

Лекция 3

ОСНОВЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН

Области применения турбомашин



Курс

ОСНОВЫ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

3.1 ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТУРБОМАШИН

В данном разделе показаны примеры места и роли турбомашин в некоторых наиболее важных промышленных приложениях.

3.1.1 ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И УСТАНОВКИ

Газотурбинный двигатель (рисунки 3.1 и 3.2) это тепловая машина, работающая по замкнутому термодинамическому циклу Брайтона (рисунок 3.3), в результате чего возникает полезная работа. Последняя преобразуется в работу передвижения летательного аппарата (в случае авиационного ГТД (рисунок 3.1)), либо в полезную работу на выходном валу (в случае наземной ГТУ (рисунок 3.2)) [2, 7, 19, 20].

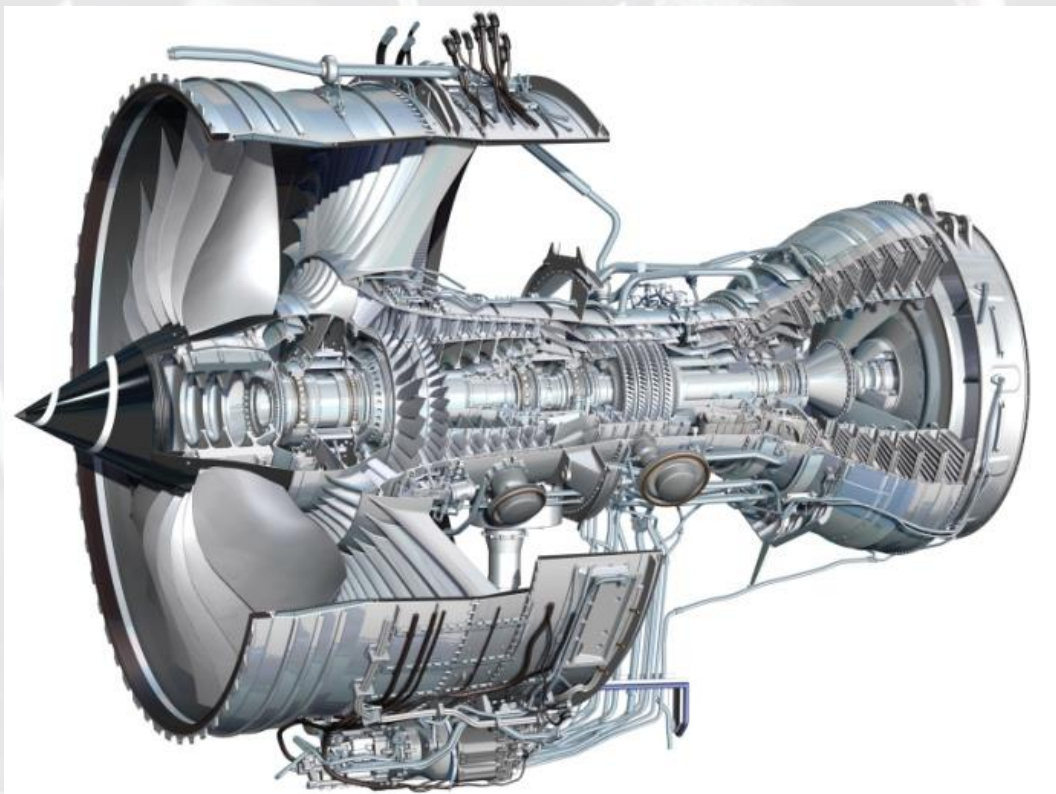


Рисунок 3.1 - Авиационный газотурбинный двигатель [8]

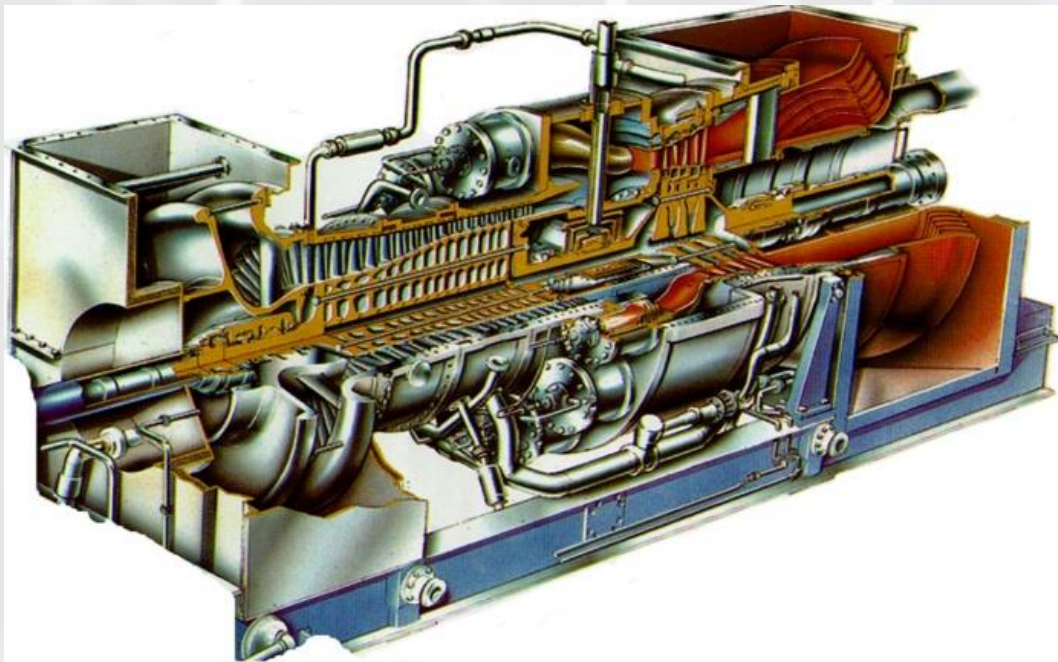


Рисунок 3.2 - Авиационный газотурбинный двигатель [8]

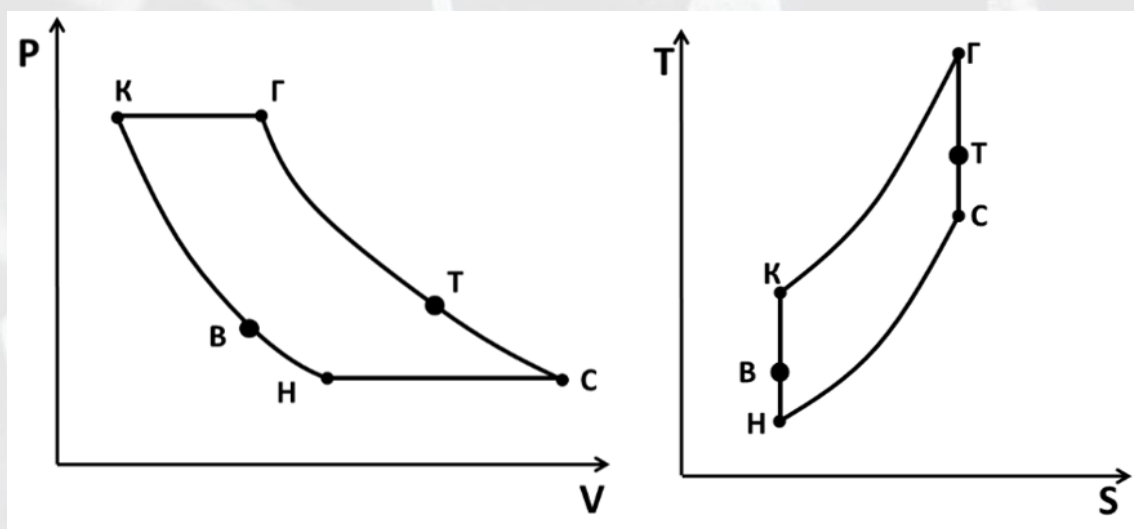


Рисунок 3.3 - Идеальный цикл $p=\text{const}$ (Брайтона) в p - V -и i - s координатах [2]

Результатом функционирования авиационного ГТД является *тяга* (P) – сила, которая прикладывается к летательному аппарату и в конечном итоге заставляет его двигаться. Принцип ее получе-

ния, согласно формуле Стечкина, основан на отбрасывании рабочего тела с высокой скоростью в сторону противоположную движению [2]:

$$P = G(v \cdot c_c - V_{\pi}) \quad (3.1)$$

Здесь G – расход рабочего тела через двигатель, кг/с;

c_c – скорость истечения газа из двигателя, м/с;

V_{π} – скорость полета, м/с;

v – коэффициент, учитывающий изменение массы рабочего тела в двигателе.

Высокоскоростной поток газа создается с помощью сопла, которое представляет собой сужающийся канал (конфузор) при дозвуковых перепадах давления. В случае сверхзвуковых перепадов давления оно имеет форму сопла Лаваля.

Для того, чтобы сопло ускоряло поток, необходимо создать разность давления между его входом и выходом. При этом давление на входе в сопло должно быть больше чем на выходе. Учитывая, что при полете летательного аппарата (ЛА) выход газовой струи осуществляется в атмосферу, то для получения высокоскоростного потока на входе в сопло необходимо создать повышенное давление.

Результатом работы наземной ГТУ (а также авиационных двигателей непрямой реакции) является мощность и крутящий момент на выходном валу, которые затем передаются потребителю (на привод генератора, газоперекачивающего агрегата (ГПА), воздушного винта и т.п.). Полезная мощность в таких двигателях создается турбиной. Для ее функционирования, как и в случае сопла



авиационного ГТД, необходимо создать разницу давления между входом и выходом.

Таким образом, для работы, как авиационного ГТД, так и наземной ГТУ необходимо создать повышенное давление на входе в узел, являющийся ключевым для функционирования изделия (турбину или сопло).

Необходимое для работы двигателя повышенное давление может быть получено с помощью компрессора. Строго говоря, для этих целей можно использовать любое сжимающее устройство (объемные, винтовые и т.п. компрессоры). Однако лопаточные компрессоры сжимают воздух непрерывно, а не порциями. Это обстоятельство позволяет осуществлять процессы во всех узлах двигателя одновременно, а не последовательно как, например, в поршневом двигателе. Последнее в свою очередь позволяет на несколько порядков повысить расход рабочего тела и пропорционально повысить мощность при малых размерах установки (см. табл. 3.3).

Для функционирования компрессора к нему обязательно необходимо подводить механическую энергию от стороннего источника. Для привода компрессора может использоваться любой генератор энергии (электродвигатель, ДВС и т.д.), однако газовая турбина позволяет получить высокую мощность при наименьших собственных размерах, что особенно важно для авиационных ГТД.

Вместе с тем компрессора и турбины не достаточно для работы газогенератора. Если пренебречь изменением массы рабочего тела в проточной части и потерями энергии, то удельные работы компрессора и турбины можно считать равными:



$$L_K = L_T \quad (3.2)$$

где $L_K = c_p T_B^* \left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$ – удельная идеальная работа компрессора;

$$L_T = c_p T_G^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{*\frac{k-1}{k}}} \right) - \text{удельная идеальная работа турбины}$$

(*);

π_T^* – степень расширения газа в турбине.

Примечание. Следует помнить, что указанное равенство справедливо только при описанных выше допущениях. Для других случаев корректно говорить о равенстве мощностей компрессора и турбины $N_K = N_T$.

В случае если турбокомпрессор состоит только из компрессора и турбины, оба узла имеют одинаковое рабочее тело – воздух, а температура воздуха на входе в турбину равна температуре на выходе из компрессора:

$$T_G^* = T_K^* = T_B^* + \frac{L_K}{c_p} = T_B^* \left(1 + \left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right) = T_B^* \pi_K^{*\frac{k-1}{k}} \quad (3.3)$$

Приравняв выражения для удельных работ, и подставив значение температуры на входе в турбину, легко прийти к выражению:

$$\left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = \pi_K^{*\frac{k-1}{k}} \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{*\frac{k-1}{k}}} \right) \quad (3.4)$$



Очевидно, это равенство будет справедливо только в одном случае, когда $\pi_k^* = \pi_t^*$. То есть, в турбокомпрессоре, состоящем только из компрессора и турбины степень повышения давления в компрессоре π_k^* равна степени расширения газа в турбине π_t^* и давление на выходе из нее равно давлению на входе в изделие. То есть устройство, состоящее только из компрессора и турбины, не создает повышенного давления на выходе.

Сказанное может быть подтверждено анализом $p-v$ диаграммы рабочего процесса рассматриваемого двигателя (при описанных выше допущениях $G_s = \text{const}$, $Lr \rightarrow 0$). Для такого двигателя цикл Брайтона вырождается в линию, и его полезная работа будет стремиться к нулю.

Для нормального функционирования турбокомпрессора на входе в турбину газ подогревают с помощью камеры сгорания. Данное обстоятельство позволяет повысить работоспособность газа и получить работу, необходимую для привода компрессора с меньшей степенью расширения π_t^* (что видно из уравнения удельной идеальной работы турбины (*)). В результате, на выходе из турбины остается значительное остаточное давление, которое может быть использовано для получения высокоскоростной струи на выходе из сопла или работы в приводной турбине наземного ГТУ.

Анализируя сказанное выше можно окончательно сформировать схему ГТД (ГТУ) (рисунок 3.4). Она состоит из следующих узлов [1, 2, 7, 19, 20]:



Входного устройства, выполненного в виде дозвукового или сверхзвукового диффузора и предназначенного для предварительного сжатия рабочего тела, поступающего в двигатель и направления его в компрессор.

Компрессора, предназначенного для непрерывного сжатия поступающего рабочего тела до необходимого уровня степени повышения давления π_k^* . Для осуществления сжатия к компрессору подводится извне механическая работа L_k , в результате чего полное давление и полная температура рабочего тела возрастают, достигая на выходе величин p_k^* и T_k^* .

Камеры сгорания – устройства, в котором происходит непрерывное сгорания топлива (керосина) при $p = \text{const}$ в потоке сжатого рабочего тела, в результате чего к газу подводится потребное количество тепла Q_1 , а температура возрастает до расчетного значения T_Γ^* .

Турбины – предназначенной для выработки мощности, необходимой для привода компрессора. В наземных ГТУ часть мощности, выработанной турбиной, передается на выходной вал. В результате совершения рабочим телом работы в турбине, его давление и температура уменьшаются, достигая на выходе значений p_T^* и T_T^* .

Реактивного сопла, предназначенного для дальнейшего расширения сжатого и нагретого рабочего тела, в результате чего потенциальная энергия струи газа, покидающего турбину, превращается в кинетическую энергию струи и используется для создания тяги. В наземных ГТУ сопло служит для вывода выхлопных газов за пределы двигателя.



Внешний вид современных двухконтурных турбореактивных двигателей показан на рисунке 3.4.

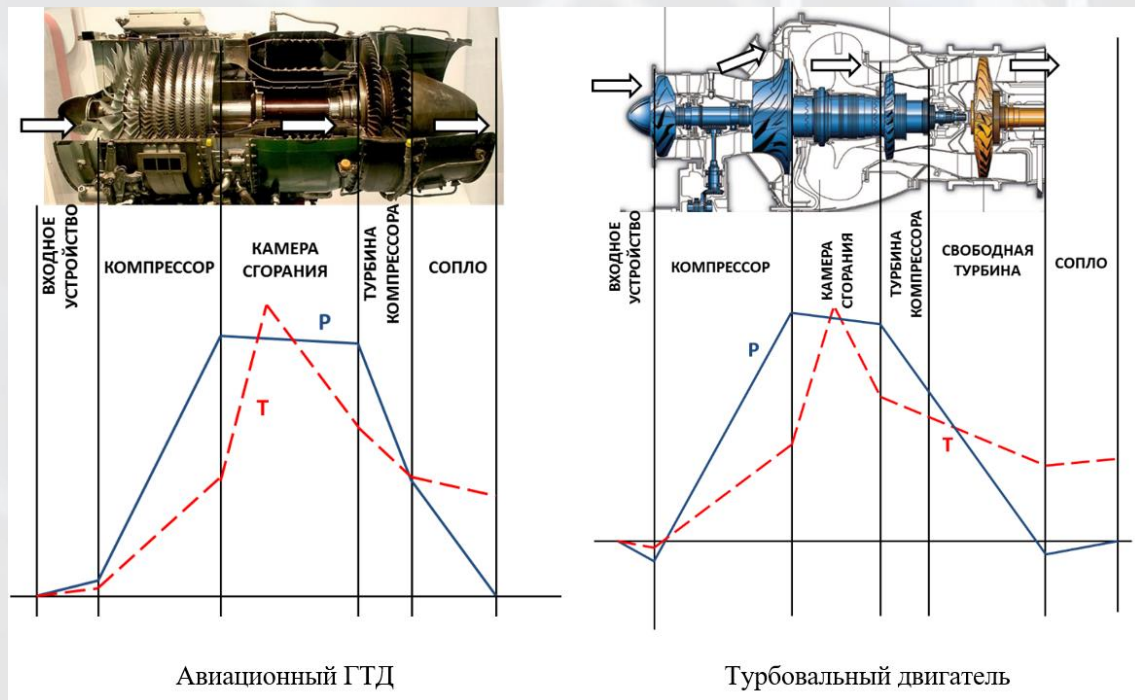


Рисунок 3.4 – Принципиальные схемы газотурбинных двигателей и изменение давления температуры в них [8]

Устройство, состоящее из входного устройства, компрессора, камеры сгорания и турбины называется **газогенератором** и служит для получения горячего газа высокого давления. Здесь следует особо подчеркнуть тот удивительный факт, что газогенератор ГТД является одним из самых сложных и напряженных в работе устройств в современной технике, на проектирование и совершенствование которых тратятся большие усилия ведущих мировых концернов (таких как *Rolls Royce*, *Pratt&Whitney*, *Safran*, *General Electric*, НПО «Сатурн» и т.п.) и научных организаций. А газогенератор служит «всего лишь» для получения нагретого газа высокого давления.

Как видно из приведенного выше анализа рабочего процесса газотурбинного двигателя лопаточные машины играют ключевую роль в его функционировании. Без сжатия в компрессоре не удастся создать повышенного давления, необходимого для работы сопла или приводной турбины наземной ГТУ. Работа компрессора в свою очередь не возможна без турбины.

3.1.2 ПАРОТУРБИННЫЕ И АТОМНЫЕ УСТАНОВКИ

Паротурбинная установка (ПТУ) — это [тепловая](#) машина непрерывного действия, работающая по циклу Ренкина (рисунок 3.5), рабочим телом которого является [вода](#) и [водяной пар](#). ПТУ преобразует потенциальную энергию нагретого пара высокого давления в электрическую энергию. В состав ПТУ входят паровая турбина, котельное и вспомогательное оборудование. Принципиальная схема паротурбинной установки для привода электрогенератора изображена на рисунке 3.6.

Простейший цикл работы ПУТ выглядит следующим образом. Перегретый пар из котельного агрегата по паропроводу попадает в турбину. При расширении энергия пара превращается в механическую энергию вращения ротора турбины, который расположен на одном валу с электрическим генератором. Отработанный пар из турбины направляется в конденсатор, в котором, охладившись до состояния воды путём теплообмена с циркулирующей водой по трубопроводу, направляется обратно в котельный агрегат при помощи насосов. В настоящее время для повышения КПД установки



применяются более сложные вариации описанного цикла, например, с промежуточным подогревом воды отработанным паром [28].

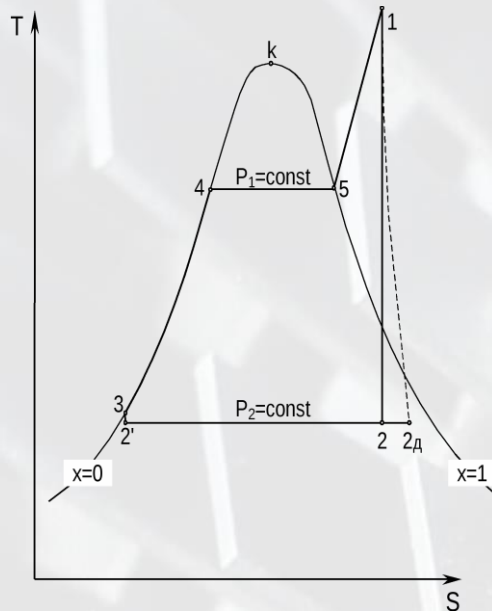


Рисунок 3.5 - Цикл Ренкина в
T-S координатах [4, 8]

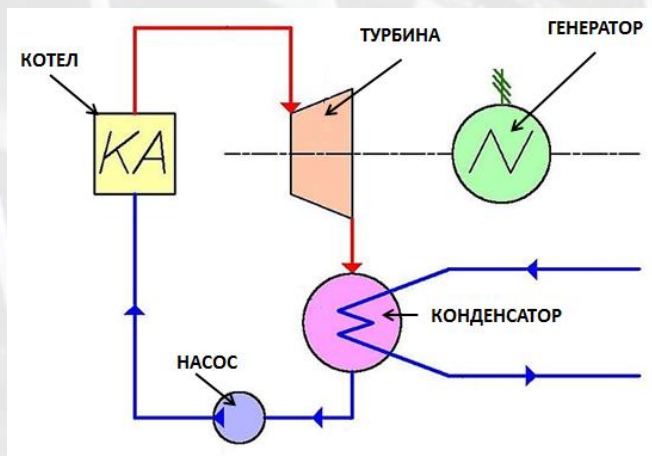


Рисунок 3.6 –
Принципиальная схема
паротурбинной установки
[28]

Следует отметить, что в качестве источника тепла для получения перегретого пара могут выступать не только котлы. Например, в этой роли может использоваться контур охлаждения ядерного реактора. То есть, ядерные электростанции являются частными случаями паротурбинных установок (рисунок 3.7).

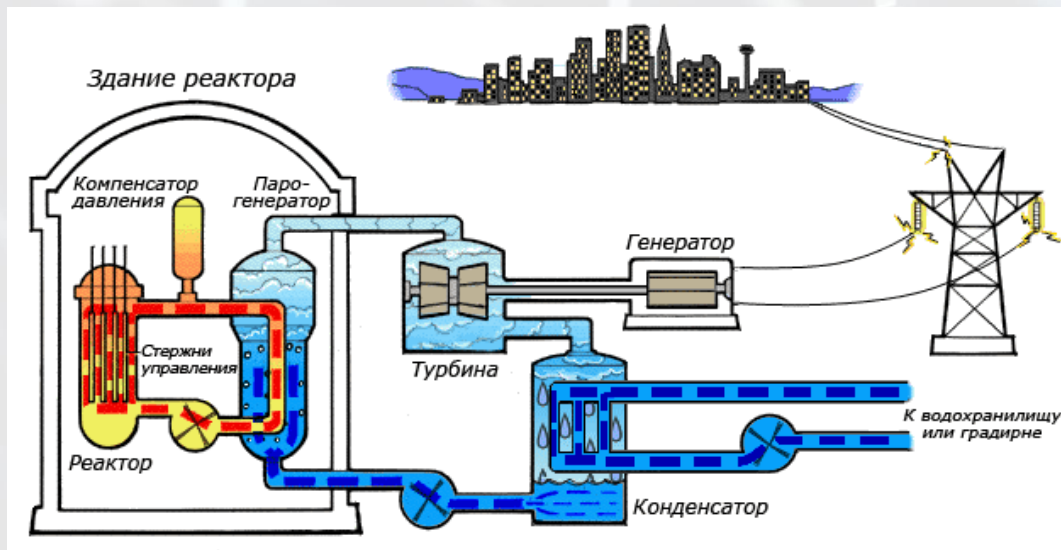


Рисунок 3.7 - Схема атомной электростанции [8]

Частота вращения ротора турбины ПТУ обычно пропорциональна требуемой частоте электрического тока (для России - 50 Гц) (синхронная машина). Для двухполюсных генераторов 3000 об/мин, для четырёхполюсных - соответственно 1500 об/мин. Частота электрического тока является одним из главных показателей качества отпускаемой электрической энергии. Современные технологии позволяют поддерживать частоту сети с точностью до 0,2 % (ГОСТ 13109-97). Резкое падение электрической частоты влечёт за собой отключение ПТУ от сети и аварийный останов энергоблока, в котором наблюдается подобный сбой [28].

Судовые ПТУ также выполняются по такой же схеме. В этом случае турбина вращает гребной винт. Для соединения быстроходных турбин с гребными винтами, требующими небольшой (от 100 до 500 об/мин) частоты вращения, применяют зубчатые редукторы (рисунок 3.8). В отличие от стационарных турбин, судовые турбины работают с переменной частотой вращения, определяемой необходимой скоростью хода судна.



Паровая турбина является важнейшим элементом паротурбинной установки, преобразующей энергию нагретого сжатого пара в механическую энергию. Внешний вид паровых турбин показан на рисунке 3.9.

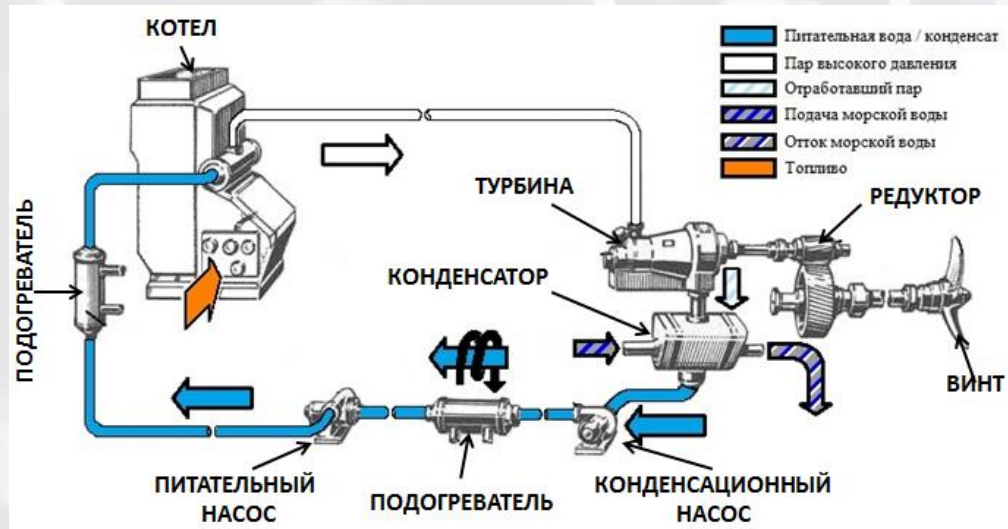


Рисунок 3.8 - Судовая паротурбинная установка [8]

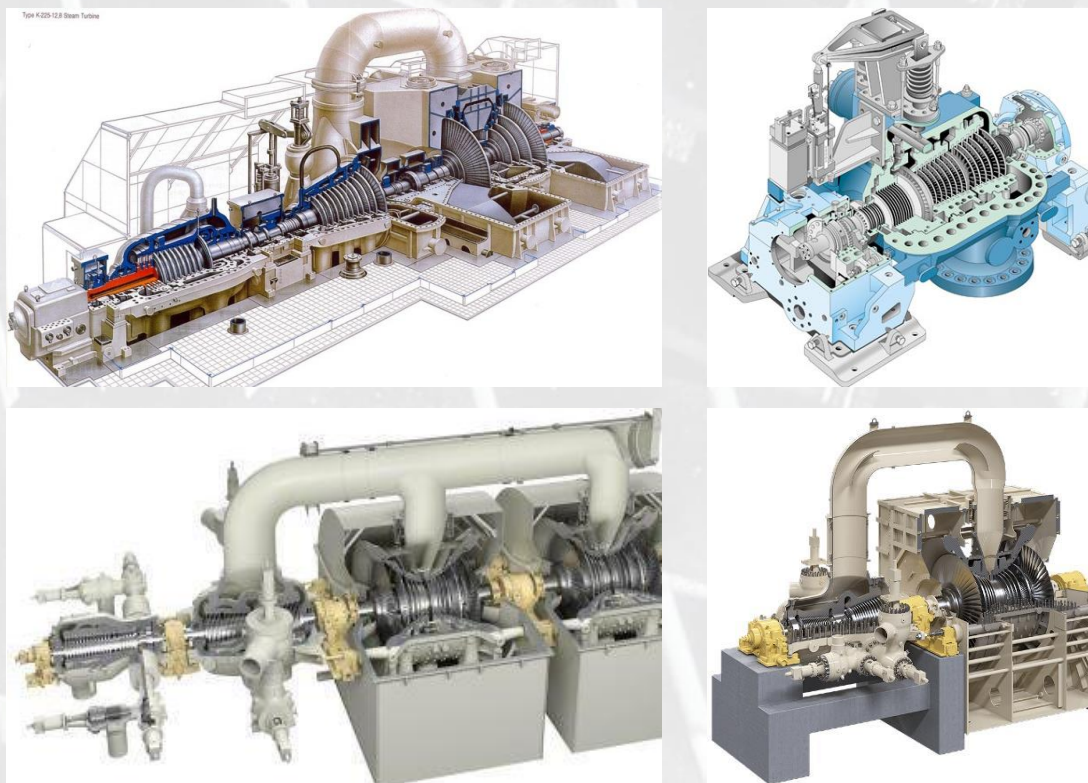


Рисунок 3.9 - Паровые турбины [8]

3.1.3 РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В качестве примера на рисунке 3.11 приведена схема ракеты носителя (РН) «Протон» [28]. На нем обозначены полезная нагрузка, а также двигатели. Видно, что они занимают очень небольшую часть ракеты. Все остальное пространство внутри ракеты, занимают баки горючего и окислителя.

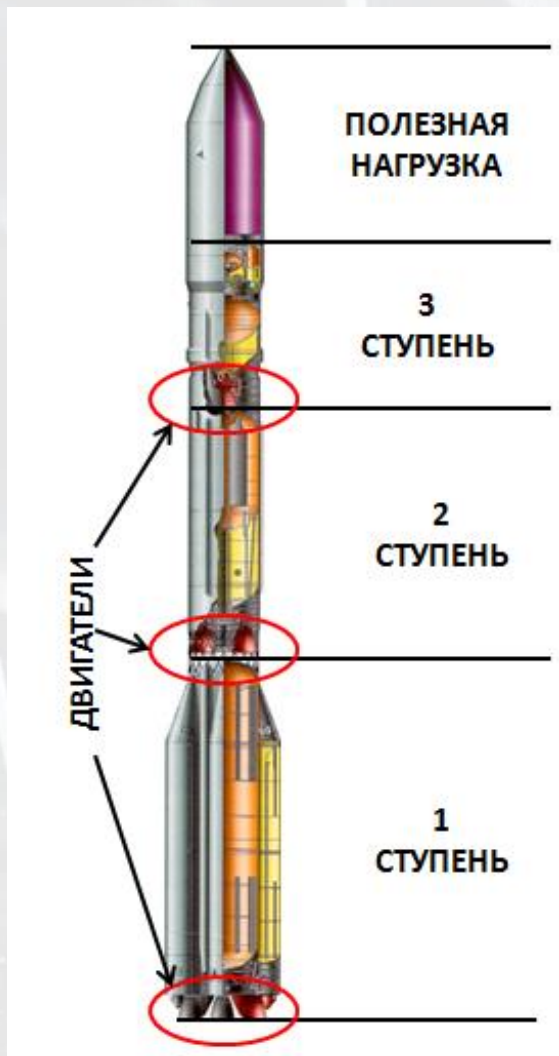


Рисунок 3.11 – Ракета – носитель
«Протон» [8, 28]

Основная область применения двигателей такого типа – ракеты носители и космические аппараты.

Высота ракеты – носителя «Протон» составляет 58 метров. Чтобы представлять их размеры, на рисунке 3.12 показаны размеры различных ракет носителей. Масса горючего и окислителя РН "Протон" составляет: для первой ступени - 428т, второй – 157т, третьей – 43т. При этом время работы ступеней весьма невелико: 121, 215 и 239 сек соответственно. Данные цифры являются типовыми для ракет - носителей (см. таблицу 3.1) [28].

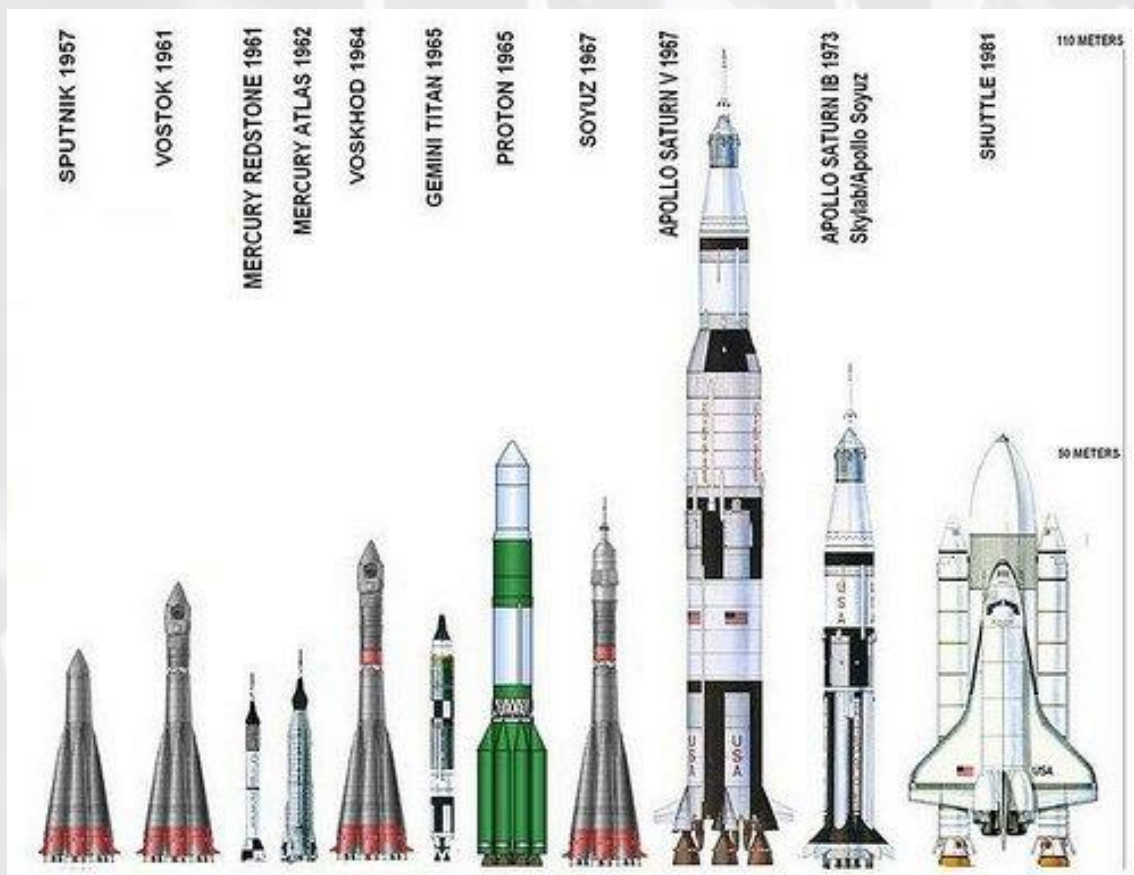


Рисунок 3.12 – Сравнение размеров различных ракет - носителей [8]

Таким образом, одной из ключевых проблем функционирования ракетного двигателя является вопрос, как за короткое время подать большое количество (исчисляющееся десятками тонн) жидкого горючего и окислителя в камеру сгорания.

Таблица 3.1 – Некоторые данные о работе ступеней ракет - носителей
[28]

	Протон		Союз		Спейс Шаттл	
	Масса Г+О, т	Время работы, сек	Масса Г+О, т	Время работы, сек	Масса Г+О, т	Время работы, сек
1 ступень	428	121	40	118	Г – 103 О -616	480
2 ступень	157	215	94	278		
3 ступень	43	239	25	240		

Данная проблема может быть решена несколькими путями. Самый простой способ заключается в подаче горючего и окислителя из баков в камеру путем их вытеснения с помощью газа высокого давления (см. рисунок 3.13, а). Такая схема питания ЖРД называется вытеснительной. Ее преимущество в простоте и надежности. Однако для успешной работы давление в баках должно быть более давления в камере (достигает 30МПа), что требует делать баки толстостенными и тяжелыми, а это не приемлемо для современной ракетной техники [7, 29, 32].

Второй подход заключается в том, что подача горючего и окислителя осуществляется с помощью лопастных насосов. Для их работы необходимо подводить механическую энергию. В качестве ее источника применяется газовая турбина. Рабочим телом в турбине являются продукты сгорания, которые получают в небольшой отдельной камере сгорания (газогенераторе), куда подводится некоторое количество горючего и окислителя. Выхлопные газы за турбиной выходят через отдельное сопло, либо направляются на наддув (рисунок 3.13, б) баков. Такая схема называется открытой

насосной или схемой с автономной турбиной (рисунок 3.14). Ее недостаток в том, что часть удельного импульса двигателя теряется, так как часть топлива расходуется на получение генераторного газа, который не участвует в создании тяги.

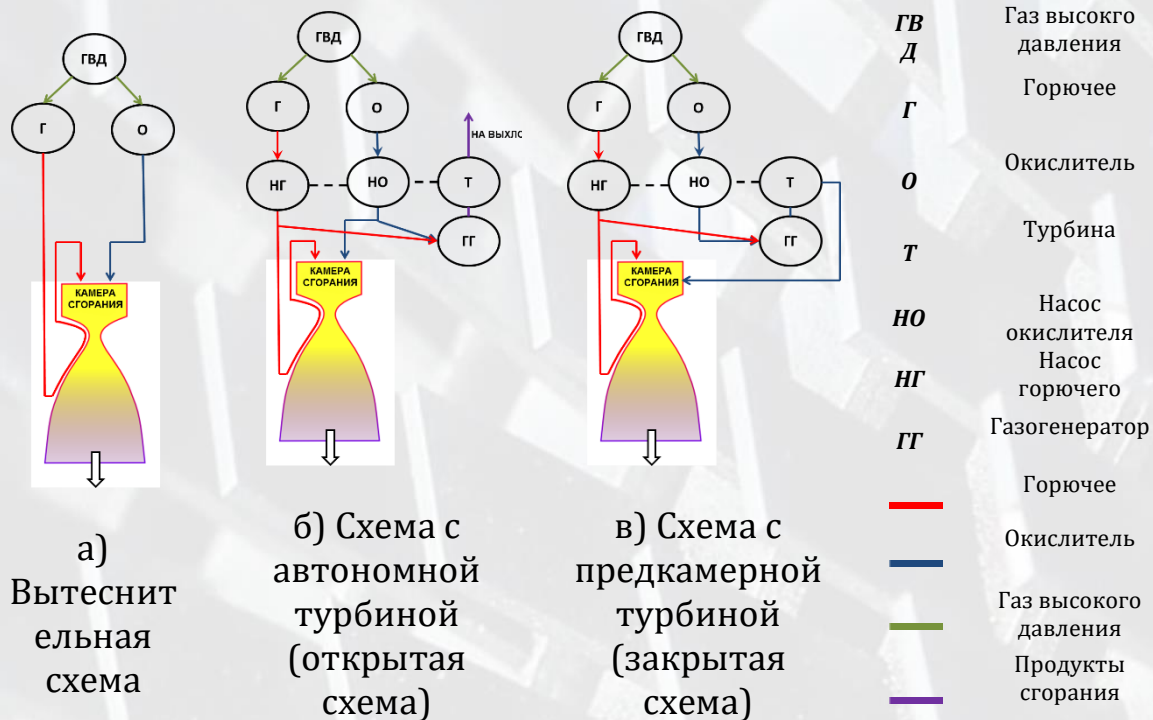


Рисунок 3.13 – Схемы питания ЖРД

Данного недостатка лишена закрытая насосная схема (схема с предкамерной турбиной) (рисунок 3.15). В ней газы на выходе из турбины поступают не в отдельное сопло, а попадают в камеру, где дожигаются (рисунок 3.13, в). В этой схеме вся масса одного из компонентов топлива идет через газогенератор, а другой компонент большей частью поступает в камеру. При этом незначительная часть его (порядка 1% от суммарного расхода топлива) идет в газогенератор для обеспечения процесса горения и образования газа, т.е. рабочего тела для привода турбины. Поскольку газ после

турбины поступает непосредственно в камеру ЖРД, то такая турбина называется предкамерной [6, 32].

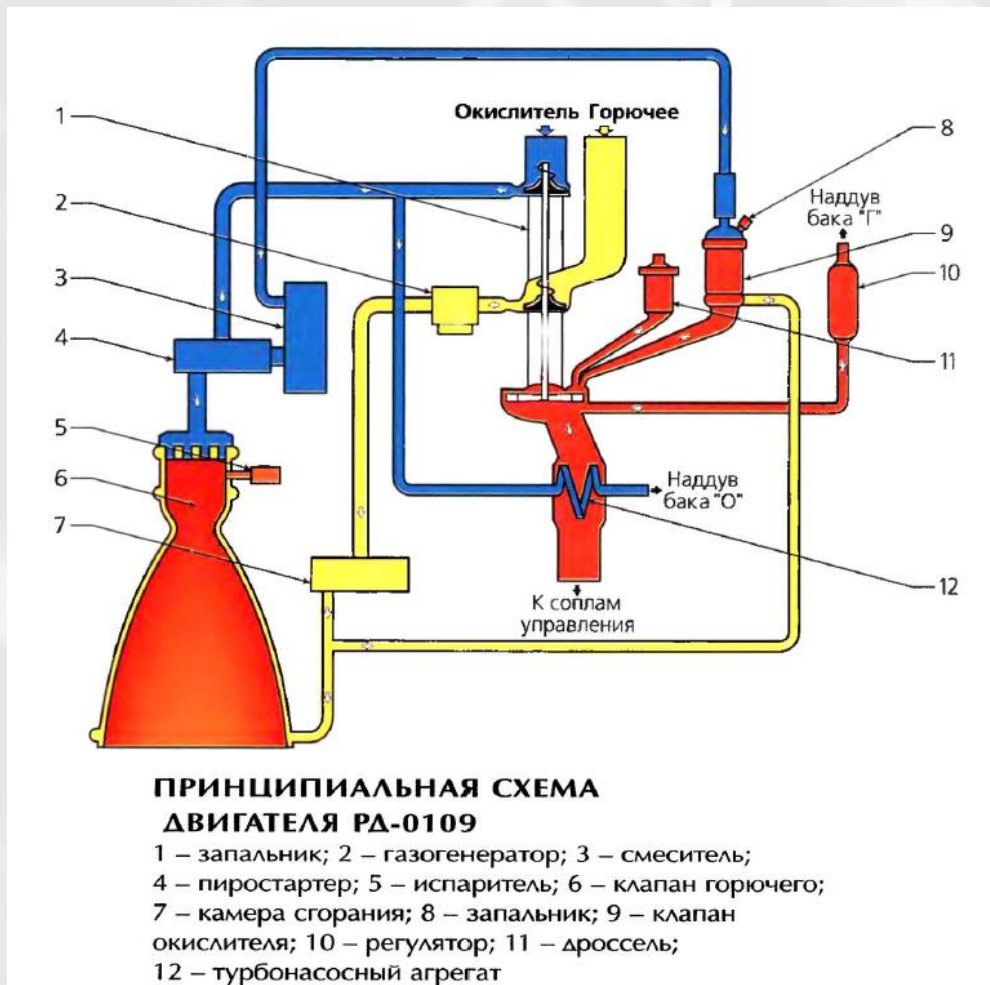


Рисунок 3.14 – Пример пневмогидравлических схемы ЖРД выполненного по открытой насосной схеме

Насосная система подачи значительно сложнее вытеснительной, но при больших расходах и давлении компонентов на входе в камеру она обеспечивает меньшую массу всей двигательной установки – совокупности ЖРД и баков. Таким образом, для уменьшения массы ракеты – носителя в состав ЖРД должны входить насосы горючего и окислителя, приводящая их турбина, газогене-

ратор и агрегаты автоматики. Обычно все эти элементы объединяются в один узел, который называется турбонасосным агрегатом (ТНА) (рисунок 3.16 и 3.17) [6, 29, 32].

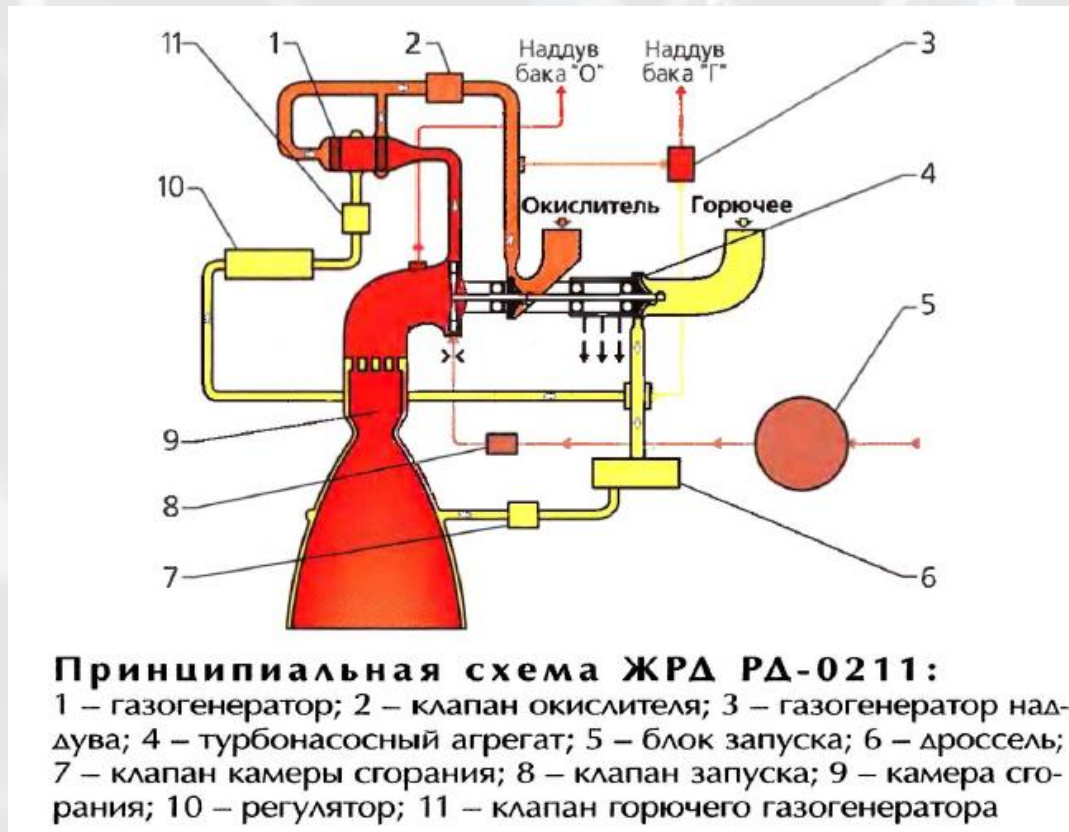


Рисунок 3.15 – Пример пневмогидравлических схемы ЖРД выполненного по закрытой насосной схеме

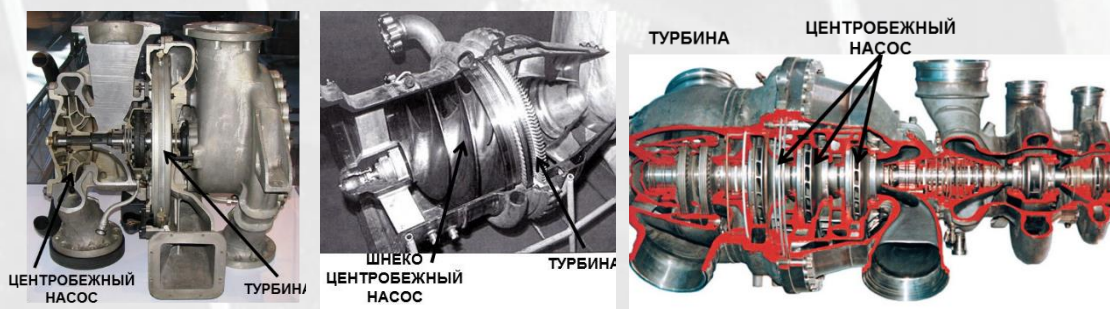


Рисунок 3.16 – Примеры турбонасосных агрегатов [8]

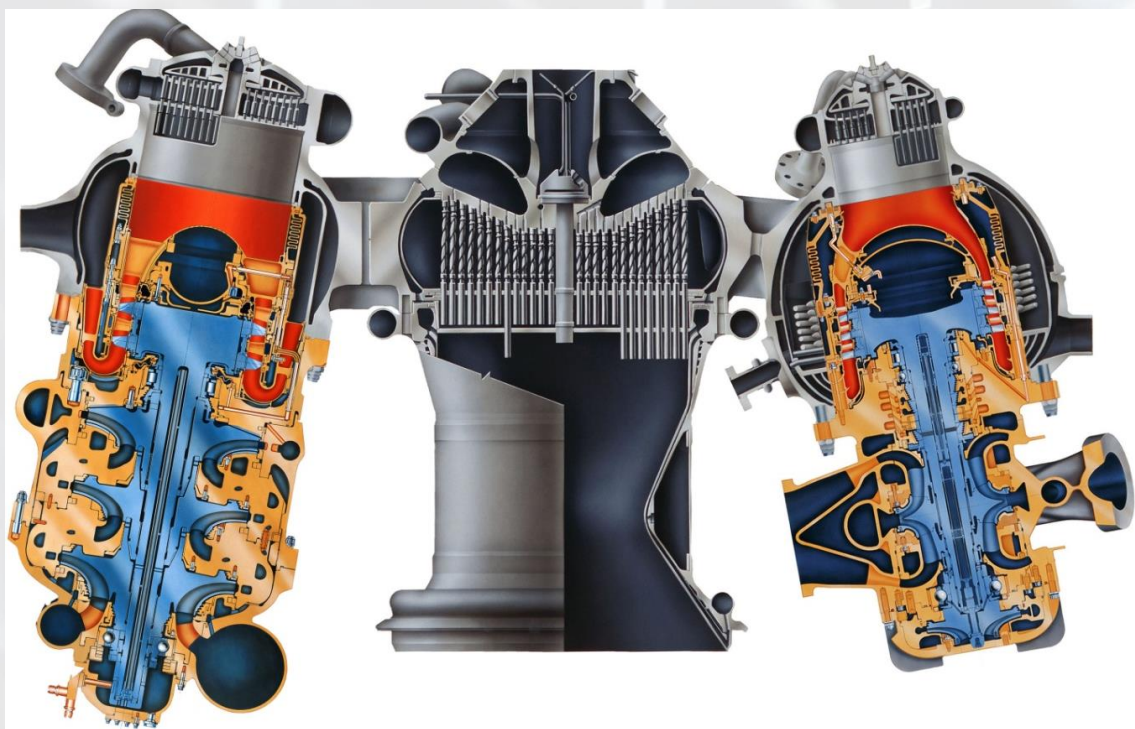


Рисунок 3.17 - Турбонасосные агрегаты двигателя RS-25 космической системы Space Shuttle [27]

ТНА сегодня обязательный элемент современного ЖРД (рисунок 3.18). ТНА – наиболее сложный и трудоемкий агрегат в составе ЖРД как по затратам на разработку, изготовление и испытания, а также по затратам на доводку и числу экспериментов по ее осуществлению.

3.1.4 Гидротурбины

Гидротурбины широко применяются для преобразования в механическую, а затем электрическую энергии текущей или падающей с высоты воды (рисунки 3.19).

Наибольшее распространение получили гидротурбины Пельтона, Френсиса и Каплана [28].



РД-180 (Россия)



НК-33 (Россия)



RS-25 SSME (США)



F-1 (США)

Рисунок 3.18 - Жидкостные двигатели ракет носителей [8]

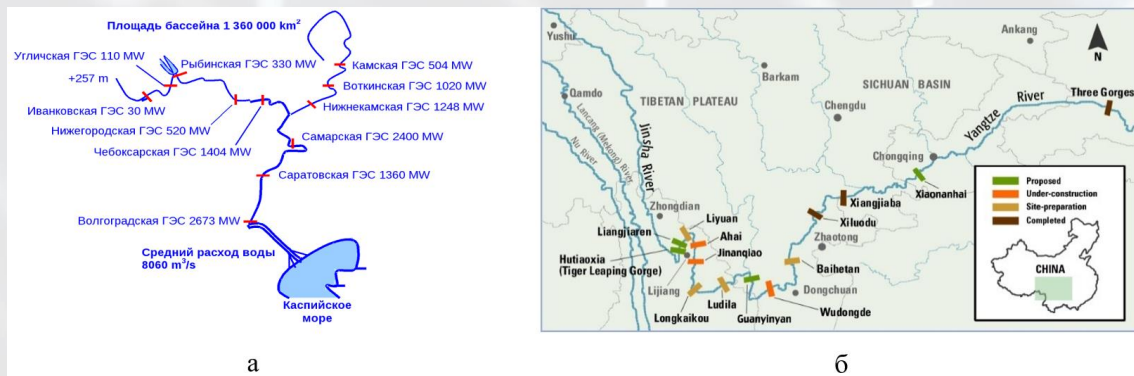


Рисунок 3.19 – Гидроэлектростанции на Волге (а) и Янцзы (б)

Активная турбина Пельтона (рисунки 3.20...3.22) была изобретена Лестером Пельтоном в 1889 году. Ее также называют ковшовой (струйно - ковшовой) турбиной. Ее устройство сильно отличается от устройства других гидротурбин, у которых рабочее колесо находится в потоке воды. В турбинах Пельтона вода подаётся через сопла по касательной к окружности, проходящей через середину ковша. При этом вода, проходя через сопло, формирует струю, летящую с большой скоростью и ударяющую о лопатку турбины, после чего колесо проворачивается, совершая работу. Скорость потока воды на выходе из форсунок зависит от напора и может достигать значительных величин, порядка 500...600 км/ч. Скорость вращения турбины также весьма велика, до 3000 об/мин [28].

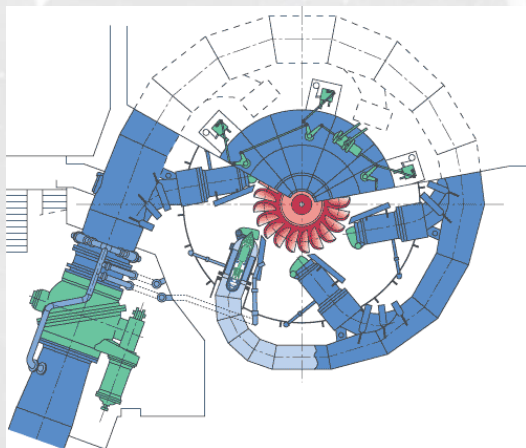


Рисунок 3.20 – Схема турбины
Пельтона с пятью соплами и
вертикальным расположением оси
вращения

После отклонения одной лопатки, под струю попадает другая и процесс повторяется. Преобразование энергии струи происходит при атмосферном давлении, а производство энергии осуществляется только за счёт кинетической энергии воды. Лопатки турбины имеют двояковогнутую форму с острым лезвием посередине. Задача лезвия — разделять струю воды с целью лучшего использования энергии и предотвращения быстрого разрушения лопаток. На рабочем колесе может быть установлено до 40 лопаток. Рабочее колесо турбины Пельтона может быть расположено как вертикально, так и горизонтально.



Рисунок 3.21 – Рабочие колеса
турбины Пельтона

Ковшовые гидротурбины применяются при напорах более 200 метров (чаще всего 300...500 метров и более), при расходах до $100 \text{ м}^3/\text{с}$. Мощность наиболее крупных ковшовых турбин может достигать 200...250 МВт и более. Ковшовые турбины часто применяются на малых ГЭС, сооружаемых на небольших реках с большими перепадами высот в горных районах [28].

Преимуществами ковшовых турбин является возможность использования очень больших напоров, а также небольших расходов воды. Недостатки — неэффективность при небольших напорах,

высокие требования к качеству подаваемой воды, поскольку различные включения (например, песок), вызывают быстрый износ турбины.



Рисунок 1.4.22 – Турбина Пельтона с горизонтальным расположением оси вращения [8]

Реактивная турбина Френсиса (рисунок 3.23) была изобретена американцем Джеймсом Френсисом в 1848 году. В турбине этого типа поток сначала движется радиально (от периферии к центру), а затем в осевом направлении (на выход). Такие турбины применяются при напорах свыше 600 м и способны давать мощность до 640 МВт [28].

Основным преимуществом турбины Френсиса является высокий КПД, наибольший из всех гидротурбин. К недостаткам турбины относится менее пологая рабочая характеристика, чем у турбины Каплана [28].

Поворотно - лопастная турбина Каплана (рисунок 3.24) запатентована в 1920 году австрийским инженером Виктором Капланом. В ней поток движется вдоль оси вращения. Ось турбины может располагаться как горизонтально, так и вертикально. Часто у турбины Каплана может изменяться угол установки лопастей, что позволяет регулировать мощность [28].

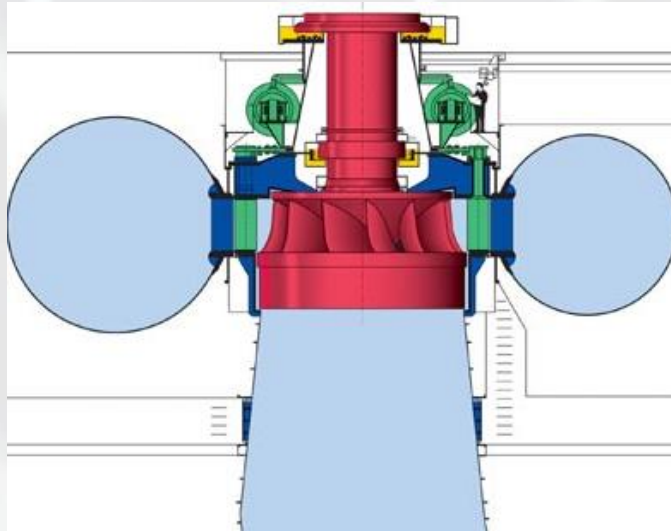


Рисунок 3.23 - Турбина Френсиса [8]

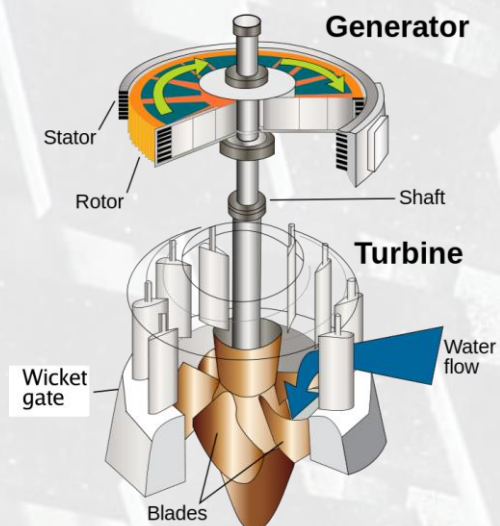


Рисунок 3.24 - Турбина Каплана [8]

3.1.5 АГРЕГАТЫ НАДДУВА

Развитие двигателей внутреннего сгорания (ДВС) идет по пути повышения мощности двигателя при уменьшении его габаритов и расхода топлива. Эта тенденция особенно актуальна для двигателей, предназначенных для транспортных средств. Рост мощности при сокращении веса и габаритов двигателя позволяет увеличить полезное пространство транспортного средства, отводимое под перевозку груза или размещение пассажиров. Кроме того, уменьшение размеров двигателя при сохранении или увеличении создаваемой мощности снижает его инерционность, и сообщает транспортному средству высокие динамические свойства. Поэтому создатели автомобилей требуют все более мощных двигателей при пониженных габаритных и весовых показателях.

Из теории ДВС известно, что мощность двигателя определяется следующим выражением [7, 18]:

$$N_e = K \cdot \frac{H_u}{l_0} \cdot \frac{V_h}{\tau} \cdot z \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \eta_v \cdot \eta_m \cdot \rho_k \cdot n \quad (3.5)$$

где K - константа;

H_u - низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;

l_0 - количество воздуха теоретически необходимое для полного совершенного сгорания топлива кг/кг;

V_h - рабочий объем цилиндра, л;

z - число цилиндров, шт;

τ - тактность двигателя (двух или четырехтактный);

α - коэффициент избытка воздуха;



η_i - индикаторный КПД;

η_v - коэффициент наполнения цилиндра;

η_m - механический КПД;

ρ_k - плотность воздуха, поступающего в цилиндр, кг/м³;

n - число оборотов коленчатого вала, об/мин.

Анализ выражения показывает, что мощность двигателя можно увеличить за счет увеличения числа цилиндров z ДВС при сохранении их размеров, или увеличивая объема цилиндров V_h . Оба этих пути приведут к росту размеров и веса двигателя в целом.

Другой путь повышения мощности – увеличение частоты вращения коленчатого вала n . Чем больше частота вращения, тем большее число рабочих циклов совершает двигатель в единицу времени. Однако такой путь развития сопровождается ростом нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма. Соответственно рост частоты вращения во избежание снижения надежности должен компенсироваться усилением элементов двигателя, что в свою очередь вновь приводит к увеличению веса и габаритов. Повышение быстроходности двигателя обуславливает высокую мощность трения, поскольку сила сопротивления пропорциональная квадрату частоты вращения n . Кроме того, обороты коленчатого вала ограничиваются скоростью движения поршня, которая не должна превышать 10...12 м/с [18].

Еще одним направлением увеличения мощности является изменение тактности – применение двухтактного двигателя. У такого двигателя рабочий цикл совершается за один оборот коленвала, что при одинаковых размерах и быстроходности позволяет совершить вдвое большую работу. Однако изменение числа тактов



приводит к существенным изменениям в конструкции двигателя. Кроме того, увеличение мощности на выходном валу на практике происходит не в 2, а в 1,5... 1,7 раза, что связано с расходом части мощности на привод нагнетателя, необходимого для запуска двигателя и продувку цилиндров.

Другое принципиальное направление повышения мощности – совершенствование рабочего процесса двигателя. Применение лучших и дорогих сортов топлив, увеличение коэффициента наполнения, механического и индикаторного КПД, изменение коэффициента избытка воздуха, модернизация каналов впуска и выпуска конечно влияют на выходную мощность. Однако при существующем уровне совершенства ДВС улучшение этих показателей способно дать прибавку мощности, не превышающую 5...10%.

Наиболее же перспективным путем повышения мощности является увеличение плотности рабочего тела, поступающего в цилиндр ρ_k . Последнее позволяет существенно увеличить мощность двигателя без существенного изменения габаритов и массы, при сохранении инерционных нагрузок и тактности. В результате увеличивается заряд цилиндра окислителем, что позволяет пропорционально увеличить количество топлива, сжигаемого в цилиндре. А это в свою очередь дает большую теплоту, которая в дальнейшем преобразуется в механическую работу [7, 18].

Кроме мощности пропорционально росту давления на входе в цилиндры растет и крутящий момент на выходном валу:

$$M_{кр} = p_{cp} V_h \quad (3.6)$$



где $p_{\text{ср}}$ - среднее давление цикла.

Хотя у современных атмосферных двигателей величина удельного крутящего момента может быть более $100 \text{ Н}\cdot\text{м/л}$, двигатели с наддувом даже при умеренных параметрах рабочего цикла превосходят эту величину более, чем на 50% [18].

Изначально наддув задумывался как способ повышения мощности ДВС, однако, со временем он стал применяться для улучшения экологических характеристик и снижения расхода топлива. В настоящее время более 90% дизельных и 6% бензиновых двигателей оснащаются агрегатами наддува. Практически все современные двигатели для мощной техники (локомотивов, грузовиков, военной, строительной и дорожной техники) имеют системы наддува [18].

Двигатель с наддувом представляет собой *комбинированный двигатель внутреннего сгорания*. Под этим понимается комбинация поршневого ДВС, лопаточных и поршневых машин сжатия, расширения и теплообменников. Термодинамически в таком двигателе единое рабочее тело совершает соответствующий единый рабочий цикл. В комбинированном двигателе тепло, полученное от сгорания соответствующего топлива (или топлив), преобразуется в механическую работу. Полезная механическая работа может в общем случае сниматься с коленчатого вала поршневой машины, с вала газовой турбины или с обоих валов. Компрессор с приводом турбиной называют *турбонаддувом* (в иностранной литературе обозначается термином *Turbocharge*), а компрессор с приводом от коленвала – *механическим наддувом* (*Supercharge*).



Конструктивно двигатель с наддувом отличается от атмосферного наличием устройства сжатия. Для этого применяются компрессоры всех известных типов. В настоящее время наиболее распространенным является наддув посредством ЦБК с приводом от газовой турбины или коленчатого вала двигателя (поскольку их рабочее процессу хорошо согласуются).

Основная идея турбонаддува заключается в использовании для привода компрессора энергии турбины, в которой происходит расширение выходящих из цилиндра выхлопных газов до давления близкого к атмосферному. Эта энергия является «дармовой» - обычно энергия выхлопных газов просто выбрасывается и рассеивается в атмосфере без всякой пользы.

Наиболее распространенной является схема одноступенчатого турбонаддува. Она выглядит следующим образом (рисунок 3.25). Атмосферный воздух, пройдя воздушный фильтр, попадет в компрессор, находящийся в составе одного агрегата с турбиной и связанный с ней валом. Агрегат, состоящий из компрессора и турбины, установленных в общем корпусе, называется турбокомпрессором (ТКР) и содержит также подшипники ротора и системы подвода и отвода масла. Сжатый воздух проходит через теплообменник, где охлаждается набегающим потоком или с помощью охлаждающей жидкости. Теплообменник не является обязательной деталью ДВС с турбонаддувом, но достаточно часто устанавливается для снижения температуры наддувающего воздуха, что увеличивает плотность окислителя на входе в цилиндры. Затем сжатое рабочее тело попадает в двигатель. Отработанные газы из цилиндра



подводятся к турбине, где расширяются, совершая работу, которая расходуется на вращение компрессора [18].

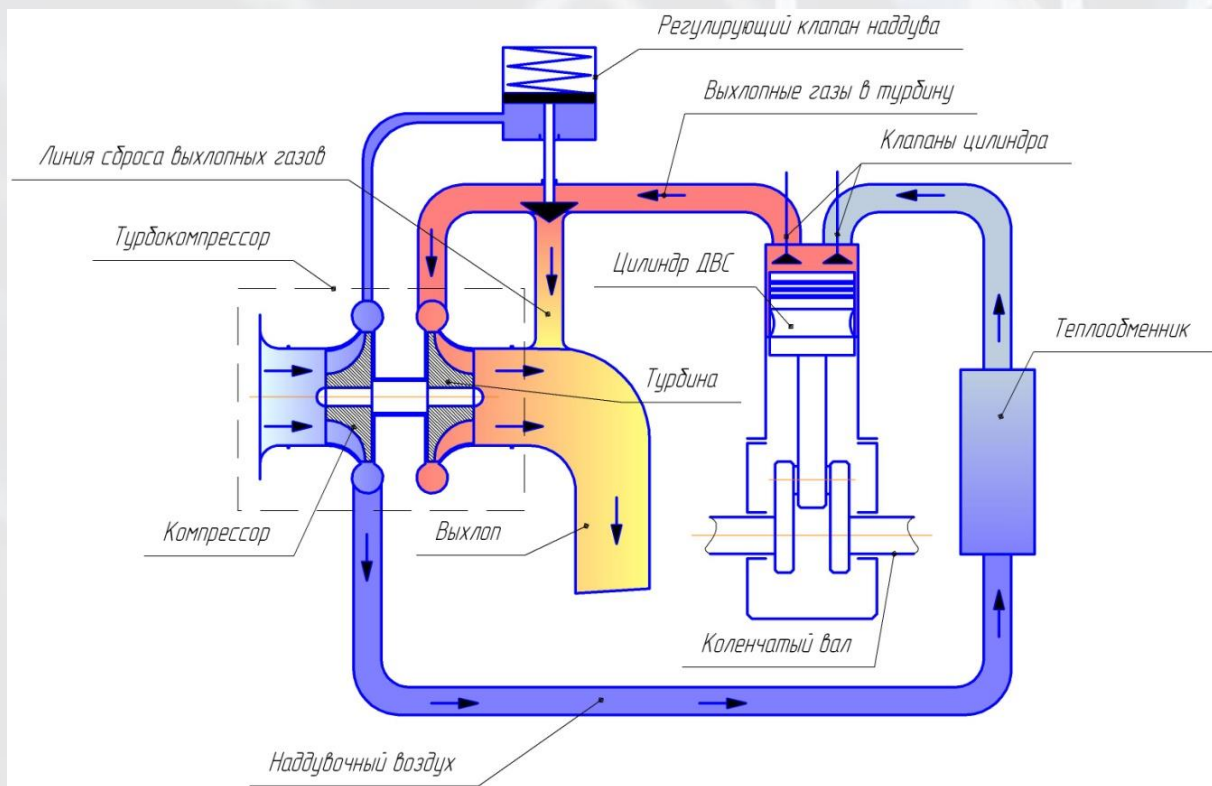


Рисунок 3.25 - Принципиальная схема организации турбонаддува [7]

Давление за компрессором может достигать значений недопустимых с точки зрения нагружения элементов двигателя, условия детонационного горения топлива или других соображений. Поэтому оно ограничивается. При превышении установленного значения срабатывает клапан, перепускающий выхлопные газы или их часть мимо турбины. В результате мощность турбины и частота вращения турбокомпрессора снижается, что приводит к уменьшению степени повышения давления в компрессоре. Описанная система регулирования не является единственной. Существует множество других вариантов ограничения предельного давления за компрессором.

Схема турбонаддува, описанная выше, может считаться классической. Она обеспечивает малый уровень механических потерь и может быть просто реализована на существующем ДВС.

На первый взгляд турбокомпрессор является довольно простым устройством. Однако, для сокращения его размеров, с целью уменьшения массы и инерционности, частота вращения ротора ТКР все время увеличивается (в настоящее время она достигает $80000...120000$ об/мин). Кроме того, температура выхлопных газов достигает $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]. Эти факты приводят к тому, что создание турбокомпрессора является сложной научно-технической задачей. Для ее решения производители прибегают к самым современным материалам и технологиям. Внешний вид типичного турбокомпрессора показан на рисунке 3.26.

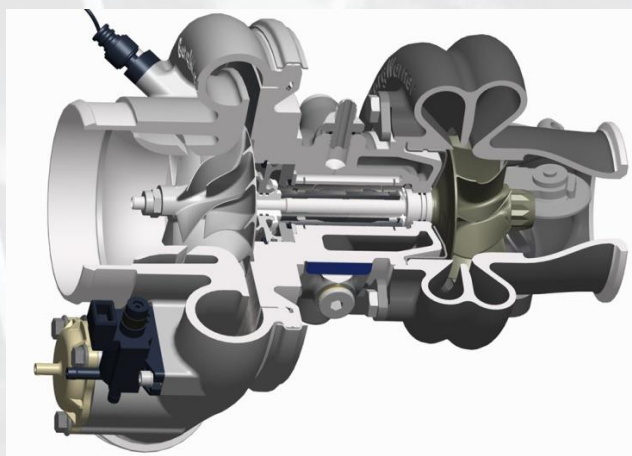


Рисунок 3.26 – Внешний вид типичного турбокомпрессора с радиальной турбиной [8]

В качестве привода компрессора могут использоваться как центробежные (рисунок 3.26), так и осевые турбины (рисунок 3.27). Большинство ДВС грузовых и легковых автомобилей имеют небольшие секундные расходы рабочего тела, поэтому в них предпочтительнее применять радиальные турбины. Обычно такие турбины применяются при мощности агрегата наддува $N=30...700\text{ кВт}$. Мощные стационарные, локомотивные и судовые

дизели имеют значительно больший расход рабочего тела и в них чаще применяются осевые турбины (рисунок 3.27). Они используются при мощности агрегата наддува $N=250 \dots 2500 \text{ кВт}$. Наличие осевой турбины позволяет практически безошибочно говорить, что турбокомпрессор принадлежит ДВС большой мощностью [7, 18].

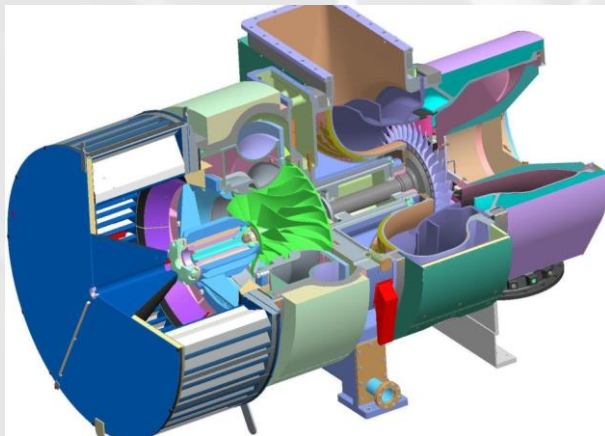


Рисунок 3.27 -
Турбокомпрессор АВВ с осевой
турбиной [8]

Увеличение заряда цилиндра, получаемое при использовании наддува, существенно повышает литровую мощность двигателя. В настоящее время литровая мощность двигателя с наддувом достигла величины $110 \dots 120 \text{ л.с./л}$ (рисунок 3.28).

Положительный эффект от повышения литровой мощности может быть реализован по-разному. Во-первых, повышение литровой мощности позволяет существенно увеличить мощность двигателя при практически неизменных габаритах и весе силовой установки (рост не превышает $5 \dots 10\%$, и связан с установкой наддувающего агрегата [18]). Данный факт ценен в случаях, когда требуется повысить мощность силовой установки, лишь незначительно меняя конструкцию самого двигателя. В настоящий момент существуют примеры, когда внедрение наддува позволило увеличить

мощность в 4 раза, при практически одинаковых габаритах и массе.

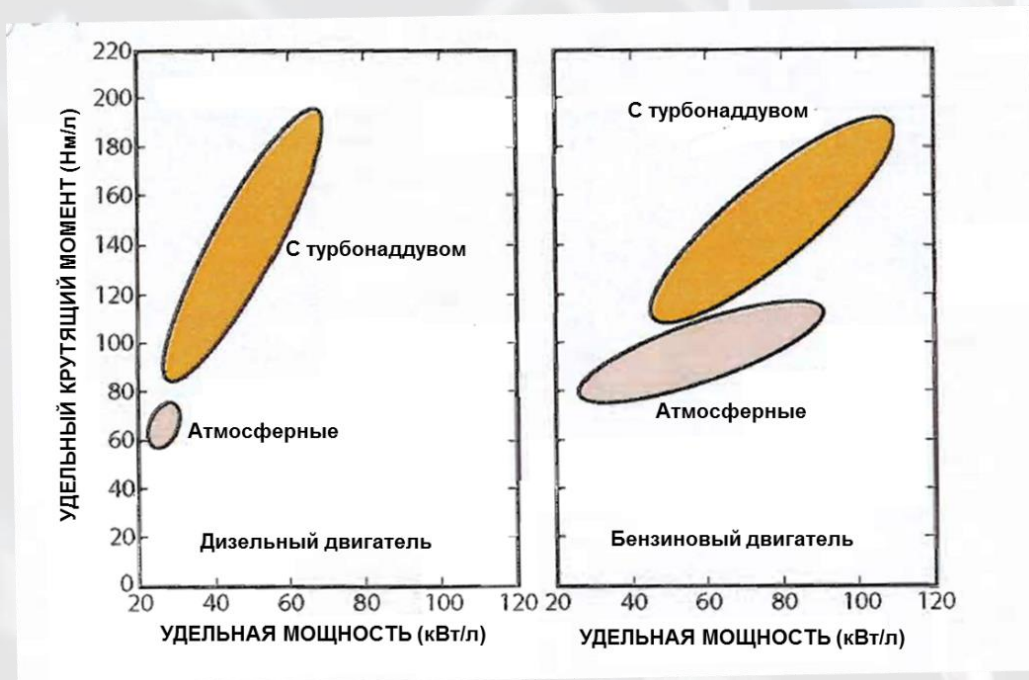


Рисунок 3.28 – Влияние турбонаддува на удельные параметры ДВС [9]

Во-вторых, рост литровой мощности позволяет получить двигатель заданной мощности со значительно меньшими размерами и массой. Двигатель с объемом 1,5 литра и наддувом до 1 кг/см^2 эквивалентен по мощности трехлитровому двигателю [7]. Более компактные двигатели имеют меньшие насосные потери и потери трения [5]. В качестве иллюстрации на рисунке 3.29 приведено сравнение двух дизелей одинаковой мощности.

Сокращение размеров ДВС позволяет сэкономить пространство в помещениях судна, локомотива, электростанции, подкапотном пространстве автомобиля и т.п. Кроме того, существенное изменение размеров двигателя приводит к снижению его стоимости. Цена двигателя с наддувом ниже, чем цена на двигатель без наддува той же мощности.

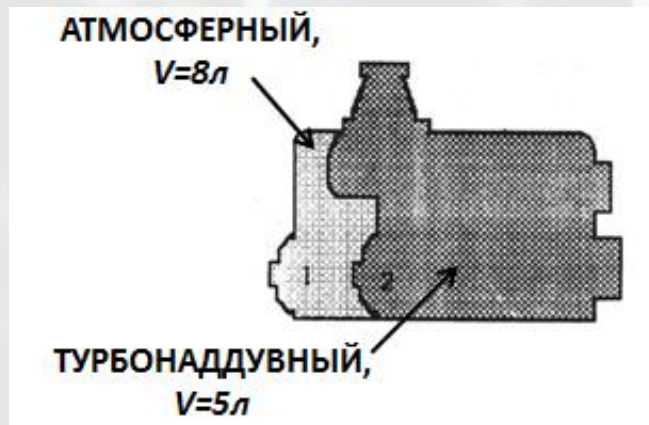


Рисунок 3.29 - Сравнение
размеров дизелей
одинаковой мощности [18]

Применение турбонаддува повышает эффективность работы двигателя, что выражается в снижении удельного эффективного расхода топлива. Основными причинами повышения экономичности дизеля с наддувом являются следующие [18]:

- а) выбор оптимальной степени повышения давления;
- б) увеличение коэффициента наполнения цилиндра η_v ;
- в) более совершенное сгорание топлива (большая полнота сгорания η_r), благодаря повышенному коэффициенту избытка воздуха α ;
- г) большая доля топлива сгорает при постоянном объеме;
- д) зарядка цилиндра происходит воздухом повышенного давления, благодаря чему появляется дополнительная положительная работа, причем, энергия на предварительное сжатие воздуха отбирается не от двигателя, а от отработанных выхлопных газов.

Это в первую очередь относится к двигателям с турбонаддувом на режимах близким к максимальным. Рост эффективности превышает 7%. В качестве иллюстрации на рисунке 3.30 приведены нагрузочные характеристики по удельному расходу топлива дизелей с наддувом и без.

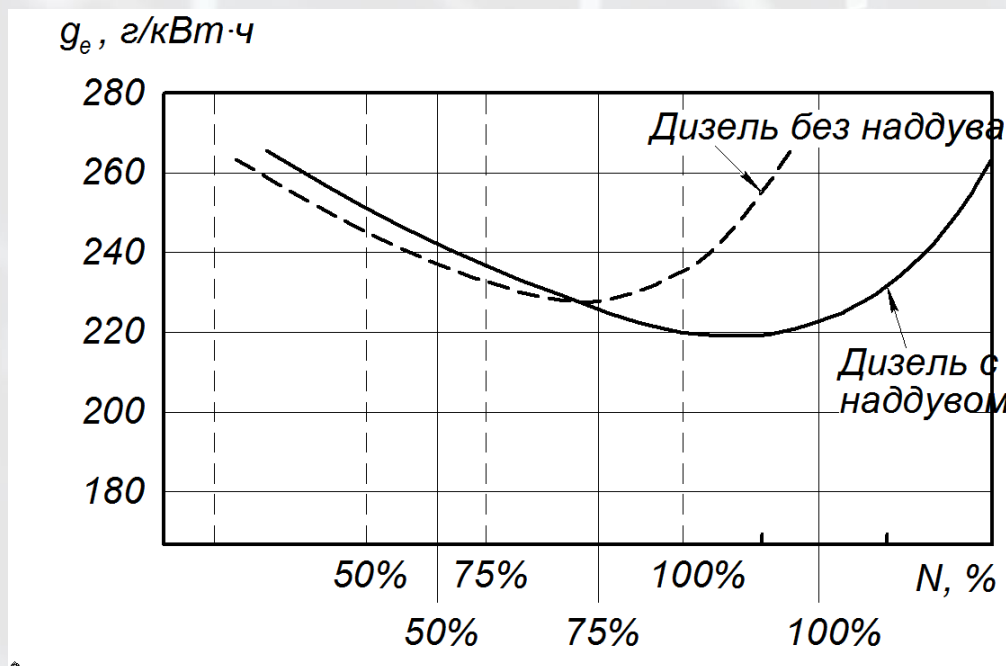


Рисунок 3.30 - Сравнение нагрузочных характеристик по удельному расходу топлива дизелей с наддувом и без [18]

Оснащение ДВС агрегатом наддува положительно сказывается на экологических характеристиках. Во-первых, установка турбины существенно снижает шум выхлопа. Во-вторых, уменьшается дымность и токсичность выхлопных газов. Это связано с тем, что поток за компрессором обладает повышенной турбулентностью, что приводит к лучшему перемешиванию топлива с окислителем. Последнее позволяет организовать процесс горения при повышенном значении коэффициента избытка воздуха α (бедной смеси). Повышению интенсивности смешения топлива с окислителем способствует также размещение карбюратора перед компрессором у бензиновых двигателей. В результате топливо выгорает полнее, а количество несгоревшего топлива уменьшается. Это и снижает концентрацию вредных веществ в выхлопе.

Ресурс ДВС с наддувом превышает моторесурс аналогичного безнаддувного двигателя. Это связано со следующими факторами [18]:

- период задержки воспламенения в наддувном двигателе, как правило, уменьшается, так как впрыск топлива происходит в среду с повышенной температурой. В результате снижается фактор динамичности цикла, сгорание становится более мягким, пропадают характерные для дизеля ударные нагрузки;
- повышенный коэффициент избытка воздуха α позволяет лучше охлаждать камеру сгорания. Благодаря повышенному коэффициенту избытка воздуха, выхлопные газы имеют более низкую температуру, не перегружают термическими нагрузками выпускной клапан. Благодаря наддуву среднее эффективное давление дизеля становится выше, но максимальное давление не возрастает в такой же степени, т.е. не возрастают нагрузки на подшипники и другие детали, что повышает срок их службы;
- использование выхлопных газов в турбине снижает их температуру, уменьшая теплонапряженность выхлопных коллекторов, улучшаются условия работы каталитического нейтрализатора.

При всех указанных достоинствах применение наддува обладает и рядом недостатков. Они зависят в первую очередь от применяемой схемы наддува, принципа его организации и конструктивного исполнения.



Главным недостатком механического наддува является то, что работа, необходимая для привода компрессора, отбирается от коленчатого вала, заметно сокращая полезную работу на выходном валу. Потеря мощности тем больше, чем больше степень сжатия. Доля мощности, идущая на привод компрессора, может превышать 15% мощности двигателя [18].

Двигатель с турбонаддувом способен дать существенное повышение мощности и крутящего момента на режимах близких к максимальным, но на низких режимах может проигрывать по данным показателям атмосферному двигателю (рисунок 3.30). С увеличением степени наддува, мощность двигателя на пониженных режимах снижется значительно. Это связано с тем, что на пониженных режимах энергии выхлопных газов недостаточно для достижения требуемой степени сжатия.

Турбина, установленная в выхлопном коллекторе, создает сопротивление выходящим отработавшими газам. Это нагружает поршни двигателя, поэтому он должен совершать повышенную работу выталкивания газа, что приводит к увеличению нагрузок на кривошипно-шатунный механизм и создает дополнительные потери.

У дизелей из-за высокого уровня степени сжатия высокий наддув приводит к чрезмерно высоким давлениям в цилиндре, т.е. высоким механическим нагрузкам. Для снижения этих нагрузок приходится снижать степень сжатия. При этом возникает проблема запуска дизеля и работы на малых нагрузках. При пуске, когда давление воздуха на входе в цилиндр равно атмосферному,



низкая степень сжатия не обеспечивает получения достаточных для самовоспламенения топлива температур [18].

При изменении режима работы двигатель с турбонаддувом обладает худшей приемистостью (временем перехода с одного стационарного режима на другой) по сравнению с атмосферными двигателями и двигателями с механическими компрессорами. Это является следствием отсутствия прямой связи компрессора и поршневого двигателя. В результате разгон ротора турбокомпрессора происходит медленнее, чем разгон коленчатого вала. Это приводит к отставанию процесса снабжения цилиндров воздухом, из-за чего снижаются эксплуатационные, экономические и мощностные показатели.

Малая степень сжатия на пониженных режимах работы, худшие пусковые характеристики и высокая инерционность являются основными проблемами турбонаддува и многие модификации классической схемы направлены на повышение приемистости. Поэтому основная тенденция развития систем наддува направлена на их устранение [7, 18].

Анализируя современные турбокомпрессоры агрегатов наддува легко заметить основные тенденции их развития, диктуемые необходимостью минимизации указанных недостатков [18]:

- уменьшение размеров турбокомпрессора и снижение его инерционности за счет этого;
- применение двухступенчатого наддува (рисунок 3.29);
- использование регулирующих элементов в турбине (рисунок 3.32 и 3.33);



- использование дополнительной камеры сгорания (рисунок 3.34);
- применение электрической подкрутки ротора.

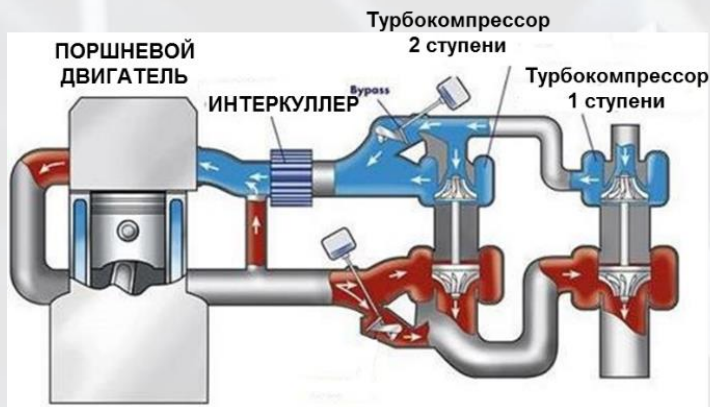


Рисунок 3.31 – Схема
двухступенчатый
наддув [8]

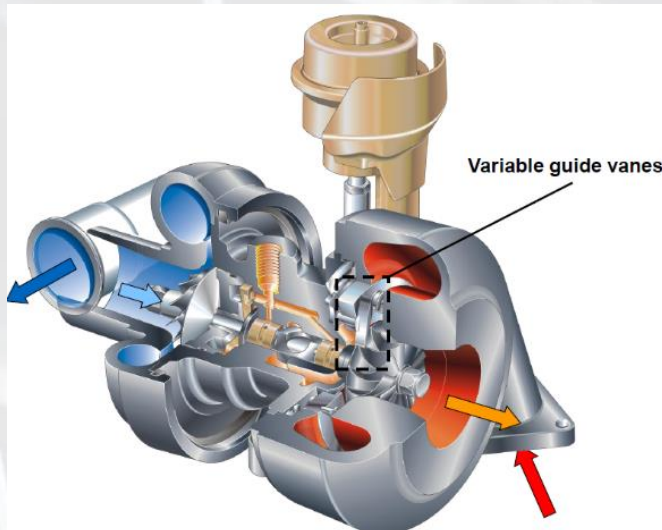


Рисунок 3.32 –
Турбокомпрессор с
регулируемыми лопатками
турбины [8]

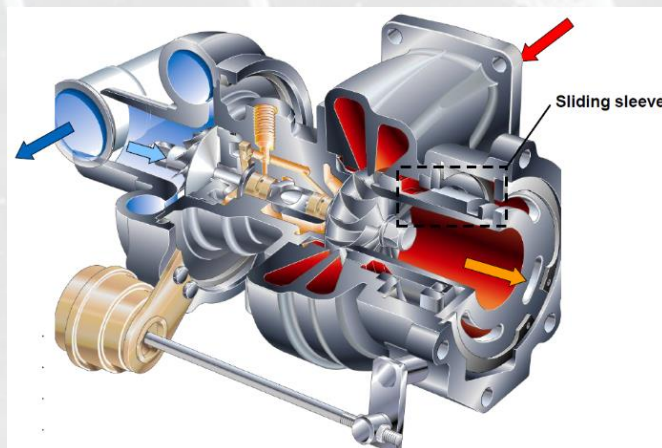


Рисунок 3.33 –
Турбокомпрессор с
турбиной регулируемой
подвижной втулкой [8]



Рисунок 3.34 –
Турбокомпрессор с камерой
сгорания системы
«Гипербар» [8]

3.1.6 ДРУГИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Применение турбомашин не исчерпывается упомянутыми областями. Ниже приводятся примеры применения турбомашин в других отраслях промышленности.

В **химической промышленности** применяются центробежные компрессоры для следующих целей [3, 7, 12]:

- производство аммиака (для сжатия азотоводородной смеси и подачи ее в колонны синтеза аммиака, для сжатия природного газа и азота);
- производства метанола (для сжатия синтез-газа, состоящего из водорода, окиси углерода и углекислого газа);
- производства кислорода (для сжатия воздуха и подачи его в блоки разделения, для сжатия кислорода и транспортирования его по трубопроводам);
- производства хлора (для сжатия осушенного хлора, для работы в составе холодильной машины термостатирования технологического процесса);

- производства полиэтилена (для сжатия газообразного этилена до высокого давления и подачи его в реактор для полимеризации);
- производства ацетилена из природного газа (для сжатия газов пиролиза метана и подачи их в колонны выделения ацетилена, для сжатия ацетилена);
- производства азотной и серной кислот (для сжатия нитрозных газов и подачи их в окислитель и абсорбционную колонну; для сжатия сернистого газа).

В **нефтехимической промышленности** применяют центробежные компрессоры в следующих установках [3, 7, 12]:

- каталитического крекинга и риформинга (для сжатия и циркуляции водородсодержащего газа в процессах гидроочистки);
- депарафинизации масел (для охлаждения масляных фракций с целью кристаллизации парафинов);
- производства этилена (для сжатия газа пиролиза этана и подачи его в реактор, работы в составе холодильных машин в двухкаскадном холодильном цикле для сжатия пропилена и этилена);
- производства синтетического каучука (для сжатия контактного газа дегидрирования изопентана и изоамиленов);
- при добыче нефти газлифтным способом. В этом случае в компрессорах сжимается попутный нефтяной газ и закачивается в скважины.



В *газовой промышленности* компрессоры обеспечивают транспортирование природного газа от мест добычи до потребителей по магистральным газопроводам, компенсируя потери давления на участках газопровода [7, 12] (рисунок 3.35 и 3.36). Линейные центробежные нагнетатели мощностью 6,3, 10, 16 и 25 МВт транспортируют газ по трубопроводам при давлении 56 и 76 бар и более при отношении давлений 1,35 ... 1,5 (рисунок 3.36). Они располагаются на компрессорных станциях вдоль трубопроводов на расстоянии 100 ... 120 км друг от друга [12] (рисунок 3.32). В ОАО "Газпром" работает около 4000 газоперекачивающих агрегатов.

Центробежные компрессоры используются также для наполнения подземных газовых хранилищ с давлением до 150 атм. [12].



Рисунок 3.35 – Схема магистральных газопроводов России

В металлургии при выплавке чугуна в доменных печах компрессорами подается воздух (или воздух, обогащенный кислородом) в печь, где протекают окислительно-восстановительные процессы, обеспечивающие превращение железной руды в чугун. В



производстве стали кислородно-конвертерным способом центробежными компрессорами продувается чистый кислород через расплавленный чугун [3,12].



Рисунок 3.36 – Устройство газоперекачивающей станции

При производстве сталей в мартеновских печах центробежными нагнетателями отсасываются продукты сгорания.

Пневматические системы. Современные предприятия металлообработки до 40% потребляемой мощности используют в виде энергии сжатого воздуха. Разветвленная система трубопроводов подводит сжатый воздух к рабочим местам, где он используется в различных пневматических двигателях, штампах, прессах, приспособлениях ручных инструментов (рисунок 3.37). Обслуживают пневматические системы центробежные компрессоры со степе-

нью повышения давления до 12. Пневматическую систему предприятия обычно обслуживают несколько параллельно работающих и резервных центробежных компрессоров [12].



Рисунок 3.37 –
Пневматический
инструмент

Холодильная техника. Получение умеренного холода в системах кондиционирования, замораживание продуктов и т.п. основано на парокомпрессионном цикле. Специальные газы – хладагенты сжимаются в центробежном компрессоре, охлаждаются и дросселируются (расширяются в турбинах) со снижением температуры, приводящим к их ожижению. Пример конструкции холодильного агрегата показан на рисунке 3.38. Жидкий хладагент соответствующей температуры создает нужную температуру охлаждаемых объектов, двигаясь в теплообменнике – испарителе [12].



Рисунок 3.38 -
Турбохолодильник

3.2 ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТУРБОМАШИН

Ниже приводятся важнейшие события, приведшие вначале к изобретению, а затем и развитию турбомашин [3, 5, 31, 28]:

50г. - Герон Александрийский сделал паровую реактивную турбину, использовавшуюся как игрушка и при проведении религиозных обрядов в храме [72] (рисунок 3.39).

500г. - в Персии изобретена ветряная турбина.

500г. - на шахтах Португалии применяются водяные турбины.

1500г. - В чертежах Леонардо да Винчи встречается «дымовой зонт». Горячий воздух от огня поднимается через ряд лопастей, которые соединены между собой и вращают вертел для жарки.

1551г. - Таги-аль-Дин придумал паровую турбину, которая использовалась для питания самовращающегося вертела.

1629г. - Джованни Бранка (Италия) предложил паровую турбину (рисунок 3.40).

1678г. - Фердинанд Вербейст построил модель повозки на основе паровой машины.

1705г. - Папен (Франция) описал центробежный водяной насос.

1756г. - Леонард Эйлер опубликовал приложение второго закона Ньютона к турбомашинам.

1791г. - Джон Барбер (Англия) получил патент на первую настоящую газовую турбину. Его изобретение имело большинство элементов, присутствующих в современных газовых турбинах.



Турбина была разработана для приведения в действие безлошадной повозки. Юридически это был первый патент на турбину (рисунок 3.41).



Рисунок 3.39- Паровая турбина
Герона Александрийского

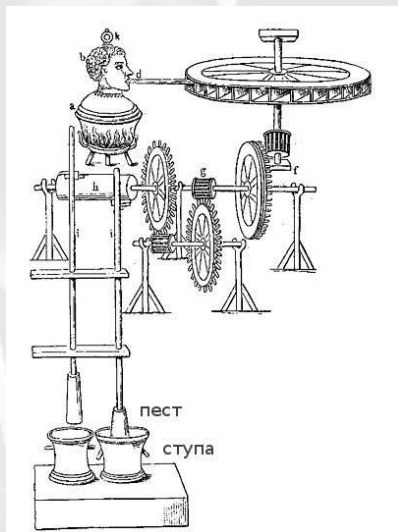


Рисунок 3.40 – Паровая турбина
Джованни Бранка

1822г. - Клод Бурден (Франция) назвал свою машину турбиной (рисунок 3.42).

1830г. - Александр Саблуков (Россия) создал первый центробежный вентилятор и использовал его для проветривания помещений заводов (рисунок 3.43).



1835г. - Александр Слабуков (Россия) предложил конструкцию осевого вентилятора и обосновал его преимущества перед центробежным.

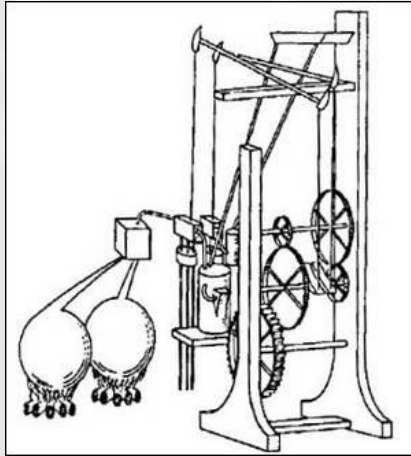


Рисунок 3.41 - Газовая турбина
Джона Барбера

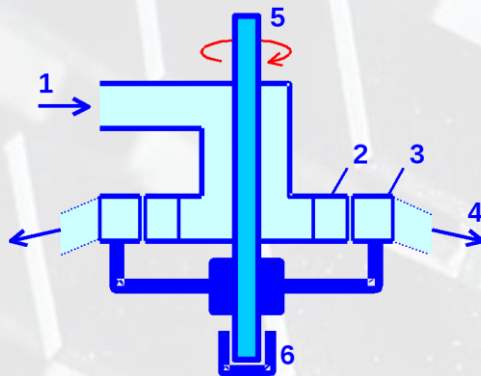


Рисунок 3.42 - Устройство
турбины Бурдена

1 - поступление воды, 2 - направляющий аппарат, 3 - многолопастное рабочее колесо, 4 - выход воды, 5 - вал, 6 - подпятник

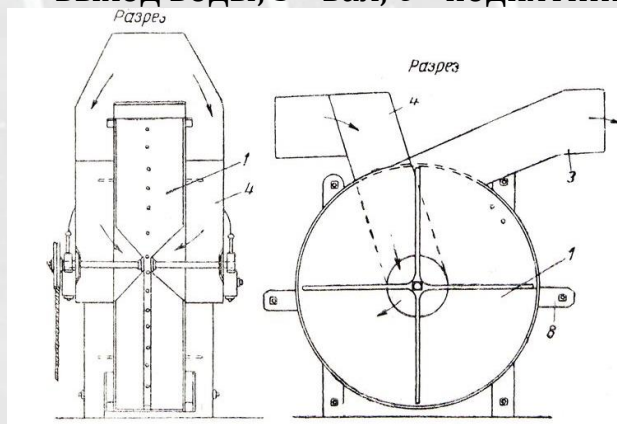


Рисунок 3.43 - Центробежный
вентилятор конструкции
Саблукова

1851г. - Джеймс Франсис (США) изобрёл радиально - поворотную гидротурбину (рисунок 3.44).

1852г. – морской инженер, адмирал Бенджамин Франклин Изервуд (США) получил патент на паротурбинный двигатель [72].

1872г. - Франц Столц разработал первый настоящий газотурбинный двигатель.

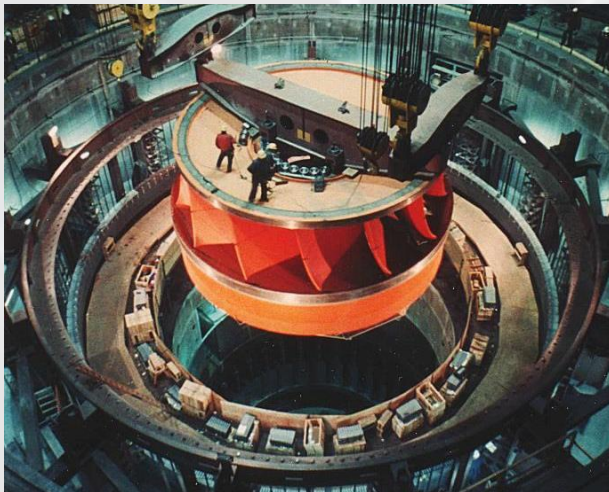


Рисунок 3.44 – Турбина
Френсиса мощностью миллион
лошадиных сил, Гранд-Кули
(США)

1875г. - Осборн Рейнольдс (Англия) запатентовал многоступенчатый центробежный насос и сформулировал критерий Рейнольдса.

1883г. – Прimitивные газовые турбины в США использовались для привода дисковых пил, но широкого распространения не получили [72].

1883г. - Густав Лаваль (Швеция) получил патент на простейшую турбину реактивного типа [72].

1884г. - Сэр Чарльз Парсонс (Англия) запатентовал идею корабля, приводимого в действие многоступенчатой реактивной паровой турбиной (рисунок 3.45). В том же году Парсонс построил первую многоступенчатую турбину для привода электрогенератора мощностью 6 л.с. с частотой вращения 17000об/мин [72].



1889г. - Густав Лаваль (Швеция) изобрёл активную турбину (рисунок 3.46), в основе которой было сопло, служащее для подачи пара, получившее впоследствии его имя. Турбина мощностью 5 л.с. с частотой вращения 30000об/мин была показана на выставке в Чикаго. Отсутствие редукторов с требуемыми характеристиками не дали турбине широкого распространения [72].

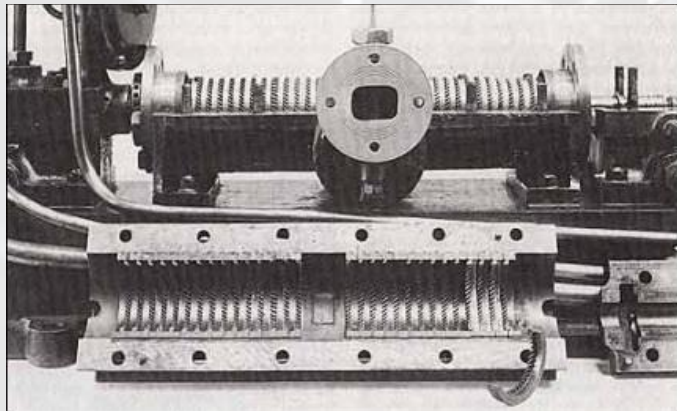


Рисунок 3.45 – Турбина
Парсонса

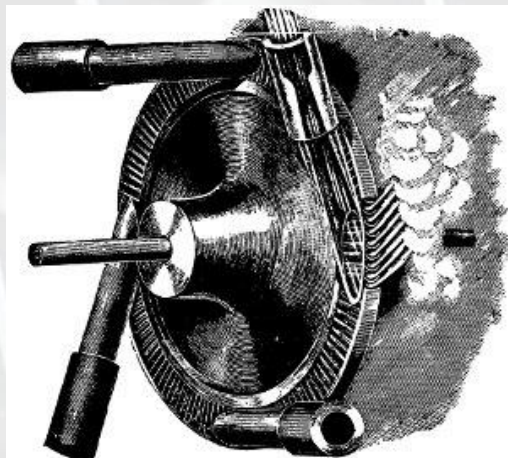


Рисунок 3.46 - Турбина Лавалья

1892г. - Релей (Англия) разработал принципы безразмерного анализа.

1994г. – Парсонс установил на судне прямодействующую паровую турбину мощностью 2300л.с. с частотой вращения 8000об/мин. Судно не показало ожидаемой скорости из-за кавитации [72].

1894г. - Ч. Кертис (США) запатентовал многоступенчатую турбину.

1895г. - Три четырёхтонных 100 кВт генератора радиального потока Парсонса были установлены на электростанции в Кэмбридже и использовались для электрического освещения улиц города.

1897г. - Парсонс создал многокадную турбину (веского, среднего и низкого давления) с приемлемой скоростью вращения и установил на судно «Турбиния», развившее скорость 34,5узлов [72].

1900г. - Огюст Рато (Франция) сделал центробежный компрессор для подачи воздуха в доменные печи (рисунок 3.47).

1903г. - Эджидиус Эллинг (Норвегия) смог построить первую газовую турбину, которая могла произвести больше энергии, чем требовалось для её работы, что рассматривалось как значительное достижение в те времена. Используя вращающиеся компрессоры и турбины, она производила 11 л.с. Его работа впоследствии была использована сэром Фрэнком Уиттлом.

1905г. - Альфред Бюши (Швейцария) запатентовал турбонаддув (рисунок 3.48).

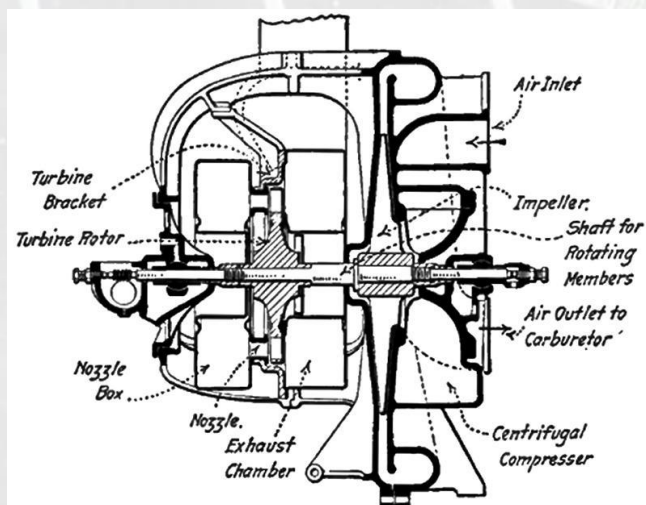


Рисунок 3.47 -
Турбонагнетатель Огюста
Рато



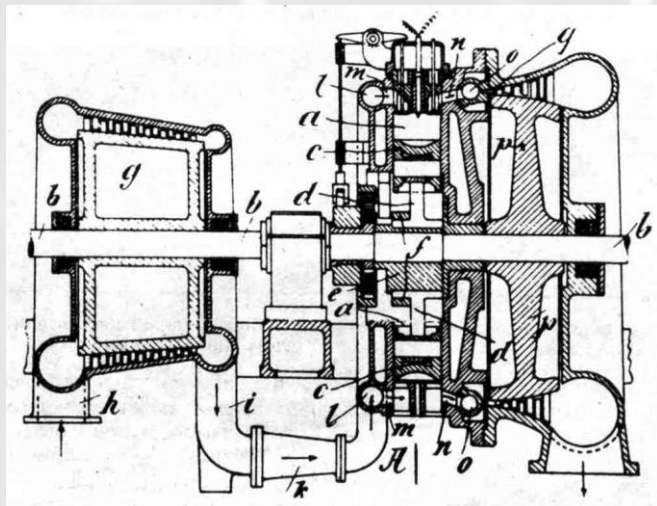


Рисунок 3.48 -
Турбокомпрессор Альфреда
Бюши

1913г. - Никола Тесла запатентовал турбину Тесла, основанную на эффекте пограничного слоя (рисунок 3.49).

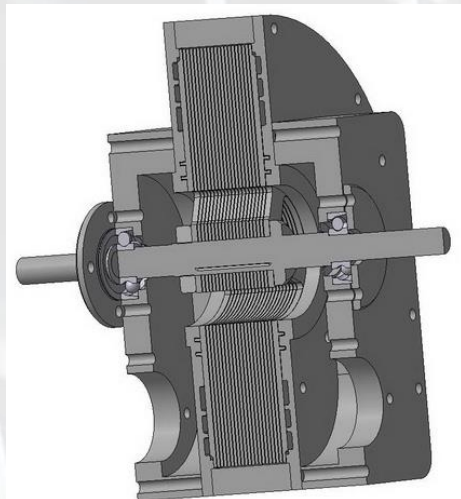


Рисунок 3.49 - Турбина
Тесла

1920г. - Практическая теория протекания газового потока через каналы была переработана в более формализованную (и применяемую к турбинам) теорию течения газа вдоль аэродинамической поверхности доктором Аланом Арнольдом Грифицем.

1920е - Аурель Стодола (Словакия) создал научные основы проектирования и расчета паровых и газовых турбин, процессов преобразования энергии в лопаточных аппаратах, истечения газов через лабиринтные уплотнения, прочности деталей турбомашин.



1930г. - Сэр Фрэнк Уиттл (Англия) запатентовал газотурбинный двигатель (рисунок 3.50). Впервые этот двигатель был успешно использован в апреле 1937 года.

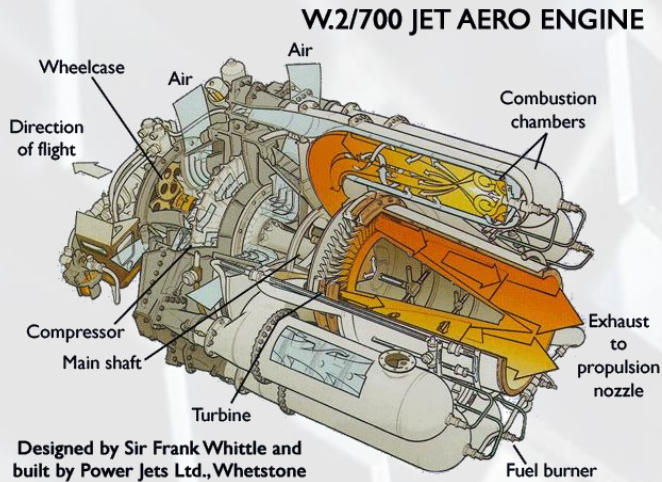


Рисунок 3.50 -
Газотурбинный двигатель
Френка Уиттла

1934г. - Рауль Патерас Пескара запатентовал поршневой двигатель в качестве генератора для газовой турбины.

1934г. - фирма «*Brown-Boveri*» (Швейцария) выпустила многоступенчатый осевой компрессор для сверхзвуковой аэродинамической трубы с КПД 84 %.

1936г. - Ханс фон Охайн и Макс Хан (Германия) разработали собственный реактивный двигатель отдельно от Уиттла (рисунок 3.51).

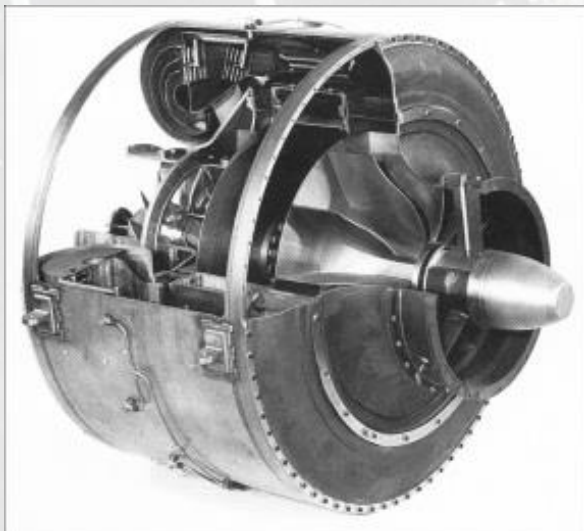


Рисунок 3.51 - Газотурбинный
двигатель Охайна Heinkel HeS 3b

1939г. - Первый полет самолета с ТРД (Охайна (Германия)) (рисунок 3.52).



Рисунок 3.52 - Опытный
самолет Хейнкель He-178 с
турбореактивным
двигателем Охайна
Heinkel HeS 3b

1941г. – Архип Люлька (СССР) предложил двухконтурный турбореактивный двигатель.

1944г. – В Германии началось серийное производство самолетов с реактивными двигателями.