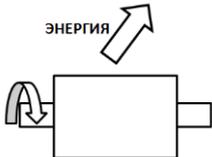
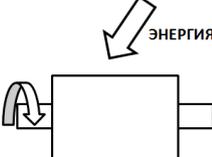
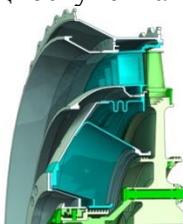
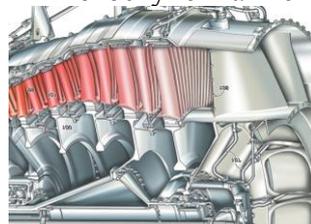
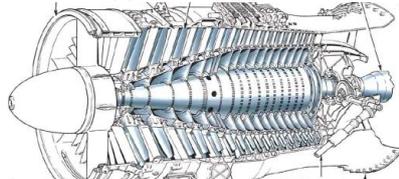
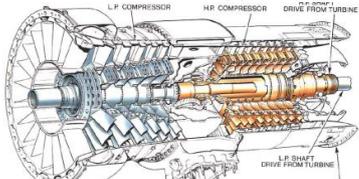
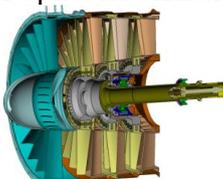
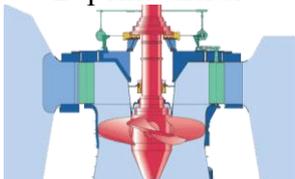
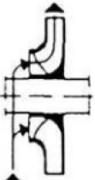
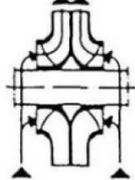


1.3 Классификация турбомашин

Все известные турбомашины могут быть классифицированы по разным признакам. Большая часть известных классификаций приведена в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1 - Возможные классификации турбомашин [4, 26, 8, 19]

Критерий классификации	Классификация	
По направлению движения энергии	<p>Машины двигатели</p> 	<p>Машины исполнители</p> 
Число ступеней	<p>Одноступенчатые</p> 	<p>Многоступенчатые</p> 
Число каскадов (валов)	<p>Однокаскадные</p> 	<p>Многокаскадные</p> 
Позиция вала	<p>Горизонтальная</p> 	<p>Вертикальная</p> 
Число входов	<p>Однозаходные</p> 	<p>Двухзаходные</p> 
По наличию корпуса	<p>Открытые</p> 	<p>Зарытые</p> 

На практике турбомашины наиболее часто классифицируют *по основному направлению движения рабочего тела*. По этому признаку они делятся на: *осевые, центробежные*

ные, центробежные и диагональные. Схема, иллюстрирующая различия лопаточных машин разных типов показана на рисунке 1.3.1.

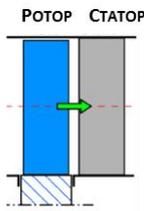
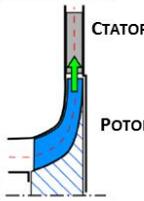
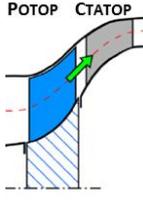
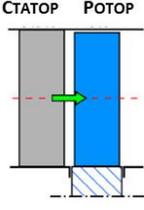
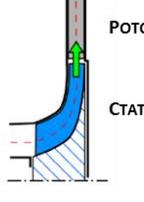
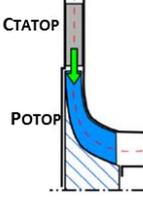
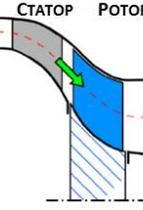
Тип	Осевые	Центробежные	Центростремительные	Диагональные
Компрессоры			Крайне редко используется	
Фото				
Турбины				

Рисунок 1.3.1 – Классификация лопаточных машин по направлению движения в них рабочего тела

В *осевых ЛМ* направление движения рабочего тела в меридиональной плоскости совпадает с направлением оси вращения РК или близко к нему. Линии тока в них располагаются на поверхностях близких к цилиндрическим, ось которых совпадает с осью ЛМ. Внешний вид осевых компрессора и турбины показан на рисунках 1.2.17 и 1.2.23.

Осевые турбомашины характеризуются повышенным КПД (до $0,9...0,92$, - наибольшим по сравнению с другими типами), но умеренными степенями повышения давления (π_k^* до 2) и расширения. Однако газодинамическая эффективность осевых ступеней существенно зависит от размера лопаточной машины. Осевые турбомашины при небольших расходах рабочего тела (менее 5 кг/с) имеют маленькие высоты лопаток. Это приводит к увеличению влияния процессов, происходящих в пограничных и радиальных зазорах, на течение в межлопаточных каналах и существенному снижению КПД. Поэтому с уменьшением расхода рабочего тела эффективность осевых турбомашин снижается, и при расходах менее 5 кг/с может проигрывать машинам других типов (рисунок 1.3.2).

Важным достоинством осевых турбомашин является простота создания многоступен-

чатых конструкций из последовательно расположенных ступеней. Действительно, в осевых машинах поток выходя из одной ступени обычно попадает в следующую без переходных каналов и дополнительных поворотов потока. Это не сопровождается снижением энергетической эффективности. Данное качество позволяет получать в осевых турбомашинах большие суммарные степени повышения давления и расширения с небольшими потерями.

В *центробежной ЛМ* движение рабочего тела в меридиональной плоскости осуществляется от центра к периферии, в направлении близком к перпендикулярному оси вращения ротора. Внешний вид РК центробежного компрессора (ЦБК) показан на рисунке 1.2.20.

Главное достоинство центробежного компрессора по сравнению с осевым – возможность получать большие значения степени повышения давления π_k^* в одной ступени. Зачастую, она превышает величину 5...6, а в перспективных авиационных компрессорах может превышать 12 [17]. КПД ступени центробежного компрессора η_k^* не превышает значение 0,85 [1, 17], что заметно меньше, чем в осевом. Значение КПД, близкие к указанной величине, характерны для компрессоров авиационных ГТД относительно большой производительности. Однако в отличие от осевых компрессоров, при уменьшении расхода через компрессор и, как следствие, уменьшении высот лопаток, снижение КПД центробежных не столь значительно как у осевых (рисунок 1.3.2). По этой причине при малых расходах рабочего тела центробежный компрессор обычно превосходит осевой по КПД.

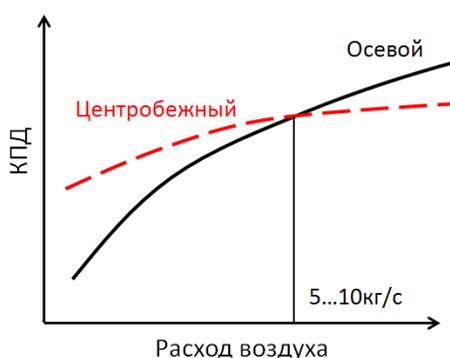
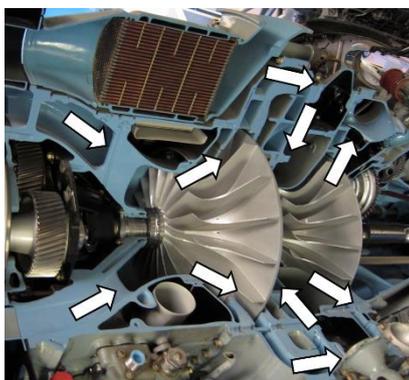


Рисунок 1.3.2 - Изменение КПД разных типов компрессоров при изменении расхода воздуха

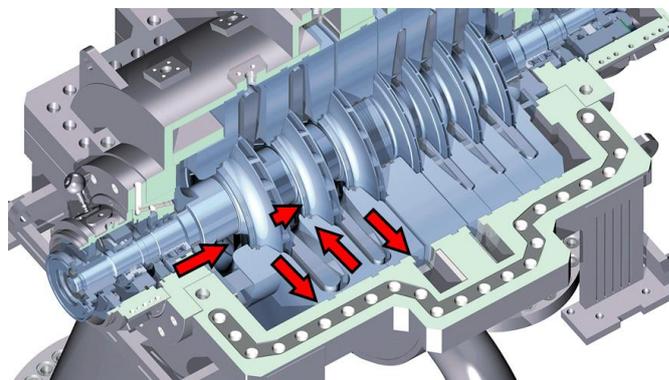
К числу достоинств ЦБК относятся также относительная простота конструкции, меньшее число деталей, более благоприятное протекание характеристик и меньшая чувствительность к условиям эксплуатации.

К недостаткам этого типа турбомашин следует отнести сложность организации многоступенчатого процесса сжатия без существенного снижения КПД, роста массы и диа-

метральных размеров. Действительно, для того, чтобы направить рабочее тело с периферии первой ступени ко входу во вторую ступень необходимо трижды повернуть поток на 90° (рисунок 1.3.3), что приводит к дополнительным потерям.



Авиационный



Промышленный

Рисунок 1.3.3 – Многоступенчатые центробежные компрессоры

В *центростремительных ЛМ* (рисунок 1.3.1) движение рабочего тела в меридиональной плоскости осуществляется также в направлении близком к перпендикулярному к оси вращения, но в направлении от периферии к центру. Центростремительными выполняют обычно только турбины.

КПД центростремительной турбины (достигает величины $0,88$) превышает КПД центробежной машины, но не достигает величины эффективности осевых турбин. За счет движения рабочего тела против действия инерционных сил в центростремительных турбинах удастся получить большую степень расширения, либо реализовать аналогичное расширение при меньшем уровне скоростей и, соответственно, потерь. В технологическом плане и по возможности организации многоступенчатого процесса центростремительные турбомашин аналогичны центробежным.

Диагональные турбомашин представляют собой тип промежуточный между осевыми и радиальными (центробежными и центростремительными) турбомашин. Их параметры находятся между параметрами лопаточных машин указанных типов.

Сравнение характеристик лопаточных машин разных типов приведены в таблице 1.3.2. Анализируя приведенные данные, не следует делать вывод, что тот или иной тип лопаточных машин плох или хорош. Сравнение следует проводить с учетом условий, в которых турбомашин будет эксплуатироваться. Например, наземные ГТУ и авиационные ГТД имеют относительно большой расход рабочего тела (измеряемый десятками килограмм в секунду) и степень сжатия (более 30). Очевидно, что для лопаточных машин таких изделий важными требованиями будут высокий КПД при больших расходах и воз-

возможность создания высокоэффективных и компактных многоступенчатых лопаточных машин, поскольку не один их тип не позволяет получить требуемые параметры в одной ступени. Таким требованиям наилучшим образом удовлетворяют осевые турбомашин (таблица 1.3.3 и рисунок 1.3.4) [7].

Таблица 1.3.2 – Сравнение разных типов лопаточных машин [7]

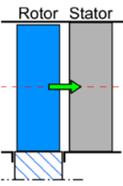
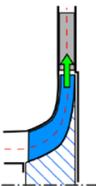
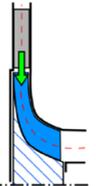
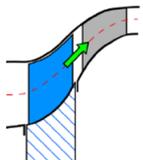
Тип турбомашин	ОСЕВАЯ	ЦЕНТРОБЕЖНАЯ	ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНАЯ	ДИАГОНАЛЬНАЯ
				
Степень изменения давления	< 2	< 12	< 6	< 5
МАХ КПД	0,92	0,85	0,88	0,9
Уровень КПД при малых расходах рабочего тела	низкий	приемлемый	приемлемый	приемлемый
Создание многоступенчатой машин	<ol style="list-style-type: none"> 1. Простая конструкция 2. Дополнительные потерь нет 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Увеличение размеров 2. Потери из-за дополнительных поворотов потока 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Увеличение размеров 2. Потери из-за дополнительных поворотов потока 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Простая конструкция 2. Дополнительные потерь нет 3. Хорошо согласуются с осевыми ступенями

Таблица 1.3.3 – К выбору типа лопаточной машин для ГТД самолета гражданской авиации [7]

	Требования	Осевые	Радиальные
Расход рабочего тела	>10 кг/с	Высокий КПД	Низкий КПД
Степень повышения давления	>30	<2	<10
Число ступеней	min	>1	>1
Снижение КПД из-за числа ступеней	Высокий	Не велико	Значительно
Сложность конструкции	Минимальная	Приемлемая	Сложная

В ряде случаев в ГТУ малой тяги, с малыми расходами рабочего тела, для повышения

КПД компрессора могут применяться многоступенчатые осецентробежные компрессоры, представляющие собой комбинацию осевых и центробежных ступеней. При этом центробежная ступень всегда является замыкающей (рисунок 1.3.5). Она устанавливается вместо нескольких осевых, имеющих сверхмалые высоты рабочих лопаток, у которых особенно сильно сказывается влияние радиальных зазоров и вторичных течений [7, 20].

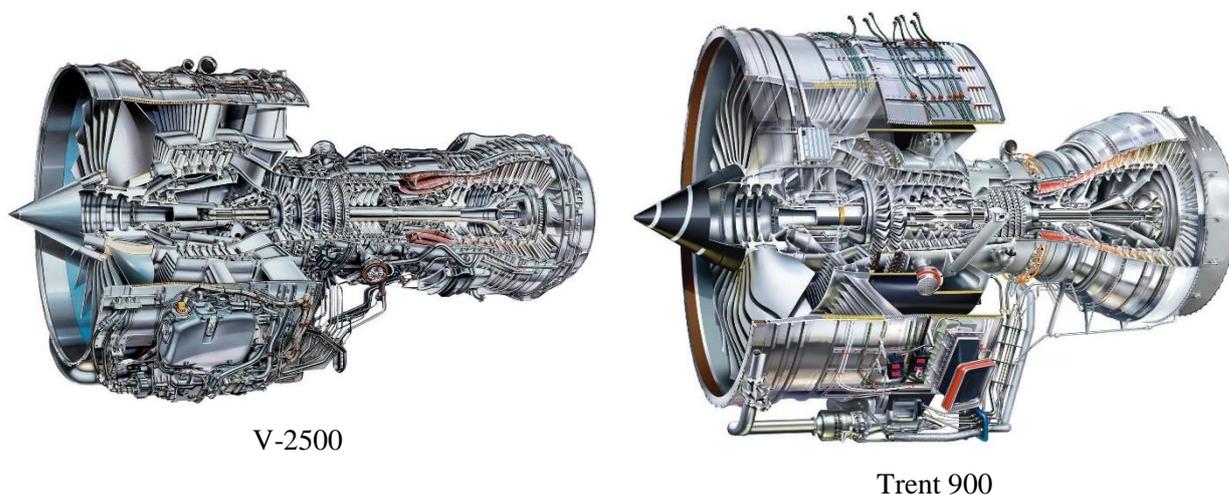


Рисунок 1.3.4 – Современные газотурбинные двигатели

Такие компрессоры имеют значительно меньшие линейные размеры и массу.

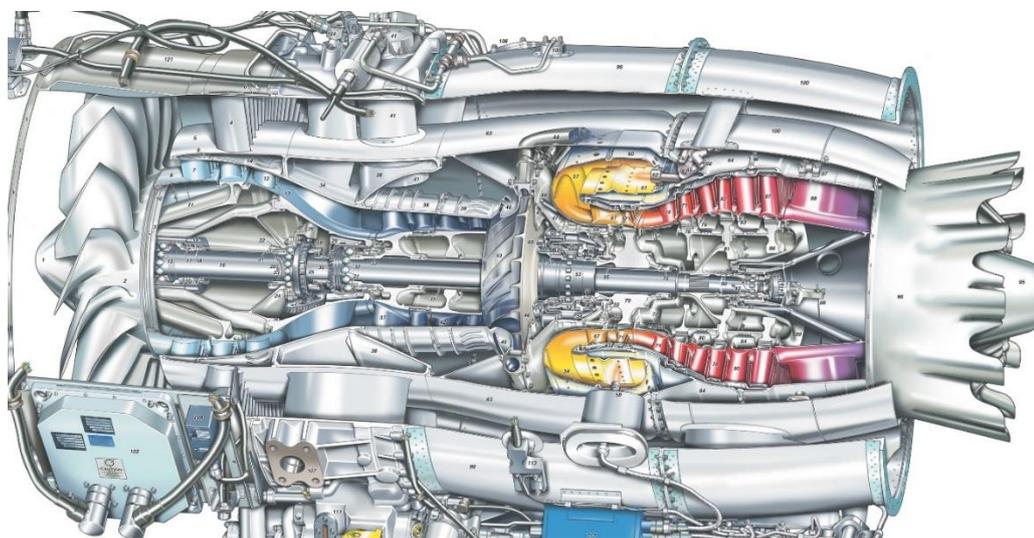


Рисунок 1.3.5 - ГТД PW 545 с осецентробежным компрессором [8]

Для агрегата наддува двигателя внутреннего сгорания (ДВС) характерны малый расход рабочего тела (до 1кг/с) и умеренные степени сжатия/ расширения (до 3 [12], у бензиновых двигателей не более 1,8...2). Кроме того, турбокомпрессор ДВС должен иметь простую конструкцию для удешевления массового производства автомобильных двигателей. Таким требованиям лучше всего удовлетворяют центробежные и центростремительные

машины. В интересующем диапазоне расходов они превосходят по КПД осевые машины и позволяют получить требуемые степени повышения давления в одной ступени (в отличие от осевых) (таблица 1.3.4 и рисунок 1.3.6) [7].

Таблица 1.3.4 – К выбору типа лопаточной машины для агрегата наддува автомобильного двигателя

	Требования	Осевые	Радиальные
Расход рабочего тела	< 1 кг/с	Низкий КПД	Высокий КПД
Степень повышения давления	< 3	< 2	< 10
Число ступеней	min	> 1	1
Снижение КПД из-за числа ступеней	Высокий	Не велико	-
Сложность конструкции	Минимальна	Сложная	Простая

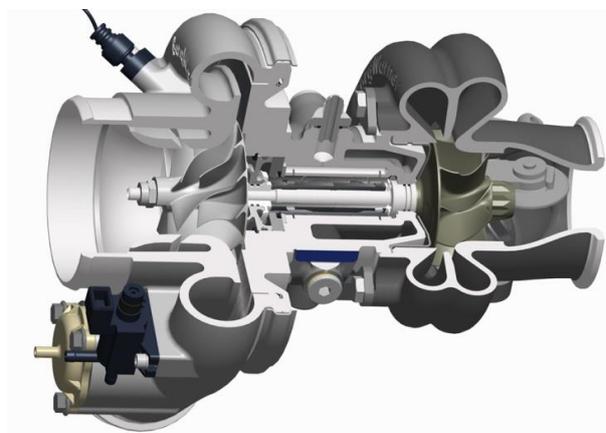


Рисунок 1.3.6 – Агрегаты наддува ДВС