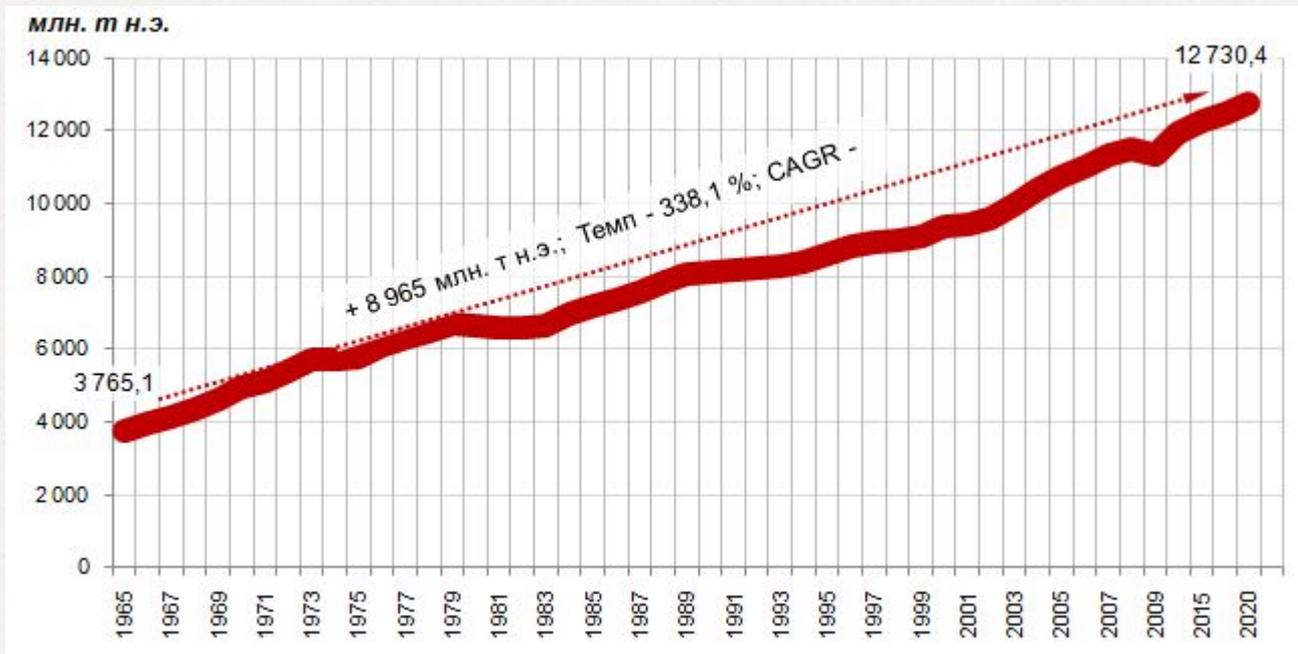
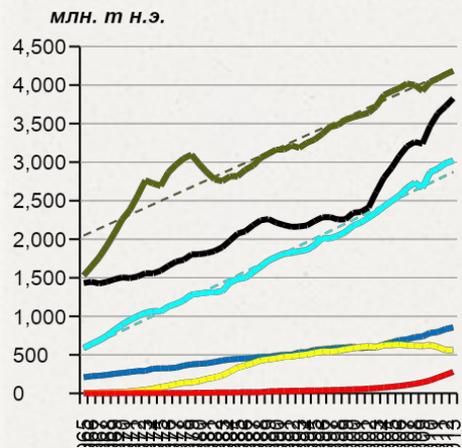


Динамика мирового потребления энергоресурсов

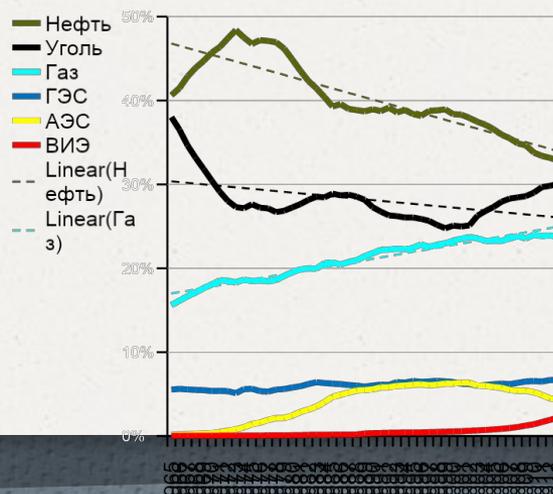
**ПОТРЕБЛЕНИЕ
- ВСЕГО**



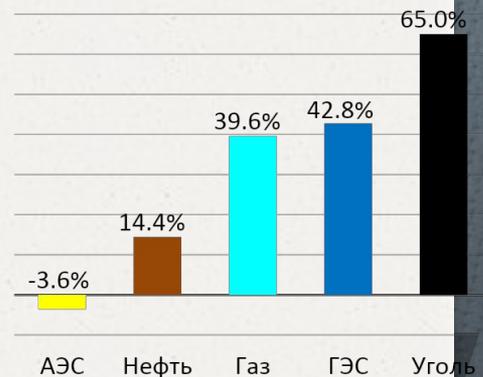
ПО ВИДАМ



УДЕЛЬНЫЙ ВЕС

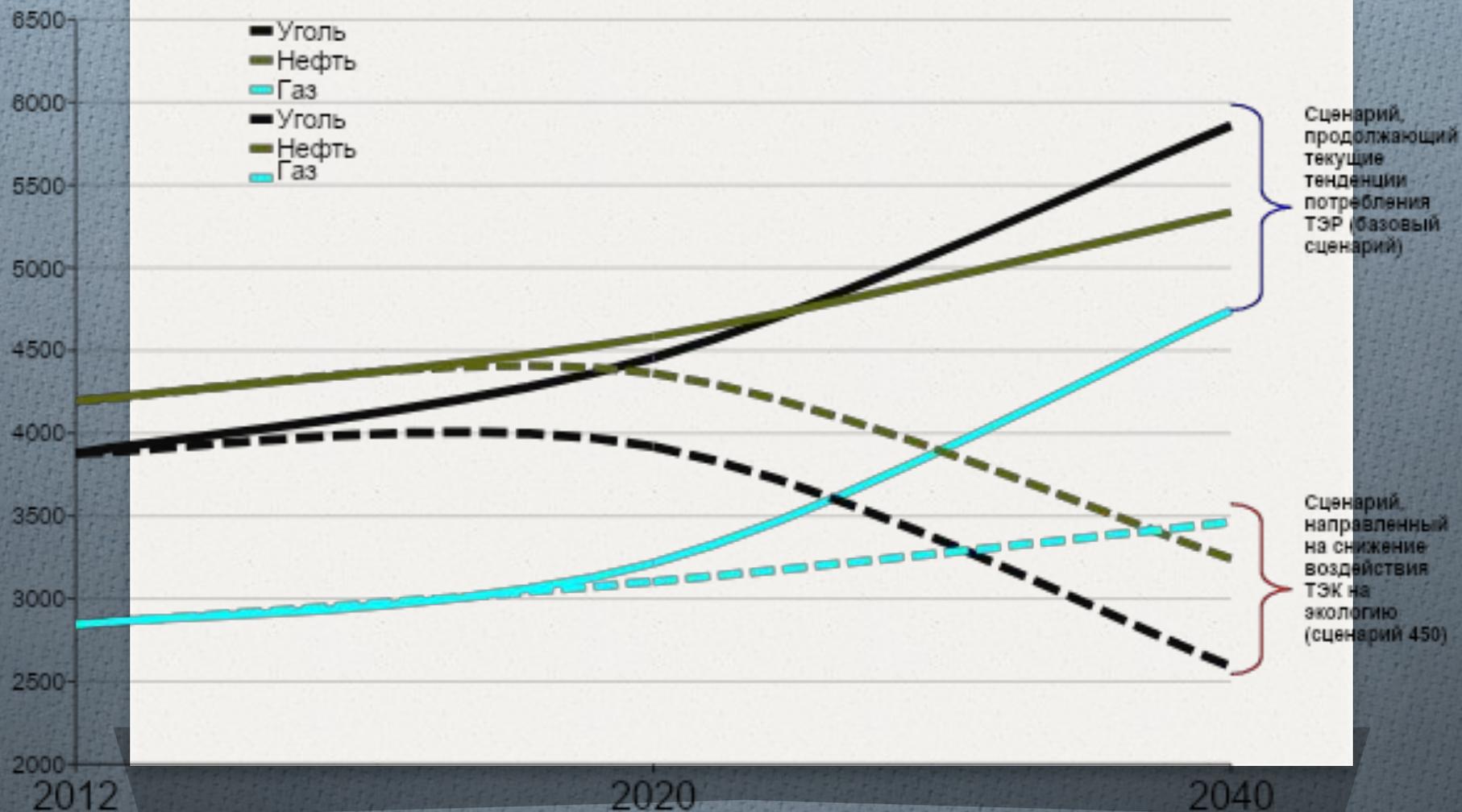


**ИЗМЕНЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА
ТРАДИЦИОННЫХ ТЭР В МИРЕ ЗА
2000-2013 Г.Г.**

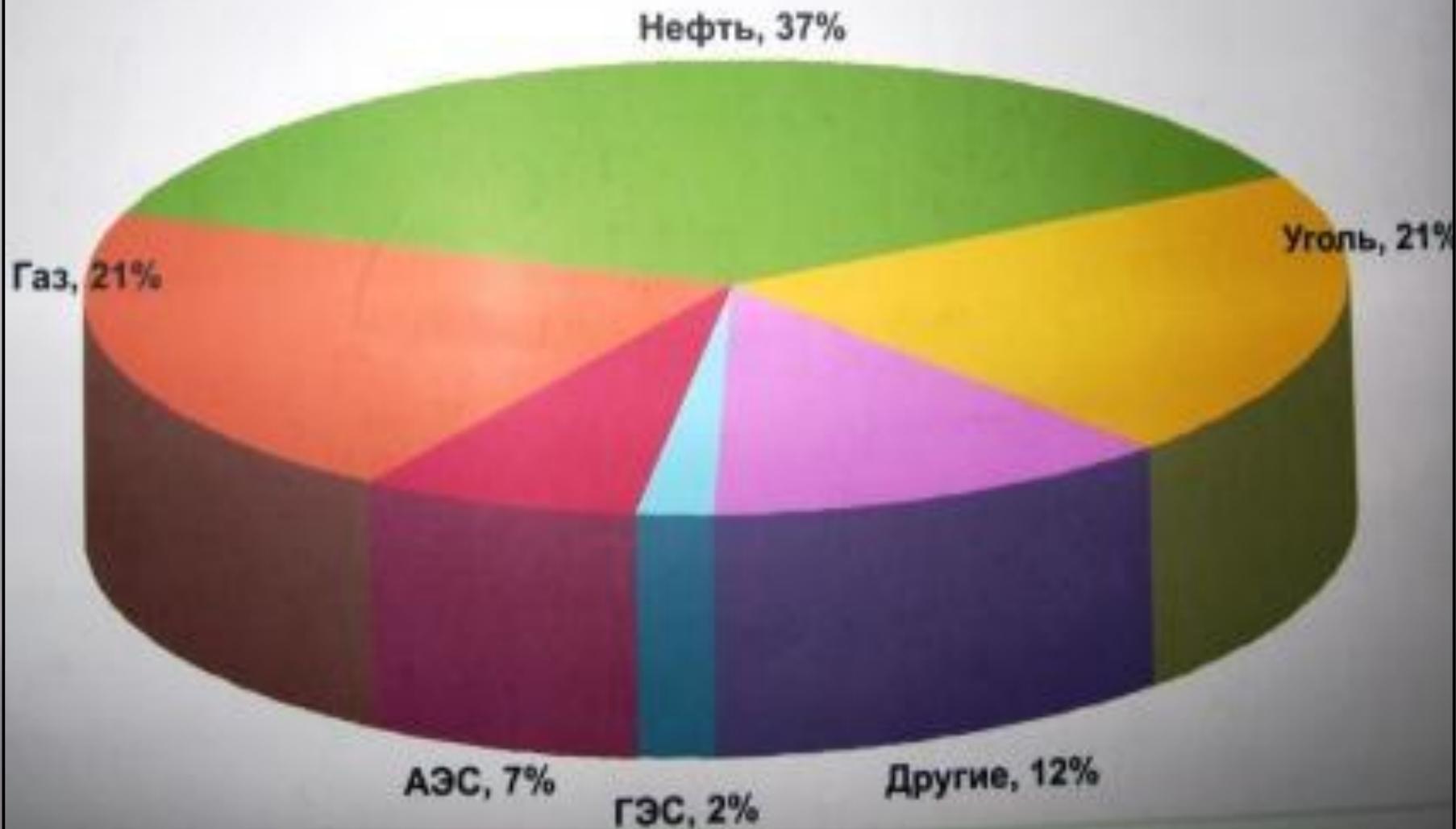


Мировой спрос на ископаемые виды топлива по сценариям развития мирового ТЭК на период до 2040 года

млн. т н.э.



Примерный мировой энергетический баланс

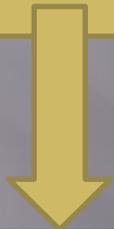


Типы электрических станций

Электрической станцией называется энергетическая установка для преобразования ПРИРОДНОЙ энергии в ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Виды электростанций в России

традиционные



Тепловые: ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС
Гидравлические: ГЭС
Атомные: АЭС

**Альтернативные
(НВИЭ)**

Ветровые
Геотермальные
Солнечные
Приливные
Биогазовые
Термоядерные

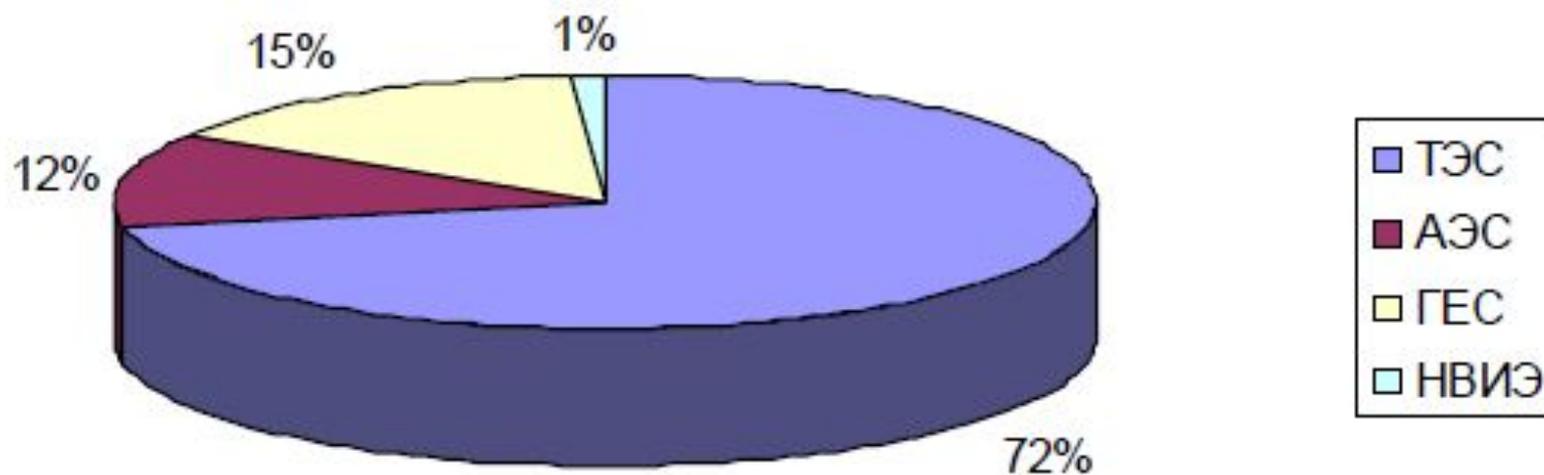


Рисунок 1.1. Типы электрических станций

Паросиловые установки

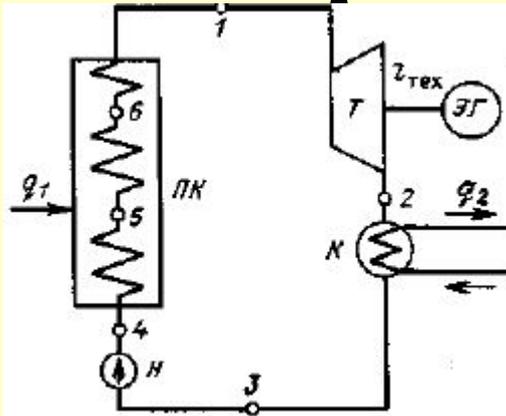


Схема паросиловой установки для выработки электроэнергии (КЭС): ПК- паровой котел; Т- паровая турбина; ЭГ- электрогенератор; К- конденсатор; Н – насос; охлаждающая вода показана стрелочками

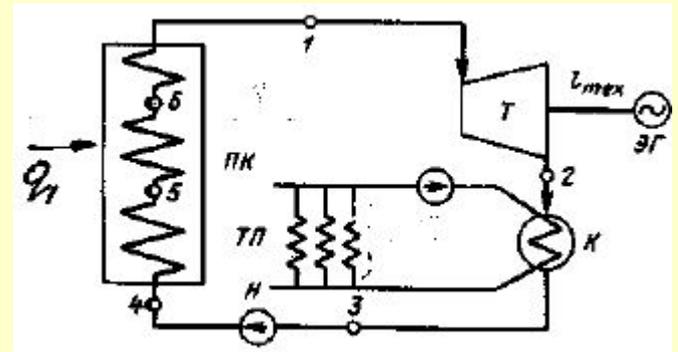
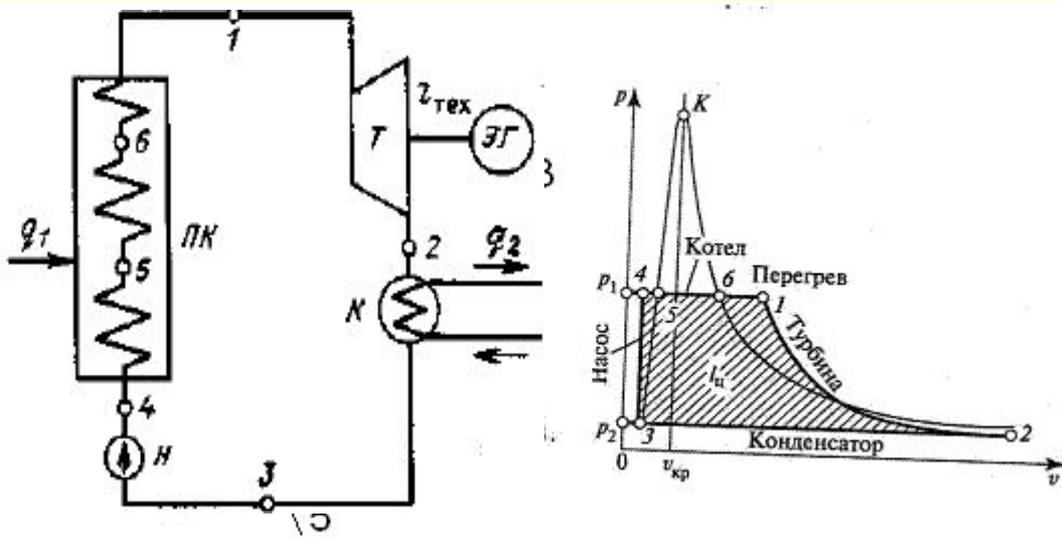


Схема паросиловой установки для совместной выработки тепловой и электрической энергии (ТЭЦ)

Вода нагнетается в парогенератор (состоит из парового котла ПК и пароперегревателя ПЕ) насосом Н и за счет теплоты сжигаемого топлива превращается в водяной пар, который затем поступает в турбину Т, вращающую электрогенератор ЭГ. Тепловая энергия пара преобразуется в турбине в механическую работу, которая, в свою очередь, преобразуется в генераторе в электроэнергию. Из турбины отработанный пар поступает в конденсатор К. В конденсаторе пар превращается в воду (конденсируется), которая с помощью насоса вновь подается в парогенератор. Таким образом цикл замыкается.

Охлажденная вода, нагретая в конденсаторе, не выбрасывается в водоем, а прогоняется через отопительные приборы теплового потребителя (ТП) и, охлаждаясь в них, отдает полученную в конденсаторе теплоту

Цикл Ренкина



изобара 4—5—6—1 — нагрев, испарение воды и перегрев пара в парогенераторе за счет подводимой теплоты сгорания топлива q_1 ;

адиабата 1—2 — расширение пара в турбине с совершением полезной внешней работы l_a^T ;

изобара 2—3 — конденсация отработанного пара с отводом теплоты q_2 охлаждающей водой;

адиабата 3—4 — сжатие конденсата питательным насосом до первоначального давления в парогенераторе с затратой подводимой извне работы l_a^H

Влияние ТЭС на экологию

Отрицательное влияние ТЭС на окружающую среду связано: с расходом больших количеств кислорода на горение топлива; с выбросом в атмосферу CO₂, а также с повышением температуры окружающего воздуха. Кроме того, ТЭС, использующие органическое топливо, загрязняют окружающую среду окислами азота, серы, углерода, а также углеводородами.

На долю ТЭС приходится около 14 процентов общего загрязнения атмосферы техническими средствами, что составляет в год:

❖	диоксида серы –	27 млн. тонн
❖	диоксида углерода –	53 млн. тонн
❖	оксида азота –	9 млн. тонн
❖	углеводородов –	12 млн. тонн

CO₂ – столько же, сколько все люди и животные

Особенно опасны канцерогенные окислы азота.

Влияние ТЭС на экологию (продолжение)

В выбросах ТЭС присутствуют и радиоактивные элементы (изотопы углерода C^{14} и пр.) \Rightarrow фон вокруг ТЭС выше, чем вокруг АЭС.

ТЭС на *2400 МВт* при высоте дымовой трубы *180 м* создает концентрацию вредных выбросов в атмосферу, которые на расстоянии *1 км* от нее в 3-12 раз превышают ПДК.

ТЭС, работающие на каменном угле, создают значительные золоотвалы. Для ТЭС мощностью в 1 ГВт они ежегодно занимают площадь *0,5 км²* при высоте в *2 м*. Вообще, ТЭС, работающие на угле, загрязняют окружающую среду больше, чем на других видах топлива («рекорд» – Hazelwood, Австралия, ТЭС на буром угле).

ТЭС оказывают отрицательное воздействие и за счет сброса в водоемы охлаждающей воды, подогретой в конденсаторах. При этом происходит «тепловое загрязнение» водоемов и интенсивное размножение водорослей.

Самые грязные теплоэлектростанции, ТОР 10

(По «эффективности» выброса CO_2 – мегатонн на ТВт·ч)

1.	Hazelwood	Австралия 	1.58
2.	Edwardsport	США 	1.56
3.	Frimmersdorf	Германия 	1.27
4.	HR Milner	Канада 	1.25
5.	CTG Portes Gil	Мексика 	1.18
6.	Belchatow	Польша 	1.09
7.	Prunerov	Чехия 	1.07
8.	Niihamanishi	Япония 	1.02
9.	Cockenzie	Великобритания 	0.99
0.	Porto Tolle	Италия 	0.78

Снижение вредных выбросов на ТЭС

Производится оптимизация условий сгорания топлива для уменьшения удельного расхода топлива и снижения выбросов золы и вредных газов (*предварительная подготовка*: добавка малого количества воды в мазут на 30% снижает образование оксида азота; используются *оптимизированные горелочные устройства*).

Для улавливания летучей золы применяются циклонные сепараторы (центрифуга), фильтры и мокрые золоуловители (разбрызгиватели воды).

Зола в зависимости от вида топлива, метода его сжигания и способа удаления из топки котла может служить ценным сырьем для промышленности строительных материалов.

Применяются каталитические фильтры очистки отработавших газов (как и в автомобилях). Платиновые катализаторы для окисления «недогоревшего» топлива (углеводородов).

Снижение вредных выбросов на ТЭС (2)

ТЭС без выбросов CO₂ – Элсам, Дания (2006, 420 МВт). CO₂ из дыма связывается специальной жидкостью, которая при нагреве до 120°C отдает газ, собираемый в хранилище (исчерпанные газоносные слои). Технология снижает расходы на удаление CO₂ из выбросов с 60 до 30 € за тонну. Стоимость проекта – 16 млн € (пополам ЕС и частные предприятия), из которых 30% - на хранение CO₂. План – получить экономически выгодные технологии к 2020 г., снизить промышленные выбросы CO₂ в ЕС на 30% (т.е. полные выбросы CO₂ в ЕС – на 10%).

Расчеты показывают, что при применении данной технологии стоимость энергии возрастет на 50% (в т.ч. и из-за энергоемкости дополнительных процессов). Но полученный CO₂ можно закачивать в нефтяные скважины, увеличивая выход нефти с 40 до 60%. Тогда стоимость энергии вырастет всего на 30%.

Другой метод – очистка топлива, особенно каменного угля, от вредных примесей (серы, ртути). Основной метод – газификация с целью получения сепарируемых горючих газов и утилизируемых отходов. Также предлагается удаление влаги из угля => более полное сгорание. Разрабатываются в США и Австралии (большая доля использования угля в промышленности), инвестиции \$ 2.5 млрд.

По оценкам, проект станет экономически жизнеспособным не ранее 2025 года. Для заметного снижения выбросов надо инвестировать \$20 млрд в течении 10 лет

Снижение вредных выбросов на ТЭС (3)

Существующий в РФ алгоритм расчета ущерба природе приводит к малым суммам штрафов за выбросы.

Например, ТЭЦ-1 в Красноярске за превышение норм выброса и неоплату нормированных квот выброса была оштрафована на *200000 р.*, что сравнимо с ее доходами за день работы.

(Для сравнения, в Казахстане за превышение норм выброса двух ТЭЦ «Астана-Энерго» был начислен штраф *116 млн. тенге ≈ 25 млн.р.*)

Этого хватает лишь на содержание аппарата природоохранных ведомств и организацию контроля окружающей среды, средств для восполнения нанесенного ущерба нет.

Эксплуатационные затраты существующих установок комплексной химической очистки достигают *10%* от годового дохода предприятия.

При этом относительный размер штрафных санкций равен *0.05%*.

Следовательно, сегодня в России у предприятий-загрязнителей полностью **отсутствуют экономические стимулы** к проведению природоохранных мероприятий!

Атомные электрические станции

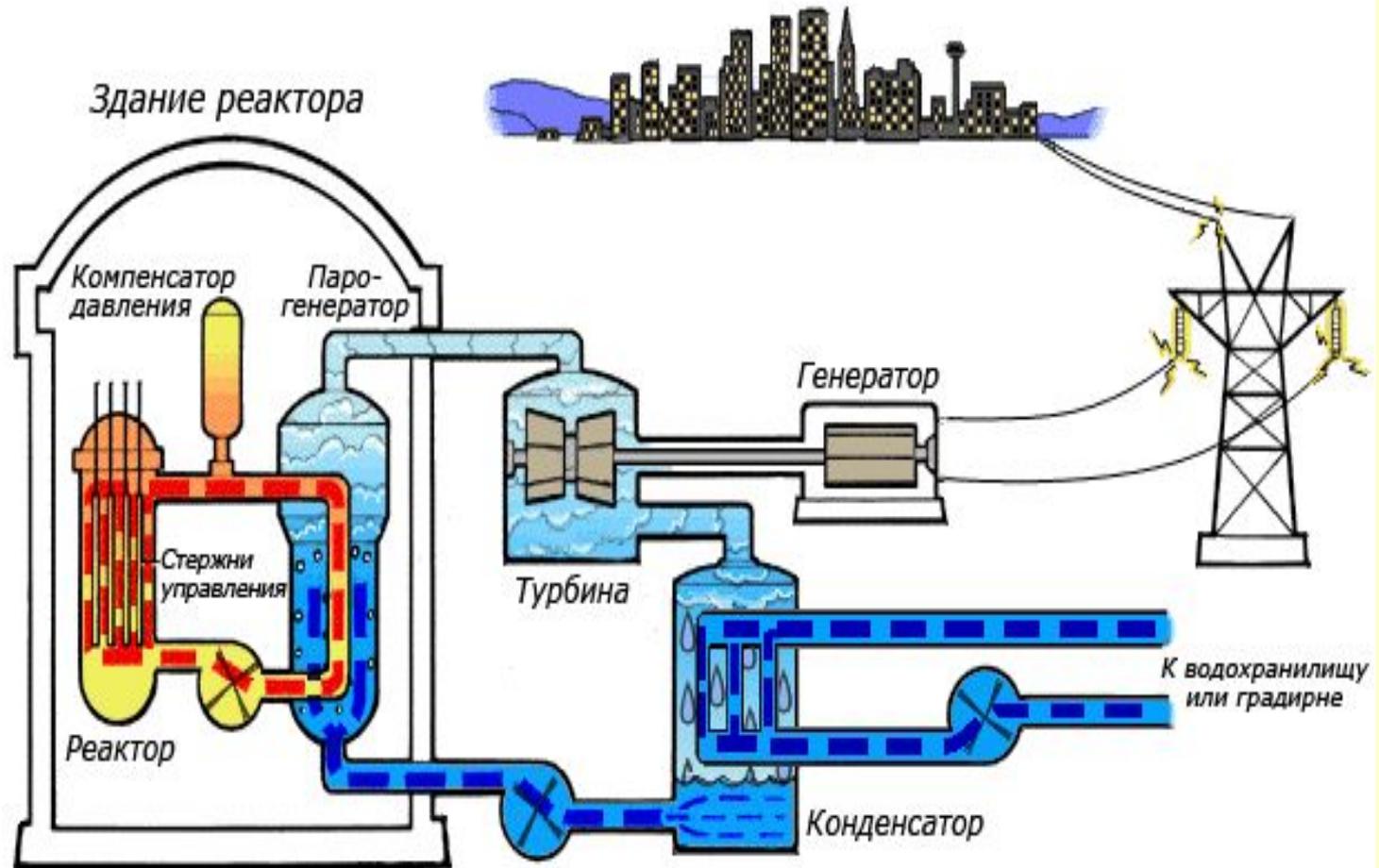
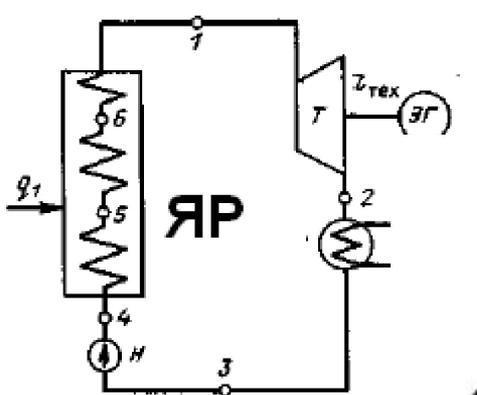
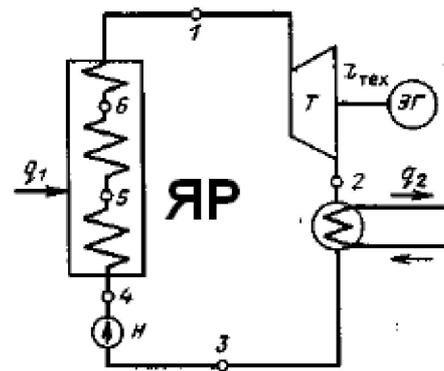
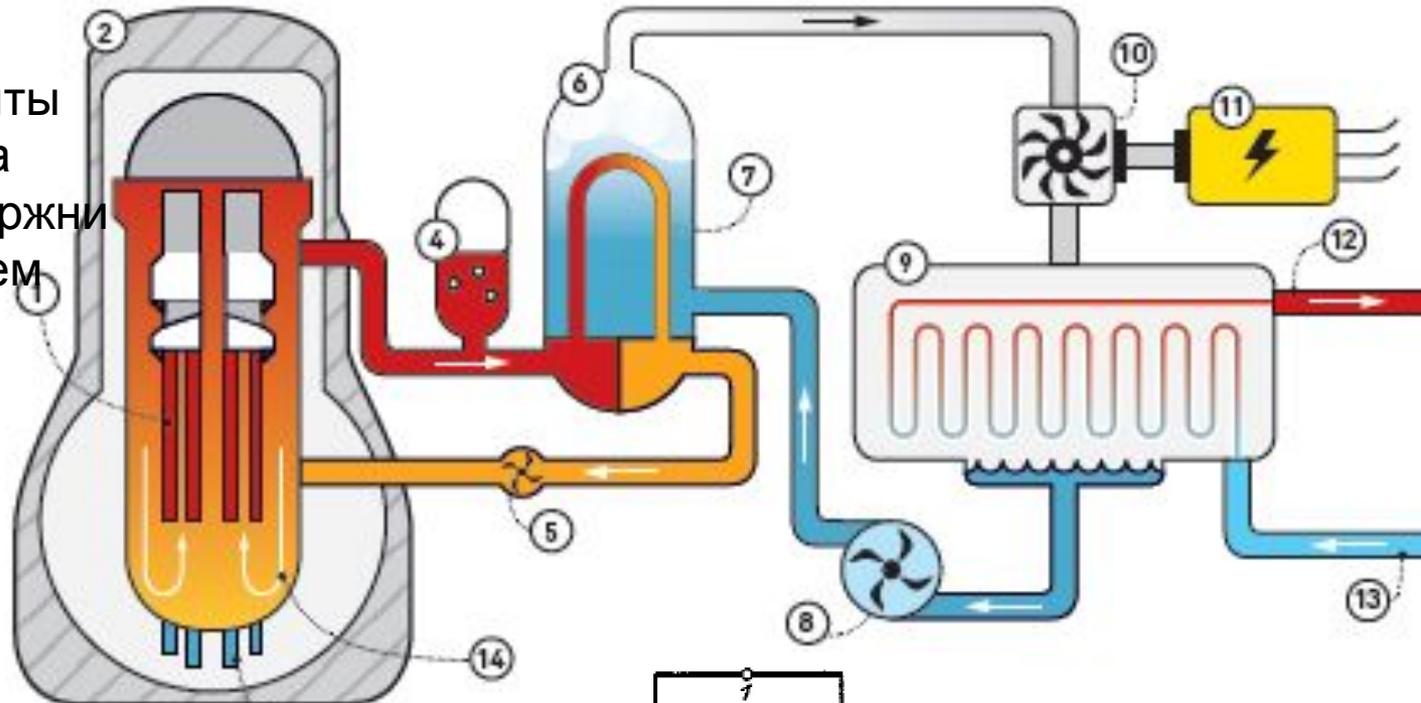
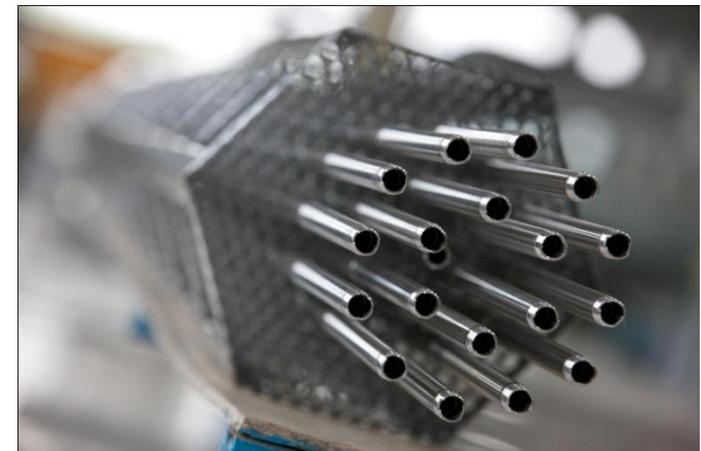
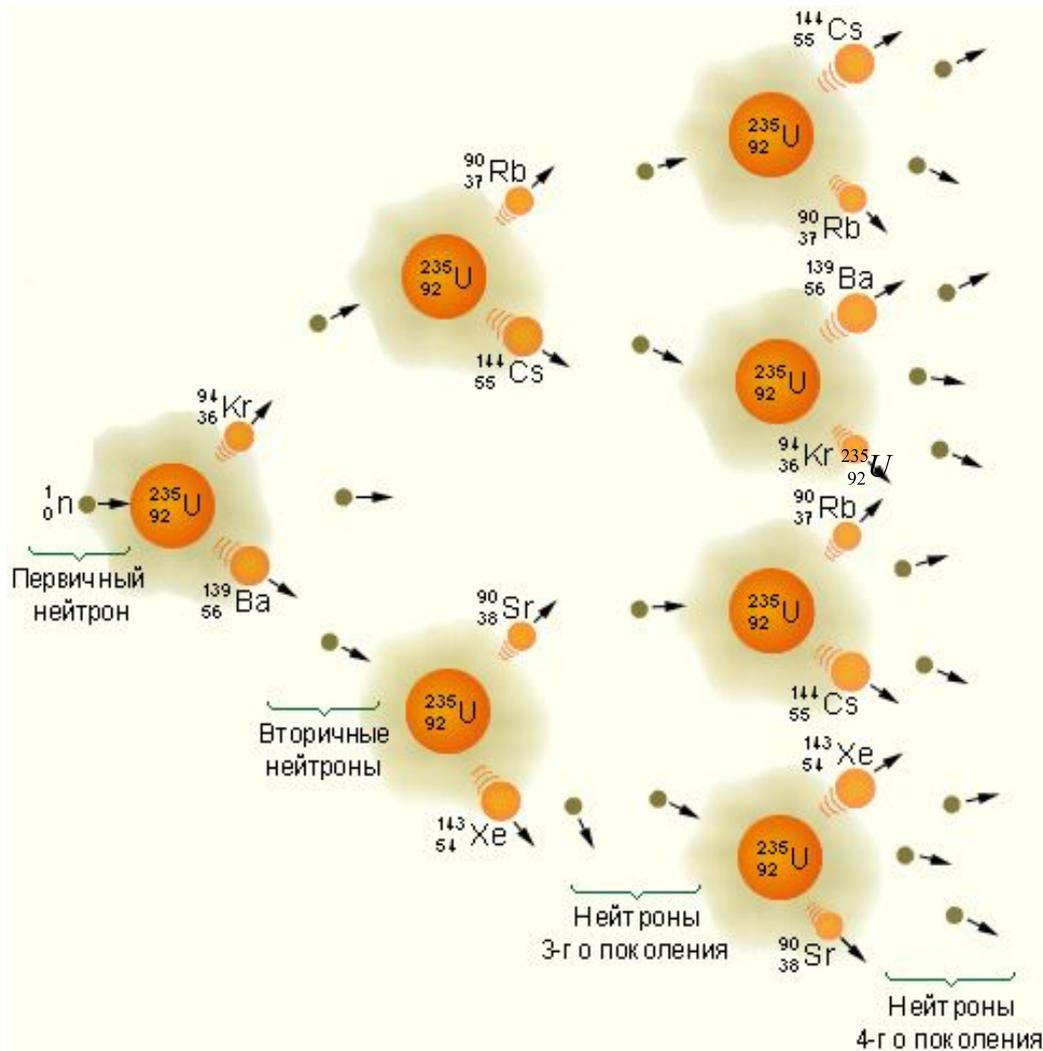


Схема атомной электростанции

1. Топливные элементы
2. Бетонная оболочка
3. Регулирующие стержни
4. Вода под давлением
5. Насос
6. Парогенератор
7. Теплообменник
8. Насос
9. Конденсатор
10. Турбина
11. Генератор
12. Горячая вода к градирне
13. Холодная вода от градирни
14. Реактор



Ядерная реакция $^{235}_{92}\text{U}$



ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

Крупнейшие АЭС России

-Ленинградская (мощность
4000 МВт)



-Калининская (мощность
3000 МВт)

- Курская (мощность 4000 МВт)



- Смоленская (мощность 3000 МВт)

19 Гидро- и гидроаккумулирующие электростанции

Гидравлические электростанции (ГЭС) – комплекс гидротехнических сооружений и энергетического оборудования, с помощью которых энергия водного потока преобразуется в электрическую энергию.

ГЭС, как правило, сооружаются не только для выработки электричества, но и для решения комплекса задач улучшения судоходства, ирригации и т.д.

Гидроэлектростанция состоит из двух частей:

- гидротехнических сооружений, обеспечивающих концентрацию потока воды;
- энергетического оборудования, преобразующего энергию движущейся воды в электрическую. Преобразование энергии осуществляется гидротурбиной.

ГЭС: проточные (**деривационные**) и аккумулирующие (**плотинные**)

- На **равнинных** реках, где **уклоны незначительны**, концентрация гидроэнергии выполняется по плотинной схеме. При малом расходе воды она запасается в водохранилище, а ГЭС включается в часы пикового потребления.
- На **горных** реках с **большими уклонами** используются деривационные схемы, с искусственным водоводом; у станции он переходит в напорный бассейн, откуда вода по турбинным водоводам поступает в здание ГЭС.



Гидроэлектрические станции (ГЭС)

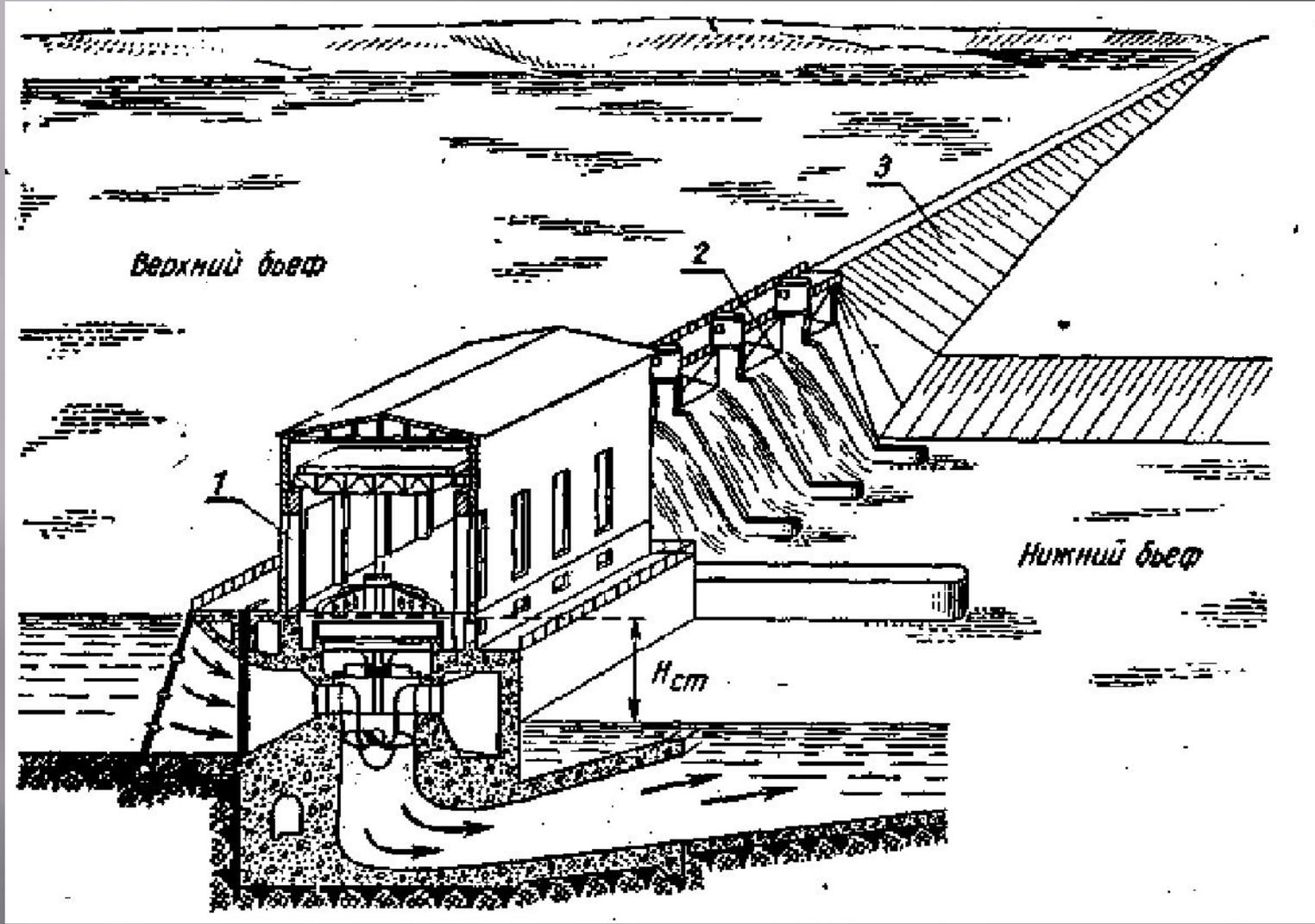


Схема приплотинной ГЭС с расположением плотины и здания станции в одном створе: 1 – здание станции; 2 – водосливная плотина; 3 – бетонная плотина

Гидротехнические сооружения ГЭС



Получаемая на ГЭС энергия зависит не только от расхода воды, но и от условного перепада высот на подходе к турбине – от **напора**.

Потенциальная энергия падающей на турбину воды пропорциональна напору.

Для получения лучшего напора вода может подводиться к турбине через **водовод**: в сужающейся части потенциальная энергия гидростатического давления превращается в кинетическую энергию движения воды.

На гидроаккумулирующих ЭС в нерабочее время реверсивная турбина подкачивает воду из реки в водохранилище по тому же каналу.

Гидросиловой аппарат ГЭС

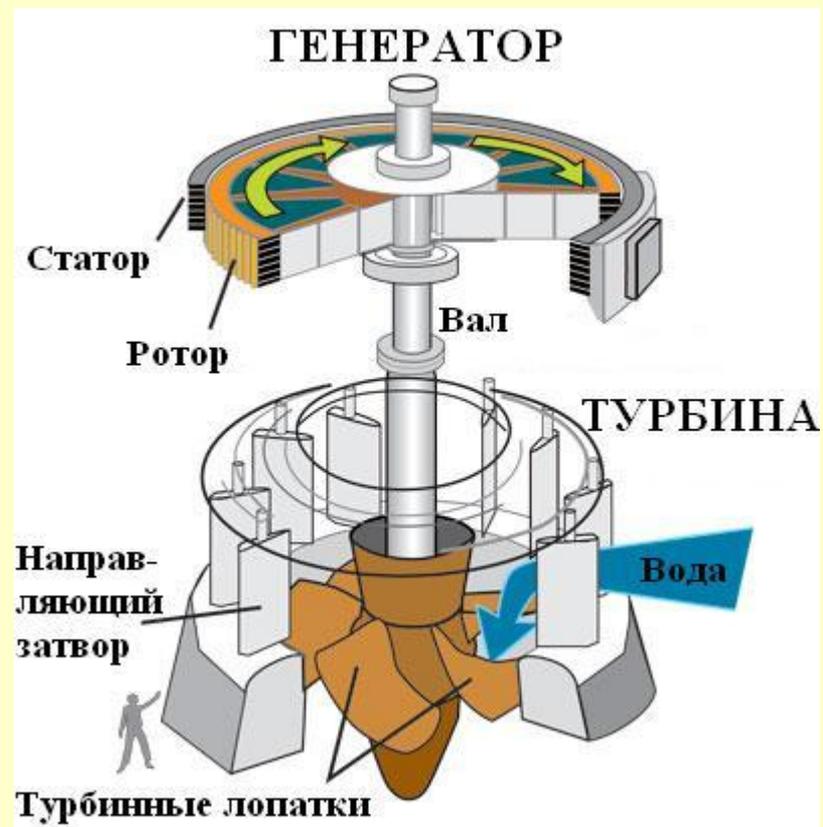
Гидросиловой агрегат ГЭС состоит из гидравлической турбины и генератора, имеющих общий вал.

Напоры воды на различных ГЭС лежат в пределах от нескольких метров до 2 км. Для работы в таком широком диапазоне применяются различные типы турбин, отличающихся формой рабочих органов и принципом воздействия воды. Все гидротурбины разделяются на два класса:

- **активные;**
- **реактивные.**

В **активной** турбине для повышения напора воды и коэффициента использования энергии вода из суживающейся насадки – сопла подается на ковшеобразные турбинные лопатки.

Вода на лопатки **реактивной** турбины поступает через направляющий затвор. В суживающихся каналах между лопатками затвора происходит частичное преобразование потенциальной энергии воды в кинетическую. Дальнейшее преобразование энергии осуществляется на рабочих лопатках сложной формы



Параметры ГЭС

Одна из первых ГЭС – Крэгсайт, Англия, 1870 год

Мощнейшая – «Три ущелья», Китай (*18300 МВт*, в 2011 – до *22500 МВт*)

Итайпу	Бразилия	2003	14000 МВт	95 ТВт·ч
Гури	Венесуэла	1986	10200 МВт	46 ТВт·ч
Тукуруи	Бразилия	1984	8400 МВт	21 ТВт·ч
Гранд Кули	США	1980	6800 МВт	20 ТВт·ч
Саяно-Шушенская	Россия	1989	6400 МВт	27 ТВт·ч
Красноярская	Россия	1972	6000 МВт	20 ТВт·ч

На снимке:

*Плотина ГЭС Итайпу
на реке Парана,
Бразилия – Парагвай.*

*Строительство
начато в 1970, первая
очередь запущена в
1984, завершена в 2003.*



Крупнейшие ГЭС России

Крупнейшие электростанции

Название электрической станции	Мощность, МВт	Число агрегатов	Год пуска
Саяно-Шушенская ГЭС	6400	10	1985
Красноярская ГЭС	6000	12	1971
Сургутская ГРЭС-2	4800	6	1988
Братская ГЭС	4500	18	1966
Ленинградская АЭС	4000	4	1984
Курская АЭС	4000	4	1985
Усть-Илимская ГЭС	3840	16	1979
Рефтинская ГРЭС	3800	10	1980
Костромская ГРЭС	3600	9	1980
Сургутская ГРЭС-1	3330	16	1983

Плюсы и минусы ГЭС

Плюсы:

- Отсутствие загрязняющих выбросов в окружающую среду;
- Очень низкая стоимость электричества (себестоимость ~5 коп/кВт·ч);
- Возможность очень длительной эксплуатации (не менее 50-100 лет);
- Возможность улучшения условий судоходства и орошения;
- Практически полная возобновляемость источника.

Минусы:

- Блокировка некоторых рек приводит к потере нерестилищ рыб;
- Создание крупных водохранилищ в равнинных районах приводит к подъему грунтовых вод \Rightarrow к заболачиванию местности;
- Увеличение водной поверхности \Rightarrow возрастает испарение, меняется климат;
- Колебания уровня воды в водохранилище и сбросовой зоне приводят к переформированию берегов реки как выше, так и ниже по течению.

Затопление территорий – один из основных минусов строительства ГЭС



Водохранилище после длительной засухи...действующее

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ЭНЕРГИИ
В ТЕПЛОВЫХ
ДВИГАТЕЛЯХ**

Тепловыми двигателями называют машины, в которых внутренняя энергия топлива превращается в механическую энергию.

Существует несколько видов тепловых двигателей:

- паровая машина;
- двигатель внутреннего сгорания;
- паровая и газовая турбины;
- реактивный двигатель;
- холодильные и компрессорные машины.

Во всех этих двигателях энергия топлива переходит в энергию газа (или пара). Расширяясь, газ совершает работу и при этом охлаждается, часть его внутренней энергии превращается в механическую энергию.

Основные понятия и исходные положения термодинамики

Предметом термодинамики является изучение законов превращения тепловой энергии в энергию механическую.

Термодинамической системой называется совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействии друг с другом и с окружающими систему внешними телами («внешней средой»).

закрытые системы.

Свойства каждой системы характеризуются рядом величин, которые принято называть *термодинамическими* параметрами.

Изменение состояния термодинамической системы во времени называется *термодинамическим процессом*. *Термодинамический цикл* – это круговой процесс, осуществляемый термодинамической системой.

Термодинамический процесс называется *равновесным*, если все параметры системы при его протекании меняются достаточно медленно. В этом случае система фактически все время находится в состоянии равновесия с окружающей средой, чем и определяется название процесса

Внутренняя энергия и передача энергии

Под *внутренней энергией* будем понимать энергию хаотического движения молекул и атомов, включающую энергию поступательного, вращательного и колебательного движений как молекулярного, так и внутримолекулярного, а также потенциальную энергию сил взаимодействия между молекулами.

Кинетическая энергия молекул является функцией температуры, значение потенциальной энергии зависит от среднего расстояния между молекулами и, следовательно, от занимаемого газом объема V , т.е. является функцией V . По- этому внутренняя энергия U есть функция состояния тела.

Величина $u = U / M$, называемая удельной внутренней энергией (Дж/кг), представляет собой внутреннюю энергию единицы массы вещества

Ее изменение в термодинамическом процессе не зависит от характера процесса и определяется только начальным и конечным состояниями тела.

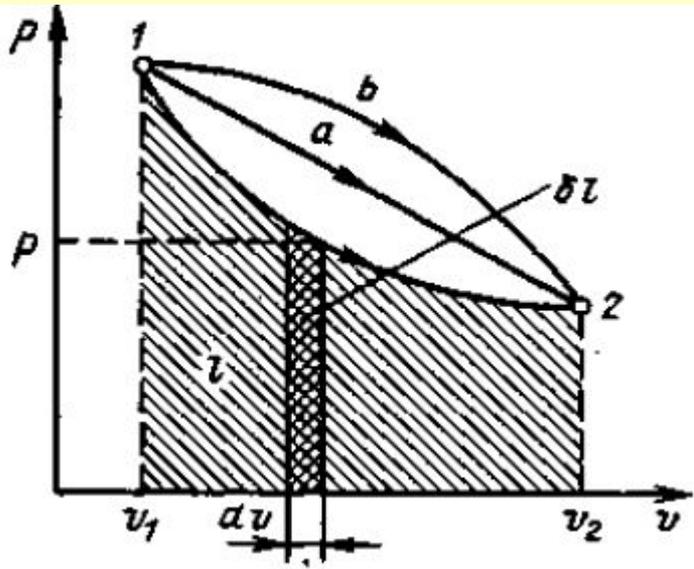
Передача энергии (формы обмена энергией) происходит двумя способами – работой L и теплотой Q .

Передача энергии в результате макроскопического упорядоченного движения микрочастиц называется *работой*.

Передача энергии в результате обмена хаотическим, ненаправленным движением микрочастиц называется *теплообменом*, а количество передаваемой при этом энергии - *количеством теплоты* или теплотой.

Рабочее тело – это газообразное, жидкое или плазменное вещество, с помощью которого осуществляется преобразование какой-либо энергии при получении механической работы, теплоты, холода.

Работа расширения



Графическое изображение работы в p, V-координатах

В термодинамике для исследования равновесных процессов широко используют P, V-диаграмму, в которой осью абсцисс служит удельный объем, а осью ординат - давление. Поскольку состояние термодинамической системы определяется двумя параметрами, то на P, V-диаграмме оно обозначается точкой/ точка 1 соответствует начальному состоянию системы, точка 2 - конечному, а линия 12 - процессу расширения рабочего тела от v_1 до v_2 . Работа процесса 12 изображается площадью, ограниченной кривой процесса, осью абсцисс и крайними ординатами.

Работа изменения объема эквивалентна площади под кривой процесса в диаграмме P, V.

Теплоемкость газов

Отношение количества теплоты dQ , полученной телом при бесконечно малом изменении его состояния, к связанной с этим изменением температуре тела dT называется **теплоемкостью** тела [1]: $C=dQ/dT$.

Коэффициент пропорциональности между количеством подведенной (отведенной) к телу теплоты и соответствующим изменением его температуры T называется **теплоемкостью** $Q=C T$

Обычно теплоемкость относят к единице количества вещества и в зависимости от выбранной единицы различают:

удельную массовую теплоемкость c , отнесенную к 1 кг газа, Дж (кг К);

теплоемкость при постоянном давлении $C_p=dq_p / dT$;

теплоемкость при постоянном объеме $C_v =dq_v / dT$.

(КПД) любого теплового двигателя, который определяется *отношением полезно полученной работы к теплу, которое на получение этой работы затрачено.*

$$\eta = \frac{L}{Q_1},$$

где L -полученная работа, Дж, Q_1 -теплота, затраченная на получение работы, Дж

Законы (начала) термодинамики.

Существует три закона, из которых первые два играют принципиальную роль в создании и описании работы тепловых машин и других преобразовательных устройствах.

Первый закон термодинамики

Пусть некоторому рабочему телу с объемом V и массой M , имеющему температуру T и давление p , сообщается извне бесконечно малое количество теплоты dQ . В результате подвода теплоты тело нагревается на dT и увеличивается в объеме на dV .

Повышение температуры тела свидетельствует об увеличении кинетической энергии его частиц. Увеличение объема тела приводит к изменению потенциальной энергии частиц. В результате внутренняя энергия тела увеличивается на dU . Поскольку рабочее тело окружено средой, которая оказывает на него давление, то при расширении оно производит механическую работу dL против сил внешнего давления. Так как никаких других изменений в системе не происходит, то по закону сохранения энергии

$$dQ = dU + dL,$$

т.е. теплота, сообщаемая системе, идет на приращение ее внутренней энергии и на совершение внешней работы.

Полученное уравнение является математическим выражением первого закона термодинамики.

Первый закона термодинамики для различных процессов

При этом возможны варианты:

$dQ = 0$, процесс **адиабатный**, без подвода или отвода теплоты.

$dL = 0$, процесс **изохорный**, рабочее тело не совершает механической работы.

Такое явление может быть в том случае, если объем пара жестко ограничен, или в случае использования в качестве рабочего тела несжимаемой жидкости.

В этих случаях вся поступающая теплота идет на увеличение внутренней энергии рабочего тела.

$dU = 0$, вся поступающая теплота расходуется на совершение механической работы. Т.е. $dQ = -dL$. Такое явление возможно только при использовании в качестве рабочего тела газов.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ

говорит о направленности тепловых процессов.

Существует несколько формулировок этого закона.

1) Теплота сама собой не может переходить от тела менее нагретого к более нагретому без одновременных изменений в этих телах или в окружающей среде.

2) Невозможно построить вечный двигатель второго рода.

3) Самопроизвольные процессы, происходящие в любой термодинамической системе, возможны только в том случае, если эта система неравновесная и эти процессы идут в направлении приближения к равновесию. При достижении равновесного состояния процессы прекращаются.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ

Обмен энергии может происходить в виде передачи того или иного количества теплоты Q . Однако, измеряя температуру, не всегда можно определить количество переданной теплоты. Например, при подводе теплоты к кипящей воде ее температура не меняется до момента полного выкипания.

Параметр, который изменяется только от количества переданной теплоты, был предложен Р. Клаузиусом в 1852 г. и впоследствии был назван энтропией S . Для произвольного количества газа энтропия обозначается через S и измеряется в Дж/К, а для 1 кг газа энтропия обозначается s и измеряется в Дж/(кг К).

Энтропия не может быть измерена каким-либо образом (как объем) и определяется только расчетным путем. $ds = dq / T$.

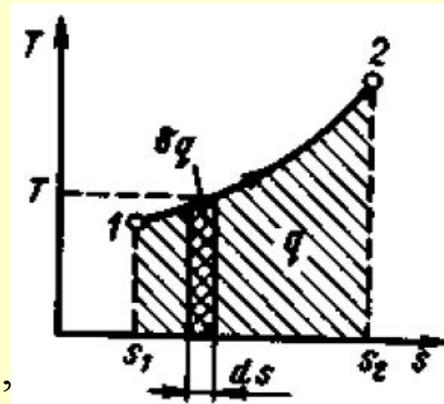
В термодинамике широко используют T, s - диаграмму, на которой (как и на $p, -V$ диаграмме) состояние термодинамической системы изображается точкой, а равновесный термодинамический процесс - линией

Из уравнения (3.3) следует, что в равновесном процессе

$$dq = Tds,$$

dq и ds имеют одинаковые знаки, следовательно, по характеру изменения энтропии в равновесном процессе можно судить о том, в каком направлении происходит теплообмен.

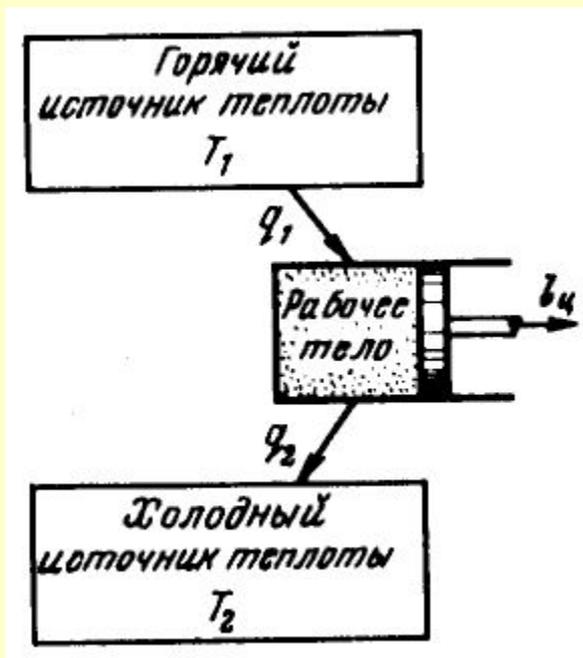
При подводе теплоты к телу ($dq > 0$) его энтропия возрастает ($ds > 0$), а при отводе теплоты ($dq < 0$) - убывает ($ds < 0$).



Графическое изображение теплоты в T, s – координатах

Общая формулировка второго закона термодинамики

Несмотря на эквивалентность теплоты и работы, процессы их взаимного превращения неравнозначны. Опыт показывает, что механическая энергия может быть полностью превращена в теплоту, например, путем трения, однако теплоту полностью превратить в механическую энергию в периодически повторяющемся процессе нельзя. Это связано с существованием фундаментально-го закона природы, называемого *вторым законом термодинамики*



Второй закон термодинамики звучит следующим образом: **невозможна периодически действующая тепловая машина, единственным результатом действия которой было бы получение работы за счет отнятия теплоты от некоторого источника**

Термодинамическая схема теплового двигателя

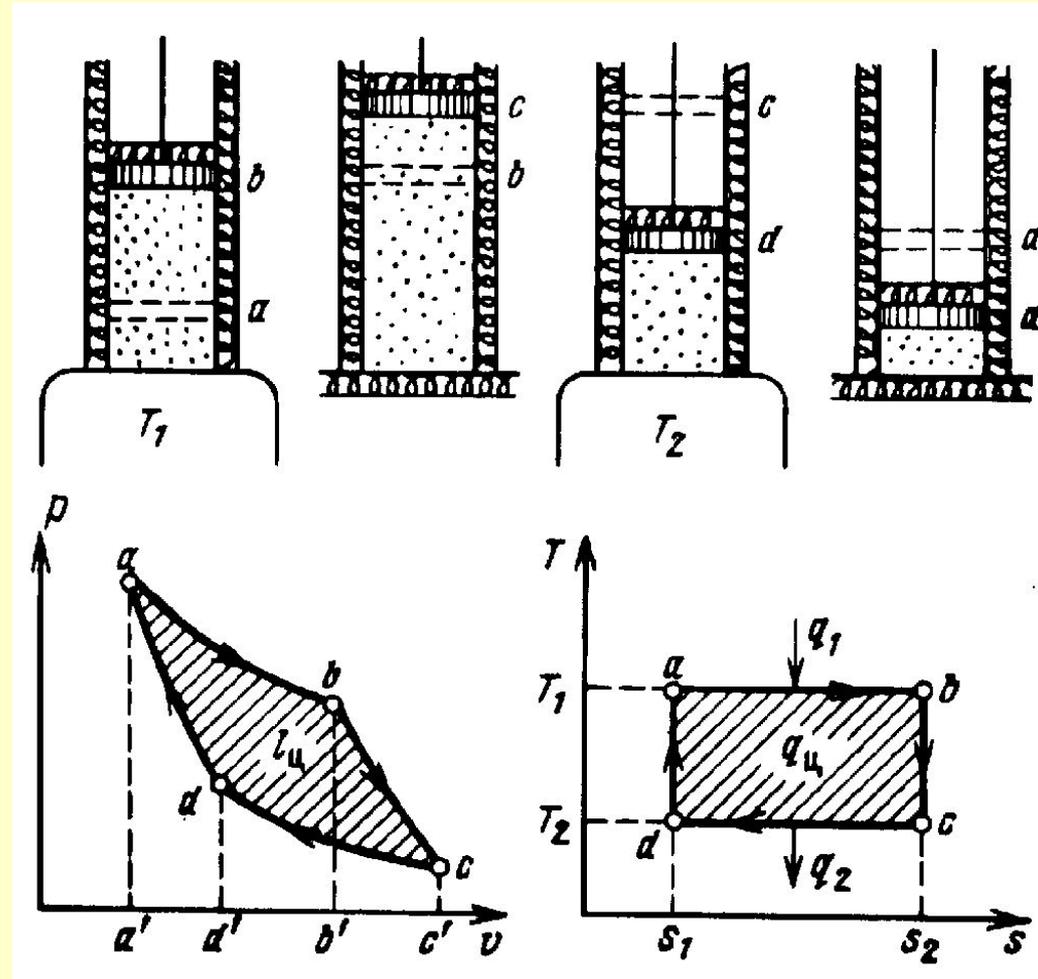
Прямой цикл Карно

Цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, носит название цикла Карно.

Термический КПД цикла Карно определяется формулой

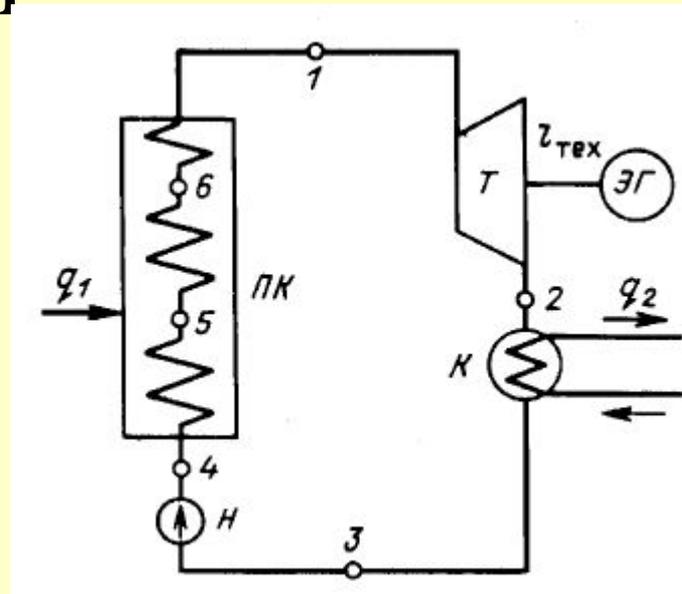
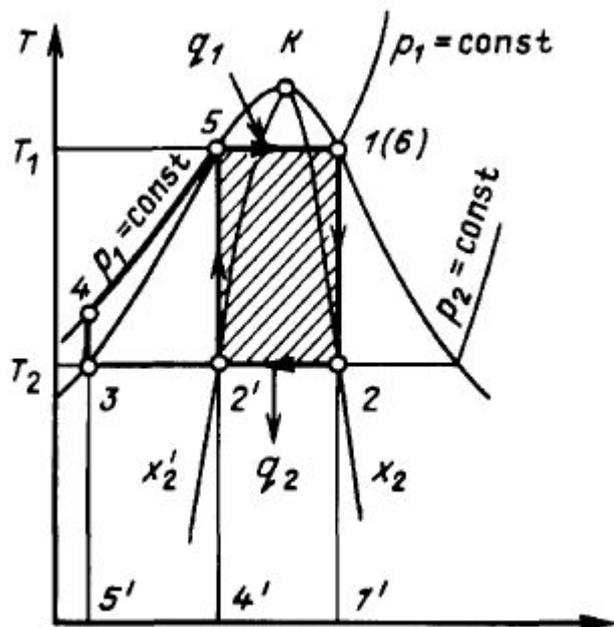
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Из нее видно, что термический *КПД цикла Карно зависит только от абсолютных температур горячего и холодного источников.* Увеличить КПД цикла можно либо за счет увеличения температуры горячего источника, либо за счет уменьшения температуры холодного. Причем увеличение температуры горячего источника в меньшей степени повышает КПД цикла Карно, чем такое же (в Кельвинах) уменьшение температуры холодного.

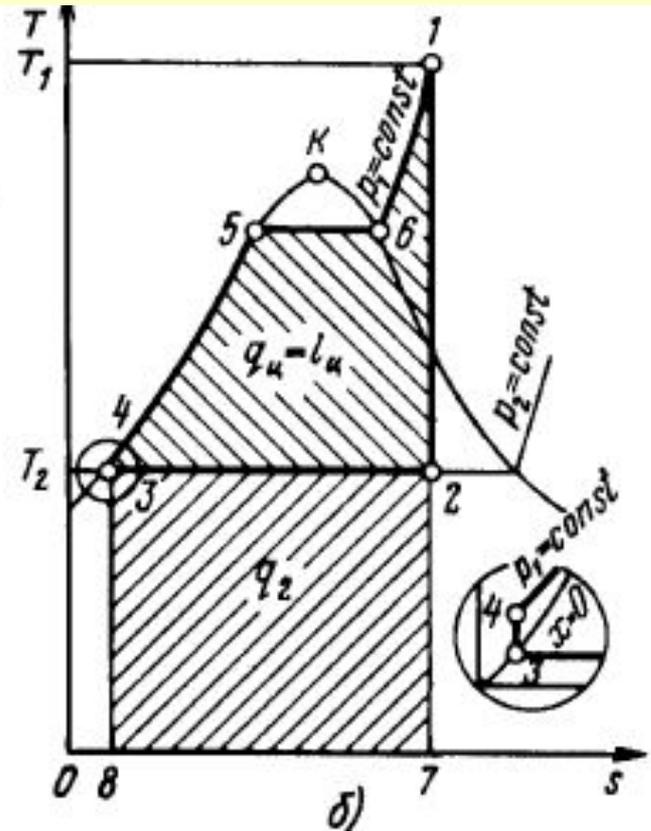
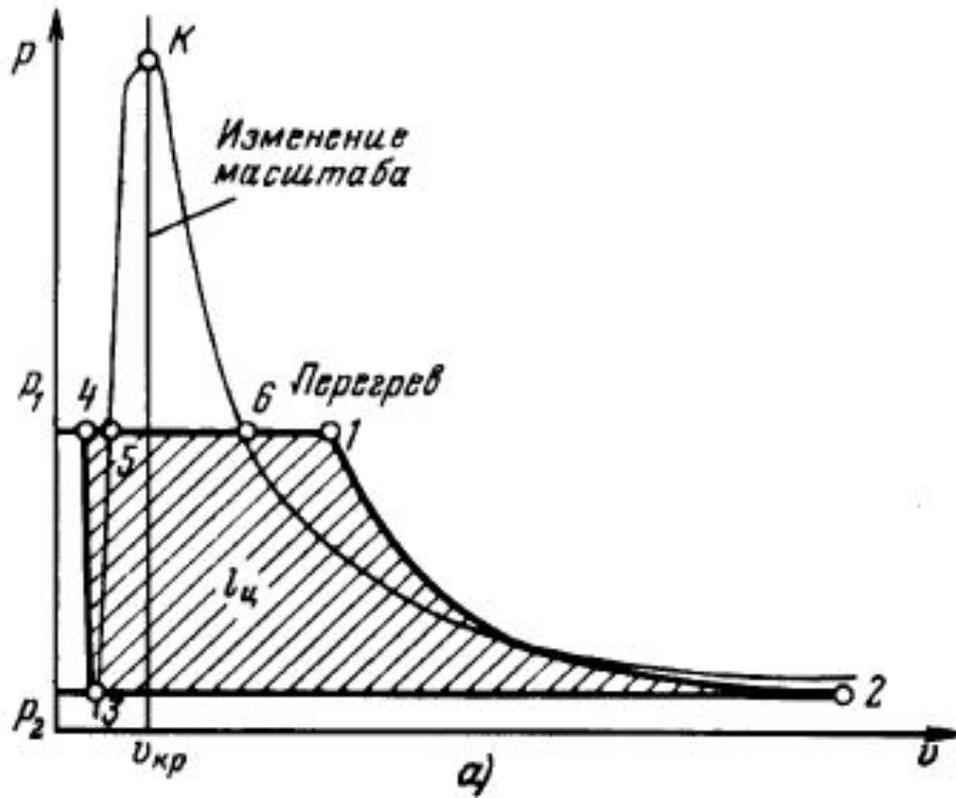


**ЦИКЛЫ
ПАРТУРБИННЫХ
УСТАНОВОК. ЦИКЛ
РЕНКИНА**

Циклы Карно и Ренкина насыщенного водяного пара в T, S -диаграмме



Цикл Ренкина на перегретом паре:
 а – в P, v - диаграмме; б – в T, s - диаграмме



Энтальпия

В термодинамике важную роль играет энтальпия - величина, которая является функцией состояния и обозначается H .

Энтальпия (греч. $\epsilon\nu\theta\alpha\lambda\lambda\omega$ «напряжение»), также **тепловая функция** и **теплосодержание** — термодинамический потенциал, характеризующий состояние системы в термодинамическом равновесии при выборе в качестве независимых переменных давления, энтропии и числа частиц.

Проще говоря, **энтальпия — это та энергия, которая доступна для преобразования в теплоту при определённом постоянном давлении.**

$$H = U + pV.$$

Энтальпия – это сумма внутренней энергии системы U и произведения давления системы p на ее объем V .

Также как внутренняя энергия, работа и теплота, она измеряется в джоулях (Дж).

h – удельная энтальпия, которая представляет собой энтальпию системы, содержащей 1 кг вещества, и измеряется в Дж/кг.

Изменение энтальпии в любом процессе определяется только начальным и конечным состоянием тела и не зависит от характера процесса.

При изобарном процессе ($dp=0$), если давление системы сохраняется неизменным,

$$dq_p = dh$$

И

$$q_p = h_2 - h_1,$$

т.е. теплота, подведенная к системе при постоянном давлении, идет только на изменение энтальпии данной системы. Это выражение часто используется в расчетах, так как огромное количество процессов подвода теплоты в теплоэнергетике (в паровых котлах, камерах сгорания газовых турбин и реактивных двигателей), а также целый ряд процессов химической технологии и многих других осуществляется при постоянном давлении.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КЭС И ТЭЦ

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ И ИХ СХЕМЫ

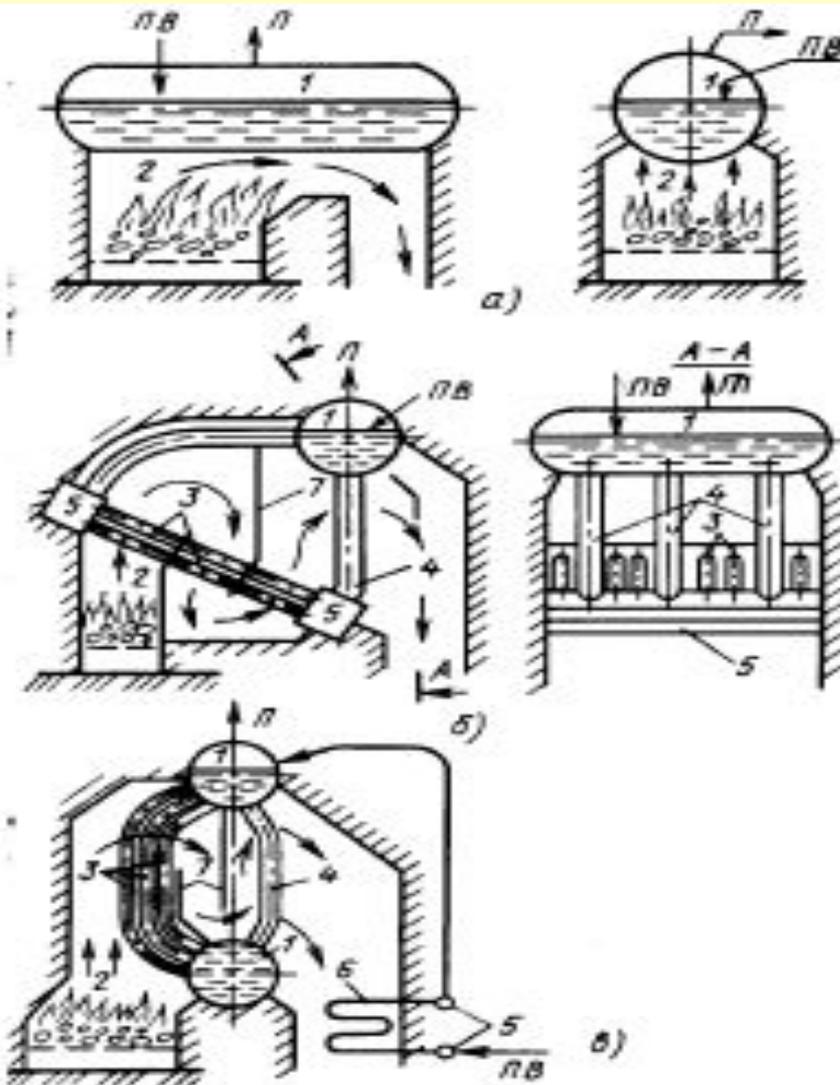
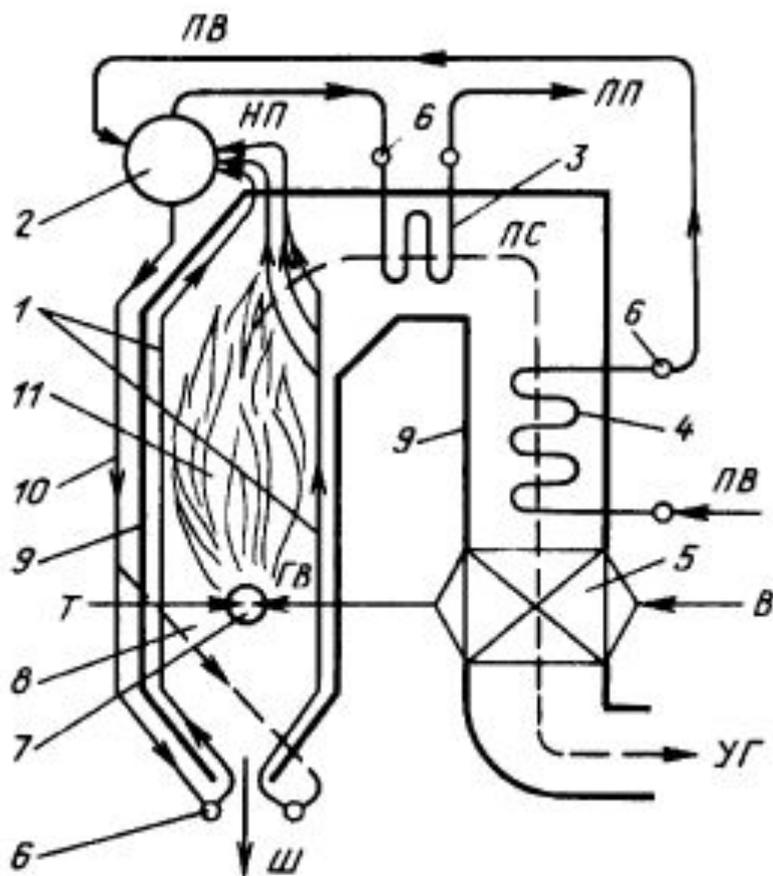
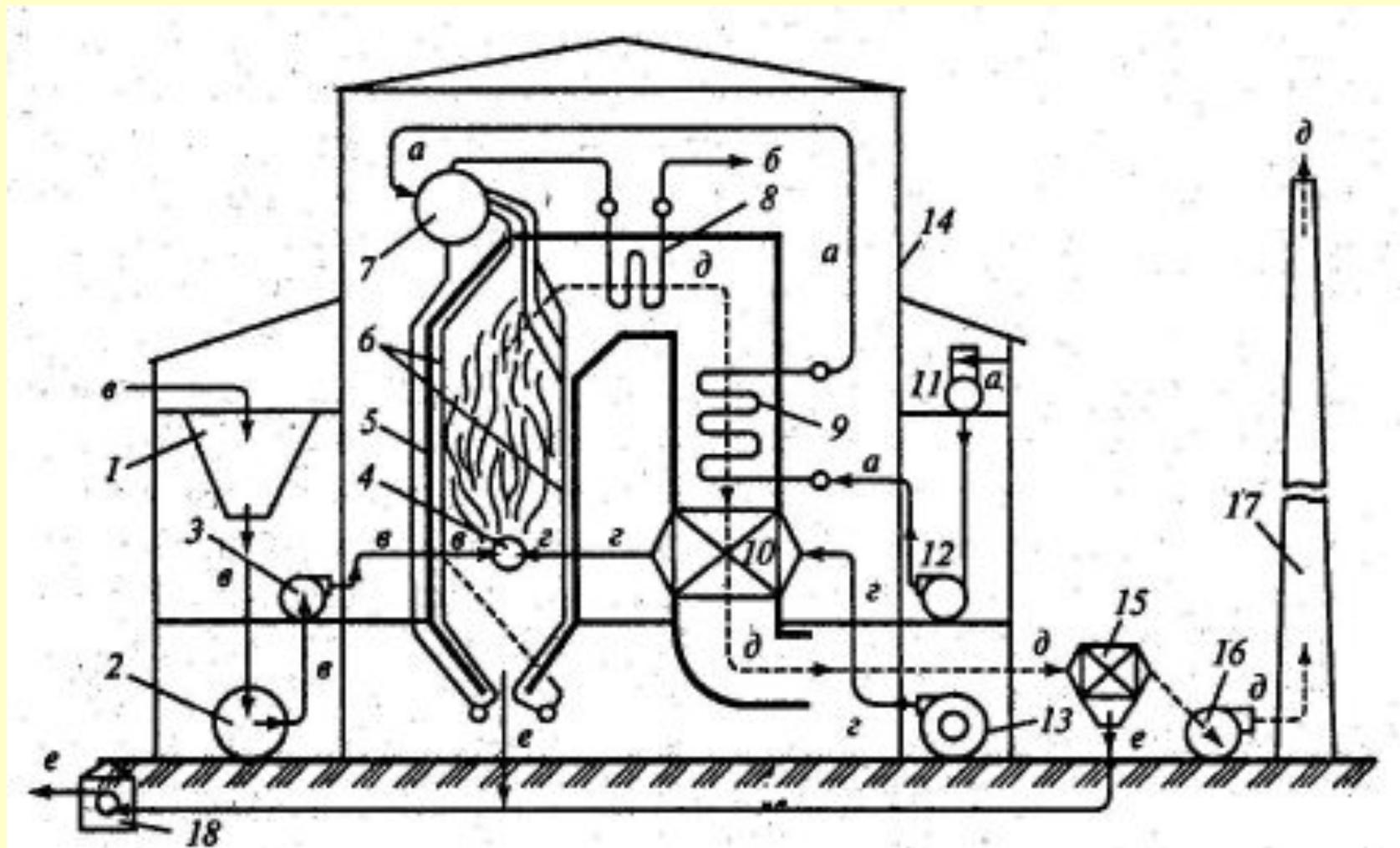


Рисунок 5.1. Схема развития паровых котлов:
 а – простой цилиндрический котел; б – водотрубный котел с наклонным трубным пучком; в – двухбарабанный вертикально-водотрубный котел. Стрелками показано движение продуктов в газоходах: 1- барабан; 2- топка; 3 – трубы кипящего (испарительного) пучка; 4 – опускные трубы; 5 – коллекторы, объединяющие трубы поверхностей нагрева; 6 – водяной экономайзер; 7 – перегородки в газоходах котла, ПВ – питательная вода; П – пар

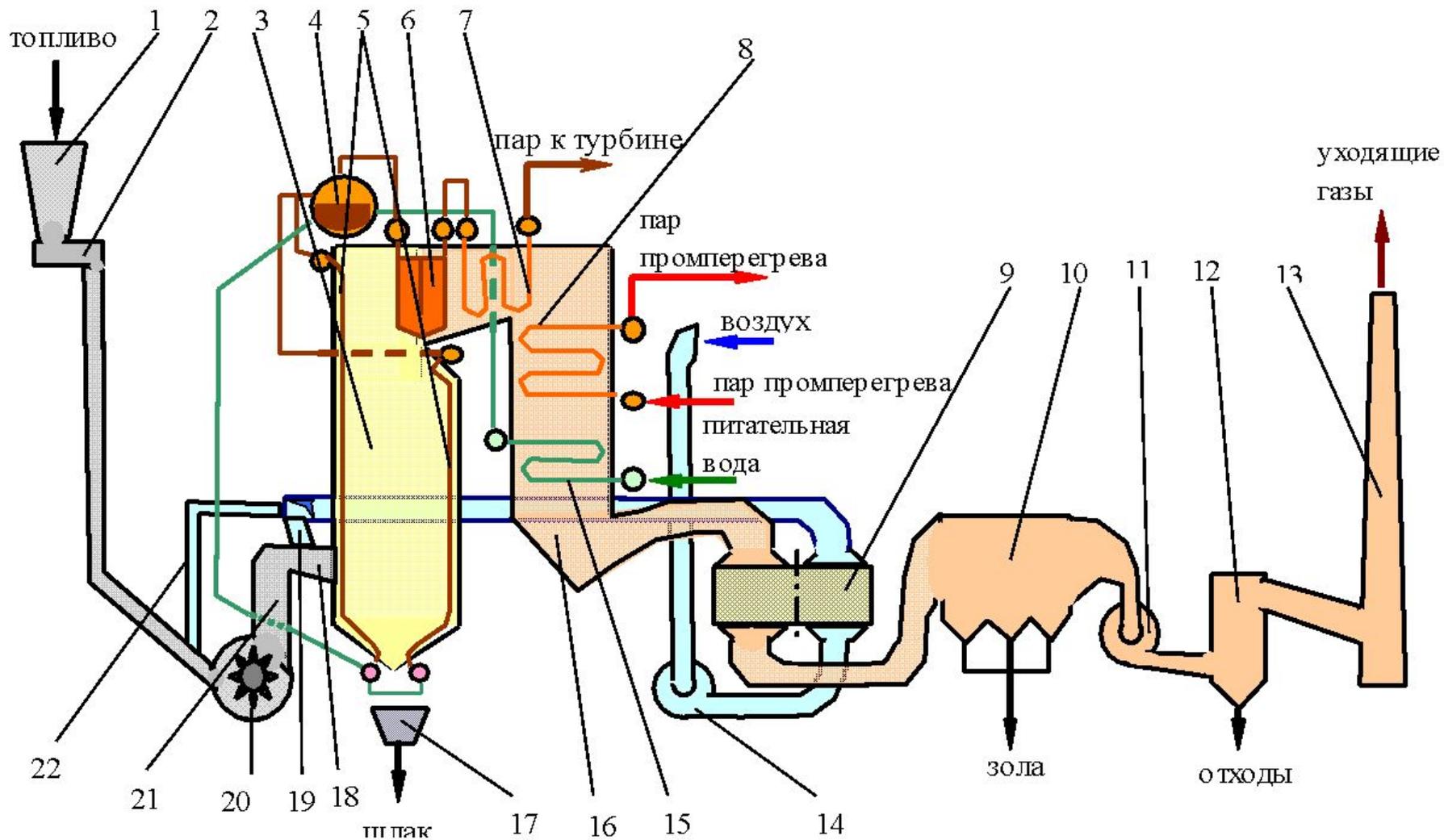
Современный вертикально-водотрубный барабанный паровой котел с естественной циркуляцией



ПВ – поддача питательной воды; НП – линия насыщенного пара; ПП – перегретый пар; Т – поддача топлива к горелке; В – подвод воздуха к воздухоподогревателю; ГВ – горячий воздух; ПС-УЧ – тракт продуктов сгорания и уходящих газов; Ш – шлак; 1 – экранные трубы; 2 – барабан; 3 – пароперегреватель; 4 – водяной экономайзер; 5 – воздухоподогреватель; 6 – коллекторы; 7 – горелка; 8 – топка; 9 – стена топки и газохода; 10 – опускная труба; 11 – топочный факел



Технологическая схема производства пара в котельной установке



ЭЛЕМЕНТЫ ПАРОВОГО КОТЛА

Топка – устройство котла, предназначенное для сжигания органического топлива, частичного охлаждения продуктов сгорания и выделения золы. Топки делят на слоевые, камерные, вихревые.

Пароперегреватель – устройство для повышения температуры пара, поступающего из испарительной системы котла. Пароперегреватели бывают радиационные и конвективные.

Экономайзер – устройство, обогреваемое продуктами сгорания топлива и предназначенное для подогрева или частичного парообразования воды, поступающей в котел.

Воздухоподогреватель – устройство для подогрева воздуха продуктами сгорания топлива перед подачей в топку котла. По принципу действия разделяются на рекуперативные и регенеративные.

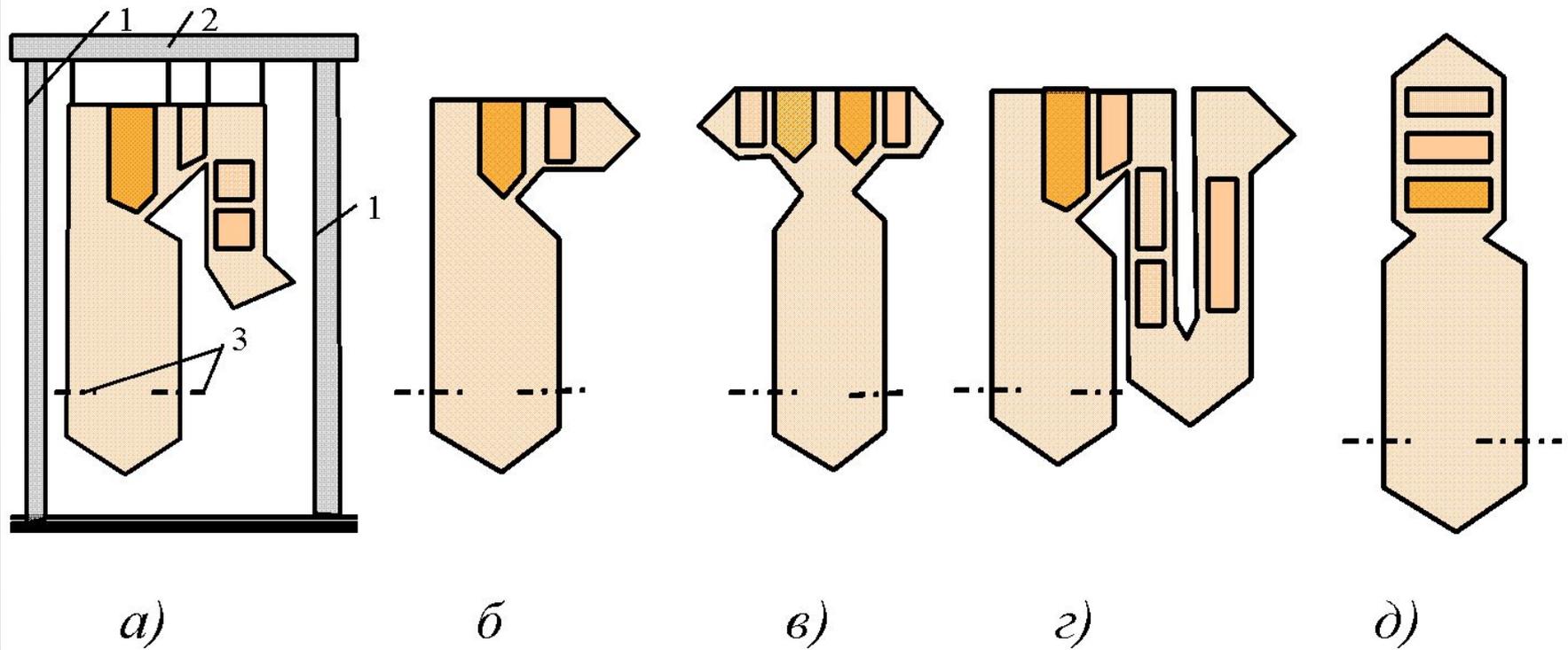
Обмуровка котла – система огнеупорных и теплоизоляционных ограждений или конструкций котла, предназначенная для уменьшения тепловых потерь и обеспечения газовой плотности. Температура наружной поверхности не должна превышать 328 К. Обмуровка бывает тяжелой 500-600 мм, облегченной (200-500 мм), легкой (100-200 мм)

Система производства пара

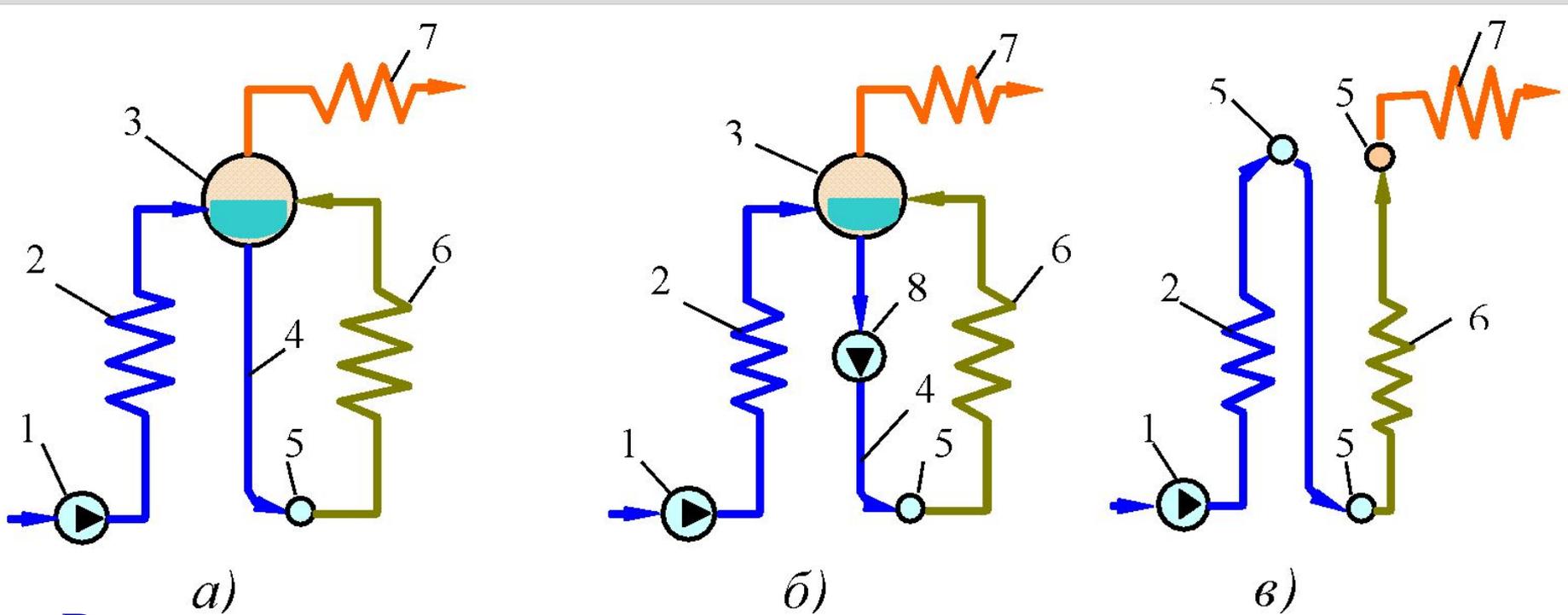
- Подогрев воды до температуры насыщения происходит в водяном экономайзере; производство пара – в испарительных (парообразующих) поверхностях нагрева; перегрев пара – в пароперегревателях. Все эти теплообменники выполнены из труб и имеют свои конструктивные особенности.
- Для непрерывного отвода тепла от продуктов сгорания и обеспечения нормального температурного режима металла поверхностей нагрева рабочее тело в них движется непрерывно.
- При этом вода в водяном экономайзере и пар в пароперегревателе движутся однократно относительно поверхностей нагрева.
- В испарительных трубах движение воды и пара в котлах различных типов может осуществляться многократно.

Конструктивные схемы котла

П-образной (а), Г-образной (б), Т-образной (в), N-образной (г), или башенной (д)



Конструктивные схемы движения пароводяной среды в котле



Различают котлы с:

- естественной циркуляцией (а);
- принудительной циркуляцией (б);
- прямоточные котлы (в).

Котлы с естественной циркуляцией

Замкнутый контур естественной циркуляции (циркуляционный контур) состоит из двух систем труб: обогреваемой и необогреваемой объединенных вверху барабаном и внизу коллектором.

Напор естественной циркуляции определяется по уравнению $S_{\text{об}} = (\rho' - \rho_{\text{см}}) gH$, где H – высота контура, м.

В контуре с естественной циркуляцией движение многократное: в процессе прохождения контура вода испаряется не полностью, а лишь частично.

Неиспарившаяся часть воды вновь проходит контур.

Паросодержание на выходе из подъемных труб составляет 3 ÷ 20%.

Поэтому вода проходит циркуляционный контур 35 ÷ 5 раз.

Отношение массового расхода циркулирующей воды G_v , к количеству образующегося пара G_n называется **кратностью циркуляции**:

$$K = G_v / G_n = 5 \div 35$$

Барабанные паровые котлы с принудительной многократной циркуляцией

- Такие котлы (б) становятся независимыми от высоты контура.
- Циркуляционный насос встроенный в контур естественной циркуляции позволяет располагать парообразующие трубы, как с вертикальным подъемным движением, так и с опускающим и горизонтальным движением пара. В таких котлах кратность циркуляции как правило ниже; она составляет $K = 3 \div 10$.
- Отличительной особенностью котлов с естественной и принудительной многократной циркуляцией является барабан, поэтому котлы называют барабанными.
- Такие котлы выполняются докритическими.

Вспомогательные устройства котельной установки

- К вспомогательным устройствам котельной установки относятся:
- 1. Система топливопивоподачи, включающая: топливный бункер сырого угля, углеразмельняющую мельницу, мельничный вентилятор.
- 2. Водоподготовка: для предотвращения отложений накипи природную воду подвергают *осветлению – удалению механических примесей отстаиванием и фильтрованием; умягчению – удалению накипеобразователей и деаэрации – удалению растворенных в воде газов. Все это называют химводоочисткой (ХВО).*
- 3. Очистка продуктов сгорания и окружающей среды. В продуктах сгорания органического топлива содержатся вредные токсические составляющие: летучая зола, окислы серы (SO_2 , SO_3) и азота (NO , NO_2). Применяются золоуловители механические сухие и мокрые и электрические; очистительные устройства для улавливания окислов серы из дымовых газов. Концентрация окислов азота зависит от температуры факела и концентрации кислорода в топочном процессе.
- 4. Различные регулирующие, запорные и предохранительные устройства

КПД котла

КПД котла по прямому балансу:

$$\eta_{\kappa} = \frac{D(i_{\text{пр}} - t_{\text{нс}})}{B \cdot Q_p^{\text{н}}},$$

где D – количество произведенного пара;

$i_{\text{пр}}$ - теплосодержание перегретого пара;

$t_{\text{нс}}$ - температура питательной воды;

B - количество сожженного топлива;

$Q_p^{\text{н}}$ - теплотворная способность топлива.

КПД котла по обратному балансу:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5,$$

$$100\% = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5,$$

где Q_p – располагаемая (внесенная в топку) теплота;

Q_1, q_1 – полезная теплота, используемая для выработки пара – 90 %;

Q_2, q_2 – потери тепла с уходящими газами – 6,0 %;

Q_3, q_3 – потери от химической неполноты сгорания – 0,5 %;

Q_4, q_4 – потери от механической неполноты сгорания - 3,0 %;

Q_5, q_5 – потери тепла в окружающую среду – 0,5 %;

КПД парового котла без учета затрат энергии на собственные нужды.

$$\eta_{\kappa} = \frac{Q_1 \cdot 100}{Q_p}.$$

Топливо

- В состав органического топлива входят соединения горючих и негорючих элементов. Твердое и жидкое топливо содержит горючие вещества: углерод (С), водород (Н), летучую серу (S_л); негорючие вещества: кислород (О), азот (N), золу (А), влагу (W). Летучая сера состоит из органических и колчеданных соединений:

- $S_{л} = S_{op} + S_{к}$

- Органические топлива характеризуются рабочей массой:

$$C^p + H^p + S_n^p + O^p + N^p + A^p + W^p = 100\%.$$

- Аналогично органические топлива характеризуются сухой горючей и органической массой.
- Важнейшими характеристиками топлива являются теплота сгорания, содержание золы и влаги, выход летучих веществ.
- **Теплота сгорания** – это количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива. Для сравнительных расчетов, как было указано ранее, используют **условное топливо** – топливо, теплота сгорания которого принята равной 29,35 МДж/кг.

Три основных элементарных состава топлива:

- *рабочая* масса топлива
 $C+H+O+N+S+A+W=100\%$;
- *сухая* масса топлива $C+H+O+N+A=100\%$;
- *горючая* масса топлива $C+H+O+N=100\%$.

Технические характеристики ТОПЛИВ

- **Теплота сгорания (высшая теплота сгорания, низшая теплота сгорания)**
- **Выход летучих веществ**
- **Зольность топлива**
- **Влажность топлива.**
- **Сернистость топлива.**

Таблица 1.7. Состав и теплота сгорания органического топлива

Топливо	Сухое беззольное состояние (<i>daf</i>)										Рабочее состояние (<i>r</i>)			
	W_f^r , %	A^d , %	V, %	C, %	H, %	S_c , %	N, %	O, %	$\frac{Q_s}{\text{МДж}}$ кг (м³)	$\frac{Q_i}{\text{МДж}}$ кг (м³)	Q_s/Q_i	$\frac{Q_s}{\text{МДж}}$ кг (м³)	$\frac{Q_i}{\text{МДж}}$ кг (м³)	Q_s/Q_i
Торф	50	12,5	70,0	56,5	6,0	0,3	2,5	34,7	22,9	21,48	1,066	10,02	8,12	1,234
Бурые угли														
Б1 (Александрийское месторождение)	55,6	22,5	58,0	69,3	5,6	4,9	0,7	19,5	28,88	27,13	1,064	9,94	7,91	1,256
Б2 (Подмосковный бассейн)	32,0	39,0	48,0	66,0	5,2	6,9	1,1	20,8	27,63	25,74	1,073	11,46	9,88	1,16
Б3 (Азейское месторождение)	25,0	19,0	47,0	74,0	5,3	0,6	1,4	18,7	30,14	28,85	1,045	18,31	16,91	1,082
Каменные угли (Донбасс):														
Г (газовый)	10,0	28,0	40,0	79,0	5,5	4,9	1,5	9,1	33,70	31,98	1,054	21,84	20,47	1,067
Д (длиннопламенный)	13,0	28,0	43,0	75,0	5,5	4,9	1,6	13,0	31,81	30,10	1,057	19,92	18,5	1,077
Т (тощий)	6,0	25,0	12,0	89,0	4,2	3,5	1,5	1,8	35,59	34,33	1,037	25,09	24,07	1,042
Антрацит АШ (Донбасс)	8,5	30	4,0	92,0	1,8	2,6	0,8	2,7	33,66	32,95	1,021	21,56	20,89	1,032
Сланцы	8	70	90	74	10	4,7	0,3	11,0	36,7	34,5	1,064	12,0	11,0	1,09
Мазут М 100 (малосернистый)	3,0	0,05	—	87,31	12,07	0,31	—	0,3	44,32	41,61	1,065	42,98	40,27	1,067
Природный газ (Уренгойское месторождение)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39,92	35,84	1,114

Турбина

- *Турбина (турбомашина) является двигателем, в котором теплота рабочего тела (пара или газа) последовательно преобразуется в кинетическую энергию струи, а затем в механическую работу.*

Для турбин характерны

- 1. малые удельные капитальные вложения на единицу мощности;
- 2. экономичность обслуживания;
- 3. высокий КПД (70-80%);
- 4. равномерность вращения и отсутствие вибрации при работе

Стационарные паровые и газовые турбины

Турбины применяются для привода:

- электрогенераторов (в таком комплексе они называются турбогенераторы),
- центробежных компрессоров и воздуходувок (турбокомпрессоры и турбовоздуходувки),
- питательных, топливных и масляных насосов (турбонасосы).
- судовых движителей с выходом на гребные валы через зубчатые редукторы (турбозубчатые агрегаты), которые создают оптимальную частоту вращения гребных винтов.

Газовые турбины широко применяются в качестве:

- авиационных двигателей (турбовинтовые и турбореактивные двигатели);
- на локомотивах (газотурбовозы).

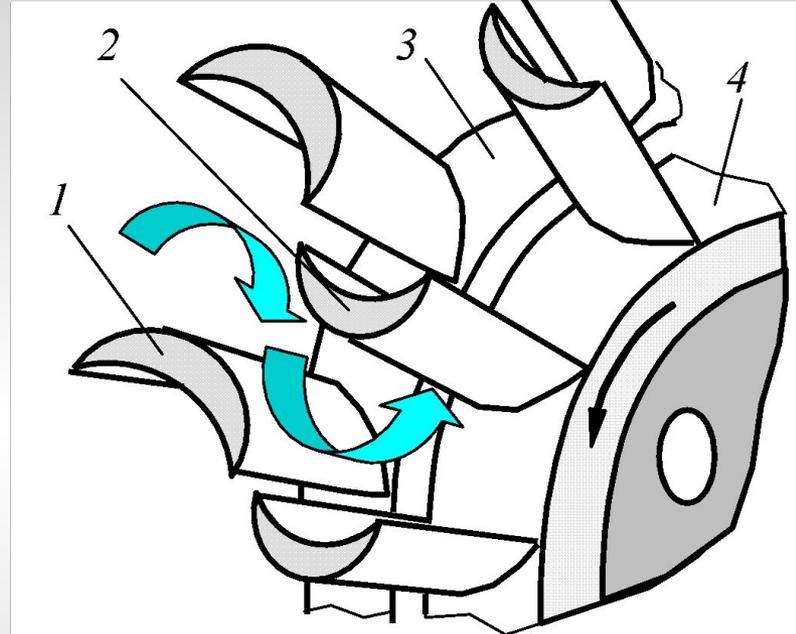
На гидроэлектростанциях устанавливаются тихоходные гидравлические турбины для привода генератора электрического тока (гидрогенераторы).

В свое время турбины вытеснили из энергетики поршневые машины благодаря хорошей экономичности, компактности, надежности работы и возможности получать большую единичную мощность в одном агрегате.

Схема движения рабочей среды в межлопаточном канале турбины

Принцип действия турбины заключается в преобразовании тепловой энергии пара в кинетическую энергию потока струи, которая, воздействуя на лопатки рабочего колеса, приводит во вращение ротор турбины.

Рабочие лопатки турбины имеют изогнутую форму и в совокупности образуют систему криволинейных каналов, называемых рабочей решеткой



Совокупность сопловых и рабочих решеток образуют ступень турбины.

Межлопаточные каналы сопловых и рабочих решеток называются проточной частью турбины.

Вал, на котором находятся рабочие лопатки, называется ротором турбины.

- В простейшей турбине рабочее тело поступает в сопло 1 (или группу сопел), разгоняется в нем до высокой скорости и направляется на рабочие лопатки 2 (рис.).
- Усилия, вызванные поворотом струи в каналах рабочих лопаток, вращают диск 3 и связанный с ним вал 4.
- Диск с закрепленными на нем рабочими лопатками и валом называется ротором.
- Один ряд сопел и один диск с рабочими лопатками составляют ступень.

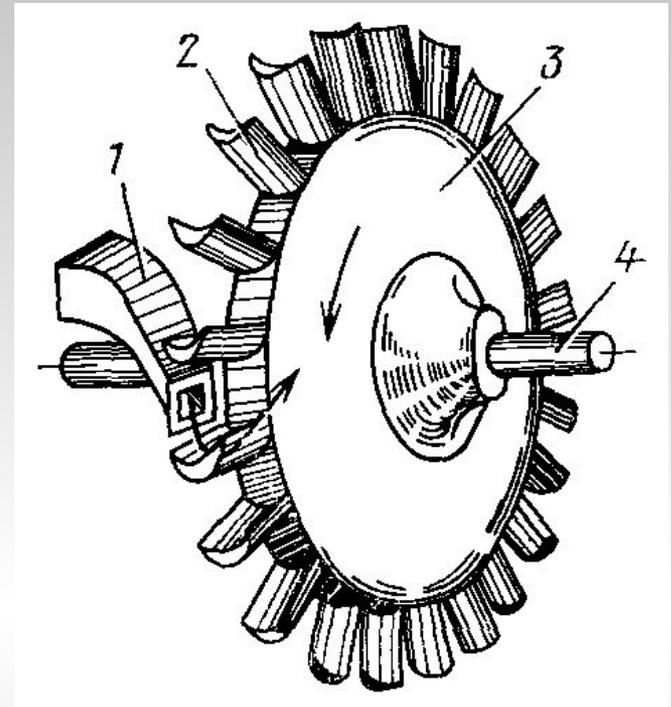


Схема турбинной ступени:

1 – сопло (или группа сопел); **2** – лопатки; **3** – диск; **4** – вал

Работа турбинной ступени

Если преобразование потенциальной энергии в кинетическую происходит только в сопловой решетке, то такой принцип работы турбины называется активным, а сама ступень – активной ступенью.

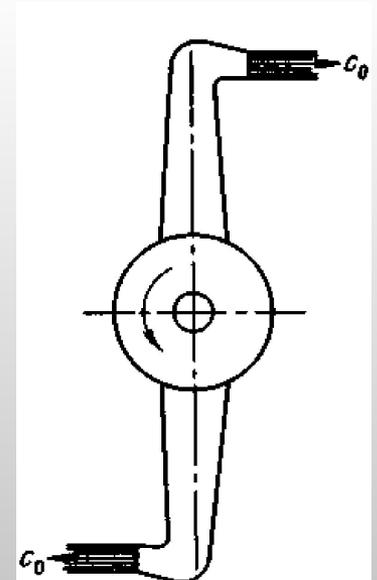
Если же преобразование потенциальной энергии пара происходит как в сопловой, так и в рабочей решетке, то в этом случае ступень называется реактивной ступенью турбины

Согласно уравнению Бернулли рабочее колесо совершает работу:

$$A = (i_1 - i_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho_{cp} g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$$

Следовательно, вся энергия потока состоит:

- из энергии положения - $(i_1 - i_2)$
- энергии давления - $\frac{p_1 - p_2}{\rho_{cp} g}$
- кинетической энергии потока . $\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}$

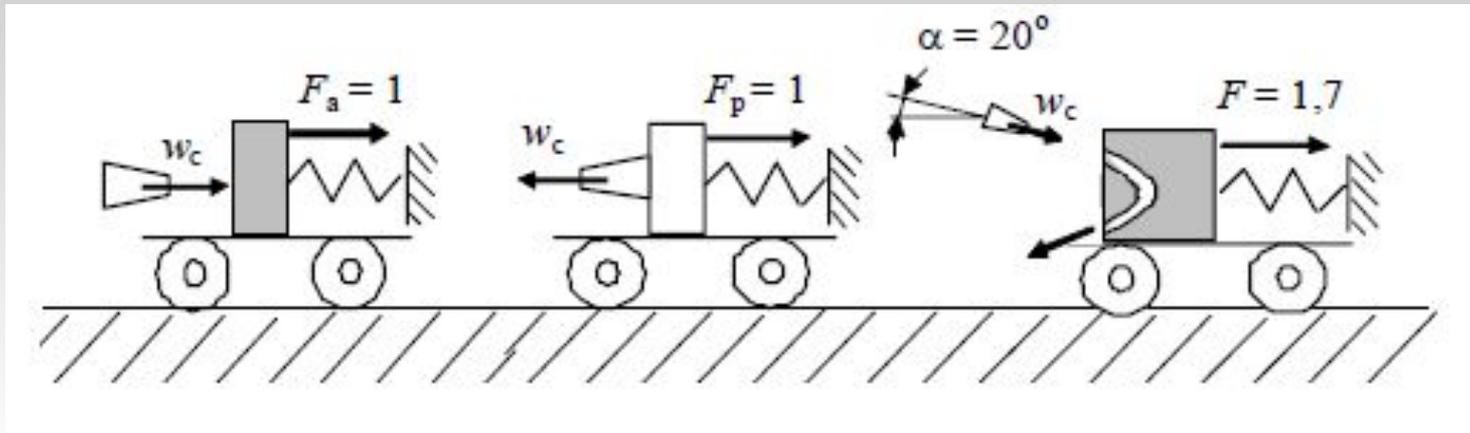


1. Принцип действия паровых турбин. Основы их устройства

Паровая или газовая турбина является двигателем, в котором теплота и давление рабочего тела последовательно преобразуются в кинетическую энергию, а затем – в механическую работу.

- При этом газ или пар направляется в сопло, *где он разгоняется*, а из сопла он попадает на лопатки турбины, *где и производит работу*.
- Сила действия струи на лопатку зависит от её скорости w , формы и расположения лопатки.
- При прочих равных условиях *наибольшая сила воздействия на стенку возникает*, **когда** применяют канал, *где струя меняет своё направление*.

- На рисунке приведены три случая организации взаимодействия струи газа со стенкой.



Воздействие струи газа на тело

- При прочих равных условиях ($w_{\text{стр}} = \text{const}$, $M_{\text{стр}} = \text{const}$) *активная сила воздействия струи F_a одинакова с реактивной силой F_p .*
- *Если же поток направить через канал, меняющий его направление, то частично реализуются и активная, и реактивная силы.* Именно так устраивают межлопаточные каналы в паровых и газовых турбинах.

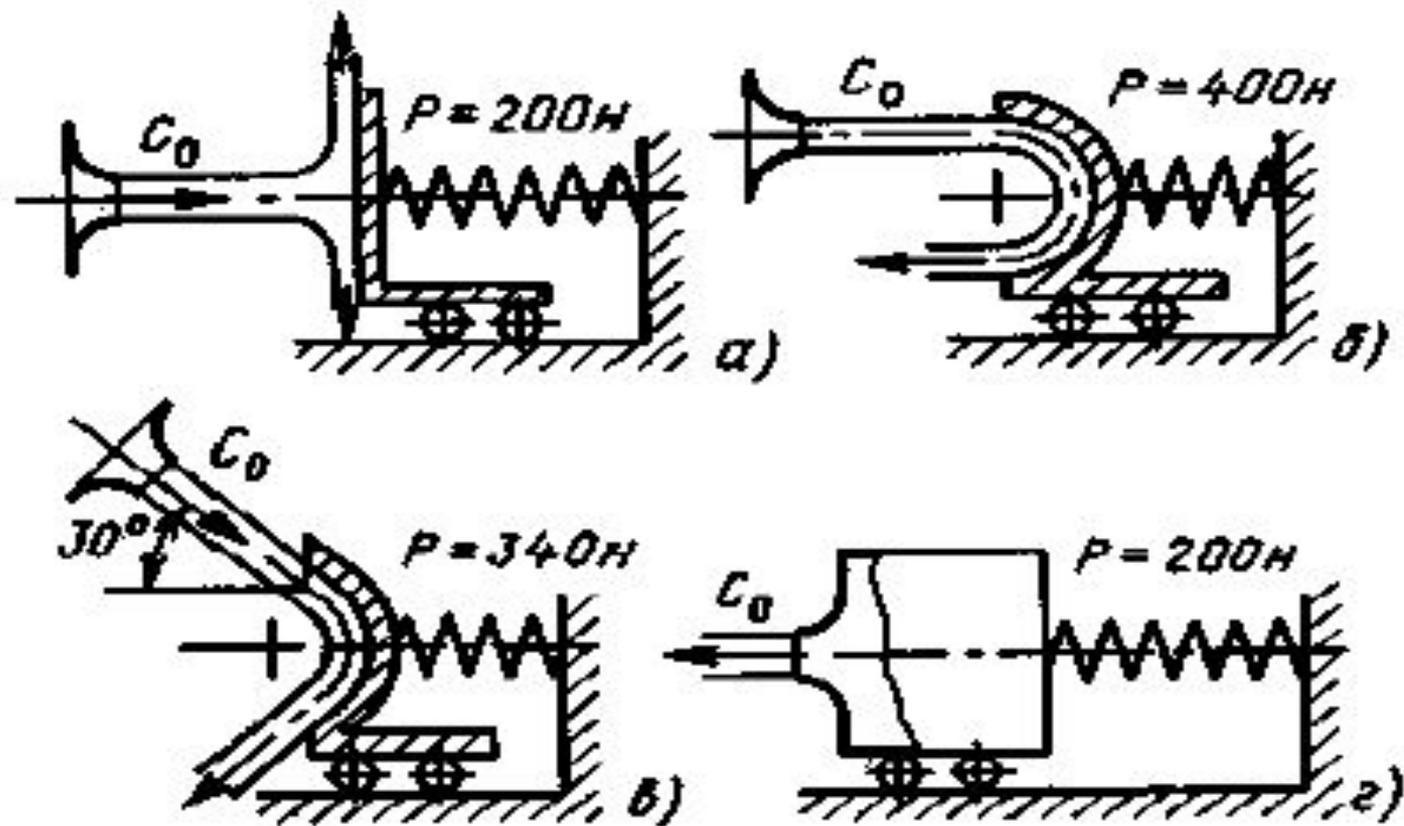
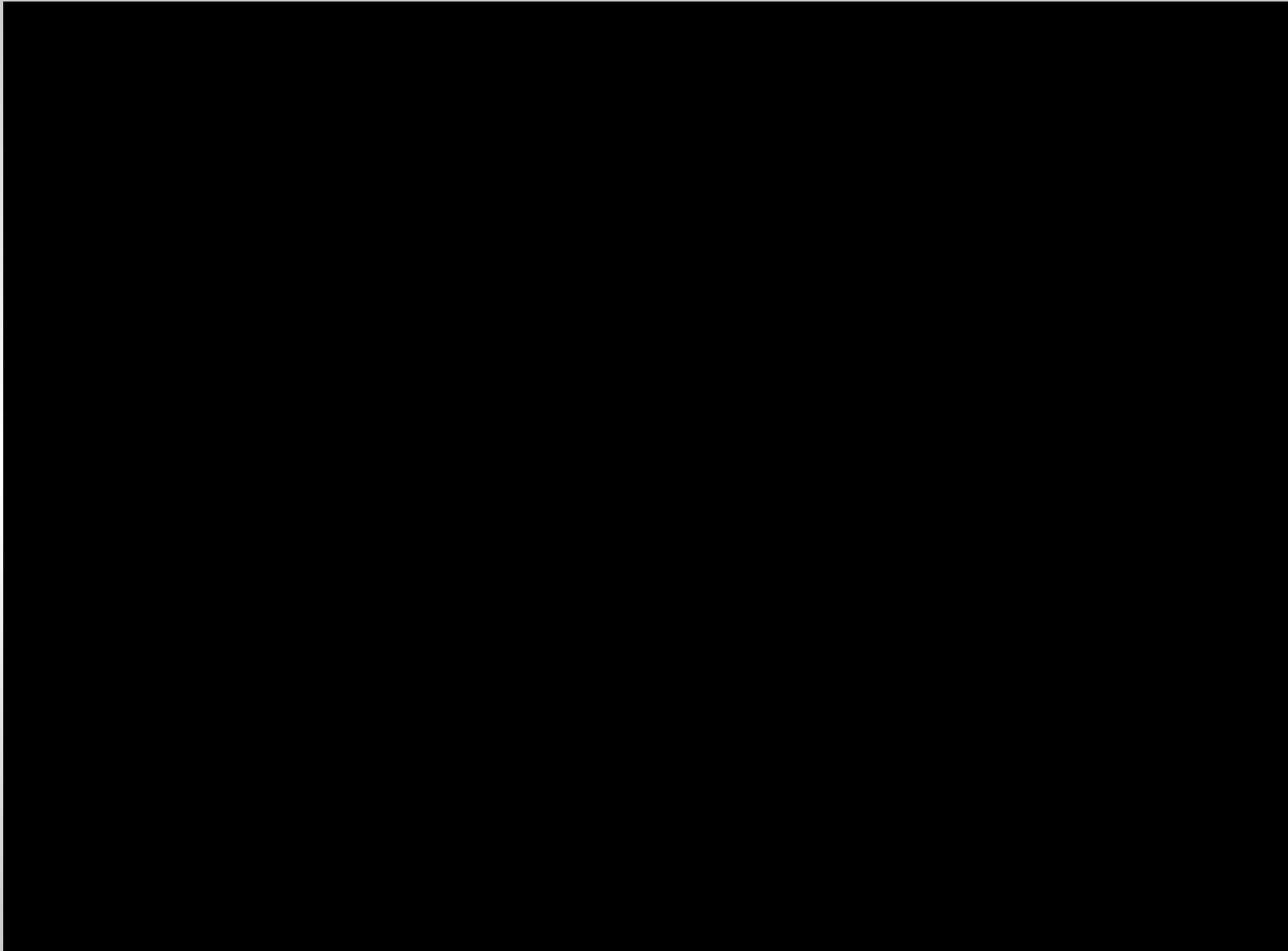
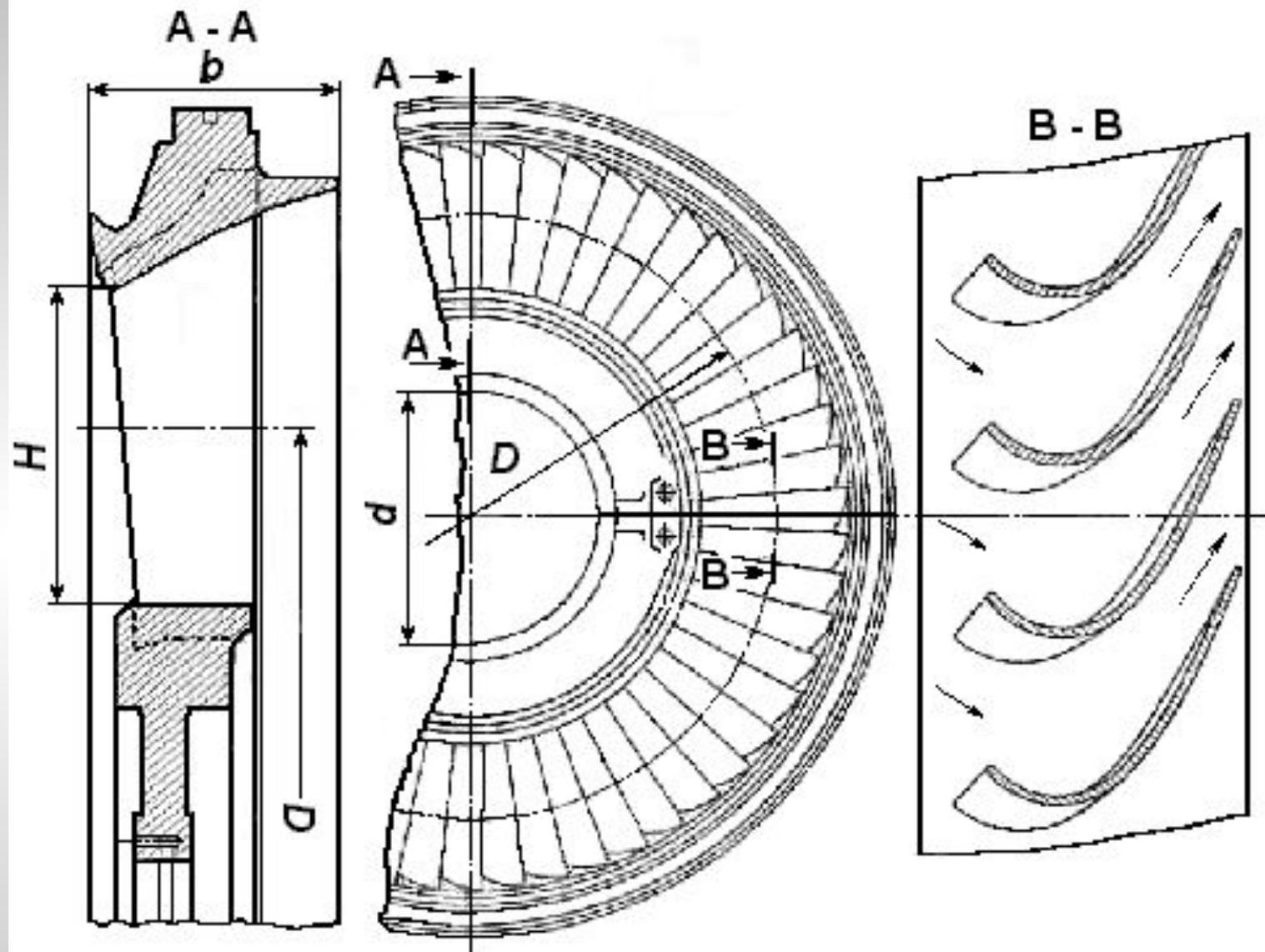


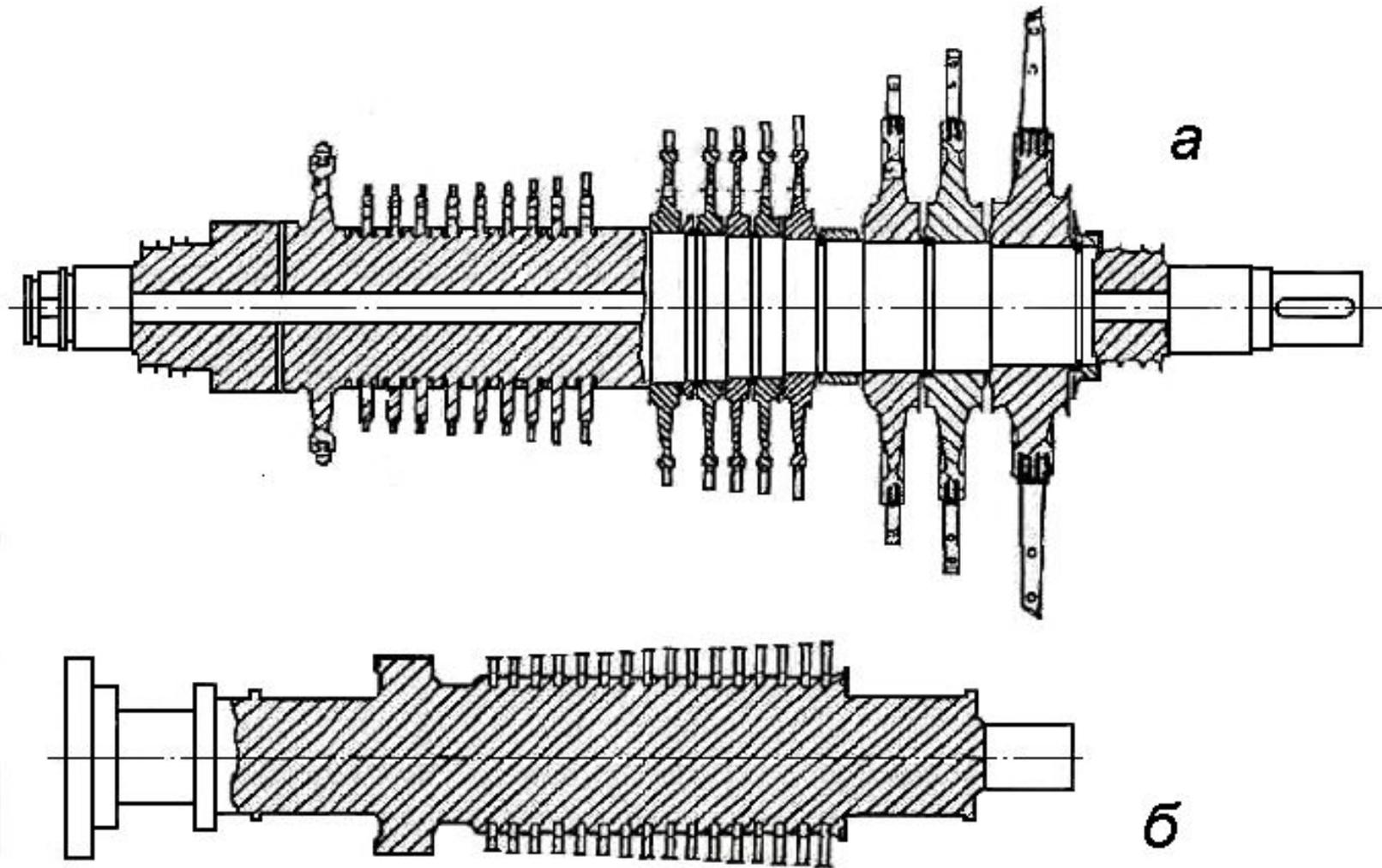
Рисунок 8.1. Схема действия струи газа на поверхности тел различной формы

- Обычно поток пара или газа, *направляется сбоку под острым углом к плоскости вращения.*
- Поток подаётся через направляющий аппарат в виде *расположенных по окружности неподвижных сопел (сопловая решётка).*
- Выходящие из сопел струи пара попадают на лопатки рабочего колеса, сидящего на валу турбины.
- *Ротор турбины вращается на подшипниках в корпусе машины, а сопловые аппараты соединены с корпусом и при работе турбины остаются неподвижными.*





Устройство соплового диска



Роторы паровых турбин:
а – дискового типа; б – барабанного типа

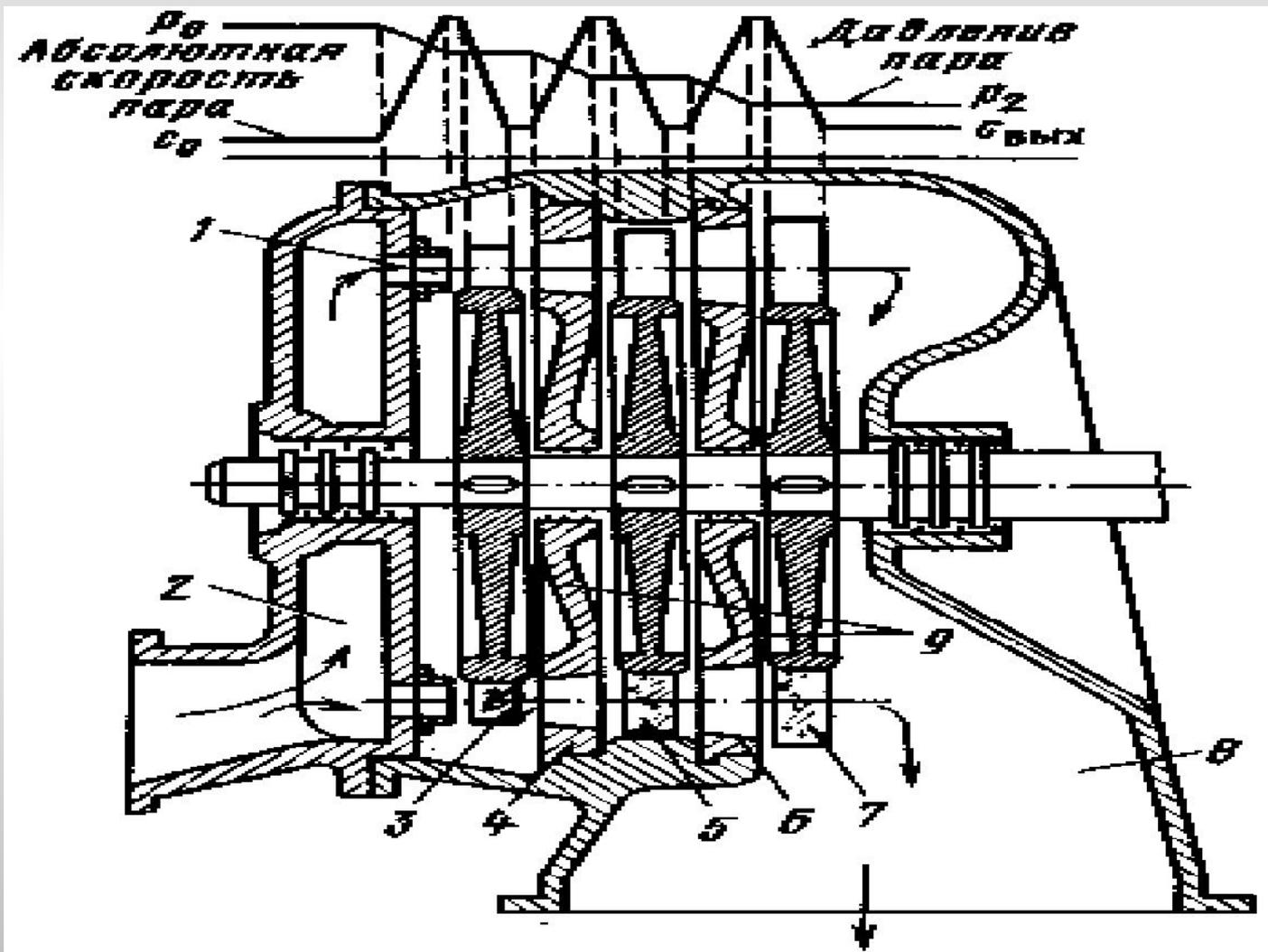
- *Обычно сопловые каналы организуются с помощью специальных сопловых лопаток, устанавливаемых по всей окружности диска, **который называют диафрагмой**.*
- **Диафрагма** имеет горизонтальный разъем, а в центре её имеется отверстие диаметром d , через которое проходит вал турбины.
- *Сечение по среднему диаметру лопаток D называют **сопловой решёткой**.*
- Форма сопловых лопаток такова, что между ними образуются суживающиеся сопла, в которых происходит разгон потока пара. В отдельных случаях может применяться сопло Лавалья, позволяющее разгонять пар до сверхзвуковых скоростей.

- Роторы турбин выполняются или дискового типа, когда рабочие лопатки устанавливаются на специальных дисках, соединённых с валом, или барабанного типа, когда лопатки монтируются на сплошном (или полом) барабане вала.
- Турбины, в которых весь **располагаемый теплоперепад** преобразуется в кинетическую энергию потока в соплах, а в каналах между лопатками расширения и разгона газа не происходит, **называются активными**.

- В активной турбине проходное сечение канала между лопатками турбины делается постоянным, и скорость и давление пара там не меняются.
- В реактивных турбинах используется **реактивная сила** *вытекающего из сопла потока*.
- *В чистом виде – это авиационные турбореактивные двигатели*, толкающие самолёт вперёд при выбрасывании продуктов сгорания в атмосферу через сопло.

- *На практике к реактивным относят любые турбины, у которых располагаемый теплоперепад преобразуется в кинетическую энергию потока не только в сопловом аппарате, но и в каналах между рабочими лопатками.*
- Для этого профиль рабочих лопаток делается таким, что проходное сечение не постоянно, а уменьшается.
- В реактивных турбинах *расширение пара протекает как бы в два этапа: вначале в сопловом аппарате, а затем и в межлопаточных каналах рабочего колеса.*

Изменение давления p и скорости в ступенях активной турбины



Классы турбин

Они делятся на четыре класса (серии). Серия К, конденсационные турбины, используются только для передачи мощности через вал электрическому генератору с последующей выработкой электрической энергии. Турбины серии Р (с противодавлением), работающие только на отборе пара, именно этот отбор обеспечивает объем пара, проходящий через проточную часть турбины и следовательно мощность на ее валу. Серия Т, эта серия турбин обеспечивает промежуточный отбор пара для целей теплофикации, кроме того, она может работать в конденсационном режиме. Таким образом ее мощность на валу обеспечивается объемом пара в отборе плюс объемом пара, идущим в конденсатор. Допускается любое соотношение между этими двумя частями пара. Другими словами такая турбина может работать чисто в теплофикационном режиме, обеспечивая 100 % мощности, в чисто конденсационном режиме, также обеспечивая 100 % мощности и при любых их соотношениях. Турбины серии ТП, они обеспечивают отбор пара для промышленных потребителей, отбор пара для целей теплофикации, они могут работать в чисто конденсационном режиме. Соотношение этих режимов может быть любое, такое же, как и для турбин серии Т.

2. Классификация паровых турбин

- Познакомимся с классификацией турбин.

- По направлению движения рабочего тела турбомашин делят на осевые (поток движется параллельно оси), радиально-осевые и радиальные, когда поток направлен от периферии к оси ротора (**центростремительные турбины**) или наоборот (**центробежные машины**).

- Преимущественное распространение получили осевые турбины.

- По характеру тепловых процессов, происходящих в турбинах, они подразделяются на несколько групп:
- 1. Конденсационные турбины, у которых отработавший пар при давлении ниже атмосферного направляется в конденсатор и конденсируется в нем, а выделяющаяся при этом теплота полностью теряется с охлаждающей водой.
- Существующие у таких турбин нерегулируемые по давлению отборы пара (от 0,2 до 0,9 МПа) из промежуточных ступеней используются для регенеративного подогрева питательной воды для паровых котлов.

- **2. Конденсационные турбины с регулируемым по давлению отборами пара** (одним или двумя) для производственных и отопительных целей при частичном пропуске пара в конденсатор.
- **3. Турбины с противодавлением**, у которых тепло отработавшего пара, имеющего давление выше атмосферного, используется для производственных и отопительных целей.

Обозначение паровых турбин включает три группы индексов.

- Первая буква (или две буквы) характеризует тип турбины:
 - ***К – конденсационная*** (весь отработанный пар направляется в конденсатор),
 - ***Т – конденсационная с отопительным*** (теплофикационным) ***отбором пара на теплофикацию,***
 - ***П – конденсационные с отбором пара для промышленного потребления,***
 - ***ПТ- с двумя регулируемые отборами пара*** (потребителю и на теплофикацию),
 - ***Р – с противодавлением на выходе из установки,***
 - ***ПР – с производственным отбором и противодавлением;***
 - ***ТР – теплофикационные с противодавлением.***

- Следующая за буквами цифра указывает номинальную мощность турбины в МВт.
- Далее цифрой обозначается начальное давление пара перед турбиной в атмосферах.
- Под чертой для турбин П, ПТ, Р и ПР *отмечается номинальное давление производственного отбора или противодавление турбины в атмосферах*.
- *Например:* турбина ПТ-60-130/13 — номинальной мощностью 60 МВт на начальное давление 130 атм. (12,8 МПа) с двумя регулируемыми отборами пара: производственным 13 атм. (1,3 МПа) и теплофикационным 1,2 атм. (0,12 МПа) — *указанное давление для отопительных целей устанавливается заводом изготовителем.*

• Существуют несколько классификаций турбин:

□ *По конструктивному выполнению* турбины бывают:

- ✓ одноступенчатые (малой мощности), многоступенчатые;
- ✓ стационарные и транспортные;
- ✓ с постоянным или переменным числом оборотов.

□ *По числу корпусов (цилиндров)*: одно-, двух- и многоцилиндровые.

□ *По принципу парораспределения*: с дроссельным регулированием (редко); с сопловым парораспределением и регулирующими клапанами; с обводным распределением, когда свежий пар с пониженными параметрами полностью или частично подаётся на последующие ступени или даже во второй, третий цилиндры, минуя предыдущие (устарели).

□ *По принципу действия*: активные и реактивные.

□ *По давлению*: среднего, повышенного, высокого и сверхкритического давления.

Активные турбины

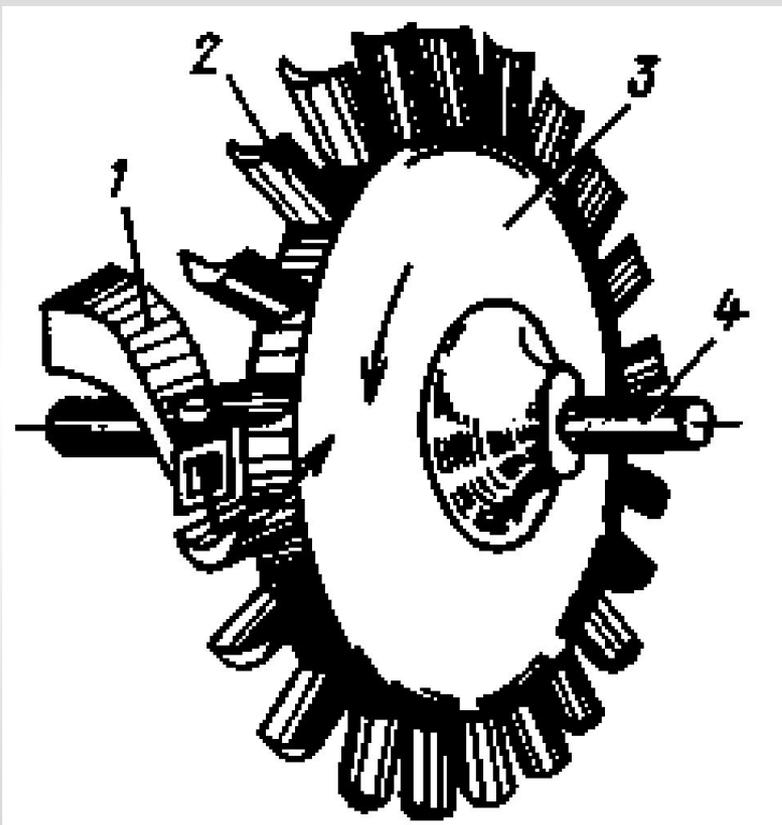
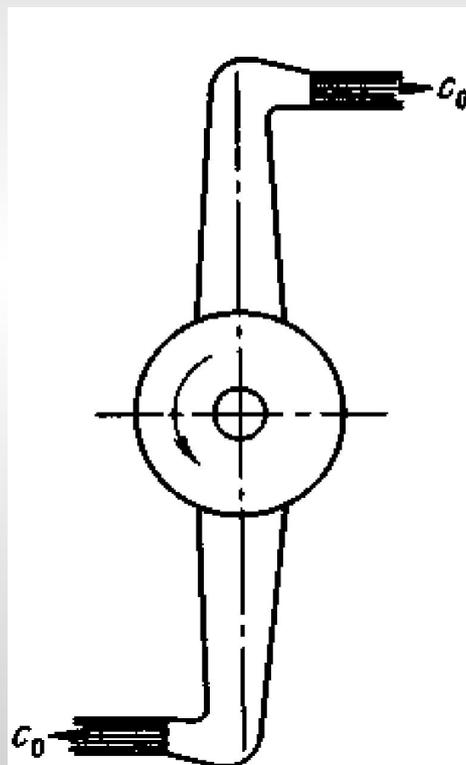


Схема ступени турбины

Реактивные турбины



Конденсационная турбина в разрезе

