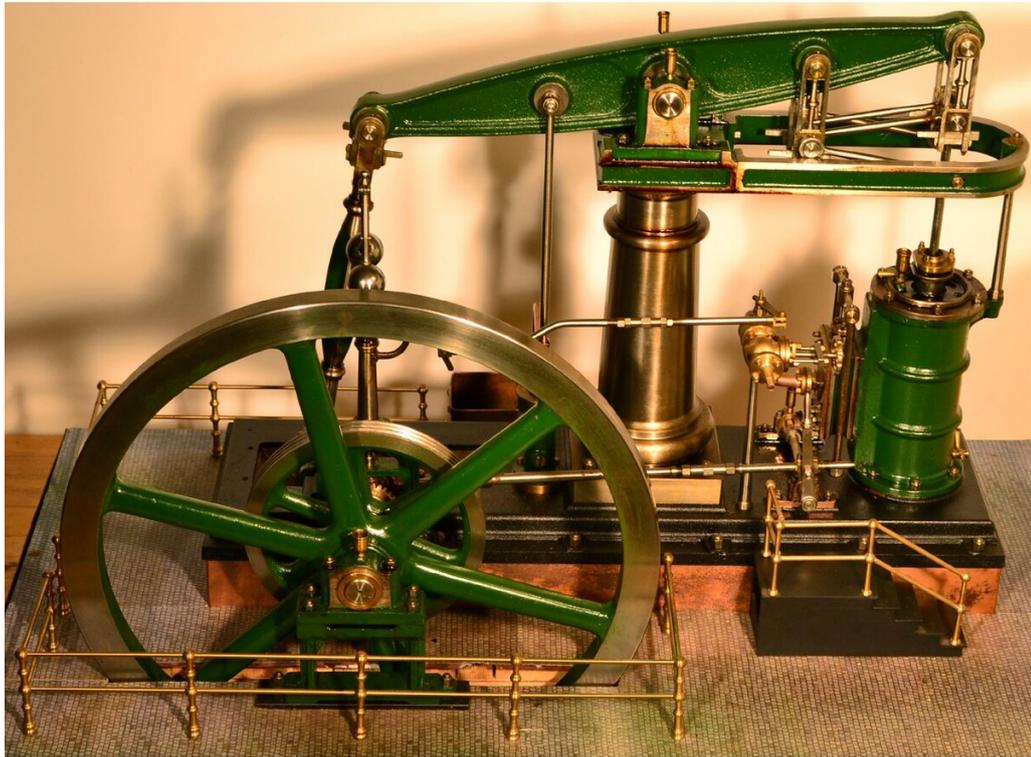


Рис. 3.1. Паровая машина двойного действия Джеймса Уатта

Паровые машины устанавливали на судах речного и морского флота, гражданских и военных. Старый парусный деревянный флот отмирал. На смену пришли стальные торговые корабли, мощные бронированные военные суда.

Паровая машина совершила поистине техническую революцию в промышленности.

К середине XIX века практически повсюду на смену естественным источникам энергии – воде и ветру – пришел **водяной пар**. На заводах и фабриках пар приводил в движение станки, при помощи пара поднимали груз, с его помощью двигались паровозы и пароходы. И повсюду требовались паровые машины, еще более мощные и совершенные.

В России судовые паровые машины строились на Ижорском заводе, машины для речных судов – на Пожевском заводе (с 1817 г.), на Мальцевских заводах, а позднее – на Сормовском.

Изобретатели паровых машин, паровозов, пароходов, в большинстве своем, были самоучки, практики. Они пользовались некоторыми эмпирическими закономерностями, но какой-либо теории расчета паровой машины попросту не существовало. Более того, в те времена не были, по существу,

известны даже свойства водяного пара.

*Интересное состояние проблемы – паровые машины работают, а теории, объясняющей их работу, нет.*

Лишь к началу XVII века отдельные ученые стали понимать, что пар – это не воздух, а особое состояние воды. Начинаются планомерные исследования по определению свойств пара. Это работы Циглера, Бетанкура, Соутерна и др.

Дальше своих предшественников пошел, профессор **Джозеф Блэк**. Он ввел понятие о *скрытой теплоте плавления и испарения*, пришел к заключению, что на испарение воды должна затрачиваться теплота и определил, что на испарение некоторого количества воды нужно затратить в четыре раза больше теплоты, чем для ее нагрева от точки замерзания до точки кипения.

**Джозеф Блэк** (16 апреля 1728 г., Бордо, Франция – 6 декабря 1799 г., Эдинбург) – шотландский химик и физик (рис. 3.2).

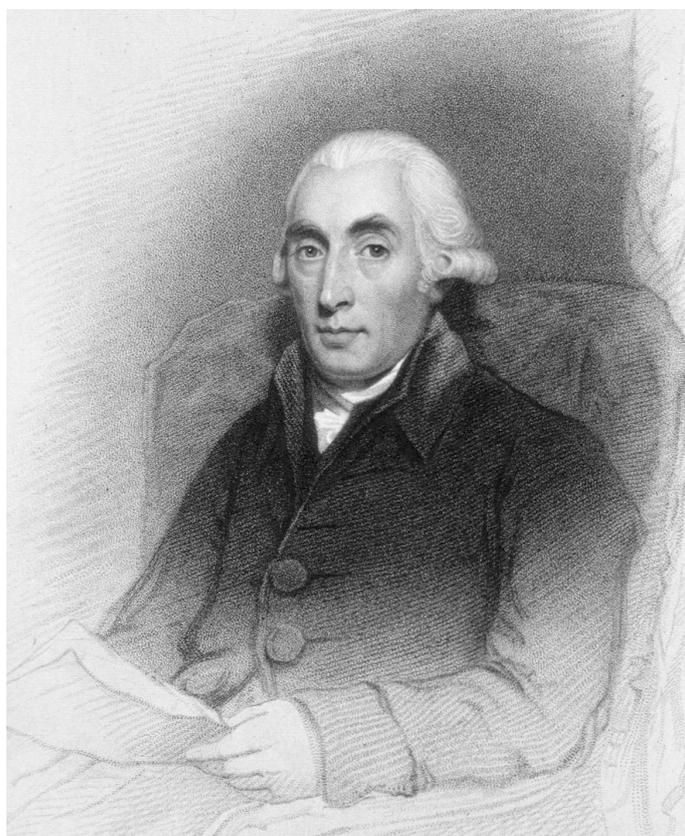


Рис. 3.2. Джозеф Блэк (1728 – 1799) — шотландский химик и физик

В 1757 году Блэк открыл теплоты плавления и парообразования. На основании ряда опытов Блэк пришел к выводу, что таяние льда связано с поглощением большого количества теплоты, которая берётся из запасов тепла смеси. Эту теплоту Блэк назвал *«скрытой теплотой» плавления*. В 1759 – 1763 гг. Блэк указал на различие между количеством теплоты и её интенсивностью (т.е. температурой), а также ввёл понятие о *теплоёмкости*. Джеймс Уатт был его учеником и помощником.

Тем не менее, в то время никто не смог бы дать, например, ответ на необычайно важный для практики вопрос, поставленный Уаттом: *сколько топлива потребуется, чтобы получить с помощью паровой машины определенную работу, и каким способом при заданной величине работы можно свести до минимума его расход?*

За исследование этой проблемы взялся молодой французский инженер **Сад Карно** (рис. 3.3).

Он формулирует условия, при которых возможно превратить теплоту в работу, доказывает, что эффективная работа паровой машины зависит от ряда факторов и, в первую очередь, от температуры пара (источник теплоты) и от температуры теплоприемника (от температуры конденсата в конденсаторе машины Уатта). Он отмечает, что всю теплоту превратить в работу невозможно и, тем самым, опровергает идею «вечного двигателя».

Занявшись теоретическим обоснованием принципов работы паровых машин, Карно стал одним из пионеров термодинамики, предложив свою знаменитую модель идеального двигателя.

В 1824 году опубликована его фундаментальная работа "Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу". Эта работа считается основополагающей в термодинамике. В ней был произведён анализ существовавших в то время паровых машин, и были выведены условия, при которых КПД достигает максимального значения (в паровых машинах того времени КПД не превышал 2 %). Помимо этого там же были введены основные понятия термодинамики: идеальная тепловая машина, идеальный цикл, обратимость и необратимость термодинамических процессов.

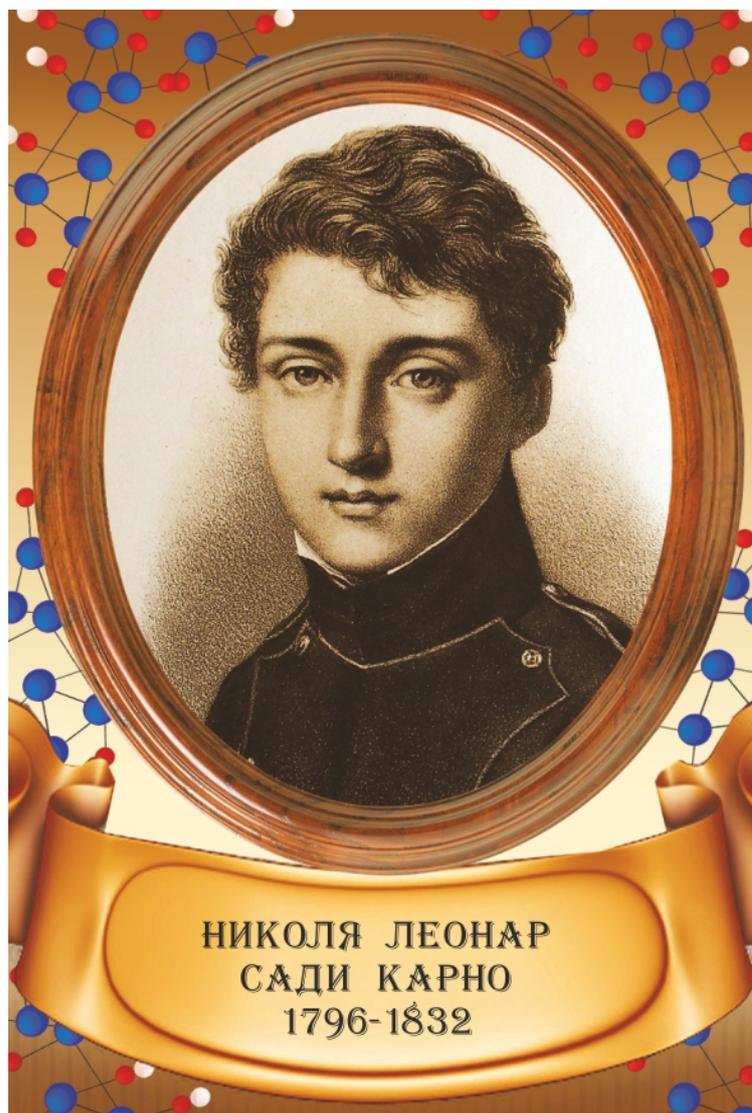


Рис. 3.3. Сади Карно (1796 – 1832) – выдающийся французский физик – основатель термодинамики

В своем трактате Карно рассмотрел в общем виде вопрос о "получении движения из тепла". Анализируя идеальный круговой процесс (известный сейчас как *цикл Карно*), он впервые пришёл к выводу о том, что полезная работа производится только при переходе тепла от нагретого тела к более холодному. Карно высказал также положение, что величина работы обусловлена разностью температур нагревателя и холодильника и не зависит от природы вещества, работающего в тепловой машине (*теорема Карно*).

Карно писал: *"Тепло не что иное, как движущая сила или, вернее, движение, изменившее свой вид; это движение частиц тел; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству"*

*исчезнувшей движущей силы. Обратное: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила. Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве; она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается; в действительности она меняет форму, т. е. вызывает то один род движения, то другой, но никогда не исчезает".* Если заменить слова "движущая сила" словом "энергия", то мы получим законченную формулировку закона сохранения энергии.

Карно также приблизительно определил механический эквивалент теплоты. Он сформулировал одно из самых важных положений термодинамики («первое начало»), т. е. закон сохранения энергии.

Теорема Карно вошла в термодинамику в качестве фундаментального принципа, а сама работа Карно, изложенная Клапейроном, послужила исходным пунктом для исследований У. Томсона и Р. Клаузиуса, приведших к открытию второго начала термодинамики.

Гемфри Дэви, Роберт Майер, Джеймс Джоуль приходят к выводу, что «теплота есть движение». Майер и Джоуль установили численную величину механического эквивалента теплоты – наиболее важную для теплоэнергетики константу.

Герман Гельмгольц заново вывел закон сохранения и превращения энергии. Вначале ученым трудно было согласиться с тем, что энергия никогда не исчезает и не возникает из ничего. Ведь нагретый предмет охлаждается, теряя тепловую энергию; опускаемый груз теряет потенциальную энергию и т. д. Однако идея сохранения энергии была спокойно воспринята инженерами. Они получили хорошую возможность сравнивать различные машины между собой, оценивая, какая часть подведенной тепловой энергии преобразуется в желаемую энергию. Теория паровых машин получила все научные обоснования.

Однако еще за 100 лет до этого гениальный русский ученый **Михаил Ломоносов** установил, что «теплота есть движение» и впервые вывел закон сохранения и превращения энергии.

**Михаил Васильевич Ломоносов** (1711 – 1765) – гениальный учёный, первый русский естествоиспытатель, получивший мировое признание, энциклопедист и художник, поэт и филолог, физик, химик, астроном (рис. 3.4). Работал в области молекулярно-кинетической теории тепла, географии, металлургии, геологии, истории. Ему принадлежит открытие атмосферы у

планеты Венеры. Он является основоположником науки о стекле, а также разработчиком проекта Московского университета, который в будущем назвали его именем. Занимался приборостроением, генеалогией.

Уже с ранних лет Михаил обучался грамоте. Учил его местный дьячок.



Рис. 3.4. М.В. Ломоносов (1711 – 1765) – гениальный русский учёный-естествоиспытатель, энциклопедист и художник, поэт и филолог, физик, химик, астроном

В конце 1730 года вместе с караваном, идущим с рыбой, Михаил бежал из родных мест в Москву, умудрился устроиться на учёбу в «Спасские школы». Эта Славяно-Греко-Латинская Академия была в России первым высшим учебным заведением.

В качестве лучшего ученика школы Ломоносова посылали на обучение за границу, где три года он учился в Марбургском университете. Здесь Михаил занимался со знаменитым немецким учёным-энциклопедистом и философом Христианом фон Вольфом.

Затем в течение года он жил и учился во Фрайберге, где занимался с немецким металлургом, химиком и врачом Генкелем.

В этом учебном заведении он обучался таким наукам, как гидростатика, теоретическая физика, механика, аэрометрия, гидравлика. Выучил немецкий, итальянский и французский языки, научился рисованию, фехтованию и танцам.

Летом 1741 года, после возвращения на родину, Ломоносова направили изучать естествознание под руководством профессора Амману. Михаил составил каталог окаменелостей и минералов для Минерального кабинета Кунсткамеры. Также написал две диссертации по химии и физике.

Основными целями его жизни было развитие российской науки, а также просвещения и экономики.

В 1745 году после защиты диссертации «О металлическом блеске» Ломоносов получил звание профессора химии. Работал на должности статского советника. В Санкт-Петербургской Императорской академии наук являлся действительным членом, а также был почётным членом в Королевской академии наук Швеции.

М.В. Ломоносов по праву считается создателем молекулярно-кинетической теории газов. Он ввел в науку понятие молекула, термин «атмосфера», сформулировал самый общий закон естествознания – **закон сохранения материи, энергии и движения**. До Ломоносова закон сохранения движения был выведен Декартом и Лейбницем, которые считали, что при всех явлениях в природе неизменным остается только количество механического движения.

Ломоносов же сформулировал свой закон в 1748 году в следующем виде: ***«Все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько у одного тела отнимается, столько присовокупится к другому. Так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте. Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения: ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оные у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает»***.

Обоснование закона было дано в письме Ломоносова от 16 июля 1748 года, адресованном великому математику Леонарду Эйлеру.

Замечательно, что под движением Ломоносов понимал не только механическое перемещение, но и тепловое; по сути дела он высказывал мысль о переходе одних форм движения в другие.

Ломоносов не только сформулировал свой закон, но и применял его.

Так, пользуясь этим законом, он объяснил процесс перехода энергии при теплопередаче, процессы, происходящие в охлаждающих смесях, и другие случаи перехода энергии.

Открытый Ломоносовым закон получил более полное обоснование в его работах: «Об отношении количества материи и веса» (1758) и в «Рассуждении о твердости и жидкости тел» (1760). Обе эти работы были опубликованы на латинском языке и, следовательно, получили известность за пределами России. Но осознать значение открытия, сделанного Ломоносовым, многие ученые тех лет так и не смогли.

Однако с развитием физики и техники формулировка закона сохранения энергии все более и более уточняется. Необходимость улучшения тепловых машин и их коэффициента полезного действия заставила более обстоятельно заняться изучением тепловых процессов. Это привело к окончательному выяснению того, что теплота является формой энергии, и к установлению впоследствии Майером, Джоулем, Гельмгольцем и Ленцем механического эквивалента теплоты. Таким образом, Ломоносов является прямым предшественником этих ученых.

В 1757 году Ломоносов стал членом канцелярии Академии наук. Одновременно с этим была опубликована одна из самых известных его работ «Слово о рождении металлов от трясения земли».

В следующем 1758 году он стал управлять в Академии географическим департаментом и начал составление нового «Атласа России».

1759 год ознаменовался в его жизни выходом «Рассуждений о большой точности морского пути». Здесь учёный описал новые изобретённые им приборы, с помощью которых можно будет определять широту и долготу.

М.В. Ломоносов – первый российский ученый-энциклопедист, серьезно занимавшийся химией, физикой, астрономией, географией, геологией, филологией, поэт, художник, историк, изобретатель. По широте интересов и глубине познания природы вещей его можно сравнить с Леонардо да Винчи.

Вот его вклад в науку:

- открыл закон сохранения материи и энергии (за 40 лет до Антуана Лавуазье);
- ввел много научных понятий и терминов: атмосфера, микроскоп, минус, полюс, нитрат, формула, горизонт, диаметр, радиус, пропорция, барометр, эклиптика, метеорология, оптика, периферия,

эфир, калий и др.;

- противник теории специальных жидкостей, таких как флогистон и электрическая жидкость, которая в то время была общепринятой, внес вклад в разработку кинетической теории газов, доказал, что тепло является формой движения;
- предложил волновую теорию света;
- доказал, что природа постоянно развивается и демонстрирует органическое происхождение почвы, торфа, угля, нефти и янтаря;
- в астрономии — предсказал существование атмосферы Венеры;
- сконструировал метеорологические, навигационные и оптические приборы (телескоп);
- впервые получил твердую ртуть;
- сконструировал прототип вертолета;
- заложил основы теории континентального дрейфа;
- теоретически предсказал существование Антарктиды;
- основал Московский университет;
- явился создателем первой русской грамматики и первого пособия по риторике, ввел систему правил для стихов в русской поэзии.

Итак, появились новые отрасли науки – термодинамика и тепломассообмен.

**Термодинамика** («термос» – тепло, «динас» – сила) изучает законы и условия превращения теплоты в работу и наоборот.

**Тепломассообмен** – наука о переносе теплоты от тела к телу, от одной части тела к другой без совершения работы.

Создание теории тепловых машин убедительно доказало невозможность устранения недостатков паровой машины.

Паровая машина имела низкий КПД (**8...9 %**). Повысить его можно за счет увеличения давления пара и его температуры. Это сделать было невозможно, так как при высоких параметрах пара котел разрушался (не было еще высокопрочных сталей). Паровая машина имела максимум два цилиндра. Увеличение количества цилиндров с целью повышения мощности приводило к увеличению габаритных размеров и массы.

Паровая машина была тихоходной (не более 1000 об/мин), повышение числа оборотов приводило к увеличению динамической нагруженности

деталей машины. Выше частота вращения вала машины, выше скорость и ускорение поршней, выше динамические нагрузки на детали машины и, в конечном счете, на фундамент машины.

Внутренняя поверхность цилиндров машины требует непрерывной смазки. Масло, соприкасаясь с водяным паром, попадает в конденсатор и покрывает масляной пленкой поверхность охлаждения конденсатора и, тем самым, снижает его коэффициент теплопередачи.

## 3.2. Паровые турбины

Для привода рабочих машин с высокими скоростями вращения (с большим числом оборотов в минуту): дисковых пил, центрифуг, вентиляторов, центробежных насосов, сепараторов, электрических генераторов – требовались высокоскоростные двигатели.

Современная **паровая турбина** – это тепловой двигатель, в котором потенциальная энергия пара превращается в кинетическую, а кинетическая, в свою очередь, преобразуется в механическую энергию вращения ротора. Ротор турбины непосредственно (с помощью муфты) соединяется с валом рабочей машины (электрогенератором, валом гребного винта, насосом, центрифугой и т. д.).

Для того чтобы преобразовать потенциальную энергию пара в кинетическую энергию, необходимо обеспечить ему выход из парогенератора, где он находится, через сопло в проточную часть паровой турбины. При этом давление пара должно быть выше давления в проточной части. Пар будет выходить струей со скоростью, которая может быть очень высокой.

Скорость истечения пара из сопла зависит от трех факторов:

- от давления и температуры «острого пара» (до начала расширения);
- от давления за турбиной, т. е. в пространстве, куда он вытекает (вакуума /противодавления);
- от формы канала (сопла), сквозь который он проходит.

Процесс создания и совершенствования паровых турбин был длительным и многотрудным.

В 1883 году швед **Густав Лаваль** (1845-1913) (рис. 3.5) создает

промышленную *активную паровую турбину с одним колесом*, которое вращалось с частотой 3000 об/мин (рис. 3.6). Турбина изготавливалась для привода сепаратора молока.



Рис. 3.5. Густав Лаваль (1845 – 1913) – шведский инженер и изобретатель активной одноступенчатой паровой турбины

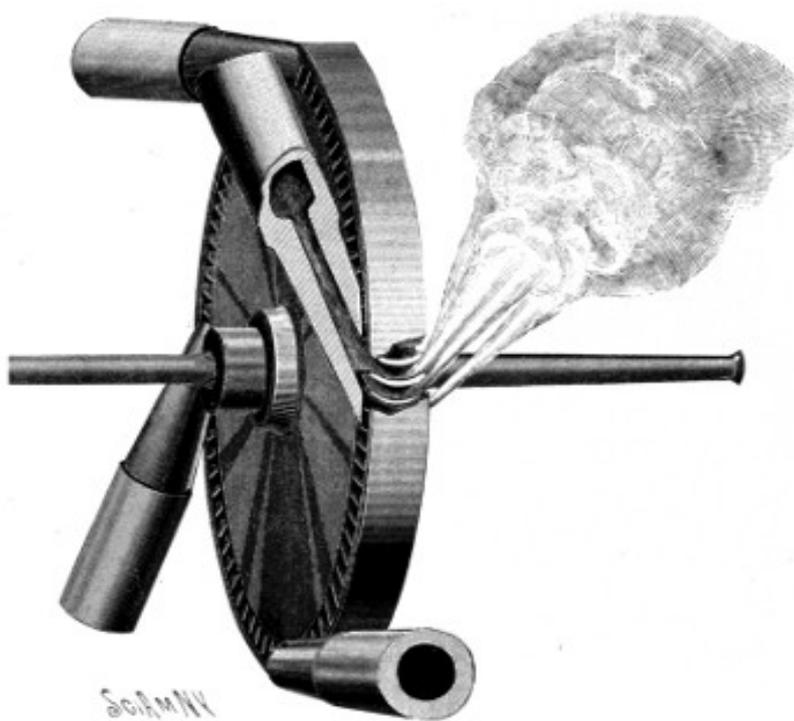


Рис. 3.6. Активная паровая турбина Густава Лавалья

В 1890 году Лаваль изобрёл сопло, служащее для подачи пара в турбину, получившее впоследствии его имя, и использующееся в том же назначении по настоящее время. В XX веке сопло Лавалья нашло применение в реактивных двигателях для создания реактивной струи.

Дальнейшее развитие турбин стало возможным после того, как Лавалем при конструировании своей турбины были разрешены основные вопросы турбостроения вообще, а именно: работа пара в расширяющемся сопле, проблема гибкого вала, диск равного сопротивления, шаровые подшипники, применение специальных материалов – никелевой стали для дисков и лопаток – и, наконец, зубчатая передача.

Лавалю принадлежит также честь изобретения центрифуги для разделения на фракции смесей, состоящих из жидкостей с разной плотностью. За свою жизнь Густав де Лаваль запатентовал 93 изобретения.

Используя результаты работы Г. Лавалья, англичанин **Чарльз Парсонс** (1854-1931) (рис. 3.7) в 1884 году изобрёл *реактивную многоступенчатую турбину* специально для привода электрогенератора (рис. 3.8).



Рис. 3.7. Чарльз Парсонс (1854 – 1931) – английский инженер и промышленник, изобретатель многоступенчатой реактивной паровой турбины

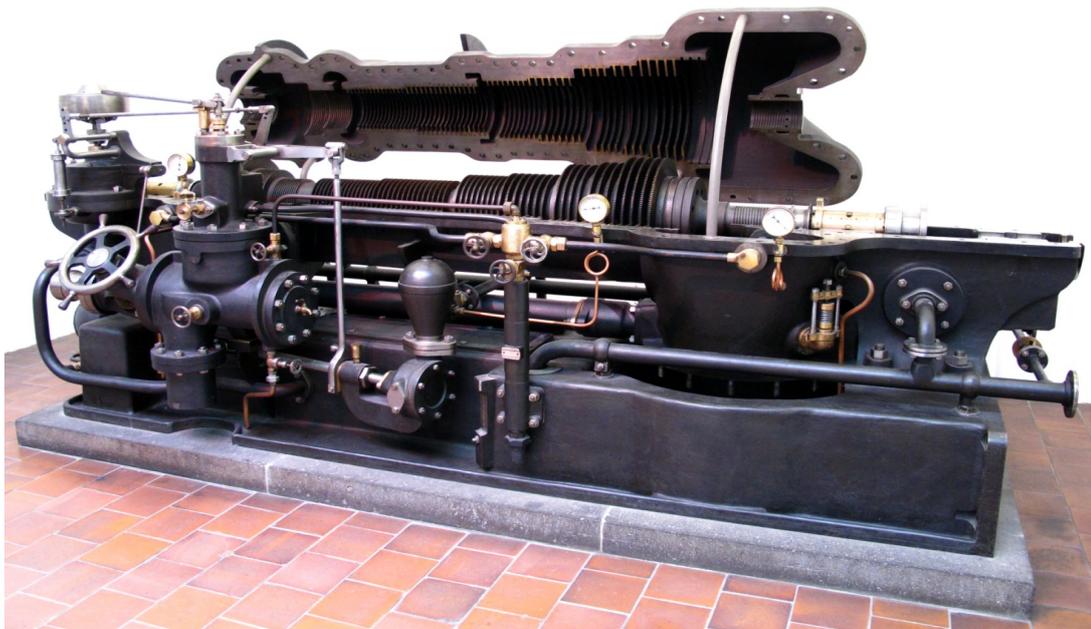


Рис. 3.8. Многоступенчатая паровая реактивная турбина Чарльза Парсонса

Первую паровую многоступенчатую турбину реактивного типа Парсонс построил в 1884 году. Она предназначалась для работы совместно с электрическим генератором. Парсонс правильно предугадал одну из наиболее перспективных областей применения паровых турбин, и в дальнейшем ему не пришлось разыскивать потребителей для своего изобретения.

С целью уравнивания осевого усилия пар подавался к середине вала турбины, а затем протекал к ее концам. Первая паровая турбина Парсонса имела мощность всего 6 л.с. и была подвергнута разнообразным испытаниям. Основные затруднения представляла разработка рациональной конструкции лопаток и способов их крепления в диске, а также обеспечение уплотнений.

Уже в конструкции 1887 года Парсонс применил лабиринтные уплотнения, что позволило перейти к турбинам с однонаправленным потоком пара. К 1889 году число построенных турбин превысило 300, их мощность пока еще не достигла 100 л.с. при частоте вращения около 5000 об/мин. Такие турбины применялись преимущественно для привода электрических генераторов.

Французский инженер **Огюст Рато** (1863-1930) (рис. 3.9) разработал конструкцию *многоступенчатой активной турбины со ступенями давления* (рис. 3.10), которая в дальнейшем была усовершенствована швейцарским инженером Целли.



Рис. 3.9. Огюст Рато (1863 – 1930) – французский инженер и промышленник, изобретатель многоступенчатой активной турбины со ступенями давления

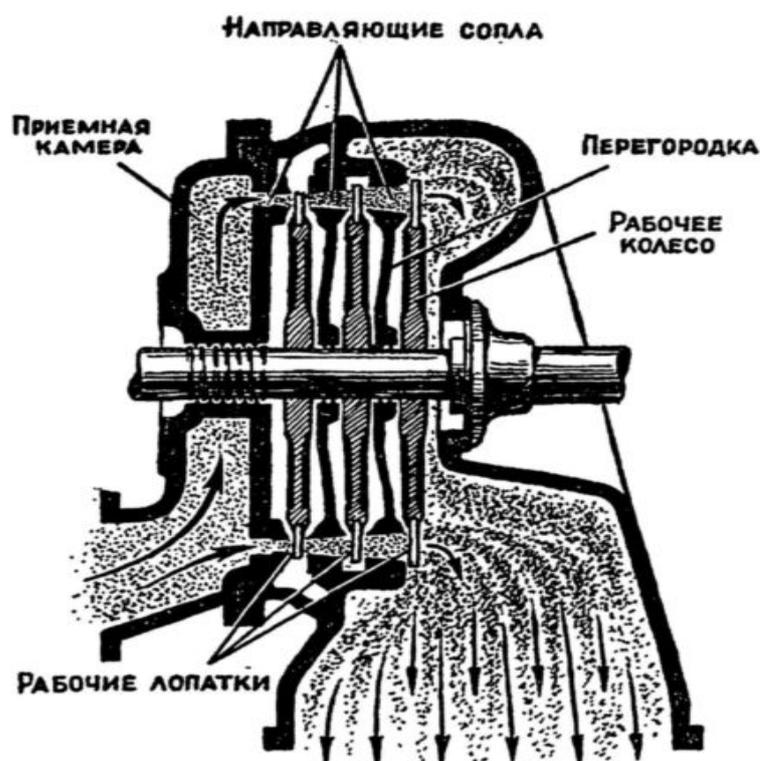


Рис. 3.10. Многоступенчатая активная паровая турбина Огюста Рато

**Огюст Рато** так же, как и Лаваль, получил широкое техническое образование, окончив два учебных заведения: Политехническую школу и Высшую горную школу.

Рато установил, что разность давлений и температур в котле и конденсаторе должна преобразовываться в скорость пара в целом ряде систем, последовательно расположенных, состоящих из групп сопел и рабочего колеса.

Исходя из этого, Рато разделил цилиндр турбины на ряд камер специальными диафрагмами. В этих диафрагмах он укреплял направляющие лопатки, через которые пар проходил из одной камеры в другую. В каждой камере помещалось одно рабочее колесо. Все колеса насаживались на один общий вал (рис. 3.11).

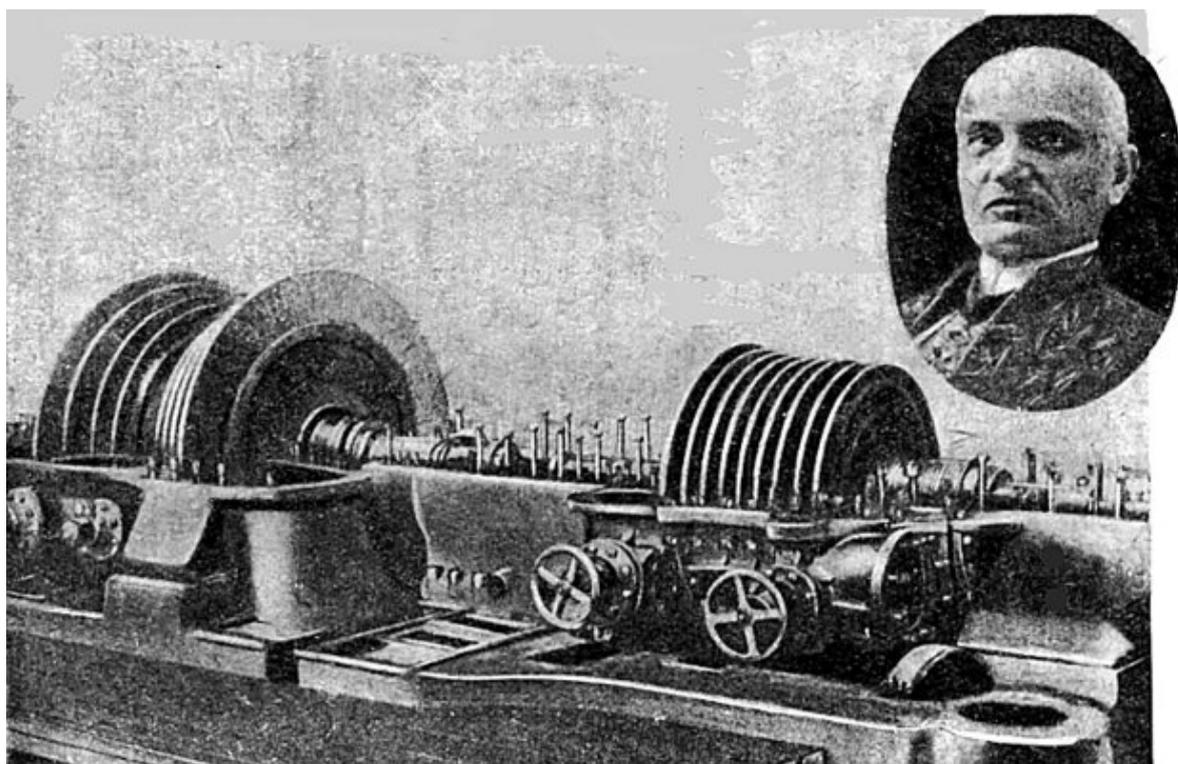


Рис. 3.11. О. Рато и его турбина мощностью 15 000 кВт со ступенями давления

Таким образом, при переходе из одной камеры в другую пар расширялся в направляющих лопатках, заменявших сопла, и давление его падало постепенно.

Турбина Рато имела немало преимуществ перед турбинами Парсонса и Лавалья.

Предложением Рато о тепловом аккумуляторе воспользовались судостроители. Они начали сооружать на судах комбинированные установки паровых двигателей и турбин. Первыми судами подобного типа были пароходы «Отаки», а также известные трансатлантические гиганты «Титаник» и «Олимпик».

Дальнейшие усовершенствования в турбину Рато внес швейцарский инженер **Генрих Целли**, применив в 1903 году насадки (сопла) с косым срезом. За счет этого удалось увеличить скорость пара на выходе из сопла и уменьшить число ступеней давления до 5–8 и тем самым сделав ее более удобной и менее громоздкой (рис. 3.12). С разрешением ряда основных вопросов турбостроения многочисленные предприятия, начавшие их производство, комбинируя отдельные достижения изобретателей, создали комбинированный тип турбины Рато — Целли с колесом Кертиса. Эти комбинированные турбины в настоящее время достигли огромных мощностей.

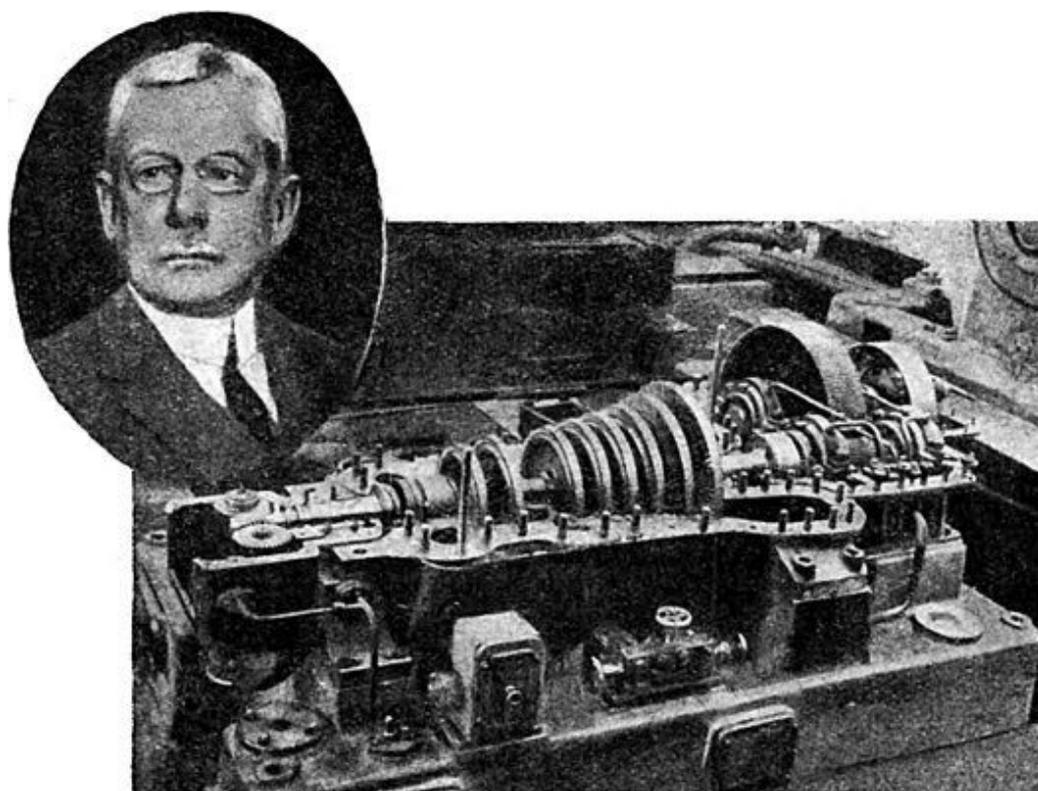


Рис. 3.12. Г. Целли и его турбина мощностью 500 кВт

Американский инженер **Чарльз-Гордон Кертис** построил *активную турбину со ступенями скорости* (рис. 3.13).

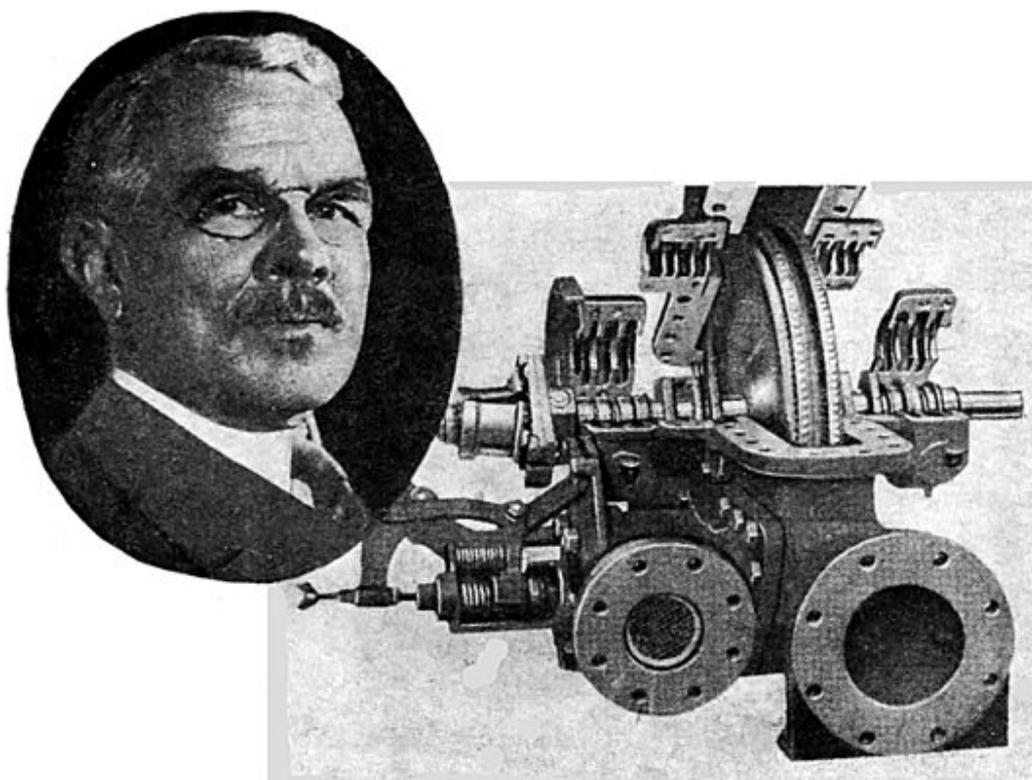


Рис. 3.13. Чарльз Кёртис (1860-1953) и его активная турбина со ступенями скорости

Ч. Кёртис в своей турбине направил пар, отработавший в первом ряду лопаток, на второй ряд рабочих лопаток, сидящих на том же самом диске и таким образом, разлагая его энергию последовательно на два и на три ряда рабочих лопаток, создал ступени скорости. Ступени скорости понизили число оборотов турбины и сделали для турбины Лавалья ненужной зубчатую передачу.

*Газовая турбина и другие разработки.* В 1899 году Ч. Кёртис разработал первую газовую турбину в Соединенных Штатах.

Ч. Кертис работал также над усовершенствованием двигателей внутреннего сгорания (двухтактных дизельных двигателей), а также над двигателями для морских судов и торпед.

Огромный вклад в *теорию создания паровых и газовых турбин* внес словацкий ученый **Аурель Болеслав Стодола** (1859-1942) (рис. 3.14).



Рис. 3.14. А. Стодола (1859 – 1942) словацкий инженер и учёный-теплотехник - основатель прикладной термодинамики, турбиностроения

В 1892 году Стодола основал турбомашинную лабораторию, Он известен как специалист в области турбомашин и тепловых двигателей. Сформулировал названный его именем закон о производительности турбин.

В 1903 году опубликовал книгу, в которой изложена термодинамика турбин, рассмотрены темы газодинамики, вибропрочности, сопротивления материалов элементов конструкций, в том числе быстровращающихся, концентрации механических напряжений на отверстиях.

### *Классификация паровых турбин*

Принцип действия паровой турбины основан на двух последовательно протекающих процессах:

- Первый состоит в преобразовании тепловой энергии пара в кинетическую энергию его потока
- Второй – в передаче кинетической энергии потока пара вращающемуся ротору.

Один ряд сопел 3 и один диск 8 с лопатками 7 называют ступенью (рис. 3.15).

Рис. 3.15. Схема турбинной ступени

По принципу действия выделяют активные и реактивные паровые турбины.

Турбины, у которых расширение пара от начала до конца происходит только в соплах, а лопатки служат для превращения кинетической энергии потока пара во вращательное движение ротора, называют **активными турбинами** (рис. 3.16).

Простейшая одноступенчатая активная турбина состоит из ряда неподвижных сопловых лопаток, образующих сужающиеся каналы – сопла в дозвуковых турбинах, и сужающе-расширяющиеся сопла – в сверхзвуковых турбинах. В каналах соплового аппарата потенциальная энергия пара преобразуется в кинетическую энергию движущейся струи, при этом происходит расширение пара и он с большой скоростью поступает в каналы, образованные рабочими лопатками. Так как каналы рабочих лопаток активной турбины имеют постоянное (по ходу движения пара) проходное сечение, то расширения пара в них не происходит. В каналах рабочих лопаток пар только изменяет направление движения, оказывая силовое воздействие на рабочие лопатки, закрепленные на диске.

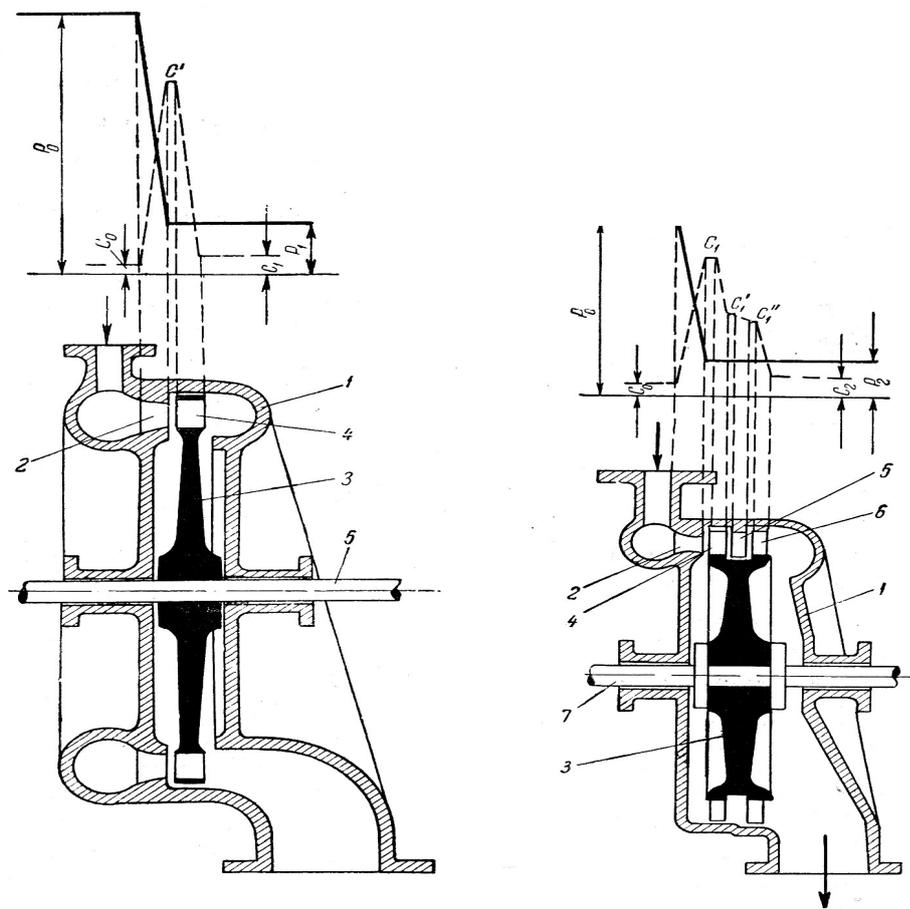


Рис. 3.16. Одноступенчатая активная паровая турбина:

1 – корпус; 2 – сопло; 3 – диск; 4 – лопатки; 5 – вал турбины

Турбины, у которых расширение пара происходит полностью на лопатках турбины, а сопла служат только для изменения направления потока, называют **реактивными турбинами** (рис. 3.17).

**Реактивными** называют также турбины, у которых пар расширяется и в соплах и на рабочих лопатках примерно в равных долях по теплопадению.

В реактивной турбине свежий пар с начальными параметрами:  $p_0$ ,  $t_0$ , и абсолютной скоростью  $c_0$ , подводится к направляющему аппарату (сечение 0). В сужающихся каналах направляющего аппарата происходит расширение пара, в результате чего на выходе из него (сечение 1) скорость потока пара увеличивается до значения  $c_1$ , а его давление снижается до значения  $p_1$ . С этой скоростью пар поступает к рабочим лопаткам турбины. В реактивной турбине рабочие лопатки образуют сужающиеся каналы, в результате чего в них происходит дальнейшее расширение пара. При этом на выходе из лопаток (сечение 2) давление пара снижается до величины  $p_2$ , а скорость потока пара – до значения  $c_2$ .

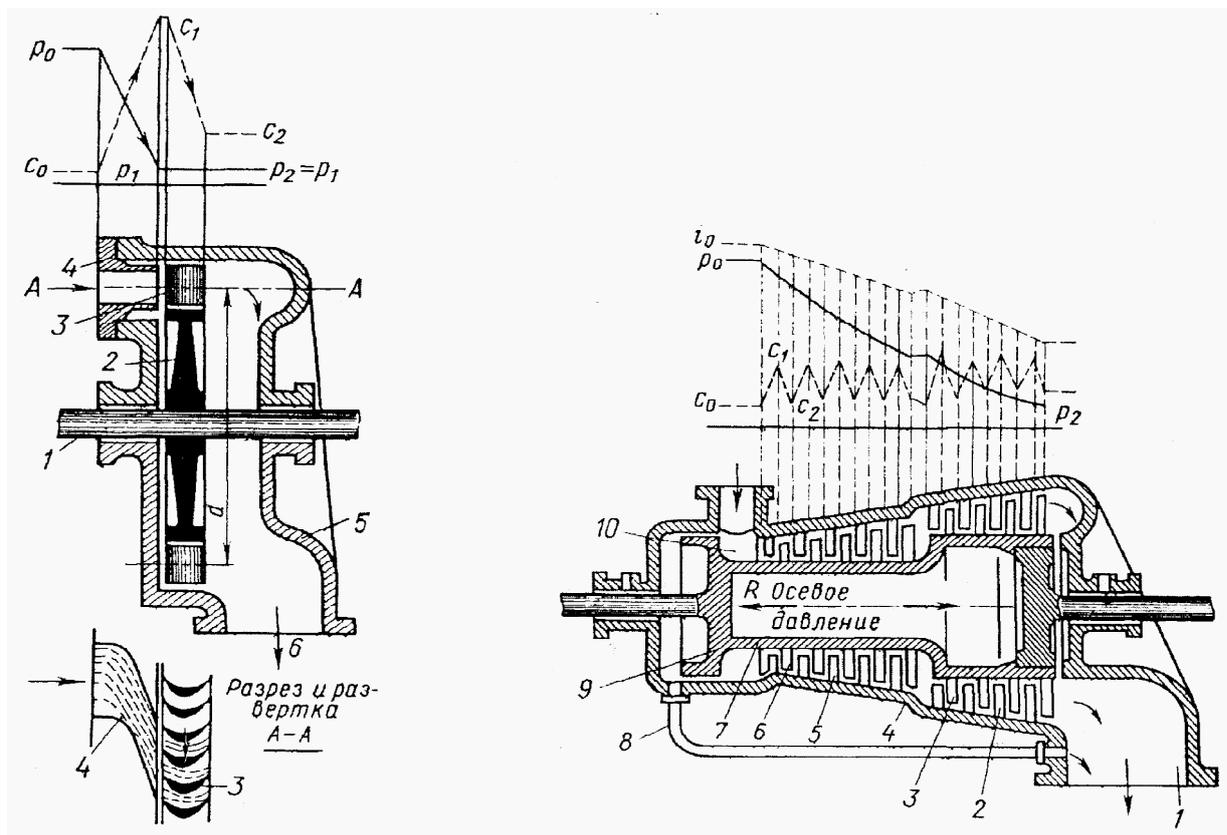


Рис. 3.17. Схема реактивной турбины:

*a* – одноступенчатая турбина;

1 – вал турбины; 2 – диск; 3 – рабочие лопатки; 4 – сопло;

5 – корпус турбины; 6 – выхлопной патрубок;

*б* – многоступенчатая турбина небольшой мощности.

По количеству ступеней паровые турбины подразделяют на **одноступенчатые** и **многоступенчатые турбины**. В одноступенчатой паровой турбине (рис. 3.17 а) не удаётся достаточно полно использовать энергию пара, поэтому современные строят многоступенчатыми (рис. 3.17 б).

По направлению потока рабочего тела выделяют **осевые (аксиальные) паровые турбины** (направление потока совпадает с направлением оси ротора, наиболее распространённый тип паровых турбин, используемых для привода электрогенераторов) и **радиальные паровые турбины** (поток осуществляется в радиальном направлении либо от оси ротора к периферии дисков, либо наоборот – от периферии к оси).

В зависимости от давления пара **паровые турбины** бывают: **низкого** (не выше 0,9 МПа), **среднего** (не выше 4 МПа), **высокого** (9–14 МПа) и **сверхкритического давления** (24 МПа и более).

В зависимости от характера теплового процесса паровые турбины подразделяют на 3 группы: *конденсационные турбины, теплофикационные и специального назначения.*

В *конденсационной паровой турбине* рабочий цикл заканчивается конденсацией пара, а образовавшийся конденсат возвращается в паровой котёл. Конденсационные турбины применяют на всех крупных ТЭС и АЭС для привода электрических генераторов, на металлургических заводах для привода доменных воздуходувок, а также в качестве главных судовых двигателей и др. Основное преимущество конденсационной турбины (по сравнению с любым другим двигателем) – возможность получения большой мощности в одной энергетической установке (рис. 3.18).

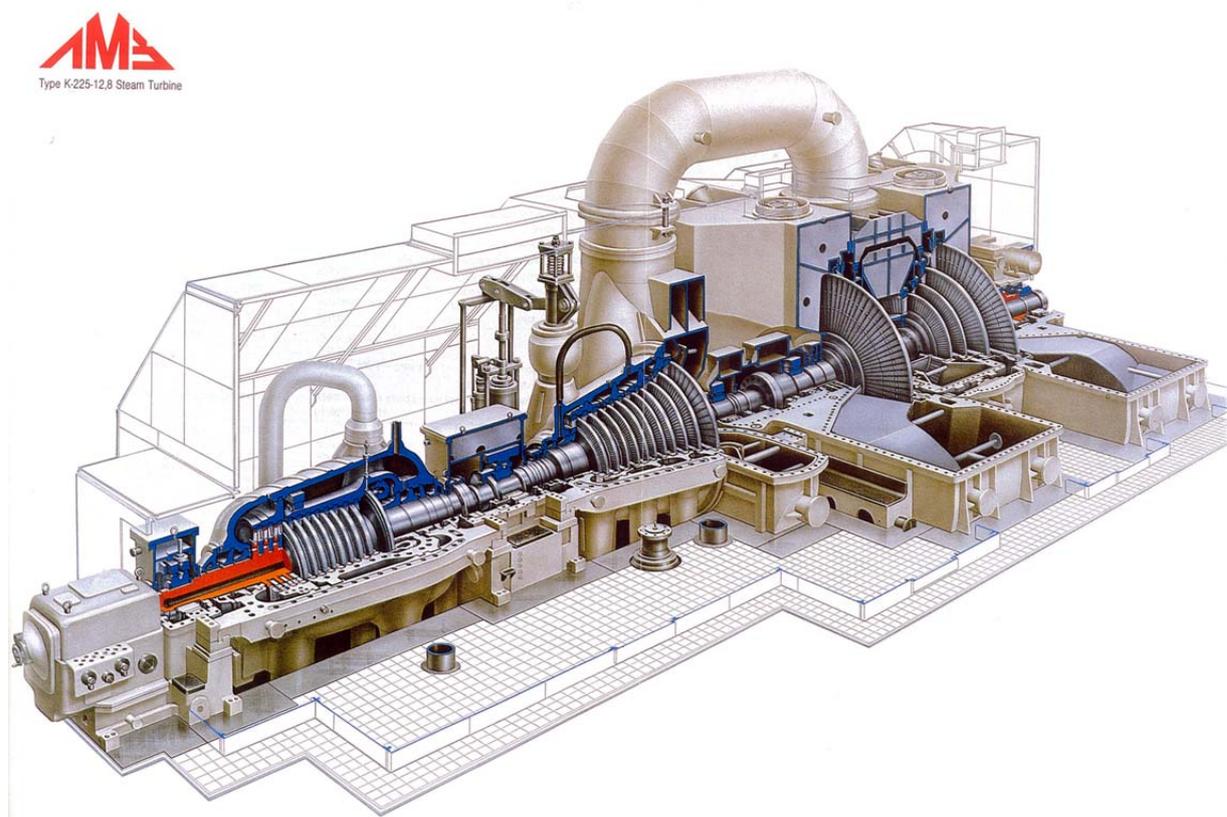


Рис. 3.18. Макет конденсационной паровой турбины К-225-12,8 ЛМЗ

Крупнейшие конденсационные турбины КЭС имеют мощность до 1200 МВт, а на конденсационных атомных электростанциях – 1900 МВт (при использовании тихоходной паровой турбины ARABELLE).

**Теплофикационные паровые турбины** служат для одновременного получения электрической и тепловой энергии (рис. 3.19, 3.20).

ТЭС, на которых установлены теплофикационные паровые турбины, называются теплоэлектроцентралями (ТЭЦ). В конструкции теплофикационных паровых турбин предусмотрены *регулируемые отборы пара*:

- для удовлетворения технологических нужд – варка, сушка, отбелка и прочих – (производственный отбор);
- для удовлетворения коммунально-бытового теплоснабжения – отопление, вентиляция, ГВС – (теплофикационный отбор).



Рис. 3.19. Ротор теплофикационной паровой турбины с отбором пара

В **противодавленческой паровой турбине** отсутствует конденсатор. Отработавший пар, имеющий давление выше атмосферного, поступает в специальный сборный коллектор, откуда направляется к тепловым потребителям для технологических целей (варка, сушка, пропарка и прочие) (рис. 3.21, 3.22).

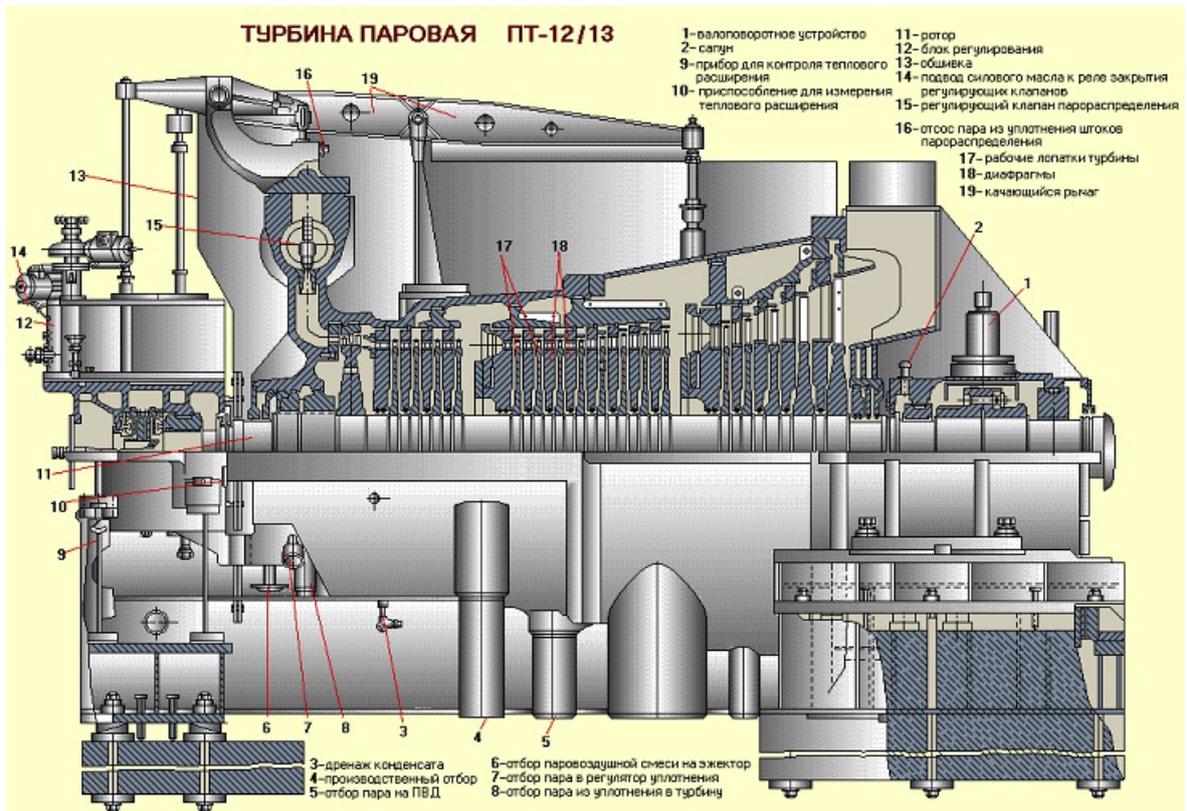


Рис. 3.20. Схема теплофикационной паровой турбины ПТ-12/13 с отборами пара



Рис. 3.21. Теплофикационная паровая турбина с противодавлением

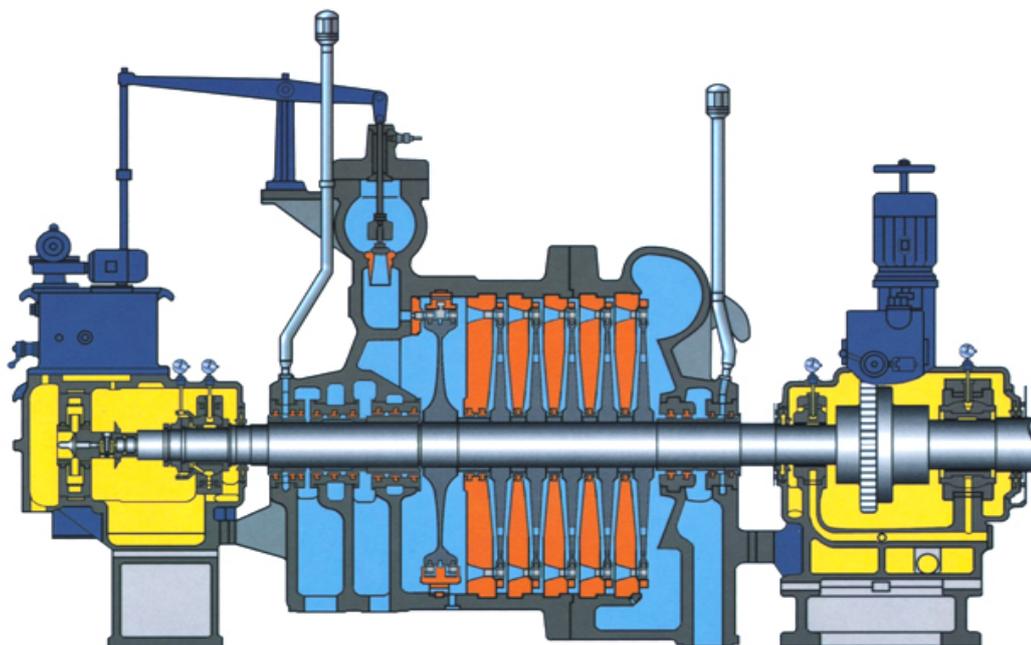


Рис. 3.22. Схема теплофикационной паровой турбины с противодавлением

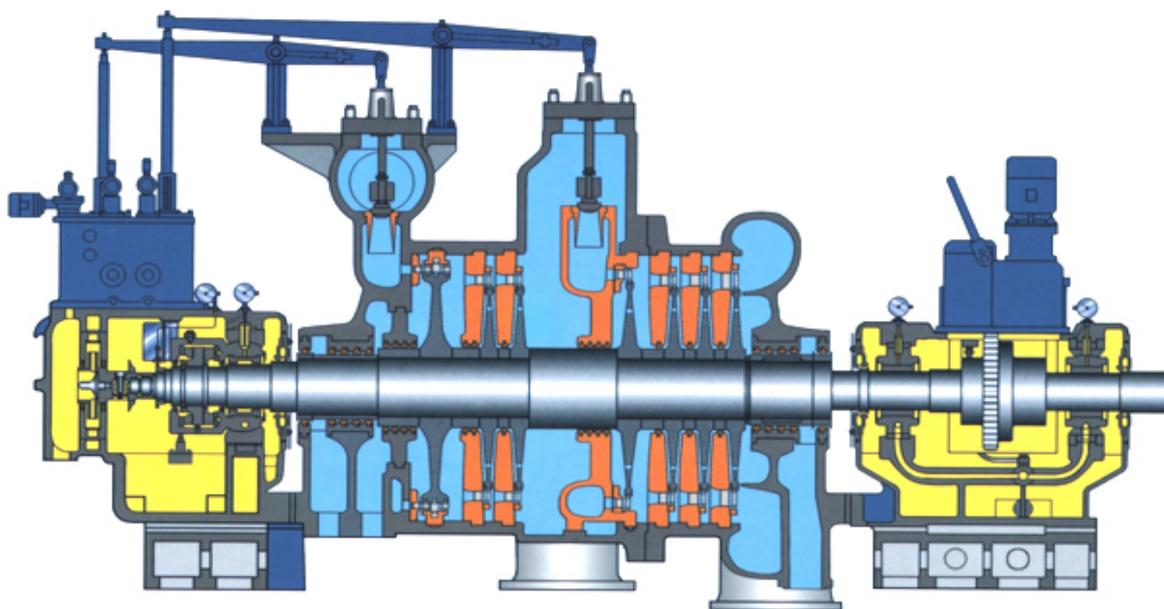


Рис. 3.23. Схема теплофикационной паровой турбины с отбором и противодавлением

У турбин с отбором и противодавлением часть пара с высоким давлением отводится из первой или второй промежуточных ступеней для удовлетворения технологических нужд высокого потенциала (200 – 250° С), а весь отработавший пар направляется из выпускного патрубка – противодавления для удовлетворения технологических нужд среднего потенциала (150 – 200° С) (рис. 3.23).

Для маркирования паровых турбин приняты такие обозначения: К – конденсационная турбина; Т – теплофикационная турбина с конденсатором и теплофикационным отбором; ПТ – теплофикационная турбина с конденсатором, производственным и теплофикационным отбором; Р – теплофикационная турбина с противодавлением; ПР – теплофикационная турбина с производственным отбором и противодавлением и т.д.

Например, типоразмер ПТ-25-90/10 означает: теплофикационная турбина с конденсатором, электрической мощностью 25 МВт, давлением острого пара 90 кгс/см<sup>2</sup>, производственным отбором 10 кгс/см<sup>2</sup> и теплофикационным отбором 1,2 кгс/см<sup>2</sup>.

### 3.3. Котельные агрегаты для получения пара или горячей воды

**Котлоагрегатом** (далее **котлом**) называют устройство, предназначенное для непрерывного производства (генерации) пара или горячей воды за счет превращения какого-либо вида энергии (электрической, атомной, чаще химической энергии топлив органического происхождения) в тепловую.

Котел, в котором генерируют (производят) водяной пар, называют **паровым**. Котел, в котором подогревают воду до желаемой температуры, называют **водогрейным**.

Котел представляет собой устройство в виде металлического сосуда (емкости), которые обогреваются горячими продуктами сгорания топлива с целью получения вышеназванных пара или воды.

Котельные установки различной мощности широко применяются для обеспечения технологических процессов, для теплоснабжения, отопления, вентиляции, горячего водоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий и сооружений, объектов строительства, предприятий общественного питания, потребителей теплоты в банях, прачечных, сельскохозяйственных предприятий.

Все множество конструкций котлов можно объединить в две группы: *жаротрубные* и *водотрубные* (они могут быть и паровыми, и водогрейными) котлы.

Первыми были изобретены *жаротрубные котлы*. В трубу большего диаметра вмонтировалась труба меньшего диаметра, так что перед нею оставалась свободной часть пространства большей трубы, в котором сжигали топливо. Пространство между трубами заполнялось водой, которая нагревалась от нагретой продуктами сгорания поверхности внутренней трубы. Вода кипела, образовавшиеся пар или горячая вода отводились к потребителю, продукты сгорания топлива отводились в атмосферу. Затем в котел снова заливали воду, и процесс повторялся.

Ярким представителем жаротрубных котлов является русский самовар. Недостатком жаротрубных котлов является низкая паропроизводительность при большой массе котла.

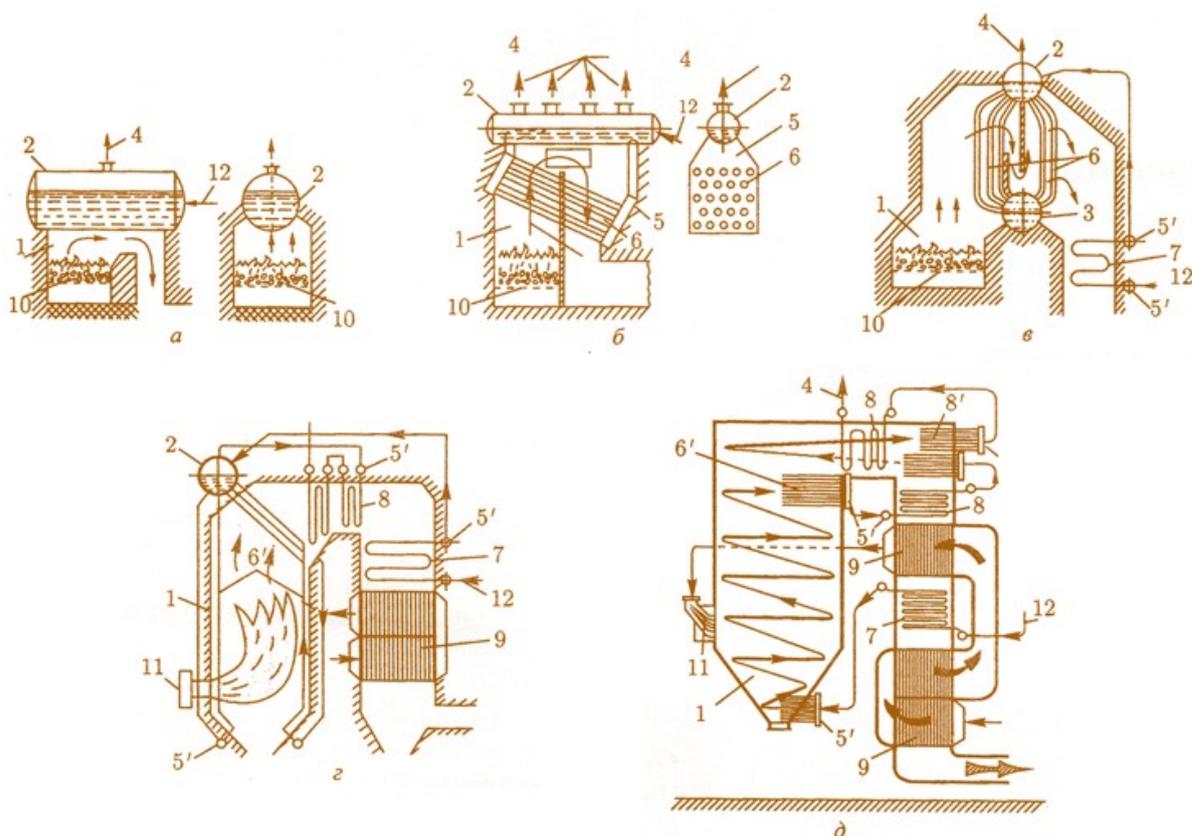


Рис. 3.24. Этапы развития типов водотрубных котлов:  
 а – цилиндрический; б – камерный горизонтально-водотрубный;  
 в – двухбарабанный вертикально-водотрубный; г – однобарабанный факельный  
 вертикально-водотрубный; д – прямоточный;  
 1 – топка; 2 – барабан-сепаратор; 3 – нижний барабан; 4 – выход пара;  
 5 – раздающая водяная камера; 5' – коллектор; 6 – трубы котельных пучков; 6' – трубы  
 настенных экранов; 7 – экономайзер; 8 – пароперегреватель; 8' – настенный ленточный  
 перегреватель; 9 – воздухоподогреватель; 10 – колосниковая решетка; 11 – горелка;  
 12 – вход воды в котел

Отличительной чертой водотрубных барабанных котлов является наличие одного или нескольких барабанов с фиксированной границей раздела между паром и водой.

Этапы развития типов водотрубных котлов показано на рис. 3.24.

В процесс становления и развития котлостроения внесли свой вклад отечественные ученые и изобретатели И.П. Алымов (применение искусственной тяги, 1864), И.А. Вышнеградский (основоположник теории регулирования котла, 1888), М.В. Кирпичев (тепловое моделирование и расчет котельных агрегатов, 1900-е гг.), Н.П. Петров (основы теории циркуляции в паровых котлах, 1907) и др.

Важным шагом в развитии конструкций паровых котлов явилось изобретение прямоточных котлов (рис. 3.24 д). Идея прямоточного парового котла восходит еще к 1785 году. К прямоточному движению рабочей среды в паровых котлах обратились в конце XIX века русские инженеры, в том числе П.Д. Кузминский и Н.Ф. Пашинин (создание перегородок из поверхностей нагрева, 1893), Д.И. Артемьев (судовой прямоточный котел, 1883).

Прямоточные котлы не имеют барабана, в них вода, а затем пароводяная смесь и пар (называемые вместе рабочей средой) последовательно проходят все поверхности нагрева котла. В отличие от барабанного типа прямоточные котлы могут работать и при сверхкритическом давлении рабочей среды.

Большой вклад в развитие прямоточных котлов внесли в 1920-е годы советские ученые, инженеры и конструкторы В.К. Худяков, А.П. Гавриленко, В.И. Гриневецкий, К.В. Кирш, **В.Г. Шухов**, Л.К. Рамзин, Г.Ф. Кнорре, стоявшие у истоков инженерно-научной школы отечественного котлостроения.

Предложенные ими идеи оказались весьма плодотворными и до сих пор успешно применяются в конструкциях отечественных и зарубежных прямоточных котлов.

По типу тяги в газоздушном тракте паровые котлы разделяются на котлы с уравновешенной тягой и наддувом. В котлах с уравновешенной тягой движение продуктов сгорания по газоздушному тракту принудительное и осуществляется за счет совместной работы дымососа и дутьевого вентилятора. В котлах с наддувом сопротивление газового тракта в основном преодолевается работой компрессора.

По виду сжигаемого органического топлива паровые котлы

разделяются на котлы, сжигающие твердое, жидкое, газообразное топливо, а также бытовые отходы, дрова, биомассу.

В 1960 – 1970 гг. проф. В.В. Померанцев, известный как автор низкотемпературной вихревой технологии сжигания, сделал фундаментальные открытия в области процессов горения и топочной техники, результатом одного из них явилось создание «топки скоростного горения ЦКТИ системы Померанцева».

Для маркирования паровых котлов приняты такие обозначения: П – прямоточный; Е – котел с естественной циркуляцией; Пр – котел с принудительной циркуляцией и т.д. Например, типоразмер Е-420-140ГМ означает: паровой котел с естественной циркуляцией для сжигания газа и мазута паропроизводительностью 420 т/ч с давлением 140 кгс/см<sup>2</sup>.

**Владимир Григорьевич Шухов (1853 – 1939)** – русский, советский ученый, инженер, изобретатель, архитектор; конструктор водотрубных котлов (рис. 3.25).

В 1871 году Шухов с отличием закончил гимназию. Он поступил в Московское императорское техническое училище (сегодня – МГТУ имени Баумана). Среди его преподавателей были знаменитый математик Алексей Летников, ученый в области механики железнодорожного транспорта Дмитрий Лебедев, основоположник современной гидро- и аэродинамики Николай Жуковский. Они требовали от студентов безукоризненного знания физики и химии, математики и архитектуры.



Рис. 3.25. Шухов В.Г. (1853 – 1939) – русский, советский ученый, инженер, изобретатель водотрубных котлов

В 1880 году В. Г. Шухов впервые в мире осуществил промышленное факельное сжигание жидкого топлива с помощью изобретенной им форсунки, позволявшей эффективно сжигать и мазут, считавшийся ранее отходом нефтепереработки. В 1891 году В. Г. Шуховым разработана и запатентована промышленная установка для перегонки нефти с разложением на фракции под воздействием высоких температур и давлений; установка впервые предусматривала осуществление крекинга в жидкой фазе.

В это время В. Г. Шухов создал *водотрубный котел*, отличающийся от остальных современных ему типов паровых котлов многими конструктивными решениями (рис. 3.26).

Котел состоит из барабана с расположенным на нем сухопарником. К барабану с помощью горловины присоединяются головки батарейных труб. Головки снабжены лазами. Кипятильные трубы диаметром 75 мм, в количестве 19 штук в одной батарее, располагаются в шахматном порядке.

В нижней части котла, перпендикулярно к его оси, расположен грязевик. Питательная вода подается на лоток и подогревается встречным потоком пароводяной смеси. Подогреваемая, таким образом в тонком слое вода выделяет соли, увлекаемые в грязевик. В дальнейшем котел был снабжен перегревателем, а число ходов дымовых газов было увеличено.

В 1900 году его паровые котлы были отмечены высокой наградой – на Всемирной выставке в Париже Шухов получил золотую медаль.

По патентам Шухова до и после революции были произведены тысячи паровых котлов. Котлы Бельвиля – Шухова были установлены на броненосцах "Князь Потемкин-Таврический", "Евстафий" и "Иоанн Златоуст".

По системе Шухова были созданы паровые котлы, нефтеперегонные установки, трубопроводы, форсунки, резервуары для хранения нефти, керосина, бензина, спирта, кислот и пр., насосы, газгольдеры, водонапорные башни, нефтеналивные баржи, доменные печи, металлические перекрытия цехов и общественных сооружений, хлебные элеваторы, железнодорожные мосты, воздушно-канатные дороги, маяки, трамвайные парки, заводы-холодильники, дебаркадеры, ботопорты, мины и т.д.

Паровые котлы его системы и резервуары различного назначения нашли применение от Баку до Архангельска, от Петербурга до Владивостока. В. Г. Шухов – создатель нефтеналивного флота в России. По его проектам создавались точные чертежи барж в Москве. Сборка стальных барж длиной от 50 до 130 м осуществлялась в Саратове и Царицыне. До

1917 года по проектам В.Г. Шухова было построено 82 баржи.

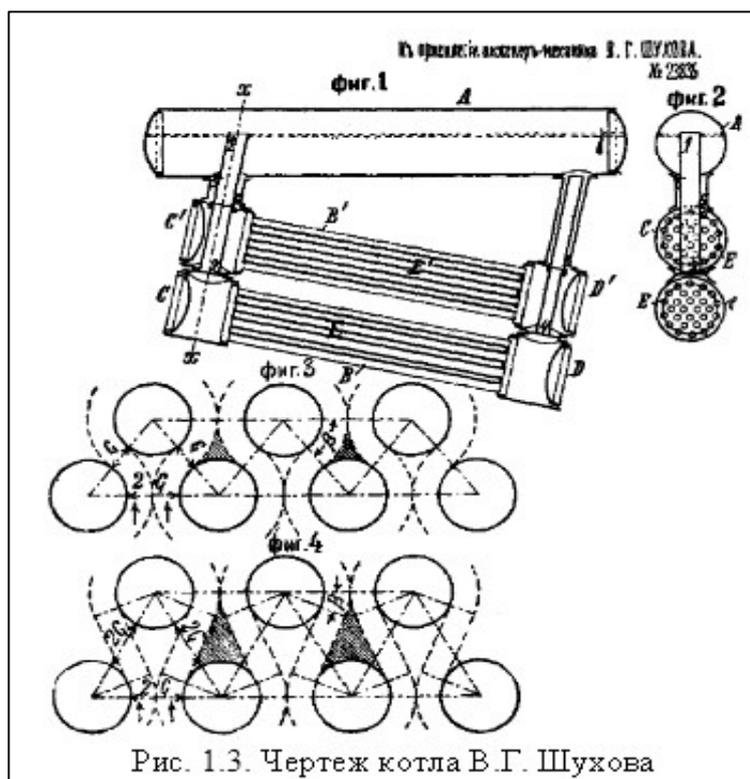


Рис. 3.26. Схема водотрубного котла Шухова.

В результате исследований В. Г. Шухова и его коллег (Е. К. Кнорре и К. Э. Лембке) была создана универсальная методика расчета водопроводов. После опробования проекта при реконструкции системы водоснабжения в Москве было осуществлено строительство водопроводов в Тамбове, Харькове, Воронеже и других городах России.

По проектам В. Г. Шухова сооружено в нашей стране и за рубежом около 200 башен оригинальной конструкции, в том числе знаменитая Шаболовская радиобашня в Москве.

Шуховская башня включена в Список памятников культуры с охранным статусом, рекомендована на включение в Список всемирного наследия ЮНЕСКО. Гиперболоидные башни такой конструкции строят и сегодня во многих странах мира.

Масштаб инженерных достижений В. Г. Шухова сопоставим с вкладами в науку М. В. Ломоносова, Д. И. Менделеева, И. В. Курчатова, С. П. Королева.

Рассмотрим устройство и сферы применения котельных агрегатов.

К **основным элементам** котла относятся: топка, барабаны,

воздухоподогреватели, горелочные устройства, устройства для регулирования температуры перегрева пара.

**Топка** представляет собой пространство, образованное экранными трубами, внутри которых циркулирует вода (рис. 3.27). В топке котла происходит процесс горения, при этом химическая энергия топлива превращается в тепловую, за счет чего вода испаряется, превращается в пар и поступает в барабан.

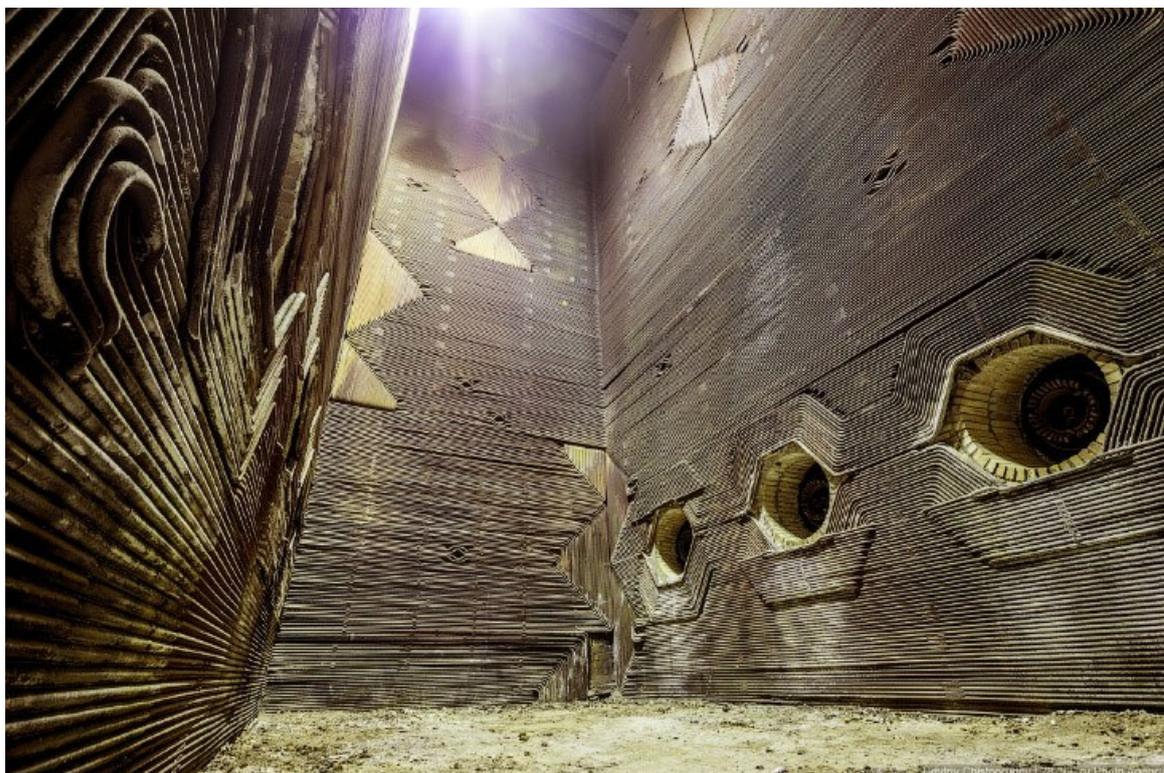


Рис. 3.27. Топка парогенератора

**Барабаны** котлов предназначены для отделения насыщенного пара от воды, удаления из него избыточной влаги, а также как устройство, в котором аккумулируется количество воды, необходимое для надежной работы котла (рис. 3.28).

**Воздухоподогреватели котла** – это поверхности нагрева, в которых происходит предварительный подогрев воздуха, поступающего в топку и необходимого для сжигания топлива. **Горелочные устройства** – это устройства для сжигания топлива в топке котла. Горелочные устройства современных котлов обеспечивают наиболее эффективное сгорание топлива с точки зрения химических процессов и снижение количества вредных веществ, образующихся в процессе горения и выбрасываемых в атмосферу. К **устройствам регулирования температуры** перегрева пара относятся

теплообменники различных типов и *впрыскивающие парохладители*.

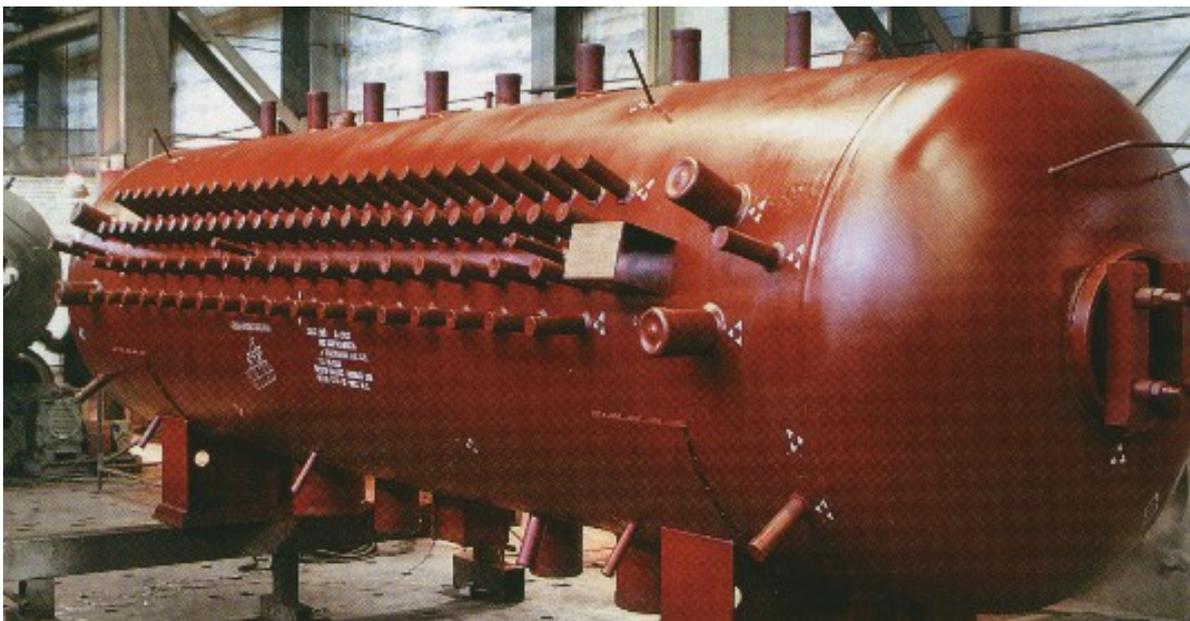


Рис. 3.28. Барабан котла

Для обеспечения работы современные котлы оснащаются *вспомогательным оборудованием*, к которому относятся дутьевые вентиляторы, дымососы, золоулавливающее оборудование, оборудование по подготовке топлива и т.п. Совокупность котла и вспомогательного оборудования называется *котельной установкой*.

Одним из важных элементов котла является каркас, предназначенный для размещения и крепления всех его элементов. Он изготавливается из металлоконструкций и опирается на фундамент или элементы здания.

Для обеспечения безопасности работы персонала, а также для снижения потерь теплоты в окружающую среду на котле предусмотрена обмуровка и тепловая изоляция.

Котлы классифицируются по назначению, паропроизводительности, параметрам пара, типу топчного устройства, способу организации взаимного движения продуктов сгорания и рабочей среды, способу организации движения рабочей среды в поверхностях нагрева и виду сжигаемого органического топлива.

*По назначению* котлы подразделяются на *паровые*, вырабатывающие водяной пар требуемых параметров, *водогрейные* (рис. 3.29), *котлы-утилизаторы* и *энерготехнологические* котлы. Они предназначаются для энергетических, производственных, отопительно-производственных и отопительных котельных установок.

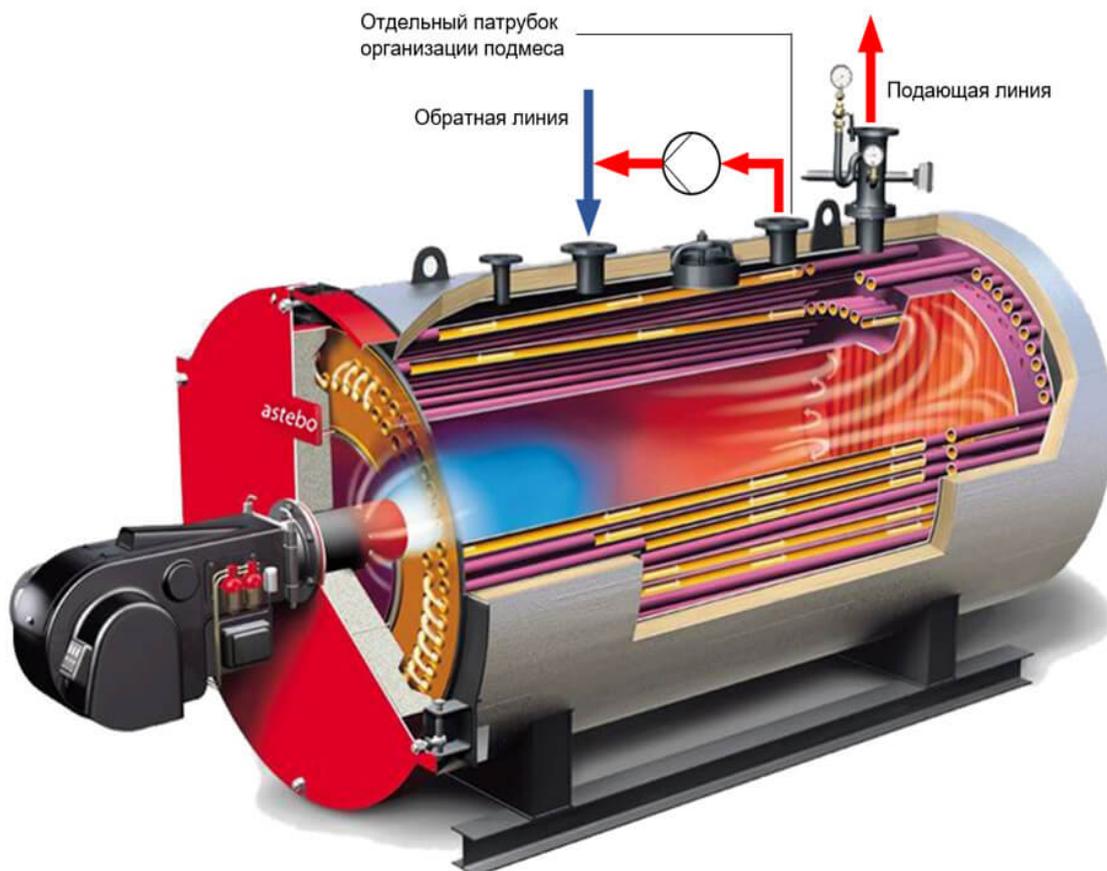


Рис. 3.29. Водогрейный котел

**По паропроизводительности** котлы подразделяются на котлы *малой* производительности, котлы *средней* производительности, *энергетические котлы* и *котлы энергоблоков ТЭС большой паропроизводительности*.

Паровые котлы *малой* паропроизводительности (до 20 т/ч) выпускаются на низкое и среднее давление пара. Они получили значительное распространение и широко используются для технологических и хозяйственных нужд, входят в состав стационарных и передвижных котельно-отопительных установок.

Котлы *средней* производительности (до 100 т/ч) – это, как правило, котлы среднего давления с умеренной температурой перегретого пара (425 – 450 °С) – широко используются в качестве источника технологического пара на промышленных предприятиях.

**Энергетические паровые котлы** выпускаются на среднее и высокое давление пара и имеют паропроизводительность от 100 до 640 т/ч. Эти котлы устанавливаются на небольших теплоэлектроцентралях и промышленных предприятиях и предназначены для выработки

электроэнергии, получения водяного пара или горячей воды для технологических нужд и нужд отопления.

**Котлы энергоблоков ТЭС (КЭС и ТЭЦ)** имеют паропроизводительность до **3600 т/ч** и выпускаются на среднее, высокое, сверхкритическое и суперсверхкритическое давление пара. Они предназначены для обеспечения выработки электроэнергии и теплофикации населенных пунктов.

**По параметрам пара** паровые котлы подразделяются на котлы, работающие на **низком (0,88 МПа), среднем (1,36; 2,36 и 3,9 МПа), высоком (8,8 и 13,8 МПа), критическом (16 МПа), сверхкритическом (23,5 МПа)** давлении. Достижения современной науки и техники в области получения новых конструкционных материалов и сталей позволили создать новые типы паровых котлов, работающих на **суперсверхкритическом** давлении (до **35 МПа**).

**По типу топочного устройства** можно выделить котлы, оснащенные **слоевой топкой, камерной топкой, циклонной топкой, вихревой топкой, топкой с кипящим слоем, специальными топками для сжигания специфических видов топлива**. Котлы, оснащенные вихревыми топками и топками с кипящим слоем, имеют множество модификаций. Их преимущество перед котлами с камерными топками в том, что они могут сжигать твердое топливо ухудшенного качества и множество видов промышленных и бытовых отходов. Для них не требуются системы пылеприготовления, они имеют меньшую металлоемкость и более высокие экологические показатели.

**Водотрубные котлы** выпускаются нескольких модификаций: **барабанные с естественной циркуляцией** (рис. 3.30), **сепарационные (безбарабанные) с многократной принудительной циркуляцией** и **прямоточные котлы**. В котлах с естественной циркуляцией циркуляция воды осуществляется за счет разностей ее плотности; для обеспечения принудительной циркуляции используются циркуляционные насосы, а движение среды в прямоточных котлах осуществляется за счет напора, развиваемого питательным насосом.

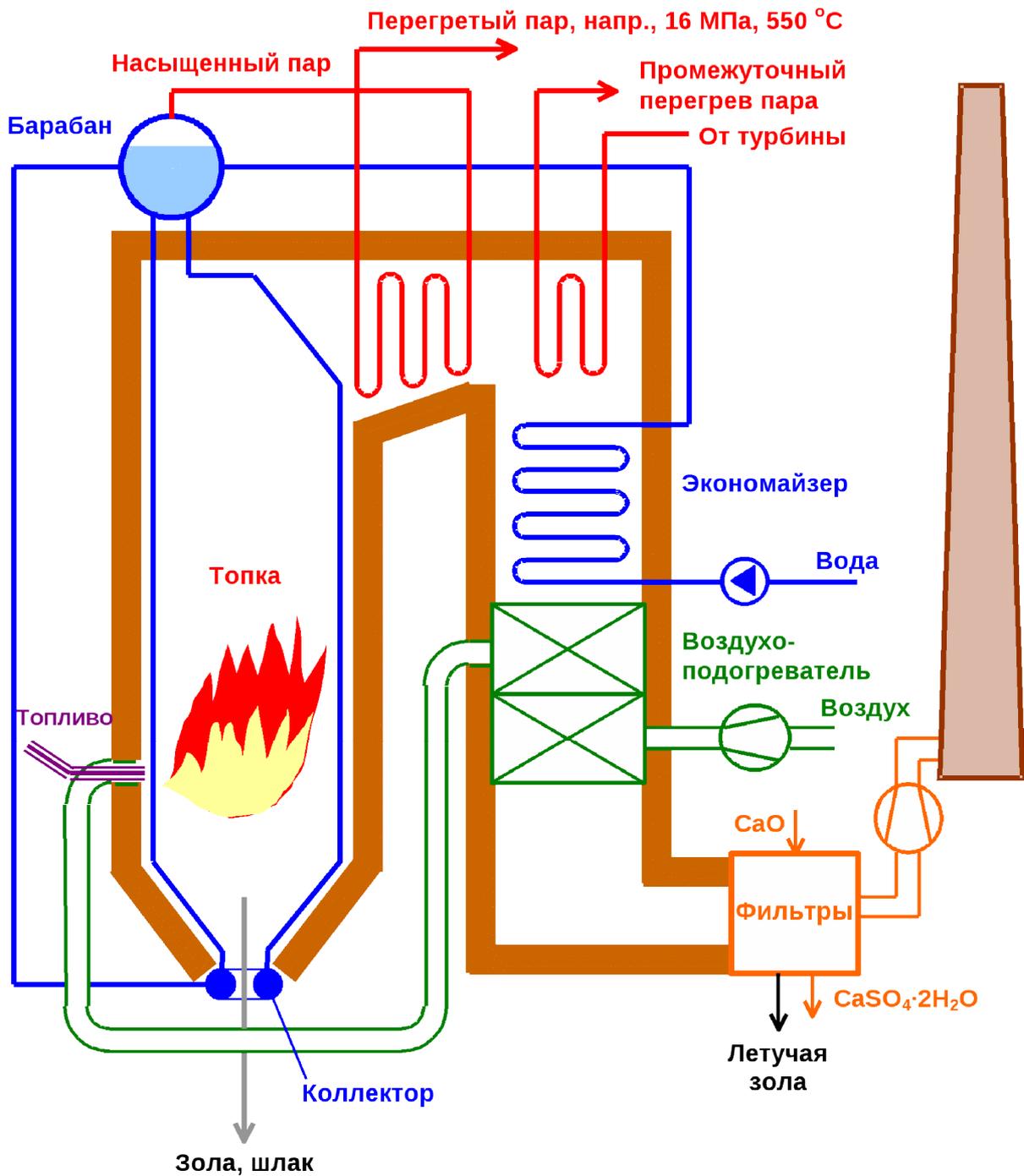


Рис. 3.30. Схема барабанного котла с естественной циркуляцией

### 3.4. Газотурбинные установки

Паровая турбина, обладая большими техническими и экономическими преимуществами перед паровой машиной, имея достаточно высокий КПД, тем не менее, не может быть использована в качестве двигателя транспортных машин, за исключением больших судов.

Для этого имеются следующие причины:

- 1) Рабочее тело, водяной пар, приводящее колесо турбины в движение, вырабатывается вне турбины в котельном агрегате. Система «паровая турбина + паровой котел» имеет большие габариты и массу, что для транспортной машины неприемлемо.
- 2) Теплоту для производства пара получают путем сжигания твердых или жидких с большой вязкостью топлив в топках котельных установок. Процесс горения этих топлив протекает на поверхности кусков твердого топлива, крупных капель жидкого топлива. Количество энергии в форме теплоты при поверхностном горении в единицу времени выделяется крайне мало.

Более интенсивно происходит выделение энергии в форме теплоты в газовых турбинных установках (ГТУ), в которых процесс горения смеси паров топлива (в основном керосин, дизельное топливо, природный газ) и кислорода осуществляется внутри ГТУ, в ее камере сгорания. Благодаря хорошему перемешиванию, горение протекает мгновенно во всем объеме рабочей смеси. Это позволяет получить большие мощности при малых габаритах и небольшой массе газовой турбины.

Идея использования энергии горячих дымовых газов для совершения механической работы известна давно.

Над созданием газотурбинных установок работали англичанин Джон Барбер (в 1791 г. получил первый патент на ГТУ), немецкий инженер Штольце (в 1872 г. получил патент на газовую турбину), инженер-механик русского военно-морского флота **П.Д. Кузьминский** (в 1890-х гг. создал газопаровую турбинную установку), французские инженеры Арманго и Лемаль (в 1905-1906 гг. построили 2 ГТУ), немецкий ученый доктор Хольцварт (в 1908-1927 гг. построил несколько ГТУ)

Те немногие, фактически работавшие газотурбинные установки, которые были построены за рассмотренный период времени, либо обладали низким КПД (3 – 14 %), либо были конструктивно сложны и мало надежны в эксплуатации, что являлось препятствием для их практического использования.

Первая газотурбинная электростанция с турбоагрегатом мощностью 5000 кВт была введена в эксплуатацию в 1939 г. в Швейцарии. Установка была выполнена по простейшей схеме и работала при температуре газа перед турбиной порядка 560 °С.

Позднее, в 50-х годах, в Швейцарии же была построена и эксплуатировалась газотурбинная электростанция в местечке Бецнау с турбоагрегатами мощностью в 12 и 25 МВт при начальной температуре газа 650 °С.

Дальнейшее совершенствование газотурбинных установок идет по пути увеличения начальной температуры газа.

На рубеже веков были созданы ГТУ с уровнем начальной температуры газов 1000 – 1100 °С.

В связи со сложностями обеспечения дальнейшего роста температуры газа перед турбиной в последнее время разрабатываются газотурбинные установки, работающие по более сложным циклам, в частности по циклу с промежуточным отводом и подводом теплоты. Газотурбинные установки, разрабатываемые по такому циклу, в настоящее время имеют существенно более высокие параметры рабочего тела и соответственно более высокие КПД.

Так, например, созданная фирмой «General Electric» новая ГТУ LMS100 с промежуточным охлаждением воздуха и начальной температурой газа 1380 °С имеет КПД, равный 45–46 %. Реализация таких циклов приводит к усложнению газотурбинной установки, увеличению металлоемкости и удорожанию ее. Что касается регенеративного цикла, то, как указывалось выше, целесообразность его применения снижается по мере достижения определенной достаточно высокой температуры воздуха за компрессором, определяемой степенью его сжатия, и по мере приближения этой температуры к температуре газа за турбиной. Однако для указанного выше уровня параметров применение регенерации оправданно и эффективно, особенно с учетом высоких степеней регенерации теплоты, достигающих значений 0,9–0,92.

Среди других важных направлений работ по созданию газотурбинных установок нового поколения следует отметить:

- аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров и турбин, базирующееся на теории вязкого трехмерного течения потоков с учетом турбулентности, периодической нестационарности, концевых эффектов, влияния радиальных и осевых зазоров на течение в проточной части. Разработанные на основе этой теории саблевидные лопатки существенно изменяют традиционный облик проточной части компрессоров и турбин и заметно улучшают

аэродинамические характеристики профилей лопаток и устойчивость течения в них;

- создание малоэмиссионных камер сгорания со снижением выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$  до 9 ppm);
- создание образцов газотурбинных двигателей с регулированием радиальных и осевых зазоров между статором и ротором и разработка систем автоматического контроля и регулирования зазоров для стационарных ГТУ с целью повышения экономичности и надежности их работы на всех эксплуатационных режимах;
- создание более эффективных и напорных биротативных компрессоров с поворотными направляющими лопатками.

Схема простейшей ГТУ представлена на рис. 3.31, макет – на рис. 3.32.

При вращении компрессора на входе в проточную часть создается разрежение, поэтому атмосферный воздух непрерывно поступает в компрессор.

За счет подвода части энергии от газовой турбины через лопаточный аппарат компрессора воздух в нем сжимается, его давление повышается в 10 – 15 раз больше атмосферного. В процессе сжатия температура воздуха также повышается до  $100 - 150^\circ \text{C}$ . Далее сжатый воздух поступает в камеру сгорания, куда через форсунки подается газотурбинное топливо.

Топливо смешивается с горячим воздухом, интенсивно сгорает по всему объему камеры сгорания, выделяя большое количество теплоты. Образовавшиеся продукты сгорания (рабочее тело) нагреваются до высоких температур **1200 – 1435° C**.

Далее продукты сгорания поступают в поточную часть газовой турбины, где расширяясь, совершают работу, часть которой затрачивается на привод компрессора, а избыток передается на приводное устройство – электрогенератор, нагнетатель природного газа, гребной винт и т.д.

Отработав в газовой турбине, продукты сгорания с температурой **550 – 650 ° C** удаляются в атмосферу.

Стационарные ГТУ используются для привода электрогенератора.

Транспортные газотурбинные двигатели (ГТД) получили широкое распространение в авиации, на железнодорожном транспорте, в военной технике.

## Простейшая тепловая схема ГТУ

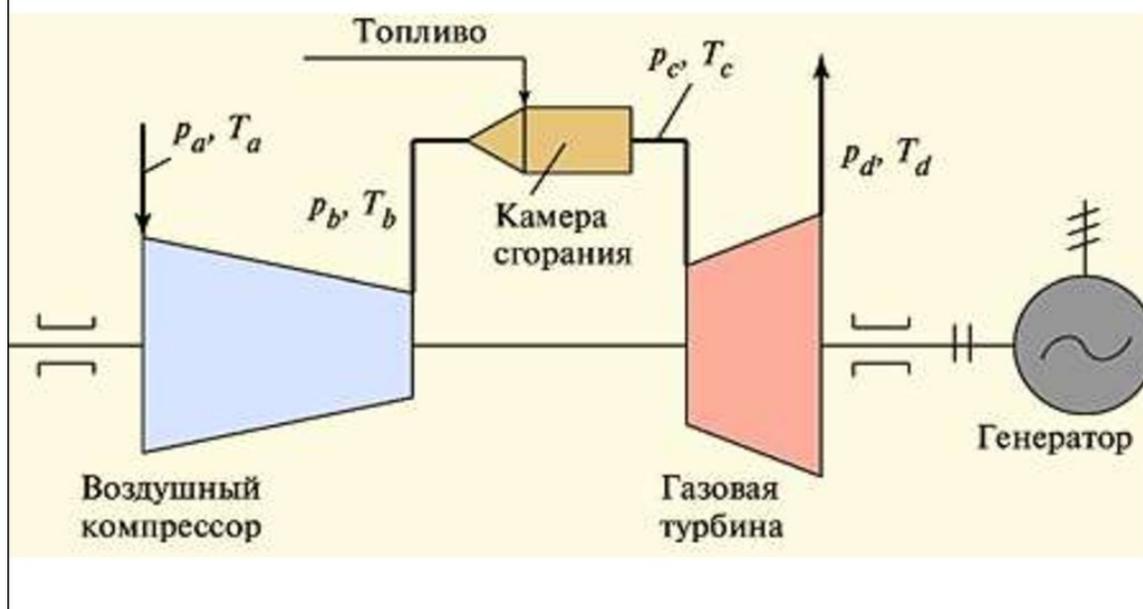


Рис. 3.31. Схема простейшей газотурбинной установки

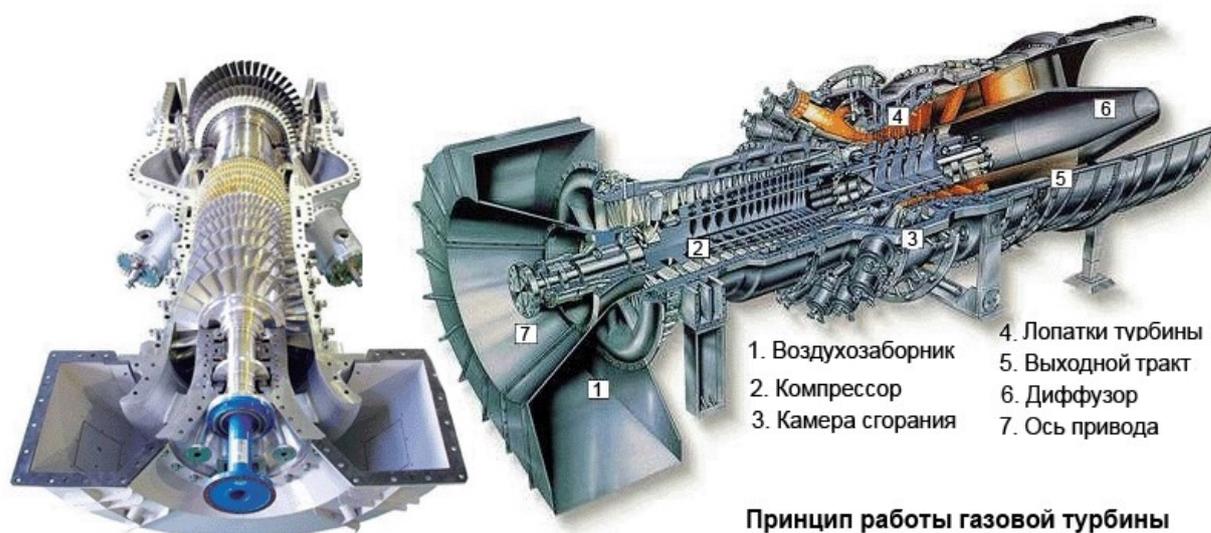


Рис. 3.32. Макет простейшей газотурбинной установки

Достоинствами ГТУ является компактность, большая мощность при значительно меньшей массе, маневренность.

Недостатком ГТУ является высокий температурный уровень отвода отработавших в газовой турбине продуктов сгорания  $550 - 600^\circ \text{C}$ .

КПД современных ГТУ достигает **40 %**.

Основополагающими теоретическими разработками в области реактивного движения и лопаточных машин были ещё дореволюционные труды учёных И.В. Мещерского, **Н.Е. Жуковского**, К.Э. Циолковского. К началу XX века относятся первые проекты ГТД русских инженеров: П. Кузьминского (1900), В. Караводина (1908), Н. Герасимова (1909), А. Горохова (1911), М. Никольского (1914). Изготовление опытного турбовинтового (турборакетного) двигателя мощностью 160 л. с. по проекту М. Никольского было начато в 1914 г. на Русско-Балтийском заводе для замены немецкого поршневого двигателя "Аргус" мощностью 140 л.с. на самолёте "Илья Муромец".

Бесспорно, что российские ученые и конструкторы, и прежде всего – Б.С. Стечкин, В.В. Уваров, А.М. Люлька, В.Я. Климов, С.К. Туманский, В.А. Добрынин, Н.Д. Кузнецов, П.А. Соловьев, С.П. Изотов, внесли выдающийся вклад в развитие современного мирового газотурбинного авиадвигателестроения.

Одним из современных достижений отечественного газотурбостроения является газотурбинная установка 6F.03 (6FA) производства ООО «Русские Газовые Турбины» (рис. 3.33).

ГТУ 6F.03 (6FA) средней мощности хорошо подходит как для режима базовой нагрузки, так и для переменных режимов, включая комбинированный цикл, центральное теплоснабжение, а также нефтегазовую и промышленную когенерацию.

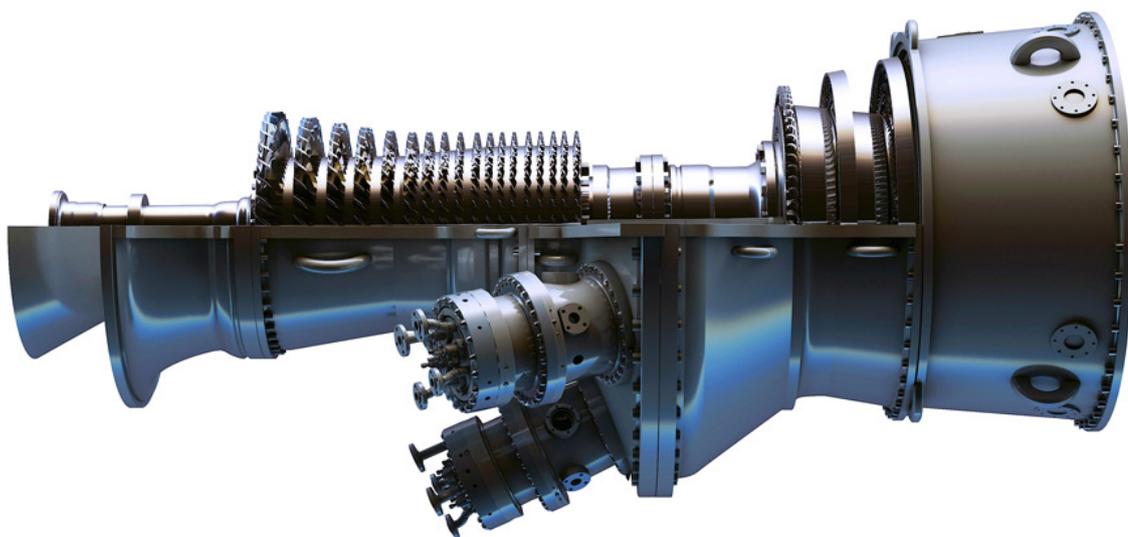


Рис. 3.33. Газотурбинная установка 6F.03 (6FA)

**Николай Егорович Жуковский** (5 января 1847 г. – 17 марта 1921 г.) – русский ученый, основоположник современной гидроаэродинамики, «отец русской авиации» (рис. 3.34).

В 1858 – 1864 гг. Н. Е. Жуковский учился в 4-й Московской мужской гимназии, в 1864 – 1868 гг. – на физико-математическом факультете Московского университета по специальности прикладная математика. С 1870 года он преподавал физику во 2-й Московской женской гимназии, с 1872 года был преподавателем математики, с 1874 года – доцентом по кафедре аналитической механики Московского высшего технического училища (МВТУ).

В 1876 году Н. Е. Жуковский защитил магистерскую диссертацию «Кинематика жидкого тела». За исследование «О прочности движения» ему была присуждена степень доктора прикладной математики (1882).

С 1885 года Н. Е. Жуковский преподавал теоретическую механику в Московском университете. В МВТУ и Московском университете ученый работал до конца жизни.

В 1902 году под руководством Н. Е. Жуковского при механическом кабинете Московского университета была сооружена одна из первых в Европе аэродинамических труб. В 1904 году под его руководством в подмосковном поселке Кучино (ныне микрорайон города Железнодорожный) был создан первый в Европе аэродинамический институт. В том же году Н. Е. Жуковский организовал воздухоплавательную секцию в обществе любителей естествознания, антропологии и этнографии. В 1910 году при его непосредственном участии в МВТУ была открыта аэродинамическая лаборатория.

В 1910 – 1912 годах Н. Е. Жуковский прочитал в МВТУ курс лекций «Теоретические основы воздухоплавания», в котором были систематизированы теоретические работы самого ученого, его ученика С.А. Чаплыгина, а также экспериментальные исследования аэродинамических лабораторий Московского университета, МВТУ и зарубежных лабораторий. С 1913 года Н. Е. Жуковский преподавал на курсах офицеров-летчиков при МВТУ. Там же было создано авиационное расчетно-испытательное бюро, в котором под руководством ученого разрабатывались методы аэродинамического и прочностного расчета самолетных конструкций. Во время первой мировой войны 1914 – 1918 годов Н. Е. Жуковский разрабатывал теорию бомбометания, занимался вопросами баллистики артиллерийских снарядов, читал курс по баллистике, воздухоплаванию, специальным вопросам гидромеханики.

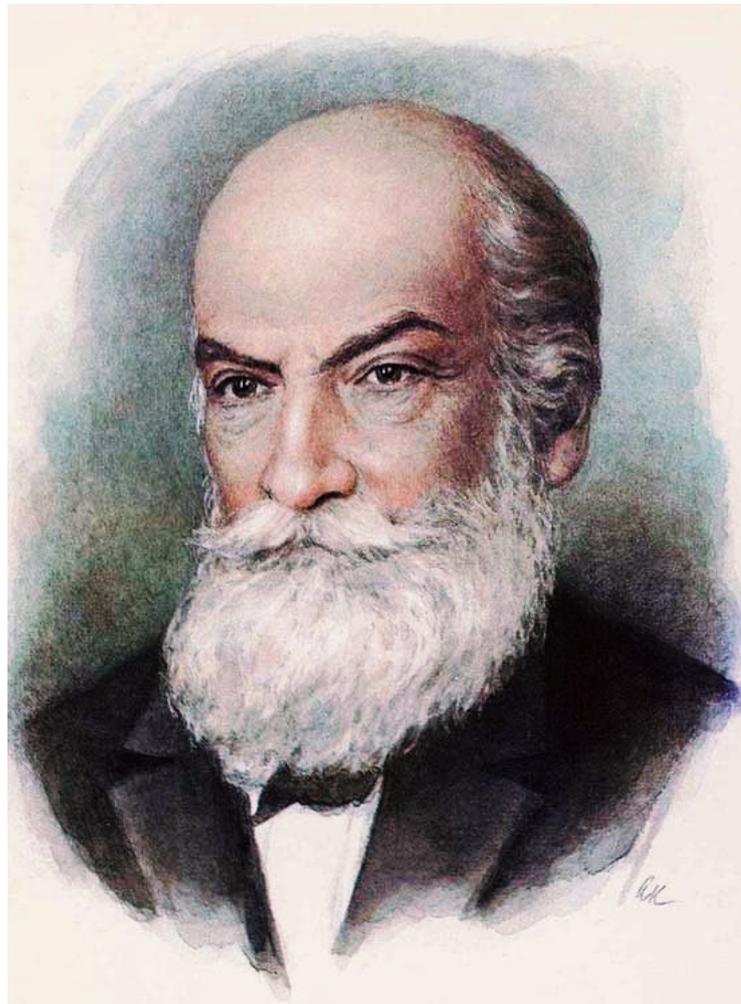


Рис. 3.34. Н. Е. Жуковский (1847 – 1921) – русский учёный-механик, основоположник гидро- и аэродинамики

После Октябрьской революции 1917 года Н. Е. Жуковский и руководимый им коллектив ученых включились в дело создания советской авиации. В декабре 1918 года по предложению ученого был создан Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), руководителем которого он был назначен. Основанные Н. Е. Жуковским теоретические курсы для военных летчиков были реорганизованы в Московский авиационный техникум, на базе которого в 1920 году был создан институт инженеров Красного воздушного флота (с 1922 года – Военно-воздушная инженерная академия им. Н. Е. Жуковского).

Н. Е. Жуковский создал единую научную дисциплину – экспериментальную и теоретическую аэродинамику, развитие которой неразрывно связано с прогрессом самолетостроения. Он является автором многочисленных оригинальных исследований в области механики твердого тела, астрономии, математики, гидродинамики и гидравлики, прикладной механики, теории регулирования машин и др. Для работ Н. Е. Жуковского

характерно сочетание глубоких теоретических изысканий с инженерным подходом к решению технических задач. Он был также автором классических учебников по теоретической механике для университетов и технических вузов.

**Павел Дмитриевич Кузьминский** (20 июня 1840 г. ст. Усть-Лабинская, Херсонская губерния – 7 апреля 1900 г. Санкт-Петербург) – русский инженер, изобретатель газовой турбины (рис. 3.35).

Павел Кузьминский окончил в 1864 году Морской корпус в Санкт-Петербурге, служил на флоте до 1884 года, был корабельным инженером-механиком, старшим механиком Болгарской флотилии.



Им была разработана новая форма судового корпуса с тетраэдровидной подводной частью. Шлюпка, построенная в 1881 году по данному проекту, показала хорошую маневренность и увеличенную скорость движения.

В 1881 – 1884 гг. Кузьминский изобрёл и сконструировал гидравлический динамометр.

В 1887 – 1892 гг. П. Д. Кузьминский сконструировал и построил *первую в мире газовую реверсивную турбину радиального типа с 10 ступенями давления.*

Рис. 3.35. П. Д. Кузьминский (1840 – 1900) – крупный русский инженер, изобретатель газовой турбины.

Там же, в Болгарии, преподавал механику в земледельческом училище «Образцов чифлик» в Русе (1886 – 1888). Основоположник и первый распорядитель морской библиотеки и Военно-морского музея в Русе (1884). Учредитель первого Болгарского технического общества (Русе, май 1885) и автор его устава. Работал на Балтийском судостроительном заводе до 1894

года. Был одним из организаторов создания воздухоплавательного отдела Русского технического общества.

В 1895 году Кузьминский предложил вариант газовой турбины более простой конструкции. Этот проект был осуществлен в 1897 году на Петербургском патронном заводе.

П. Д. Кузьминский занимался вопросами механики корабля, теплотехники, гидромеханики, воздухоплавания. В 1880 – 1882 гг. П. Д. Кузьминский совместно с Д. И. Менделеевым занимались изучением законов вязкого трения. В области теплотехники он доказал эффективность сжатия рабочей смеси для двигателей внутреннего сгорания (1862), предлагал использовать комплексные силовые установки с несколькими рабочими телами как наиболее выгодными (1862), предложил к использованию в котлах пылеугольное топливо (1865).

Турбина работала на парогазовой смеси, получаемой в созданной им в 1894 году камере сгорания.

В 1893 году совместно с инженером Н. Ф. Пашиным Кузьминский работал над проектом *прямоточного котла с принудительной циркуляцией и сепаратором пара*.

В области воздухоплавания им было создано несколько проектов аппаратов тяжелее воздуха.

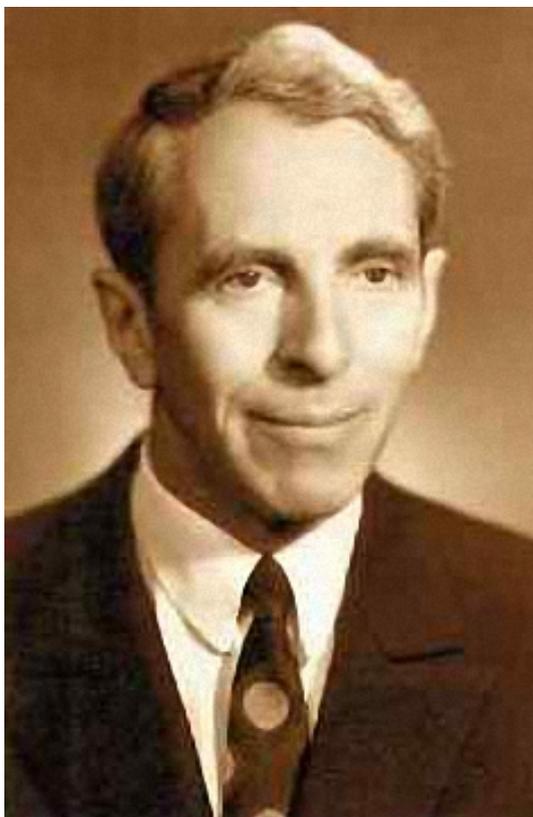
Одним из основных элементов газотурбинных установок (ГТУ) является компрессор. Большой вклад в становление и развитие отечественного компрессоростроения внесли выдающиеся советские ученые **В. Ф. Рис** и **А. П. Гофлин**.

**Владимир Федорович Рис** (28 сентября 1907 г. – 10 мая 1991 г.) – крупный советский учёный, специалист в области центробежных компрессорных машин, доктор технических наук, профессор, лауреат Ленинской и государственных премий СССР (рис. 3.36).

С 1931 года В.Ф. Рис работал на ЛМЗ – Ленинградском металлическом заводе и с 1933 года в Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина, затем переведён на Невский машиностроительный завод им. В. И. Ленина для организации проектирования и производства компрессоров, одновременно продолжал преподавать в ЛПИ.

В годы Великой Отечественной войны занимался пуском и наладкой

центробежных компрессорных машин на Урале. В 1944 году вернулся в Ленинград. До конца 1960-х гг. занимал должность главного конструктора по компрессоростроению Невского машиностроительного завода им. В. И. Ленина. Под его руководством создано более 200 различных типов машин для многих отраслей промышленности.



В.Ф. Рис является автором более 10 монографий по расчету и проектированию центробежных компрессорных машин.

Спроектированные под руководством В.Ф. Риса и выпущенные Невским машиностроительным заводом отечественные центробежные компрессоры по своим техническим характеристикам превосходили в 1960 – 1980-е годы все зарубежные аналоги.

Рис. 3.36. В. Ф. Рис (1907 – 1991) – крупный советский учёный, специалист в области компрессоростроения, доктор техн. наук, профессор лауреат Ленинской и государственной премий СССР

За достижения в становлении отечественного центробежного компрессоростроения В. Ф. Рису присуждена:

- Сталинская премия 1949 года – за создание отечественных конструкций мощных турбомашин для металлургической промышленности.
- Ленинская премия 1965 года – за создание и внедрение в народное хозяйство газотурбинного агрегата ГТ-700-5 с нагнетателем 280-12.

**Александр Петрович Гофлин** (25 апреля 1914 г. – 11 октября 1996 г.) – крупный советский учёный, специалист в области осевых компрессорных машин, доктор технических наук, профессор, участник Великой отечественной войны (рис. 3.37).

Александр Петрович Гофлин родился 25 апреля 1914 года в г. Симферополе в семье врача.

После окончания школы работал на заводе «Углерод» слесарем-машинистом в г. Симферополе

В 1932 – 1938 гг. обучался в Ленинградском политехническом институте. Одновременно с 1936 года работал на заводе «Экономайзер» инженером-конструктором. После окончания института был оставлен в аспирантуре и в 1941 году подготовил к защите кандидатскую диссертацию.

Когда началась Великая отечественная война, на второй день А. П. Гофлин ушел добровольцем на фронт. Все четыре года войны гвардии майор А.П. Гофлин был на передовой.

В составе 322 Гвардейского минометного полка 9 Гвардейской армии в должности начальника штаба участвовал в прорыве и снятии блокады Ленинграда, освобождал, Прибалтику, Прагу, Будапешт, Вену.

После Победы и демобилизации в ноябре 1945 года А. П. Гофлин возвращается в Ленинград и начинает работу в Центральном котлотурбинном институте им. И. И. Ползунова. В 1947 году А. П. Гофлин защищает заново подготовленную кандидатскую диссертацию и создает лабораторию турбокомпрессорных машин, где занимается разработкой теории расчета осевых компрессоров для ГТУ. В 1963 году на основании разработанной теории модельных осевых компрессорных ступеней А. П. Гофлин защищает докторскую диссертацию.

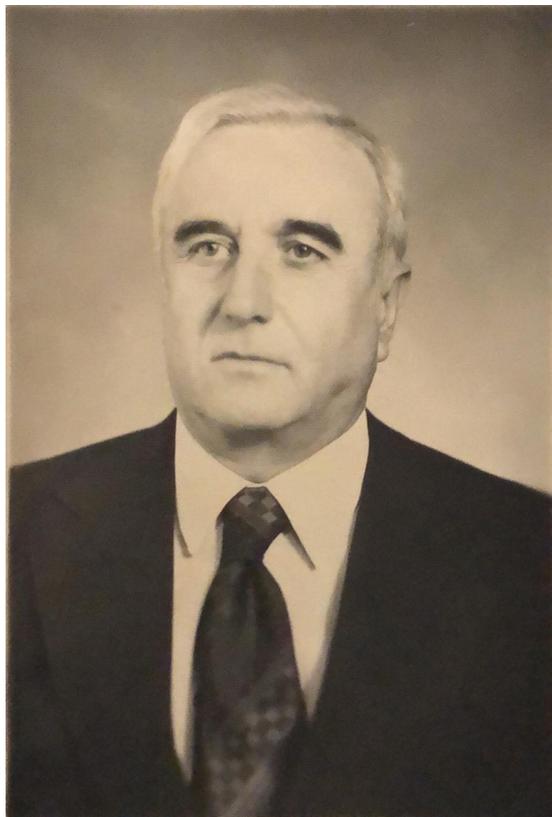


Рис. 3.37. А. П. Гофлин (1914 – 1996) – крупный советский учёный, специалист в области осевых компрессорных машин, доктор техн. наук, профессор

В течение 25 лет под руководством доктора технических наук, профессора А. П. Гофлина были разработаны все выпускавшиеся в СССР осевые компрессорные машины для стационарных газотурбинных установок, газоперекачивающих станций и других отраслей народного хозяйства. В 1960 – 1970-е годы отечественные осевые компрессоры по своим техническим характеристикам превосходили все зарубежные аналоги.

С 1969 по 1996 год доктор технических наук, профессор А. П. Гофлин возглавлял кафедру теплосиловых установок и тепловых двигателей Ленинградского технологического института целлюлозно-бумажной промышленности (ныне СПб ГУПТД) – *в нашем ВУЗе*.

А. П. Гофлин был автором более 160 научных трудов, в том числе учебника «Аэродинамический расчет проточной части осевых компрессоров для стационарных установок» и соавтором двух монографий – «Судовые компрессорные машины» и «Теплотехника целлюлозно-бумажного производства».

Он награжден орденами и медалями СССР как участник Великой Отечественной войны, прошедший всю войну, за работу в высшей школе – нагрудным знаком «За отличные успехи в области высшего образования». Им подготовлено большое количество инженеров, кандидатов и докторов наук – специалистов в области теплоэнергетики.

### *Аддитивные технологии*

Аддитивные технологии (Additive Manufacturing – от слова аддитивность – прибавляемый) – это послойное наращивание и синтез объекта с помощью компьютерных 3d технологий. Изобретение принадлежит Чарльзу Халлу, в 1986 году сконструировавшему первый стереолитографический трехмерный принтер.

Что значит аддитивный процесс послойного создания модели и как он происходит? В современной промышленности это несколько разных процессов, в результате которых моделируется 3d объект:

- UV-облучение;
- экструзия;
- струйное напыление;
- сплавление;
- ламинирование.

Материалы, используемые в аддитивных технологиях:

- воск;
- гипсовый порошок;
- жидкие фотополимеры;
- металлические порошки;
- разного рода полиамиды;
- полистирол.

### ***Применение аддитивных технологий***

Технологический прогресс способствует производству множества полезных вещей для быта, здоровья и безопасности человека, например аддитивные технологии в авиастроении помогают создавать более высокоэкономичный и легкий по весу авиатранспорт, при этом его аэродинамические свойства сохраняются в полном объеме. Это стало возможным в результате применения принципов строения костей птичьего крыла в проектировании крыльев самолета.

Другие сферы применения аддитивных технологий:

- строительство;
- сельскохозяйственная промышленность;
- машиностроение;
- судостроение;
- космонавтика;
- медицина и фармакология.

### ***Аддитивные 3d технологии***

Динамически развивающиеся быстрыми темпами аддитивные технологии 3d печати используются в прогрессивных производствах. Существует несколько инновационных видов аддитивных технологий:

1. FDM (Fused deposition modeling) – изделие формируется послойно из расплавленной пластиковой нити.
2. CJP (ColorJet printing) – единственная в мире 3d полноцветная печать с принципом склеивания порошка, состоящего из гипса.
3. SLS (Selective Laser Sintering) – технология лазерного запекания, при которой образуются особо прочные объекты любых размеров (рис. 3. 38).
4. MJM (MultiJet Modeling) многоструйное 3d моделирование с использованием фотополимеров и воска.

5. SLA (Laser Stereolithography) – с помощью лазера происходит послойное отвердевание жидкого полимера.



Рис. 3.38. Лопатки ГТУ, выполненные по аддитивной технологии

### *Аддитивные технологии в машиностроении*

В настоящее время бурными темпами идет процесс развития монокристаллического литья лопаток из жаропрочных сплавов, сплавов с композиционной структурой, создания промышленного оборудования для осуществления процесса направленной кристаллизации, а также развития систем охлаждения лопаток путем создания сложных внутренних полостей. Решаются проблемы, связанные с получением лопаток с проникающей системой охлаждения *по аддитивной технологии*.

## **3.5. Парогазовые установки**

Из термодинамики известно, что повышение КПД цикла теплового двигателя происходит при повышении температуры подвода тепла и при понижении температуры отвода тепла из цикла [2].

В ГТУ подвод тепла происходит в камере сгорания в процессе горения топлива. Температура образующихся продуктов сгорания, которые являются рабочей средой газовой турбины, не ограничивается стенкой (как в парогенераторе), через которую необходимо передавать тепло, и достигает уровня **1200 – 1435 °С**.

КПД современных ГТУ достигает 40 %.

В паросиловых установках (ПСУ) температура подвода тепла с перегретым паром не может превышать допустимую для металла труб котельных пароперегревателей и таких неохлаждаемых узлов, как паропроводы, коллекторы, арматура, она составляет сейчас **540 – 565 °С**. Зато отвод тепла в конденсаторах паровых турбин осуществляется циркуляционной водой при температурах, близких к температуре окружающей среды **28 – 30 °С**.

КПД современных ПСУ достигает 42 – 44 %.

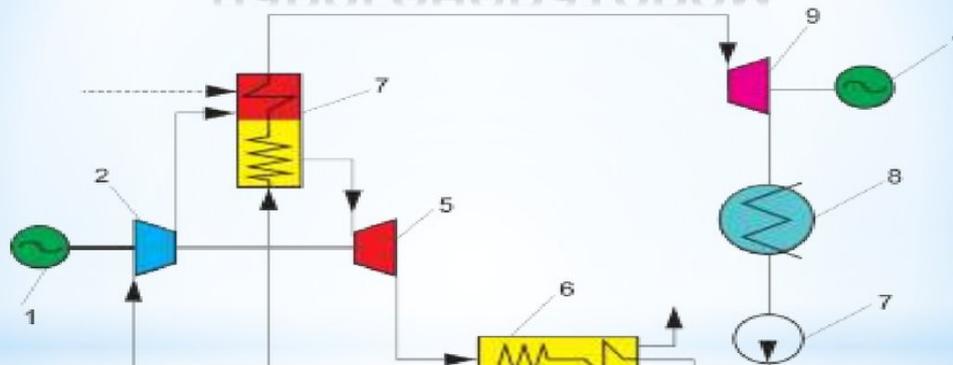
Указанные особенности ГТУ и ПСУ позволяют существенно повысить КПД производства электроэнергии путем *объединения* в одной парогазовой установке (ПГУ) высокотемпературного подвода тепла (в ГТУ) и низкотемпературного отвода тепла (в конденсаторе паровой турбины). Для этого отработавшие в турбине газы подаются в котел-утилизатор, где генерируется и перегревается пар, поступающий затем в паровую турбину. Вращаемый ею электрический генератор при неизменном расходе топлива в камере сгорания ГТУ увеличивает выработку электроэнергии в 1,5 раза.

Созданная на основе самых высокоэффективных ГТУ и ПСУ современная ПГУ имеет КПД **60 %**. Ближайшей и реальной перспективой является получение КПД ПГУ 65 % и более.

Среди различных вариантов ПГУ наибольшее распространение получили следующие схемы:

- ПГУ с высоконапорным парогенератором (ВПП) (рис. 3.39);
- ПГУ со сбросом газов от турбины в топку парового котла (рис. 3.40);
- ПГУ с утилизационным паровым котлом (УПК) (рис. 3.41).

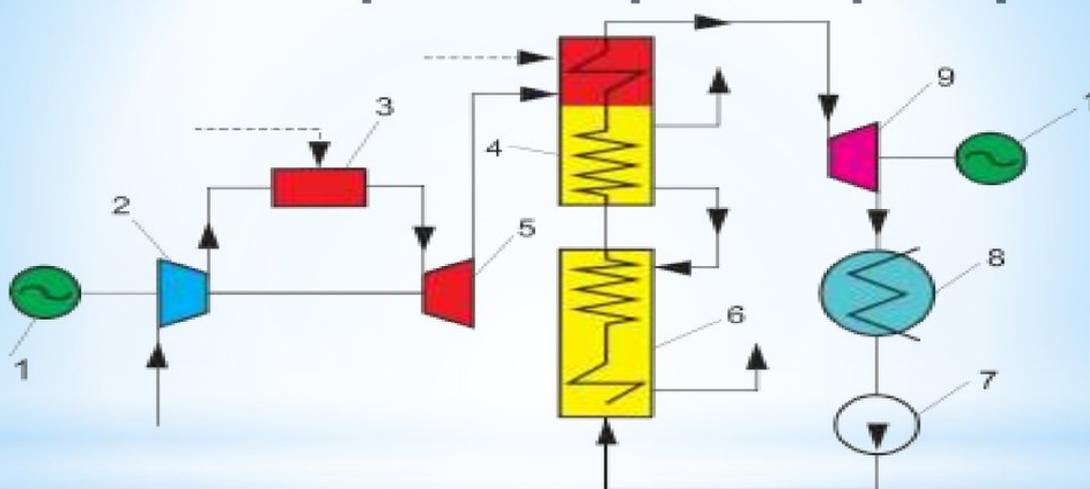
## \* Парогазовые установки с высоконапорным парогенератором



1 - электрогенератор; 2 - компрессор; 3 - камера сгорания; 4 - высоконапорный парогенератор; 5 - газовая турбина; 6 - газовойодяной подогреватель; 7 - насос; 8 - конденсатор; 9 - паровая турбина; ----- топливо

Рис. 3.39. Схема ПГУ с ВПГ

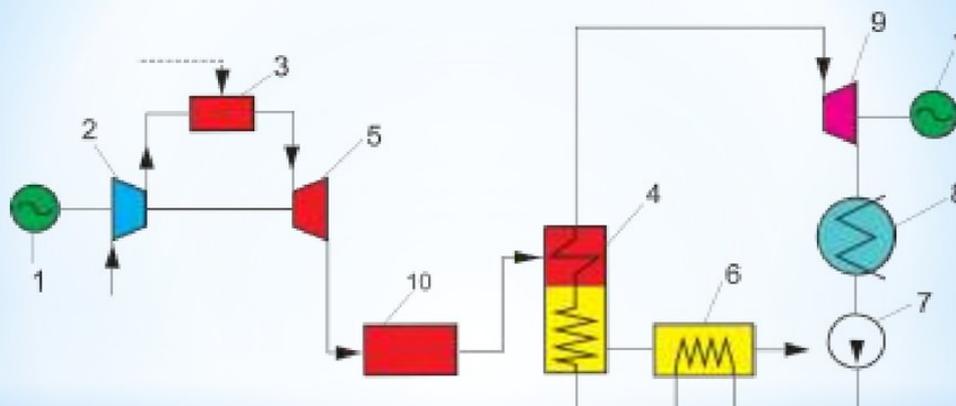
## \* Парогазовые установки с низконапорным парогенератором



1 - электрогенератор; 2 - компрессор; 3 - камера сгорания; 4 - низконапорный парогенератор; 5 - газовая турбина; 6 - газовойодяной подогреватель; 7 - насос; 8 - конденсатор; 9 - паровая турбина; ---- топливо

Рис. 3.40. Схема ПГУ с НПГ

## \* Парогазовые установки с котлом-утилизатором



1 - электрогенератор; 2 - компрессор; 3 - камера сгорания; 4 - котел-утилизатор; 5 - газовая турбина; 6 - резервуар питательной воды; 7 - питательный насос; 8 - конденсатор; 9 - паровая турбина; 10 - камера дожигания топлива; ---- топливо

Рис. 3.41. Схема ПГУ с КУ

### *Преимущества ПГУ:*

- Парогазовые установки позволяют достичь электрического КПД более **60 %**. Для сравнения, у работающих отдельно паросиловых установок КПД обычно находится в пределах 33 – 44 %, для газотурбинных установок – в диапазоне 28 – 40 %
- Низкая стоимость единицы установленной мощности.
- Парогазовые установки потребляют существенно меньше воды на единицу вырабатываемой электроэнергии по сравнению с паросиловыми установками.
- Короткие сроки возведения (9 – 12 мес.)
- Нет необходимости в постоянном подвозе топлива железнодорожным или морским транспортом.
- Компактные размеры позволяют возводить непосредственно у потребителя (завода или внутри города), что сокращает затраты на ЛЭП и транспортировку электроэнергии.
- Более экологически чистые в сравнении с паротурбинными установками.

### ***Недостатки ПГУ:***

- Низкая единичная мощность оборудования (160 – 972 МВт на 1 блок), в то время как современные ТЭС имеют мощность блока до 1200 МВт, а АЭС 1200 – 1900 МВт.
- Необходимость осуществлять фильтрацию воздуха, используемого для сжигания топлива.
- Ограничения на типы используемого топлива. Как правило, в качестве основного топлива используется природный газ, а резервного – мазут. Применения угля в качестве топлива абсолютно исключено. Отсюда вытекает необходимость строительства недешевых коммуникаций транспортировки топлива – трубопроводов.
- Сезонные ограничения мощности. Максимальная производительность в зимнее время.

Идея создания парогазовых установок, использующих в качестве рабочих тел продукты сгорания топлива и водяной пар (бинарные установки), впервые была высказана французским ученым Карно еще в 1824 году в его работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Карно предложил схему поршневой парогазовой установки и обосновал основное условие создания эффективных парогазовых установок – использование продуктов сгорания топлива в качестве рабочего тела в области высоких температур с одновременной утилизацией отбросного тепла газов для получения рабочего пара. По мере развития паровых и газовых турбин оказалось возможным практическое осуществление этой идеи гениального ученого, более чем на столетие вперед определившего основные пути развития парогазовых тепловых двигателей.

Первые бинарные парогазовые установки появились в Германии. В 1913 – 1917 гг. Хольцварт осуществил ПГУ на базе ГТУ с пульсирующей камерой сгорания. КПД её не превышал 14 %.

В 1932 году фирма «Броун-Бовери» разработали высоконапорный парогенератор «Велокс» в топку которого воздух подавался осевым компрессором, приводом которого служила осевая газовая турбина.

В России исследования комбинированных термодинамических циклов выполнены в ЦКТИ 1934 – 1940 гг. и продолжены в послевоенные годы.

В 1944 – 1945 гг. в ЦКТИ **А. Н. Ложкин** разработал схему парогазовой установки со сгоранием топлива при постоянном давлении.

Начатые в ЦКТИ термодинамические исследования циклов ПГУ получили развитие в работах Одесского политехнического института

(проф. Д. П. Гохштейн), Саратовского политехнического института (проф. А. И. Андрющенко), Ленинградского политехнического института (проф. И. И. Кириллова и В.А. Зысина), ЭНИНа, ВТИ и др.

На базе разработанных ЦКТИ схем и основного нестандартного оборудования парогазовых установок в Советском союзе были, частности, построены и введены в эксплуатацию парогазовые установки:

- 1966 – 1970 гг., Ленинград, Блок-ТЭЦ № 6, 3 блока ПГУ с ВПГ мощностью 16,5 МВт, ( $\eta = 35,5 \%$ ) на базе ГТ-700-4-1М с начальной температурой газов 700 °С;

- 1972 год, Невинномысск, Невинномысская ГРЭС, ПГУ с ВПГ мощностью 200 МВт, ( $\eta = 43 \%$ ) на базе ГТ-35 с начальной температурой газов 770 °С производства Харьковского турбинного завода.

За эти годы в мировом газотурбостроении сменилось несколько поколений агрегатов. Начальная температура газа выросла с 800 – 850 °С до 1200 – 1435 °С. В результате этого была преодолена граница ( $\approx 1100$  °С), за которой наиболее эффективным типом парогазовой установки становится не ПГУ с ВПГ или НПГ, а ПГУ с котлом-утилизатором (КУ).

С появлением на Российском рынке мощных газотурбинных установок ускорились работы по использованию схем и установок с котлами-утилизаторами. В частности, в 2000 – 2001 гг. разработан проект ПГУ-450Т для Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга. Реализация проекта строительства Северо-Западной ТЭЦ началась в 1993 году. На Северо-Западной ТЭЦ устанавливаются 4 парогазовых блока ПГУ-450Т. В состав каждого блока входят:

- две газовые турбины V-94.2 фирмы Siemens мощностью по 150 МВт;
- два котла-утилизатора П-90 АО «Подольский машиностроительный завод» (новая разработка);
- одна теплофикационная паровая турбина Т-150-7,7 ОАО «ЛМЗ» мощностью 150 МВт (новая разработка);
- три генератора с воздушным охлаждением ТФГ (П)-160-2УЗ АО «Электросила» мощностью 160 МВт (новая разработка).

Основоположниками становления парогазотурбостроения в нашей стране являются **А. Н. Ложкин, С. А. Христианович, А. И. Андрющенко, И. И. Кириллов, В. А. Зысин** и др.

Схему парогазовой установки со сгоранием топлива при постоянном давлении в 1945 году в ЦКТИ им. И. И. Ползунова разработал крупнейший советский ученый **Александр Николаевич Ложкин** (рис. 3.42). Предложенные технологии были настоящим прорывом и значительно улучшали рабочие и эксплуатационные характеристики энергоблоков (увеличение КПД), сокращали расход топлива на 30 %, на треть снижали уровень вредных выбросов в атмосферу.



Рис. 3. 42. А.Н. Ложкин – один из основоположников парогазотурбостроения, доктор техн. наук, профессор. Родился 25 июля 1903 года в г. Суздаль

В 1960 – 1970 годы совместно с ЦКТИ им. И.И. Ползунова на базе разработанных А.Н. Ложкиным схем был построен ряд опытных парогазовых установок, подтвердивших эффективность парогазового цикла.

Первая ПГУ с ВПГ мощностью 6,5 МВт ( $\eta = 29,1 \%$ ) на базе ГТУ-1,5 с начальной температурой газов 720 °С была введена в действие на 1-й ТЭЦ в Ленинграде в 1963 году.

**Сергей Алексеевич Христианович** (27 октября (9 ноября) 1908 г., Санкт-Петербург – 28 апреля 2000 г., Москва) – советский и российский учёный в области механики. Академик АН СССР (1943). Член ВКП(б) с 1949 года, Герой Социалистического Труда. Лауреат трёх Сталинских премий (рис. 3.43).

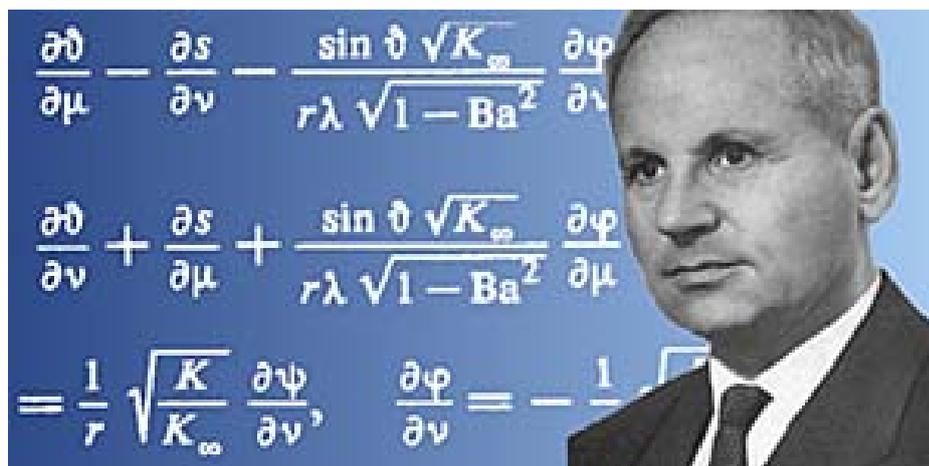


Рис. 3.43. С.А. Христианович (1908 – 2000) – один из основоположников парогазотурбостроения. Академик АН СССР

С.А. Христианович – один из создателей Сибирского отделения АН СССР и Новосибирского университета, где он – руководитель кафедры аэродинамики и профессор (до 1965 года). Ему удалось создать современный академический институт – ИТПМ СОАН – со многими научными направлениями: аэродинамика больших скоростей, магнитная гидродинамика, механика горных пород, энергетические установки, удалось сформировать коллектив единомышленников. Под его руководством (1957 – 1965) была создана мощная экспериментальная база, построены *турбокомпрессорная станция и сверхзвуковая труба. Главной же стала работа над проектом парогазовой установки (ПГУ), которая явилась основой экологически безопасных тепловых электростанций с турбинами на природном газе и технологией внутрицикловой газификации высокосернистых зольных топлив (в первую очередь мазутов) как средства обеспечения «чистым топливом» и предотвращения вредных выбросов в атмосферу. Эти предложения для того времени были существенно новыми.*

В 2017 г. на Пермской ГРЭС был введен в эксплуатацию четвертый **парогазовый** энергоблок установленной мощностью **861 МВт** - это **крупнейшая парогазовая установка в России.**

Мощность станции возросла на треть – до **3261 МВт**, благодаря чему Пермская ГРЭС вошла в пятерку крупнейших теплоэлектростанций России. В период с 1986 по 1990 годы было введено в эксплуатацию три паросиловых энергоблока с турбинами К-800-240, суммарной мощностью 2400 МВт. Пермская ГРЭС (рис. 3.44) – единственная в России электростанция на газовом топливе, все энергоблоки которой имеют мощность по 800 МВт.



Рис. 3.44. Машинный зал Пермской ГРЭС

Новый энергоблок Пермской ГРЭС – крупнейший в России, построенный в тепловой генерации в последнее десятилетие (рис. 3.45).

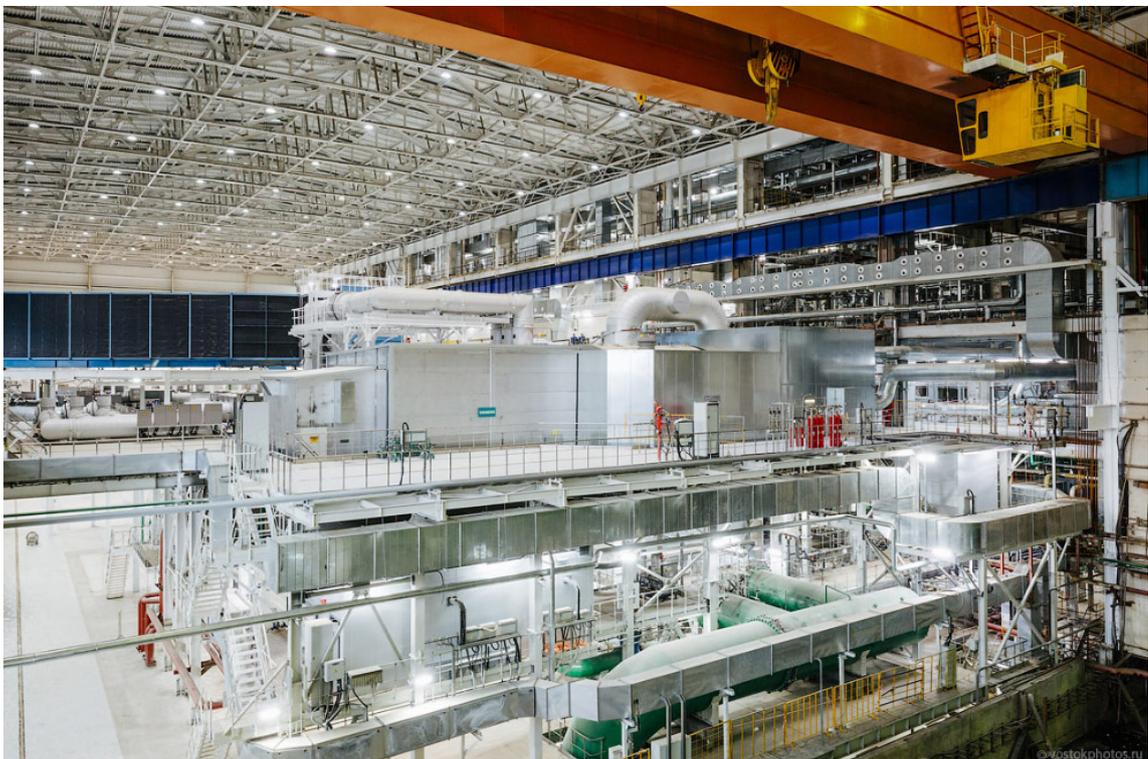


Рис. 3.45. Новый парогазовый (ПГУ) энергоблок Пермской ГРЭС

**Удельный расход топлива составляет 215 г/кВт·ч**, что является одним из наиболее экономичных показателей среди тепловых электростанций страны и почти в 1,5 раза меньше чем на действующих энергоблоках Пермской ГРЭС первой очереди.

**КПД нового парогазового энергоблока 57 %** – один из самых высоких показателей в российской теплоэнергетике.

### **3.6. Двигатели внутреннего сгорания и газопоршневые электростанции**

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – это разновидность теплового двигателя, в котором топливо сгорает непосредственно в рабочей камере (внутри) двигателя. Тем самым, топливная смесь и является рабочим телом таких двигателей. Такой двигатель является химическим и преобразует энергию сгорания топлива в механическую работу.

Тепловые машины (в основном, паровые) с момента появления отличались большими габаритами и массой, обусловленными применением внешнего сгорания (требовались котлы, конденсаторы, испарители, теплообменники, тендеры, насосы, водяные резервуары и др.), в то же время основная (функциональная) часть паровой машины (поршень и цилиндр) сравнительно невелика. Поэтому ученые всё время возвращались к возможности совмещения топлива с рабочим телом двигателя, позволившего затем значительно уменьшить габариты и вес, интенсифицировать процессы впуска и выпуска рабочего тела. ДВС развивались с отставанием от паровых машин, обусловленным отсутствием подходящего горючего. Появление разнообразных мощных и лёгких ДВС позволило создать новые виды транспорта (винтовые и реактивные самолёты, вертолёт, ракета, космический корабль), улучшить экономичность и экологичность корабельных силовых установок и локомотивов. Моторизация привела также к ускорению темпа жизни людей, возникновению целой автомобильной культуры (США); в военном деле дало возможность создать необычайно разрушительные машины (танк, истребитель, бомбардировщик, ракеты с обычной и ядерной боеголовкой, подводные лодки и другие).

*Классификация ДВС по устройству:*

1. Поршневые двигатели (рис. 3.46), где камерой сгорания служит цилиндр, а возвратно-поступательное движение поршня с помощью кривошипно-шатунного механизма преобразуется во вращение вала.

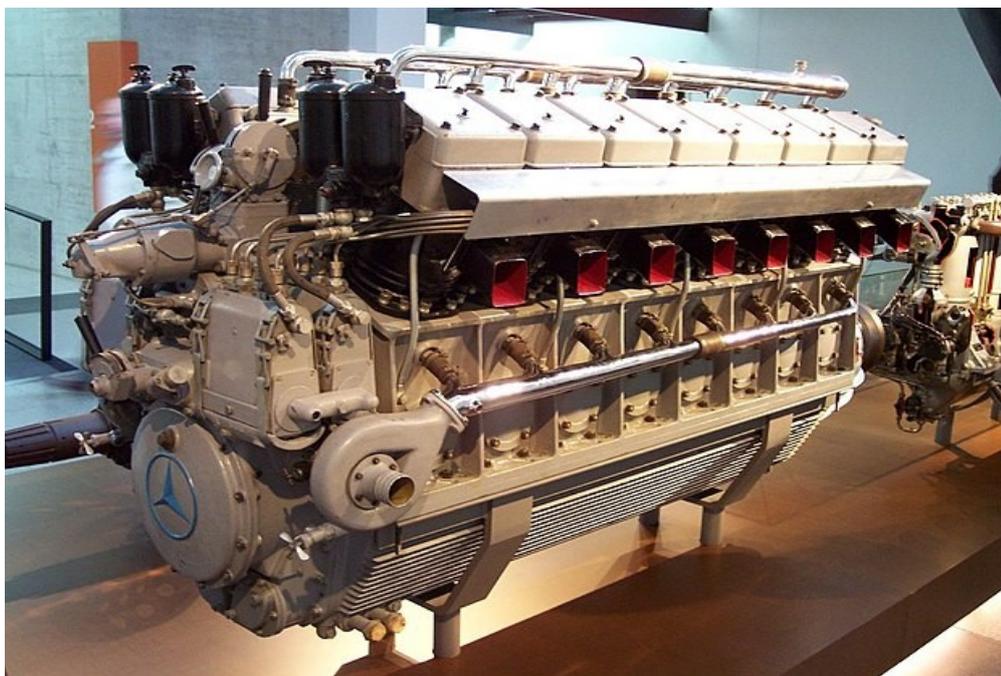


Рис. 3.46. Поршневой ДВС

2. Газотурбинные двигатели, где преобразование энергии осуществляется ротором с лопатками крыловидного профиля (рис. 3.47).

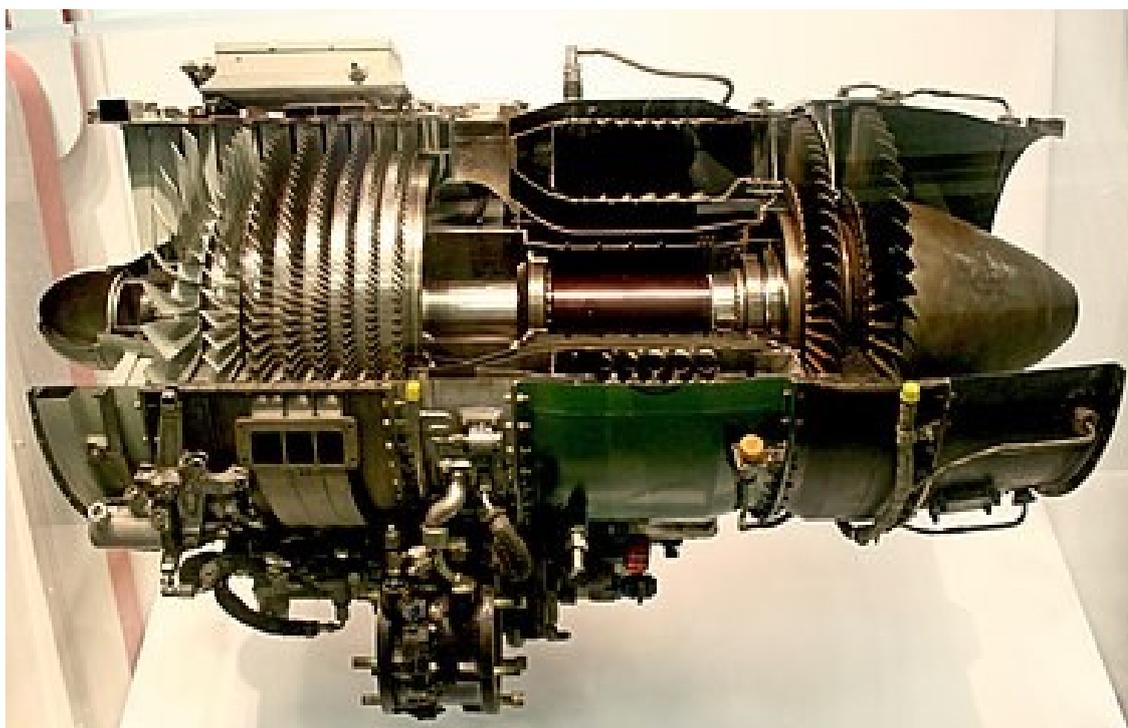


Рис. 3.47. Газотурбинный ДВС

3. Роторно-поршневые двигатели (рис. 3.48), в которых преобразование энергии осуществляется за счёт вращения рабочими газами ротора специального профиля.

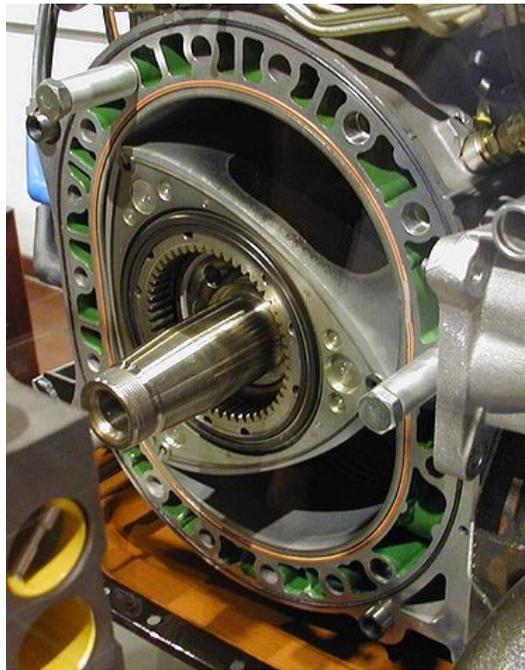


Рис. 3.48. Роторно-поршневой двигатель в разрезе с ротором в форме треугольника Рёло

4. Реактивные двигатели (рис. 3.49), где развиваемая двигателем мощность сразу используется для поступательного движения ракеты или самолёта, а дополнительное преобразование в крутящий момент и трансмиссия отсутствуют (двигатель является движителем).

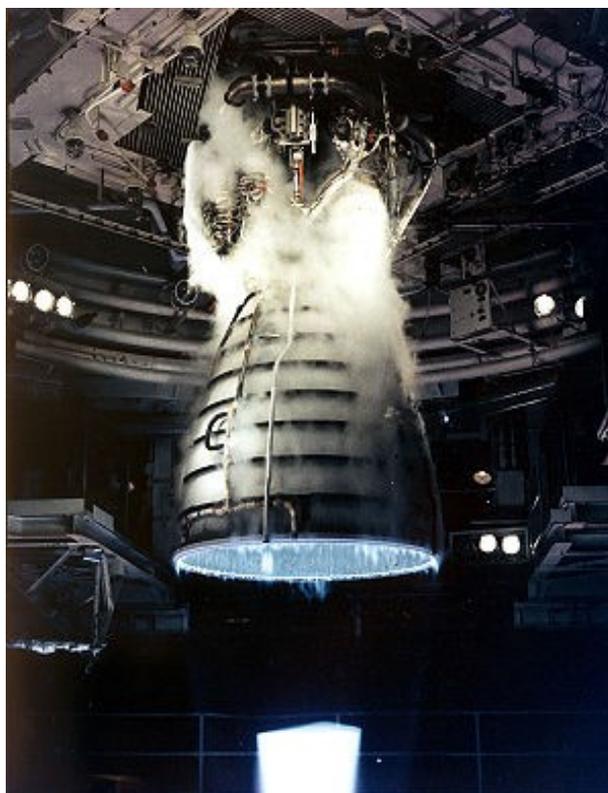


Рис. 3.49. Испытания реактивного двигателя

В 1876 году немецкий изобретатель **Отто Николаус Август** осуществил цикл двигателя внутреннего сгорания, который работал по четырёхтактной схеме: впуск, сжатие *топливной смеси*, *воспламенение ее от искры* и рабочий ход, выпуск отработанных газов (рис. 3.50).

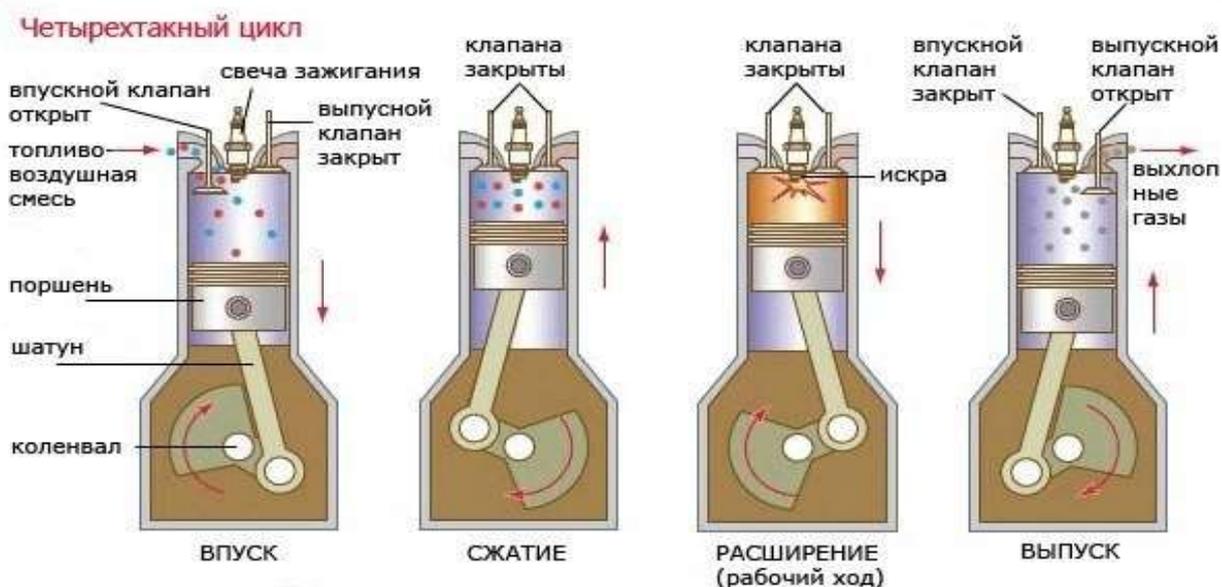


Рис. 3.50. Цикл четырехтактного бензинового ДВС со сжатием топливо-воздушной смеси



Рис. 3. 51. Николаус Август Отто (1832 – 1891) – немецкий изобретатель четырехтактного бензинового ДВС со сжатием топливо-воздушной смеси

**Николаус Август Отто** (рис. 3.51) родился в 1832 году в немецком городе Хольцхаузен-ан-дер-Хайде.

В 1848 году, после окончания реального училища занялся коммерческой деятельностью. В 1876 году Отто смог реализовать свою идею двигателя с четырехтактным циклом, и получил патент на него.

Именно модификации этого двигателя и получили наибольшее распространение. За более чем столетний период, который по справедливости именуют «автомобильной эрой», менялось все – формы, технологии, решения. Исчезали одни марки и взамен приходили другие. Несколько витков развития прошла автомобильная мода. Неизменным осталось одно – число тактов, по которым работает двигатель. И в истории автомобилестроения это число навсегда связано с именем немецкого изобретателя-самоучки Отто.

Другим выдающимся событием в истории ДВС было создание двигателя внутреннего сгорания с воспламенением топлива от сжатия. В 1892 году немецкий инженер **Рудольф Дизель** запатентовал, а в 1893 году описал в брошюре «Теория и конструкция рационального теплового двигателя для замены паровых машин и известных в настоящее время тепловых двигателей» двигатель, работающий по циклу Карно (рис. 3.52).

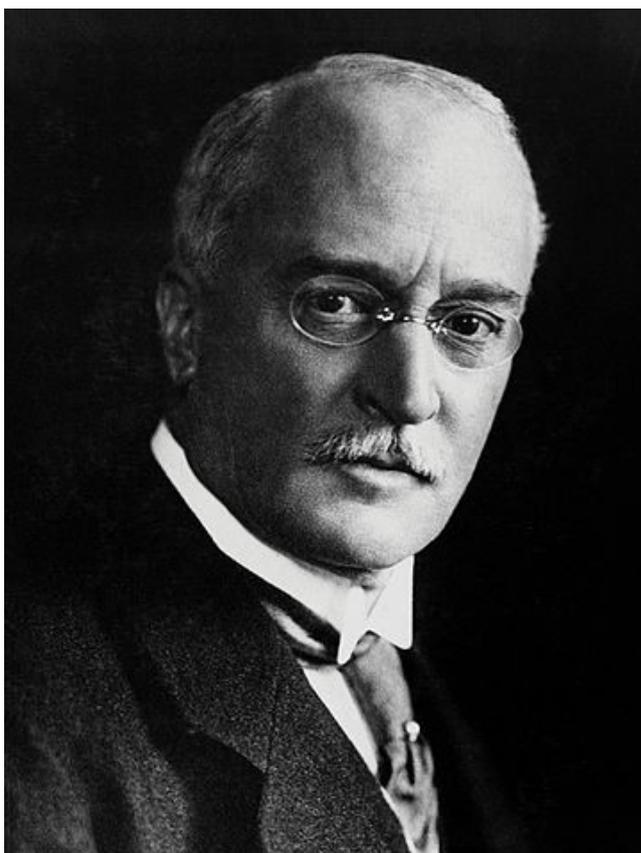


Рис. 3.52. Рудольф Дизель (1858 – 1913) – немецкий изобретатель четырехтактного ДВС со сжатием воздуха и самовоспламенением топлива, названного его именем

**Рудольф Кристиан Карл Дизель** родился в 1858 году в Париже. В 1871 году поступил на обучение в Королевское земское училище в Аугсбурге (Германия). После окончания училища в 1873 году с отличием, Рудольф поступает в только что открывшуюся Техническую школу в Аугсбурге. Спустя два года он получает стипендию в Королевском Баварском политехническом институте в Мюнхене.

В 1892 году Дизель подает заявку на получение патента на «новый рациональный тепловой двигатель», который и получает в императорском патентном бюро в Берлине в 1893 году под названием «Метод и аппарат для преобразования высокой температуры в работу».

В патенте Германии № 67207 с приоритетом от 28 февраля 1892 года «Рабочий процесс и способ выполнения одноцилиндрового и многоцилиндрового двигателя» принцип работы двигателя излагался следующим образом: *Рабочий процесс в двигателях внутреннего сгорания характеризуется тем, что поршень в цилиндре настолько сильно сжимает воздух или какой-нибудь индифферентный газ (пар) с воздухом, что получающаяся при этом температура сжатия находится значительно выше температуры воспламенения топлива. При этом сгорание постепенно вводимого после мертвой точки топлива совершается так, что в цилиндре двигателя не происходит существенного повышения давления и температуры. Вслед за этим, после прекращения подачи топлива, в цилиндре происходит дальнейшее расширение газовой смеси. Для осуществления рабочего процесса, описанного в п. 1, к рабочему цилиндру присоединяется многоступенчатый компрессор с ресивером. Равным образом возможно соединение нескольких рабочих цилиндров между собой или же с цилиндрами для предварительного сжатия и последующего расширения (рис. 3.53).*

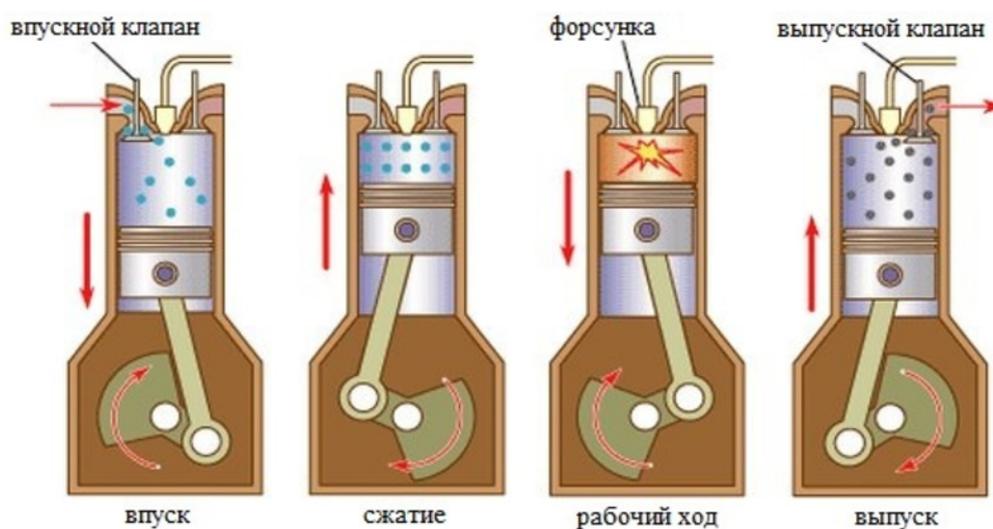


Рис. 3.53. Цикл четырехтактного дизельного ДВС со сжатием чистого воздуха

Первый двигатель Р. Дизель построил уже к июлю 1893 года. Предполагалось, что сжатие будет осуществляться до давления 3 МПа, температура воздуха в конце сжатия будет достигать 800 °С, а топливо (угольный порошок) – вводиться непосредственно в цилиндр. При запуске

первого двигателя произошел взрыв (в качестве топлива был использован бензин). В течение 1893 года было построено три двигателя. Неудачи с первыми двигателями вынудили Р. Дизеля отказаться от изотермического сгорания и перейти к циклу со сгоранием при постоянном давлении. В начале 1895 года был успешно испытан первый компрессорный двигатель с воспламенением от сжатия, работающий на жидком топливе (керосине), а в 1897 году начался период широких испытаний нового двигателя. Эффективный КПД двигателя составлял 25 %, механический КПД – 75 %. Первый двигатель внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия для промышленных целей был построен в 1897 году Аугсбургским машиностроительным заводом. На выставке в Мюнхене в 1899 году уже было представлено 5 двигателей Р.Дизеля заводами Отто-Дейтц, Круппа и Аугсбургского машиностроительного завода. Успешно демонстрировались двигатели Р. Дизеля и на Всемирной выставке в Париже (1900). В дальнейшем они нашли широкое применение и получили название «дизельные двигатели» или просто «дизели» (рис. 3.54).

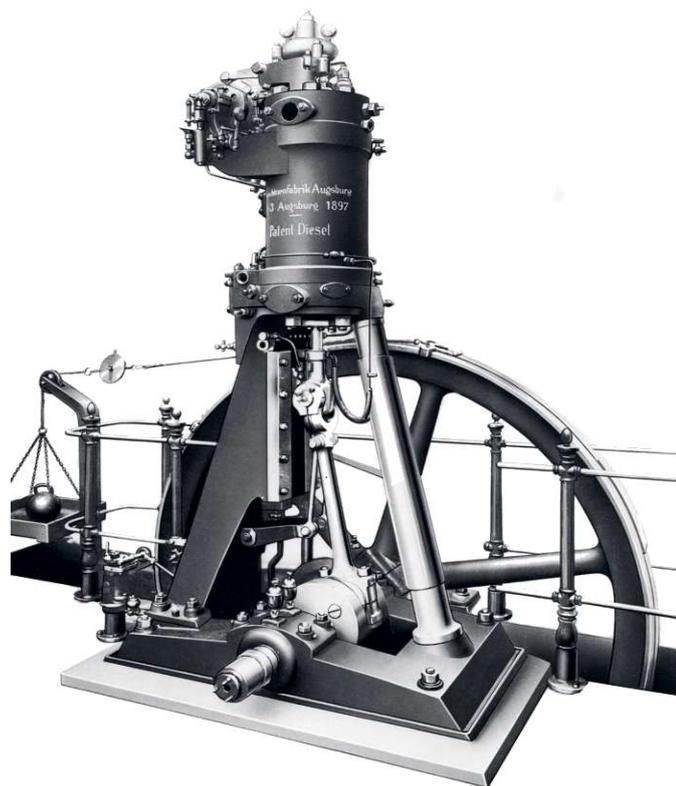


Рис. 3.54. ДВС Р. Дизеля

Так как температура сжатого воздуха достигала **600...650 °C**, **топливо самовоспламенялось**, и газы, расширяясь, двигали поршень. Таким образом, Дизелю удалось значительно повысить КПД двигателя. К тому же здесь не нужна была система зажигания, а вместо карбюратора работал топливный насос.

С 1893 года Р. Дизель вел разработки нового двигателя на Аугсбургском машиностроительном заводе (с 1904 года - MAN) при финансовом участии компаний Фридриха Круппа и братьев Зульцер. Первый функционирующий двигатель был создан Дизелем там же в 1897 году. Мощность двигателя составляла 20 лошадиных сил при 172 оборотах в минуту, КПД 26,2 % при весе 5 тонн. Это намного превосходило существующие двигатели Отто с КПД 20 % и судовые паровые турбины с КПД 12 %, что вызвало немедленный интерес промышленности. Двигатель Дизеля сразу же нашёл применение, был оценён во многих странах. Но у себя на родине Р. Дизель не нашёл признания и тяжело это переживал.

Точные обстоятельства смерти Рудольфа Дизеля не выяснены. 29 сентября 1913 года он отправился пароходом из Антверпена в Лондон, но во время плавания бесследно исчез.

В России первые керосиновые двигатели начали строиться в 1890 году на заводе Е. Я. Бромлея (четырёхтактные калоризаторные), а с 1892 года и на механическом заводе Э. Нобеля. В 1899 году Нобель получил право на производство двигателей Р. Дизеля и в том же году завод приступил к их выпуску. Конструкцию двигателя разработали специалисты завода. Двигатель развивал мощность 20 – 26 л.с., работал на сырой нефти, соляровом масле, керосине. Специалисты завода выполнили также разработки двигателей с воспламенением от сжатия. Они построили первые безкрейцкопфные двигатели, первые двигатели с V-образным расположением цилиндров, двухтактные двигатели с прямоточно-клапанной и петлевой схемами продувки, двухтактные двигатели, в которых продувка осуществлялась за счет газодинамических явлений в выпускном канале. Производство двигателей с воспламенением топлива от сжатия было начато в 1903 – 1911 гг. на Коломенском, Сормовском, Харьковском паровозостроительном заводах, на заводах Фельзера в Риге и Нобеля в Петербурге, на Николаевском судостроительном заводе.

**Густав Васильевич Тринклер (1876 – 1957)** – русский и советский учёный и изобретатель, создатель бескомпрессорного дизельного двигателя (рис. 3.55).

Будучи студентом Санкт-Петербургского технологического института, Густав Тринклер начинает разрабатывать проект нового теплового двигателя, работающего на жидком углеродном топливе с воспламенением от сжатия.

Летом 1898 года при переходе на V курс института Тринклер завершил работу над проектом и был принят на Путиловский завод, где начал строить первый в мире «бескомпрессорный нефтяной двигатель высокого давления»,

который он назвал «Тринклер-мотором». В течение 1898 года двигатель был построен (рис. 3.56), и в 1900 году начались его испытания.

Результаты испытания «Тринклер-мотора», спроектированного, построенного и испытанного молодым русским инженером вызвали восхищение специалистов достигнутым блестящим результатом (КПД 29 %) и одновременно волну опасений русских и зарубежных производителей тепловых двигателей.

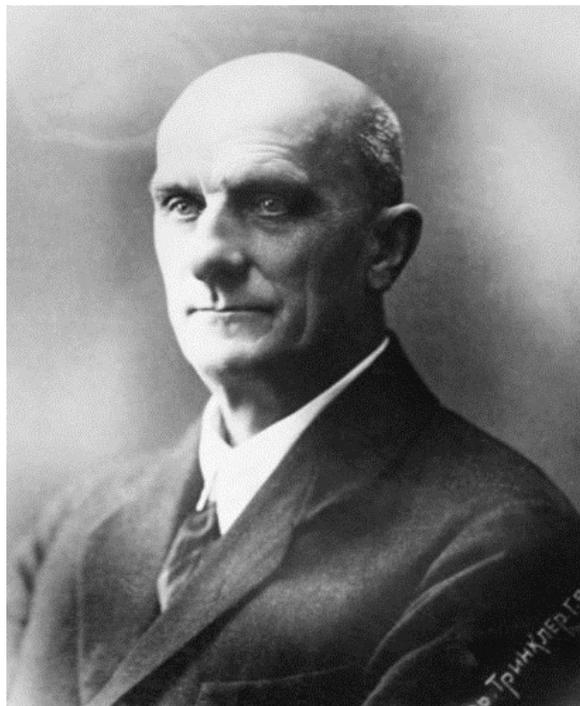


Рис. 3.55. Г.В. Тринклер (1876 – 1957) – русский и советский учёный и изобретатель, создатель бескомпрессорного дизельного двигателя

Поэтому Тринклер уезжает строить свои двигатели на завод «Братьев Кертинг» в Ганновере (Германия), где и работает до середины 1907 года главным конструктором. Бесспорные преимущества «Тринклер-мотора», опробованного и освоенного за рубежом, привлекли, наконец, внимание отечественных промышленников. С июня 1907 года Тринклер работает начальником отдела тепловых двигателей на Сормовском судостроительном заводе, куда он был приглашен в качестве одного из ведущих специалистов по тепловым двигателям мирового энергомашиностроения.

На заводе «Красное Сормово» он проработал двадцать лет и оставил заметный след в его истории. Густав Васильевич возглавлял отдел тепловых двигателей. Под его руководством строились двигатели внутреннего сгорания, за которые в 1910 году завод получил Большие золотые медали на выставках в Баку и Екатеринославе. В советское время был построен первый в СССР мощный двухтактный двигатель для фабрики «Красный Перекоп». Тринклер был основателем и первым директором машиностроительного техникума, где и по сей день готовят для завода руководителей производства среднего звена.

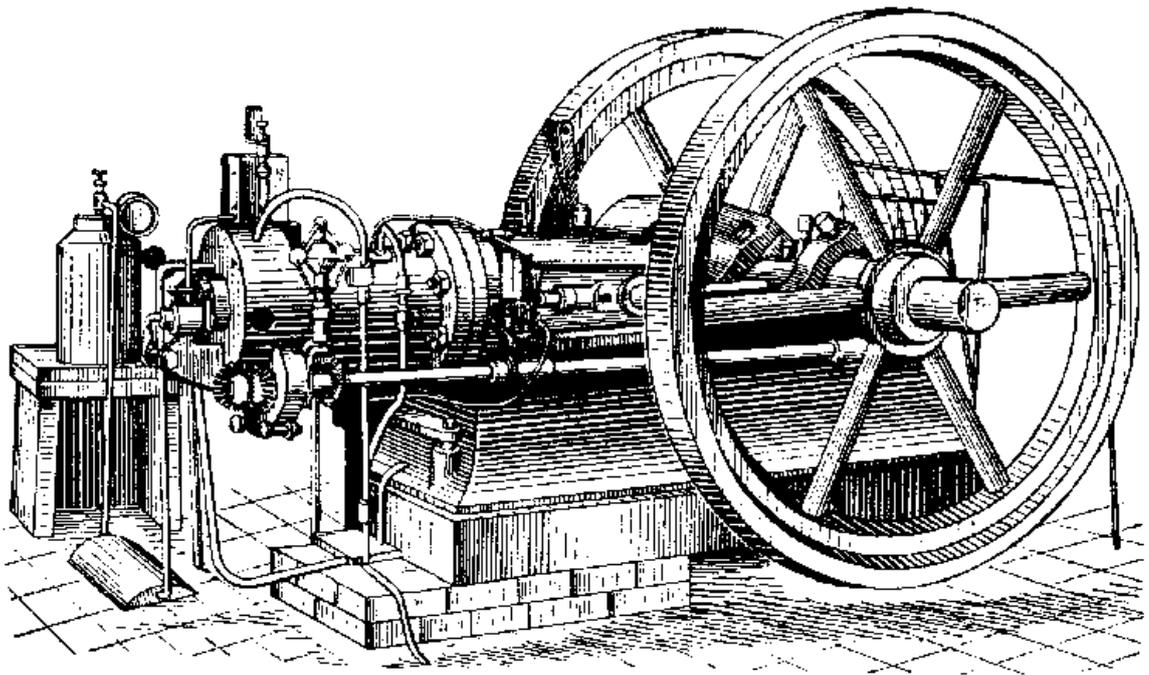


Рис. 3.56. Двигатель, построенный по проекту Г. Тринклера на Путиловском заводе в 1898 году

Производство дизельных двигателей в России началось практически одновременно со странами Западной Европы. Успешно развивалось отечественное двигателестроение и в советский период. К 1928 году в стране уже выпускалось свыше 45 типов двигателей суммарной мощностью около 110 тыс. кВт. В годы первых пятилеток был освоен выпуск автомобильных и тракторных двигателей, судовых и стационарных двигателей мощностью до 1500 кВт, созданы авиадизель, танковый дизель В-2, в значительной степени предопределивший высокие тактико-технические характеристики бронетанковой техники страны. Значительный вклад в развитие отечественного двигателестроения внесли выдающиеся советские ученые: Н. Р. Брилинг, Е. К. Мазинг, В. Т. Цветков, А. С. Орлин, В. А. Ваншейдт, Н. М. Глаголев, М. Г. Круглов и др.

Из разработок в области тепловых двигателей последних десятилетий XX века следует отметить три важнейшие: создание немецким инженером Феликсом Ванкелем работоспособной конструкции роторно-поршневого двигателя (РПД), комбинированного двигателя с высоким наддувом и конструкции двигателя с внешним сгоранием, конкурентоспособного с быстроходным дизелем. Имея малую удельную массу и габариты, высокую надёжность, РПД достаточно быстро получили широкое распространение главным образом на легковом автотранспорте, в авиации, на судах и

стационарных установках. Лицензию на производство двигателя Ф. Ванкеля приобрело более чем 20 фирм, в их числе и такие как «Дженерал Моторс», «Форд». К 2000 году было изготовлено более двух миллионов автомобилей с РПД.

В последние годы продолжается процесс совершенствования и улучшения показателей бензиновых двигателей и дизелей. Развитие бензиновых двигателей идёт по пути улучшения их экологических характеристик, экономичности и мощностных показателей путем более широкого применения и совершенствования системы впрыска бензина в цилиндры; применения электронных систем управления впрыском, расслоения заряда в камере сгорания с обеднением смеси на частичных нагрузках; увеличения энергии электрической искры при зажигании и т. д. В результате экономичность рабочего цикла бензиновых двигателей становится близкой к экономичности дизелей. Для повышения технико-экономических показателей дизелей используют повышение давления впрыскивания топлива, применяют управляемые форсунки, форсирование по среднему эффективному давлению путём наддува и охлаждения наддувочного воздуха, используют мероприятия по снижению токсичности отработавших газов.

### *Газопоршневые электростанции*

Газопоршневая установка (ГПУ) или электростанция – это система генерации, созданная на основе поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего на природном или другом горючем газе. Возможно получение двух видов энергии (тепло и электричество), и этот процесс называется «когенерация».

В случае, если в газопоршневых электростанциях используется технология, позволяющая получать ещё и холод (очень актуально для вентиляции, холодоснабжения складов, промышленного охлаждения), то данная технология будет называться «тригенерация» (рис. 3.57, 3.58).

В России производятся ГПУ мощностью от 88 кВт до 4 МВт.

Наиболее распространенными типами газопоршневых двигателей являются двигатель с искровым зажиганием и двухтопливный двигатель.

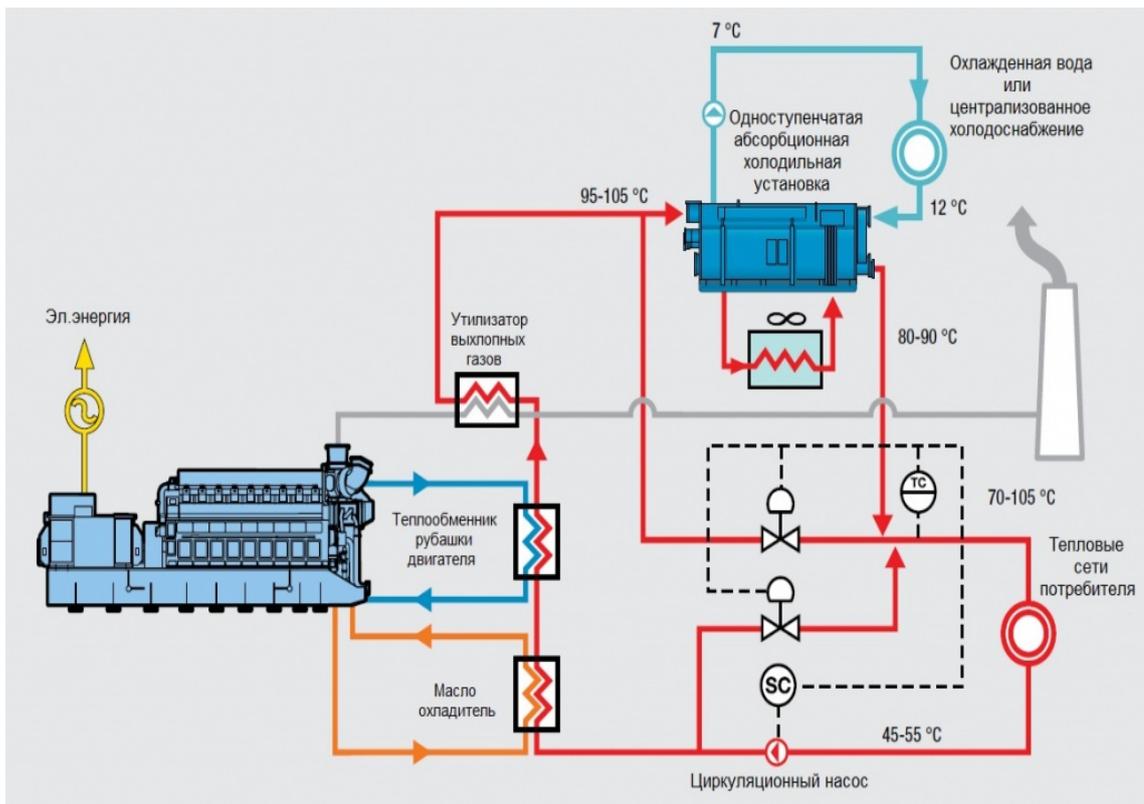


Рис. 3.57. Тепловая схема тригенерационной установки



Рис. 3.58. Газопоршневая электростанция MTU 12V4000 GS (L32) - 1 169 кВт, 400 В, (природный газ)

### 3.7. Тепловые электростанции: КЭС и ТЭС

Тепловые электрические станции (ТЭС) - это предприятия для превращения энергии органического топлива: угля, мазута, природного газа, торфа, сланцев, древесных отходов и других горючих природных энергетических ресурсов в электрическую и тепловую энергию.

Принцип работы ТЭС основан на уникальном свойстве водяного пара – быть теплоносителем. В перегретом состоянии, находясь под давлением, он превращается в мощный источник энергии, приводящий в движение турбины теплоэлектростанций.

Термодинамический цикл паросиловых установок, используемый на ТЭС по настоящее время, разработал и предложил в 1869 году шотландский инженер **Уильям Джон Ренкин**. Этот цикл носит имя автора - *цикл Ренкина*.

**Уильям Джон Макуорн Ренкин** – шотландский физик, основатель термодинамики и теории паровых машин. Член Эдинбургского и Лондонского королевских обществ. Основатель энергетизма. Автор первого труда по технической термодинамике («Руководство к паровым машинам», 1859). Работал в области геодезии и сооружения портов. Профессор университета в Глазго (рис. 3.59).

Родился Ренкин в Шотландии в Эдинбурге 5 июля 1820 года в семье инженера. Уже в юные годы он смог проявить свои таланты, которые впоследствии сделали его знаменитым. В шестнадцать лет, обучаясь в Эдинбургском университете, Ренкин получает золотую медаль за очерк по относительной волнообразной теории света, и двумя годами позже получает дополнительный приз за другой очерк по относительным методам физического исследования.

С 1848 года Ренкин начинает исследования в молекулярной физике, которая занимала его в течение всей оставшейся жизни. Но самые крупные исследования и научные труды он создал в области технической термодинамики, считаясь, по праву, одним из основателей этого раздела общей физики.

В 1849 году Ренкин выпустил две работы по теории высокой температуры. Самая ранняя работа, «О зависимости между температурой и максимальной эластичностью пара и других испарений» была напечатана в новом Эдинбургском философском журнале. И в конце 1849 году он высылал её в Королевское общество Эдинбурга, членом которого Ренкин становится в 1853 году, опубликовав работу «О формуле для вычисления расширения жидкостей высокой температурой».

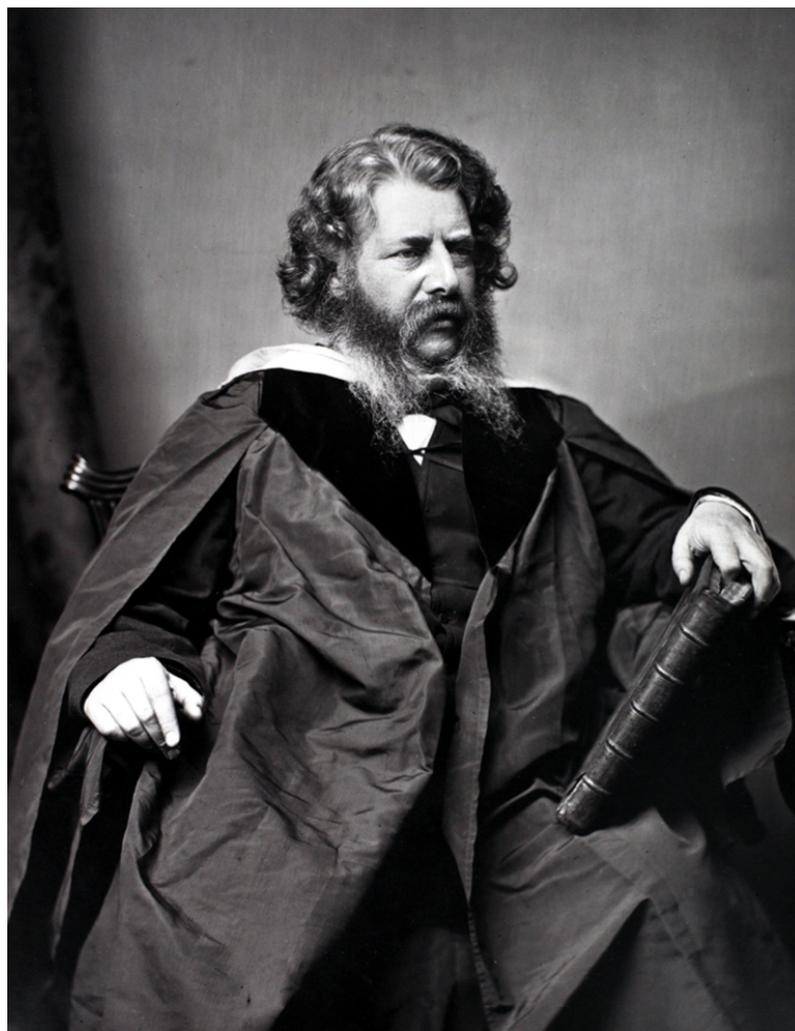


Рис. 3.59. Уильям Джон Макуорн Ренкин (1820 – 1872) – шотландский инженер, физик и механик, один из создателей технической термодинамики

В 1849 году Ренкин независимо от Клаузиуса получил общие уравнения термодинамики, выражающие соотношение между теплотой и механической энергией. В 1850 году исследовал термодинамические свойства газов и пара и составил таблицы водяных паров, получивших широкое применение. В 1859 году он построил полную теорию паровой машины.

Наряду с законом сохранения силы как первым началом, появляется второе начало новой теории теплоты, гласящее, что не всякая теплота, заключенная в теле, может быть превращена в механическую работу.

Ренкин выразил закон сохранения энергии в следующей форме: сумма всей энергии (потенциальной и кинетической) во Вселенной остается неизменной.

Первая тепловая электростанция была построена в Нью-Йорке на Перл-Стрит (Манхэттен) в 1882 году. Родиной первой российской тепловой станции, спустя год, стал Санкт-Петербург. Доля ТЭС в мировой энергетике составляет 63 % (рис. 3.60).

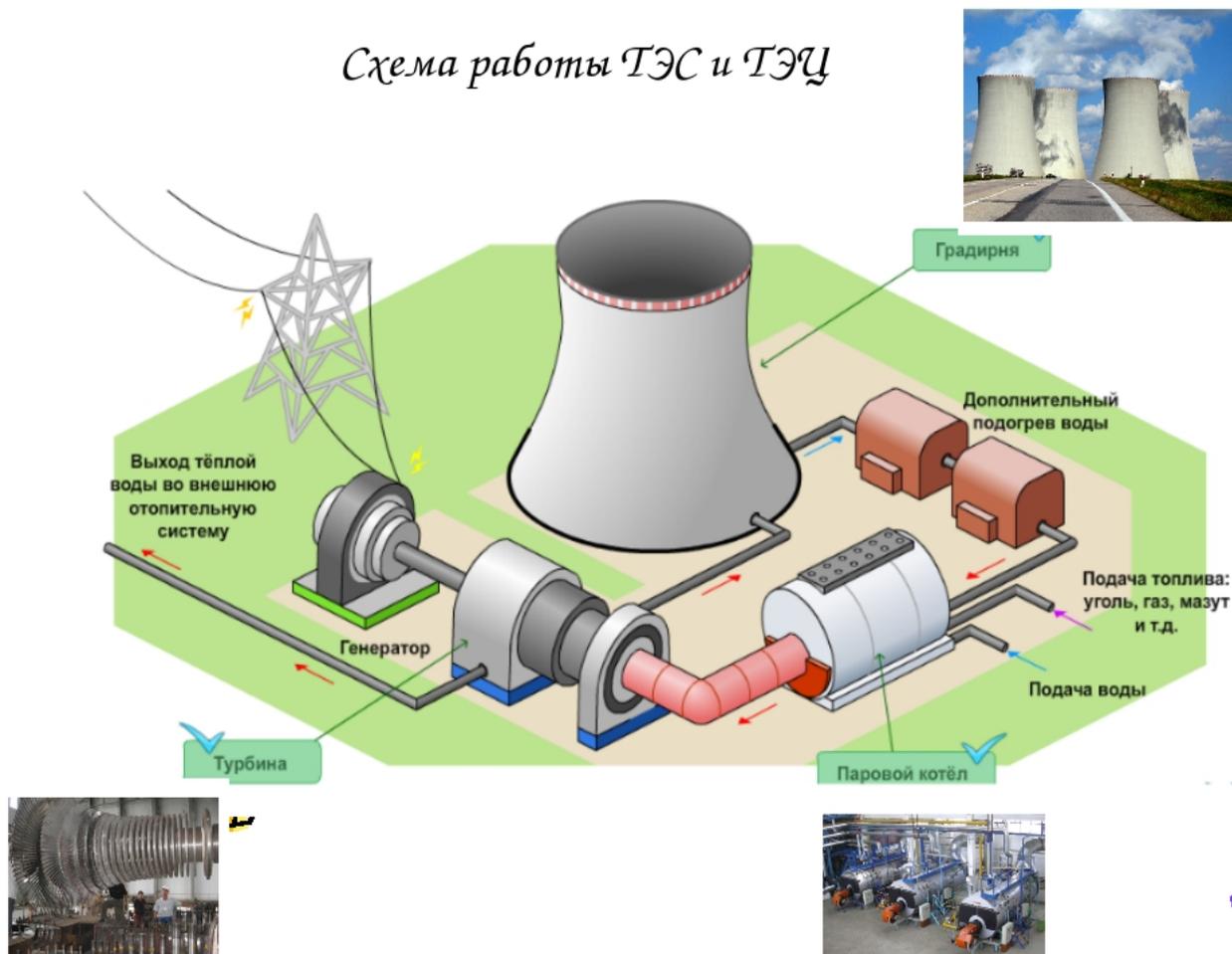


Рис. 3.60. Схема паротурбинной электростанции

По виду генерируемой и отпускаемой энергии тепловые электростанции разделяют на два основных типа:

*конденсационные (КЭС или ГРЭС), предназначенные только для производства электроэнергии,*

*теплофикационные, или теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), вырабатывающие как электрическую, так и тепловую энергию в виде пара и горячей воды для производственных и коммунально-бытовых целей.*

КЭС строят вблизи мест его добычи органического топлива, а ТЭЦ размещают вблизи потребителей тепла – промышленных предприятий и жилых массивов.

На рис. 3.61 представлена классификация тепловых электрических станций на органическом топливе.

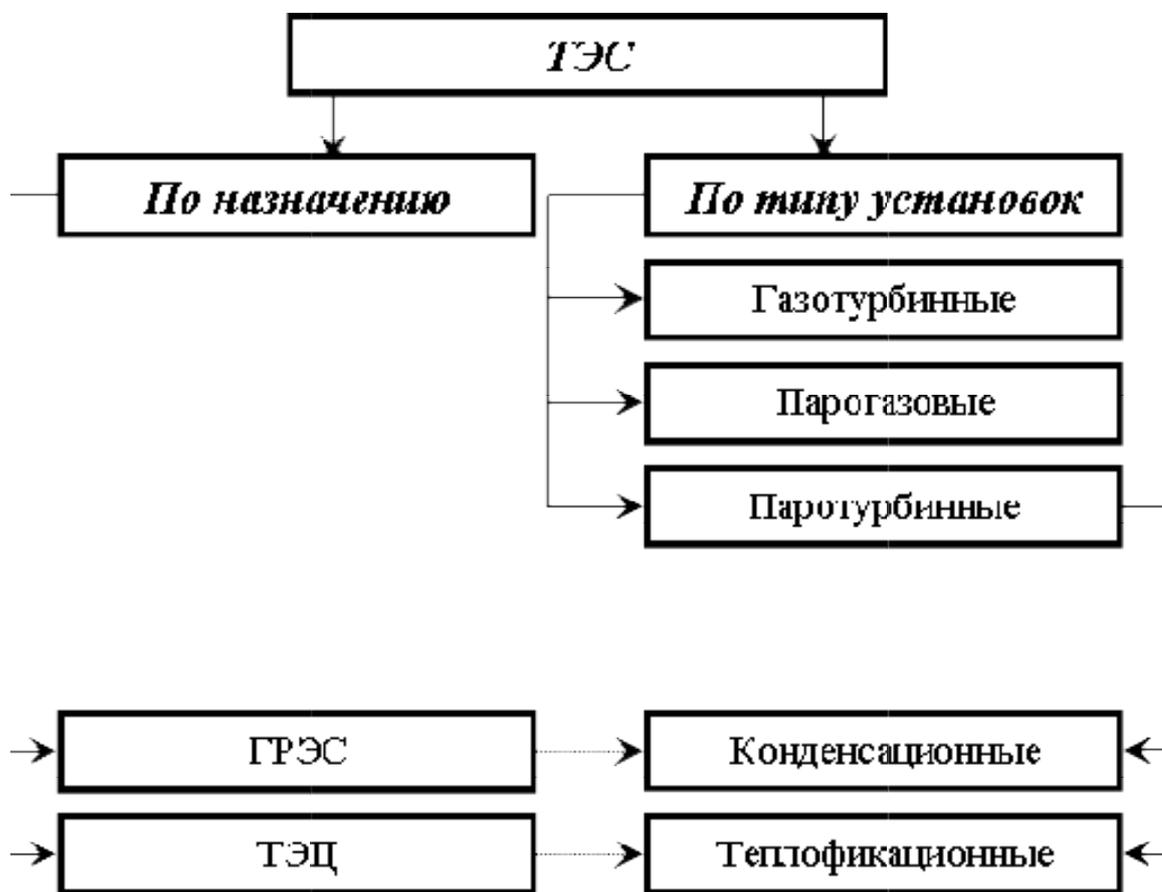


Рис. 3.61. Типы тепловых электростанций на органическом топливе

По типу теплосиловых установок, используемых на ТЭС для преобразования тепловой энергии в механическую энергию вращения роторов турбоагрегатов, различают **паротурбинные, газотурбинные и парогазовые электростанции.**

Основой **паротурбинных электростанций** являются паротурбинные установки (ПТУ), которые для преобразования тепловой энергии в механическую используют самую сложную, самую мощную и чрезвычайно совершенную энергетическую машину – паровую турбину. ПТУ – основной элемент ТЭС, ТЭЦ и АЭС.

**Газотурбинные тепловые электростанции** (ГТЭС) оснащаются газотурбинными установками (ГТУ), работающими на газообразном или жидком (дизельном) топливе. Поскольку температура газов за ГТУ достаточно высока, то их можно использовать для отпуска тепловой энергии внешнему потребителю. Такие электростанции называют ГТУ-ТЭЦ.

Традиционная современная газотурбинная установка (ГТУ) – это совокупность воздушного компрессора, камеры сгорания и газовой турбины, а также вспомогательных систем, обеспечивающих ее работу. Совокупность ГТУ и электрического генератора называют газотурбинным агрегатом.

**Парогазовые тепловые электростанции** комплектуются парогазовыми установками (ПГУ), представляющими комбинацию ГТУ и ПТУ, что позволяет обеспечить высокую экономичность. ПГУ-ТЭС могут выполняться конденсационными (ПГУ-КЭС) и с отпуском тепловой энергии (ПГУ-ТЭЦ). В настоящее время в России работают, в частности, четыре новых ПГУ-ТЭЦ:

- Северо-Западная ТЭЦ Санкт-Петербурга,
- Калининградская ТЭЦ,
- ТЭЦ-27 ОАО «Мосэнерго»,
- Сочинская ТЭЦ;

построена также теплофикационная ПГУ на Тюменской ТЭЦ; введена в эксплуатацию Ивановская ПГУ-КЭС.

**Блочные ТЭС** состоят из отдельных, как правило, однотипных энергетических установок – энергоблоков. В энергоблоке каждый котел подает пар только для своей турбины, из которой он возвращается после конденсации только в свой котел. Парогенераторы, турбины и электрогенераторы согласуются по шкале мощности. Каждой турбине соответствует определенный тип паро- и электрогенератора. Число блоков определяется заданной мощностью электростанции.

По блочной схеме строят все мощные ГРЭС и ТЭЦ, которые имеют так называемый промежуточный перегрев пара.

Современные КЭС являются наиболее крупными энергопредприятиями, использующими блоки конденсационных паровых турбин мощностью 150, 200, 300, 500, 800 и 1200 МВт.

*На ТЭС с поперечными связями* работа котлов и турбин обеспечивается по другому: все котлы ТЭС подают пар в один общий паропровод (коллектор) и от него питаются все паровые турбины ТЭС. По такой схеме строятся КЭС без промежуточного перегрева и почти все ТЭЦ на докритические начальные параметры пара.

По уровню начального давления различают ТЭС докритического давления, сверхкритического давления (СКД) и суперсверхкритических параметров (ССКП).

Критическое давление – это **22,1 МПа (225,6 ат)**.

В российской теплоэнергетике начальные параметры стандартизованы: КЭС и ТЭЦ строятся на докритическое давление **8,8 и 12,8 МПа (90 и 130 ат)**, и на сверхкритическое давление – **23,5 МПа (240 ат)**. ТЭС на сверхкритические параметры по техническим причинам выполняется с промежуточным перегревом и по блочной схеме.

К **суперсверхкритическим параметрам** условно относят давление более **24 МПа (вплоть до 35 МПа)** и температуру более **560 °С (вплоть до 620 °С)**, использование которых требует новых материалов и новых конструкций оборудования.

## ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЭС – атомная электростанция.

БАК – большой адронный коллайдер.

БиоТЭС – биоэлектростанция.

ВЭС – ветровая электростанция.

ГАЭС – гидроаккумулирующая электростанция.

ГеоТЭС – геотермальная электростанция.

ГРЭС – государственная районная электростанция.

ГТУ – газотурбинная установка.

ГЭС – гидроэлектростанция.

ИТП – индивидуальный тепловой пункт.

КЭС – конденсационная электростанция.

СТС – система централизованного теплоснабжения.

ПТУ – паротурбинная установка.

ПГУ – парогазовая установка.

ПЭС – приливная электростанция.

СЭС – солнечная электростанция.

ТЭС – тепловая электростанция.

ТЭЦ – тепловая электроцентраль.

УТС – управляемый термоядерный синтез.

ЦТП – центральный тепловой пункт.

ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor –  
Международный термоядерный экспериментальный реактор

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ветошкин А. Г., Таранцева К. Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы) : учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф., академика МАНЭБ и АТП РФ А. Г. Ветошкина. – Пенза : Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2004. – 249 с.
2. Зысин Л. В. Парогазовые и газотурбинные установки : учеб. пособие. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с.
3. Смоляков А. Ф. Введение в специальность: учеб. пособие для студентов направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» / А. Ф. Смоляков [и др.].– СПб.: СПбГЛТУ, 2016. – 68 с.
4. Энергетика: история, настоящее и будущее в 5 т. / С. Г. Плачкова и др. – Киев: Издательский дом "АДЕФ-Украина", 2012 – 2013.
  - Т. 1. От огня и воды к электричеству,
  - Т. 2. Познание и опыт – путь к современной энергетике,
  - Т. 3. Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики,
  - Т. 4. Развитие атомной энергетики и объединенных энергосистем,
  - Т. 5. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетике в современном мире.
5. Калабеков И. Г. Российские реформы в цифрах и фактах. – Изд. 2-е. – М.: РУСАКИ, 2010 (доп. изд-е 2019). – 498 с.
6. Энергетическая революция. XXI век. Перегрузка – <http://earth-chronicles.ru/news/1-0-28> - Земля. Хроники Жизни, 2011 - 2020.
7. Иванов В. Д. Основы теплоснабжения : учеб. пособие / В. Д. Иванов, В. Н. Притула, С. В. Иванов ; СПб ГТУРП. — СПб., 2013. — 404 с.
8. Электронные библиотеки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный (Интернет).

Учебное издание

**ИВАНОВ ВЛАДИМИР ДМИТРИЕВИЧ**

# **ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ**

## **ЧАСТЬ 1. ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Редактор Т.А. Смирнова  
Корректор Н.П. Новикова  
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2020 г., поз. 20

---

Подп. к печати 23.11.2020.    Формат 60x84/16.    Бумага тип. № 1.  
Печать офсетная.    9,25 печ.л.;    9,25 уч.-изд.л.    Тираж 80 экз.  
Изд. № 20.    Цена "С".    Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,  
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.