

Теория турбомашин

Курс лекций. 5 семестр.

Заведующий кафедрой, доцент,
кандидат технических наук

Юрий Владимирович Кожухов

kozukhov_yv@mail.ru

+7 (921) 567-84-91

СПбПУ, кафедра «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника»

Доц. Ю.В. Кожухов

Теория турбомашин. Лекция 1.

СОДЕРЖАНИЕ

- Введение
- Задачи курса, его метод и связь с другими предметами учебного плана.
- Литература.
- Исторический обзор развития теории и практики турбомашин, роль отечественных и иностранных ученых.
- Принцип действия и устройство турбомашин, области применения, классификация.

TURBO (лат.)– вихрь, (волчок, веретено).

1. Рекомендуемая литература

Основная

- Теория турбомашин. Основы теории турбокомпрессоров. Учебное пособие. Галеркин Ю.Б., Ю.В. Кожухов. Изд. Политехнического университета. СПб. 2013 - 245 с.
- Теория и расчет турбокомпрессоров (учебное пособие для студентов ВУЗов). Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б., Анисимов С.А. и др. Под общей редакцией К.П. Селезнева - Л.: Машиностроение. 1986 - 392 с.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Литература

Дополнительная

- Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. -М.: Наука, 1976.-888 с.
- Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1992.-672 с.
- Кириллов И.И. Теория турбомашин.-Л.: Машиностроение, 1972.-536 с.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин

Леонард Эйлер (1707-1783 г.г.)

Начало теории турбомашин было положено трудами Л. Эйлера, который в 1755 г. получил одно из основных уравнений гидродинамики идеальной жидкости. Научную базу для изучения рабочего процесса всех турбомашин составляют основоположные труды Леонарда Эйлера, современная механика жидкости и газа и экспериментальная аэродинамика.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики турбомашин



SCHWEIZERISCHE NATIONALBANK
BANCA NAZIONALE SVIZRA



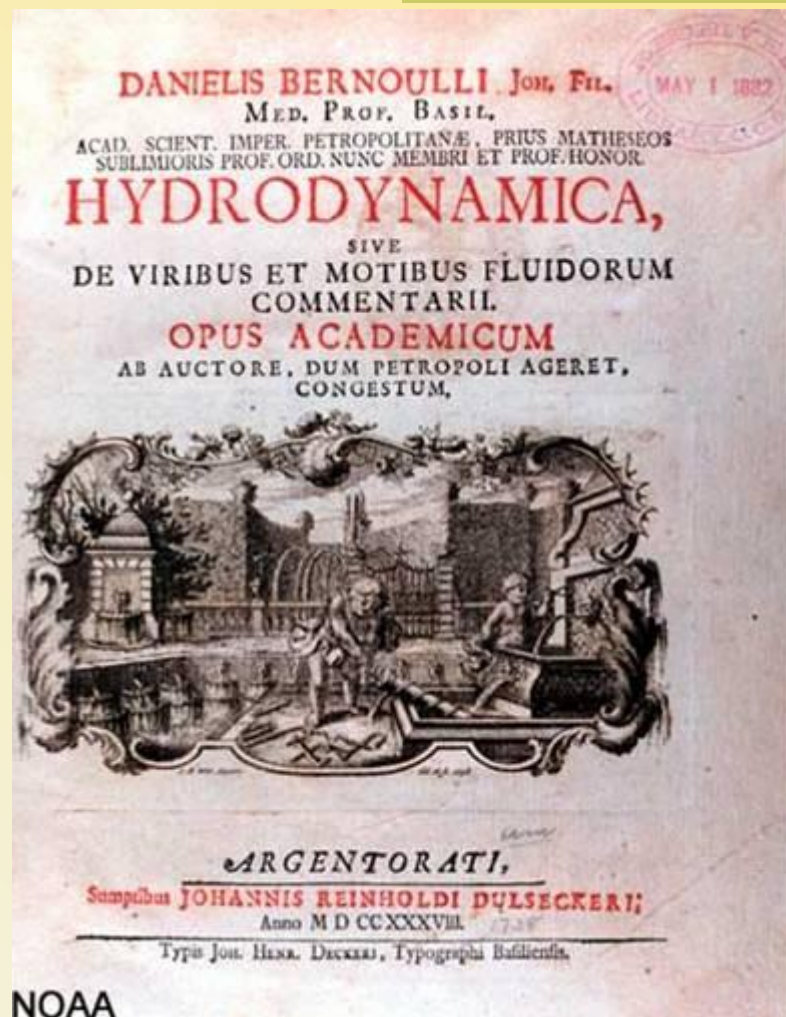
Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин

Даниил Бернулли (1700 – 1782 г.г.)

Даниил Бернулли, студенческий товарищ Эйлера по Базельскому университету, так же внёс свой вклад, получив закон сохранения энергии для одномерного установившегося течения газа в проточной части турбомашин.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

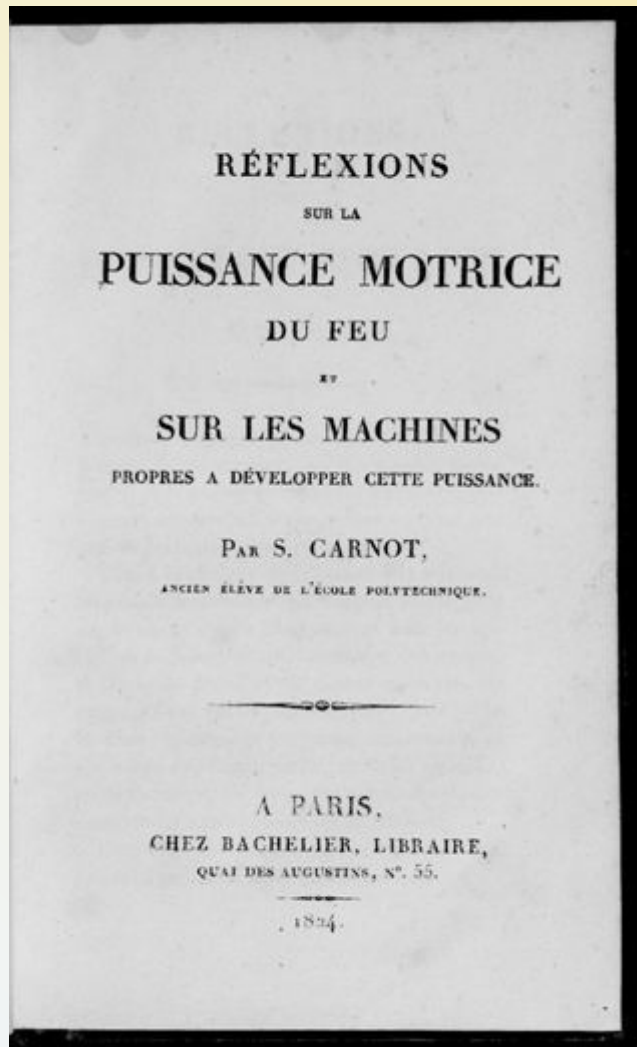
Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

Николя Леонар Сади Карно (1796 – 1832 г.г.)

Неоценимый вклад в развитие термодинамики, являющейся основой теории турбомашин, внёс Николя Леонар Сади Карно издав в 1824 году первую и единственную работу свою работу — «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Эта работа считается основополагающей в термодинамике.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин

**Александр Александрович
Саблуков
(1783 – 1857 г.г.)**

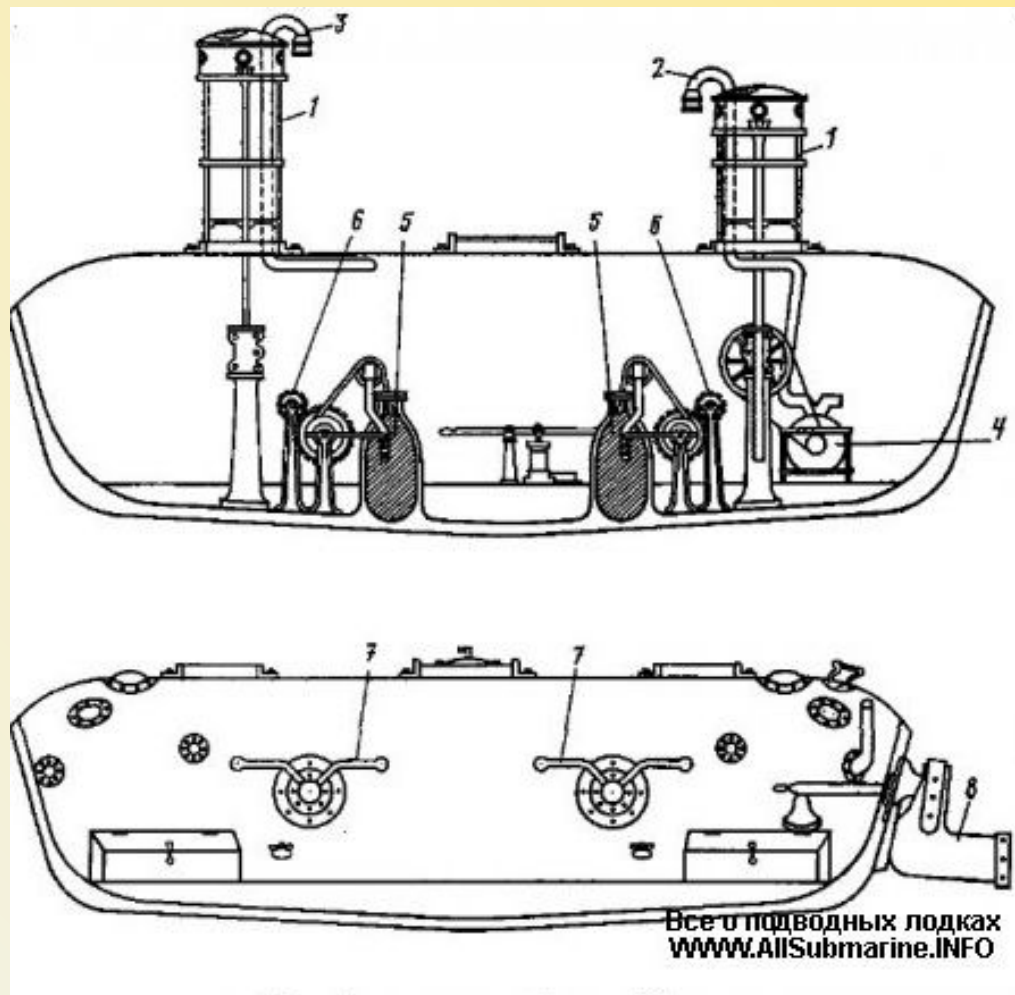
В 1832 г. генерал-лейтенантом Александром Александровичем Саблуковым был создан центробежный вентилятор, который использовался на кожевенных и сахарных заводах, в прачечных, позднее применялся на Чагирском руднике.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

Устройство подводной лодки Шильдера (с подлинных чертежей изобретателя).

- 1 — башни,
- 2 — труба для выхлопа испорченного воздуха,
- 3 — труба для впускания свежего воздуха,
- 4 — вентилятор Саблукова,
- 5 — свинцовые гири,
- 6 — ворота для подъема и опускания гирь,
- 7 — ворота гребков,
- 8 — руль

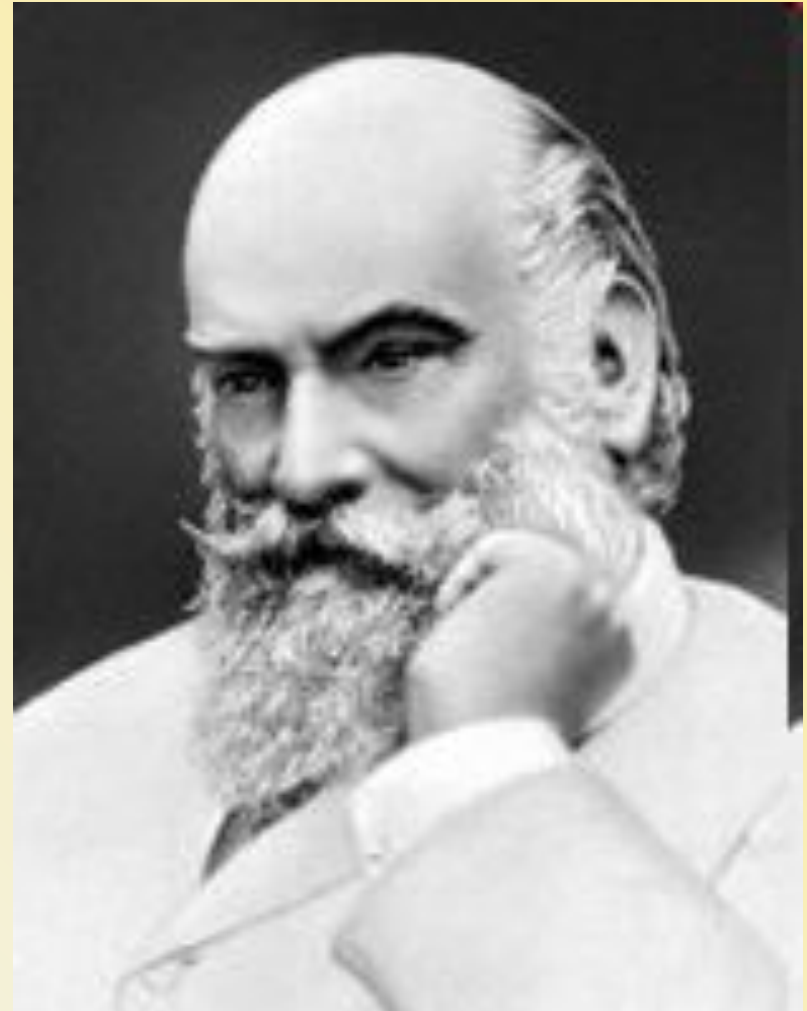


Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин

Николай Егорович Жуковский
(1847 – 1921 г.г.)

Выдающийся русский учёный,
создатель аэродинамики как науки.

В конце 19 века Жуковский и
Чаплыгин создали теорию решётки
профилей, а так же основы газовой
динамики.

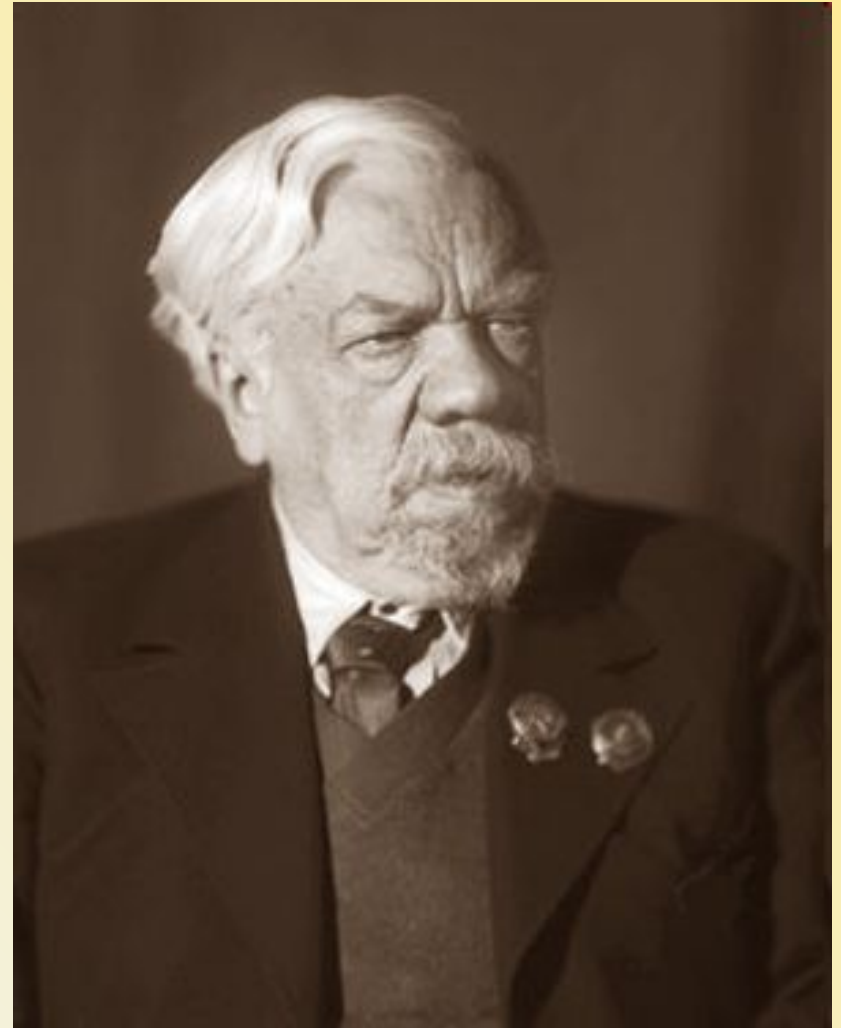


Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

**Сергей Алексеевич Чаплыгин
(1869 – 1942 г.г.)**

Российский, советский ученый в области механики, один из основоположников аэродинамики.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин

**Карл Густав Патрик де Лаваль
(1845 – 1913 г.г.)**

Лаваль шведский инженер и изобретатель (по национальности француз) в 1878 г. сконструировал центробежный сепаратор непрерывного действия для молока, для которого требовался очень скоростной привод, и в 1883 г. Лаваль сконструировал первую в мире паровую турбину, которую усовершенствовал к 1889 г. – это была паровая турбина активного типа.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики турбомашин



Турбина Лавалья. $P_{\text{вх}} = 5 \text{ бар}$, $P_{\text{вых}} = 5 \text{ бар}$,
 $T_{\text{вх}} = 150^\circ \text{C}$, $n = 30 \text{ тыс. об/мин.}$, $N = 7,3 \text{ кВт}$

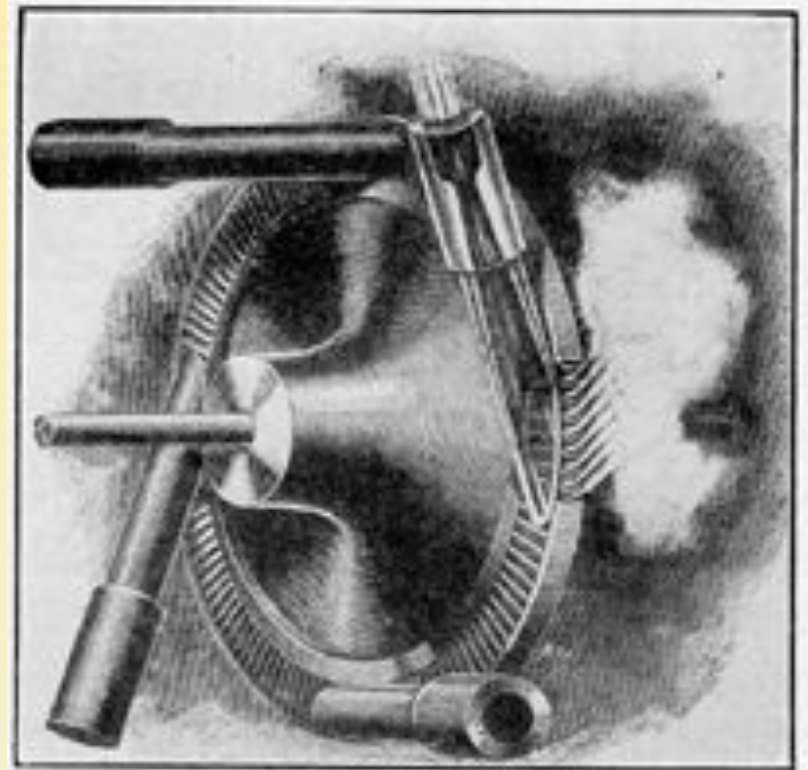


Fig. 4. Dr de Laval's Turbine.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

Ауре Стодола (1859 – 1942 г.г.)

Очень большой вклад в развитие турбомашин внёс словацкий инженер и учёный-теплотехник Ауре Стодола. В 1892—1929 профессор Высшей технической школы в Цюрихе.

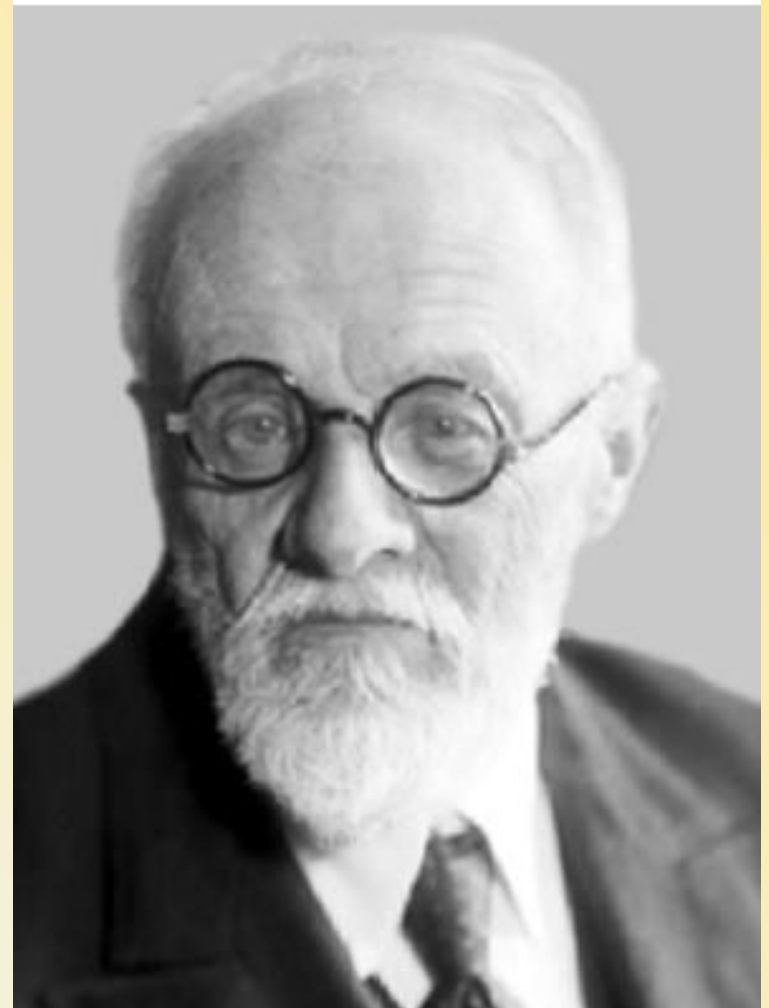
Основные труды Стодола посвящены термодинамической и аэрогидродинамической теории и расчёту паровых и газовых турбин, а также теории автоматического регулирования и теории циркуляции в центробежных компрессорах.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин

**Александр Александрович
Радциг (1869 – 1941 г.г.)**

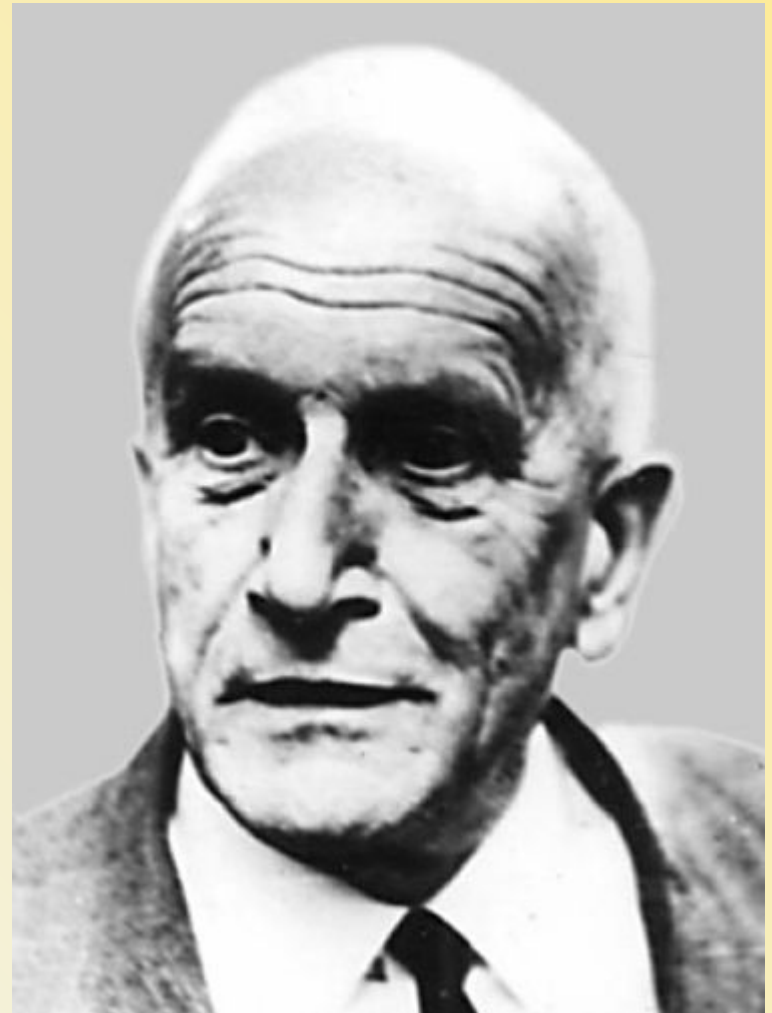
Значительный вклад в мировое развитие теории турбо-машин внесли отечественные учёные. Основоположником и создателем русской школы энергетиков и турбостроителей в Санкт-Петербурге является Радциг Александр Александрович.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики
турбомашин

**Иван Иванович
Кириллов (1902 – 1993 г.г.)**

Продолжателем и последователем русской турбинной школы является Кириллов Иван Иванович, крупный учёный, инженер и педагог в области турбомашин, профессор Ленинградского политехнического института, заведующий кафедрой «Паровые турбины и машины» ЛПИ.

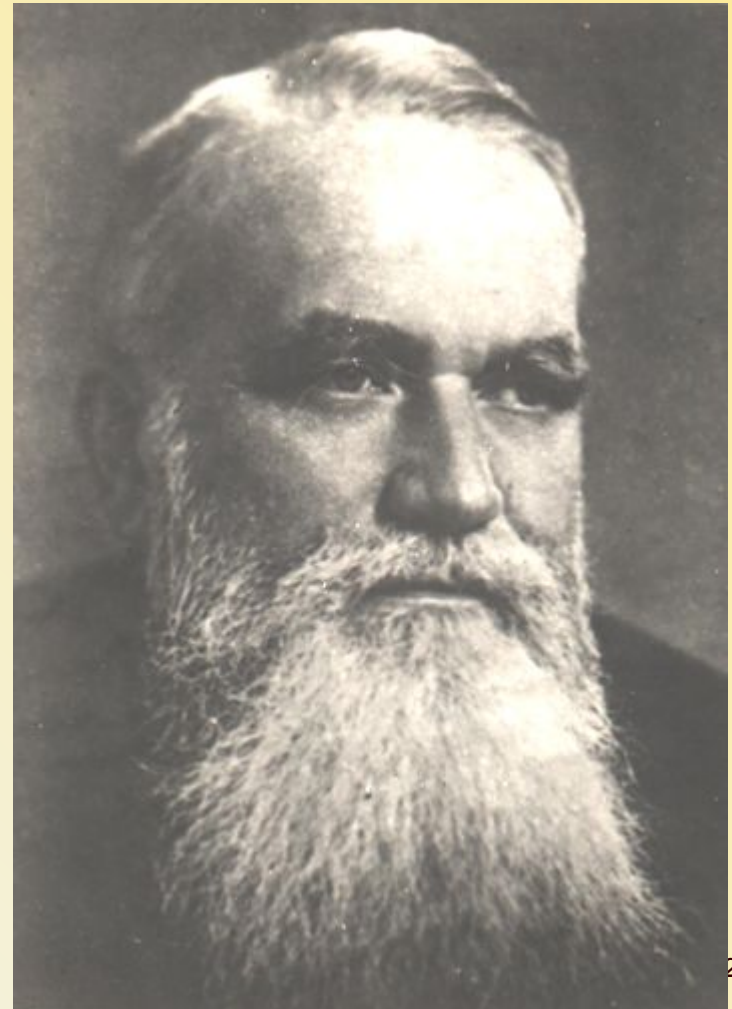


Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

Константин Иванович Страхович (1904 – 1968 г.г.)

К.И. Страхович был одним из основателей и создателей Энергомашиностроительного факультета ЛПИ. С 1930 г. профессор Ленинградского политехнического института, становится первым заведующим кафедрой компрессоростроения. При активном участии К.И. Страховича был создан один из первых в нашей стране воздушно-реактивных двигателей.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

**Константин Павлович
Селезнёв (1920 – 1998 г.г.)**

К.П. Селезнев - основатель научной школы компрессоростроения в ЛПИ - СПбГПУ. с 1960 г. и до 1989 г. заведовал кафедрой компрессоростроения ЛПИ. В 1973 – 1983 гг. был ректором ЛПИ. После 1989 г. был профессором - научным руководителем исследовательских групп, связанных с тематикой центробежных компрессоров высокого и сверхвысокого давления.

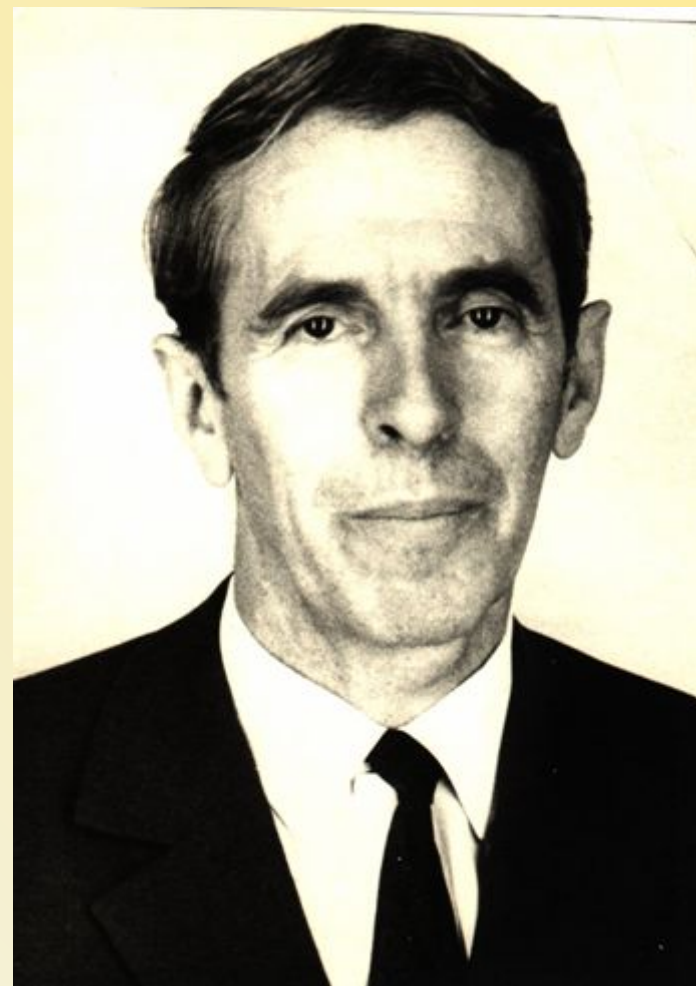


Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

Вольдемар Францевич Рис (1907 – 1991 г.г.)

В.Ф. Рис в 1933 г. был переведен на НЗЛ для организации проектирования и производства первых в стране центробежных компрессоров. Большим вкладом В. Ф. Риса в теорию и практику компрессоростроения явились монографии “Центробежные компрессорные машины” (1957 и 1964 гг.), и др. В.Ф.Рис был одним из наиболее видных ученых и инженеров отрасли компрессоростроения.

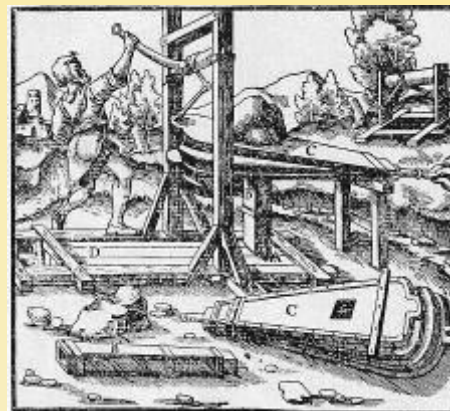


Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.
Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

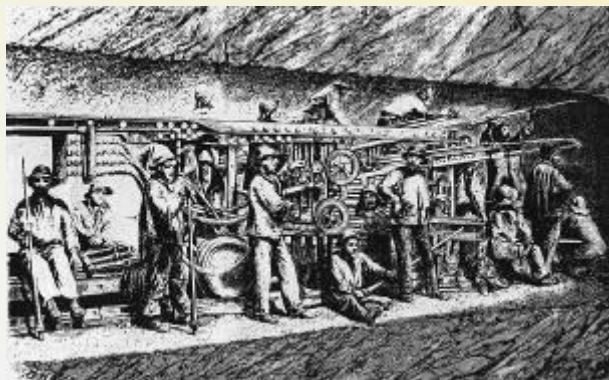
■ Компрессорная техника в промышленности и транспорте



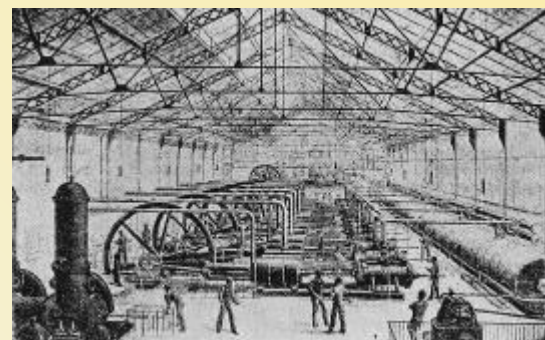
Древнейшие технические устройства – компрессоры.
Выплавка металлов в древнем Египте



Проветривание штолен – Европа, средние века



Первое широкое применение пневматики –
проходка ж/д туннеля.
Швейцария, середина 19 в



Первая централизованная система
энергоснабжения – городская
компрессорная станция.
Париж, 2-я половина 19 в.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Исторический обзор развития теории и практики турбомашин

- В **1900** г. фирма **Рато** выпустила первый центробежный компрессор для подачи воздуха в доменные печи.
- В **1934** г. фирма **Броун-Бовери** в Швейцарии впервые построила многоступенчатый осевой компрессор.
- На **ЛМЗ** выпускаются центробежные компрессоры с **1924** г., на **НЗЛ** с **1932** г.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Принцип действия и устройство турбомашин

Компрессоры –

это энергетические машины,
служащие для сжатия и
перемещения газов.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Принцип действия и устройство турбомашин

Характерная особенность турбомашин — непрерывный поток газа и непрерывность процесса сжатия для турбокомпрессоров, или расширения для турбин.

Турбокомпрессоры по принципу действия относятся к классу энергетических турбомашин (машины лопаточного типа). К этому классу помимо турбокомпрессоров относятся паровые и газовые турбины, центробежные и осевые насосы, а также гидравлические турбины. Общим для всех этих энергетических машин является наличие вращающихся и неподвижных лопаточных аппаратов, взаимодействующих с потоком рабочей среды.

Принцип действия и устройство турбомашин

Турбокомпрессоры имеют существенные преимущества перед другими типами компрессоров:

- 1) сравнительно небольшие размеры и вес;
- 2) отсутствие возвратно-поступательного движения;
- 3) равномерность подачи газа;
- 4) отсутствие загрязнения газа маслом, следствием чего является, в частности, малый расход смазочных веществ;
- 5) возможность непосредственного соединения компрессора с быстроходной паровой или газовой турбиной, а также с электродвигателем;
- 6) возможность получения в компрессоре весьма больших расходов газа.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Принцип действия и устройство турбомашин

К недостаткам турбокомпрессоров надо отнести главным образом:

Трудности выполнения их для получения малых расходов (особенно осевых компрессоров) и степеней повышения давления порядка нескольких десятков и выше.

Устойчивая работа этих машин возможна в ограниченном диапазоне производительностей.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Принцип действия и устройство турбомашин

Основные области применения компрессоров в настоящее время:

МЕТАЛЛУРГИЯ - получение чугуна и стали, блоки разделения воздуха,

ГОРНОЕ ДЕЛО - проветривание, передача энергии сжатым воздухом,

ВЕНТИЛЯЦИЯ промышленных, общественных, жилых помещений и пр., охлаждение технических устройств,

ПНЕВМАТИКА - использование энергии сжатого воздуха в промышленности, строительстве, дорожном строительстве,

ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ - реакции синтеза при производстве пластмасс, удобрений и пр.,

НЕФТЕХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ – переработка углеводородов,

ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА – пищевая промышленность, кондиционирование промышленных, общественных, жилых помещений, высокие технологии и пр.,

ЭНЕРГЕТИКА - газотурбинные двигатели, тепловые электростанции, газоохлаждаемые атомные реакторы, турбопоршневые двигатели,

ГАЗОВАЯ и НЕФТЯНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ - обработка, транспортировка, хранение природного (попутного) газа, переработка природного газа для получения синтетических моторных топлив.

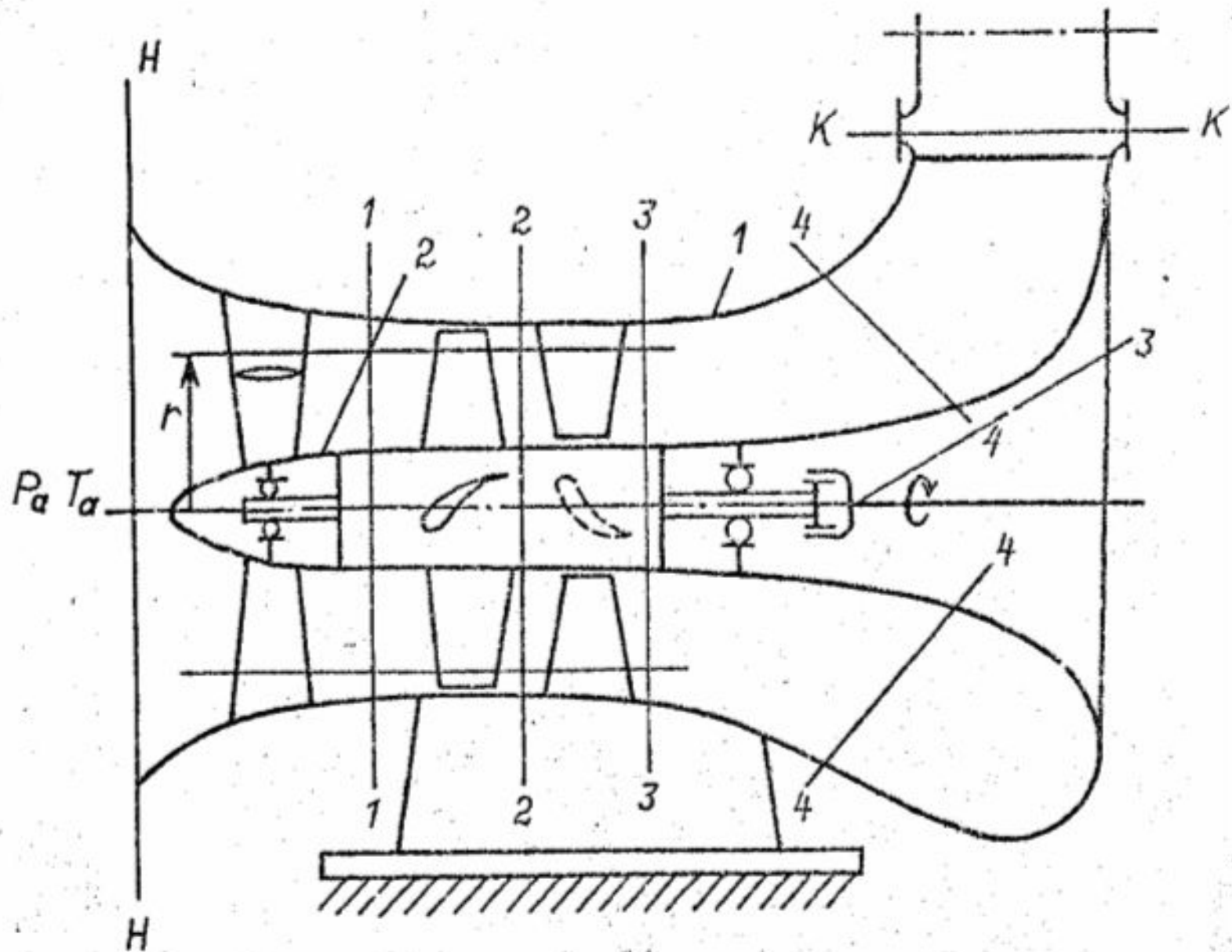
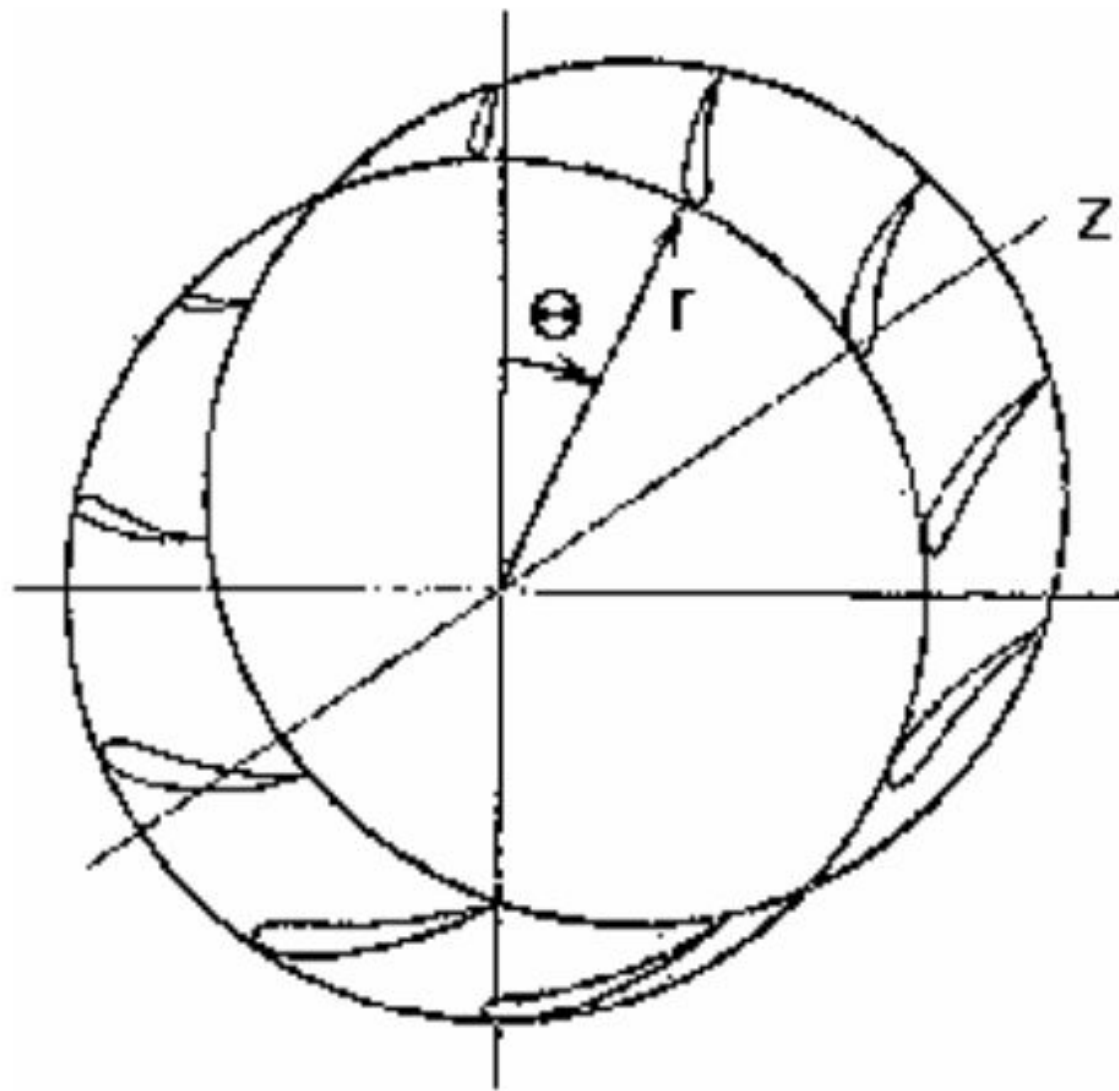
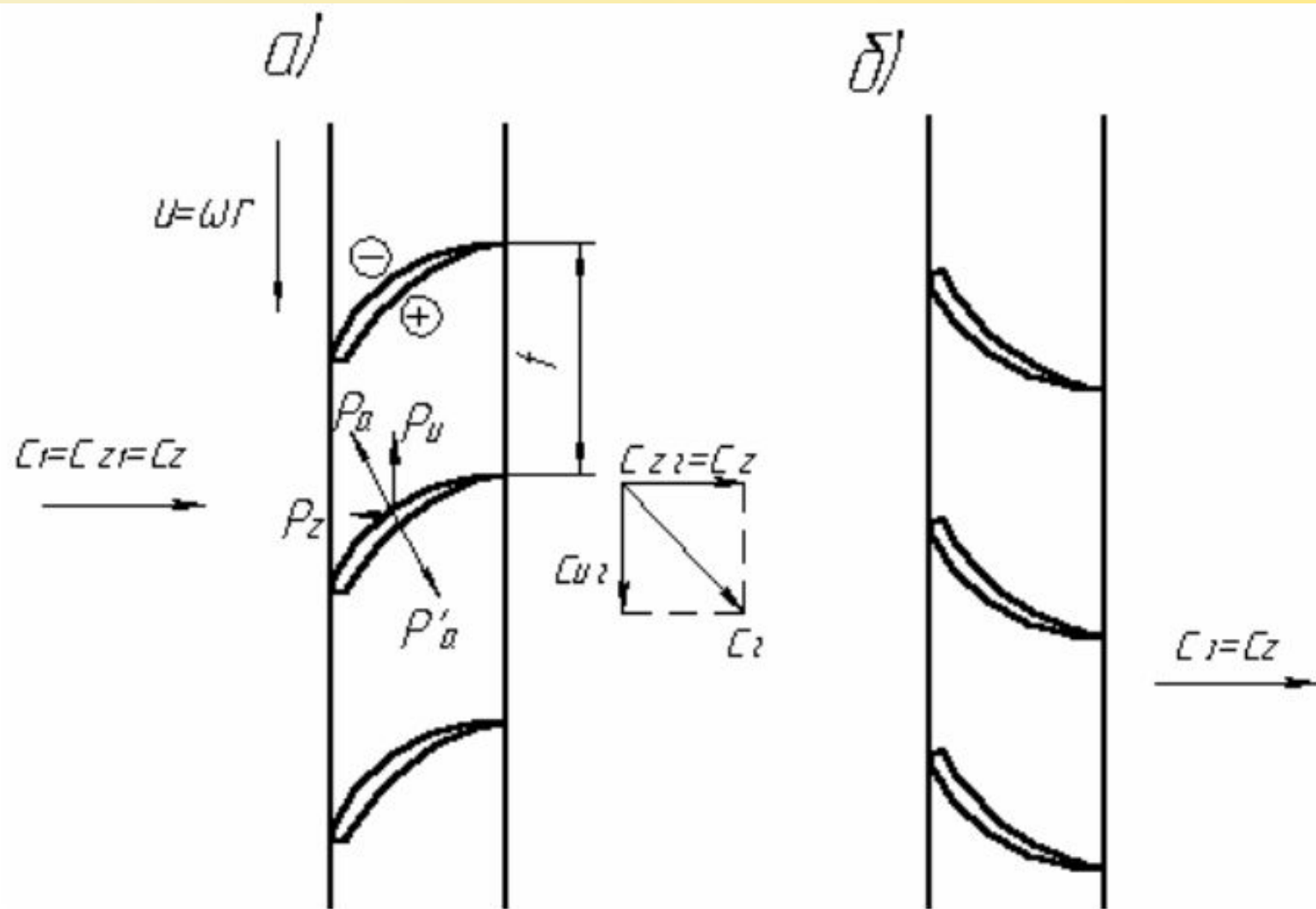


Схема осевого компрессора с одной ступенью.



Элементарная кольцевая лопаточная
решётка осевого компрессора.



Взаимодействие газа с элементарной лопаточной решёткой (решеткой профилей) рабочего колеса (а) и направляющего аппарата (б).

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Принцип действия и устройство турбомашин

Рабочее колесо (РК) является основным, обязательным элементом компрессора. Оно передает газу механическую работу от двигателя, и тогда создается непрерывный поток газа, в котором давление газа возрастает.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Принцип действия и устройство турбомашин

Диффузоры – каналы специальной формы, в которых кинетическая энергия газа переходит в энергию давления при снижении скорости.

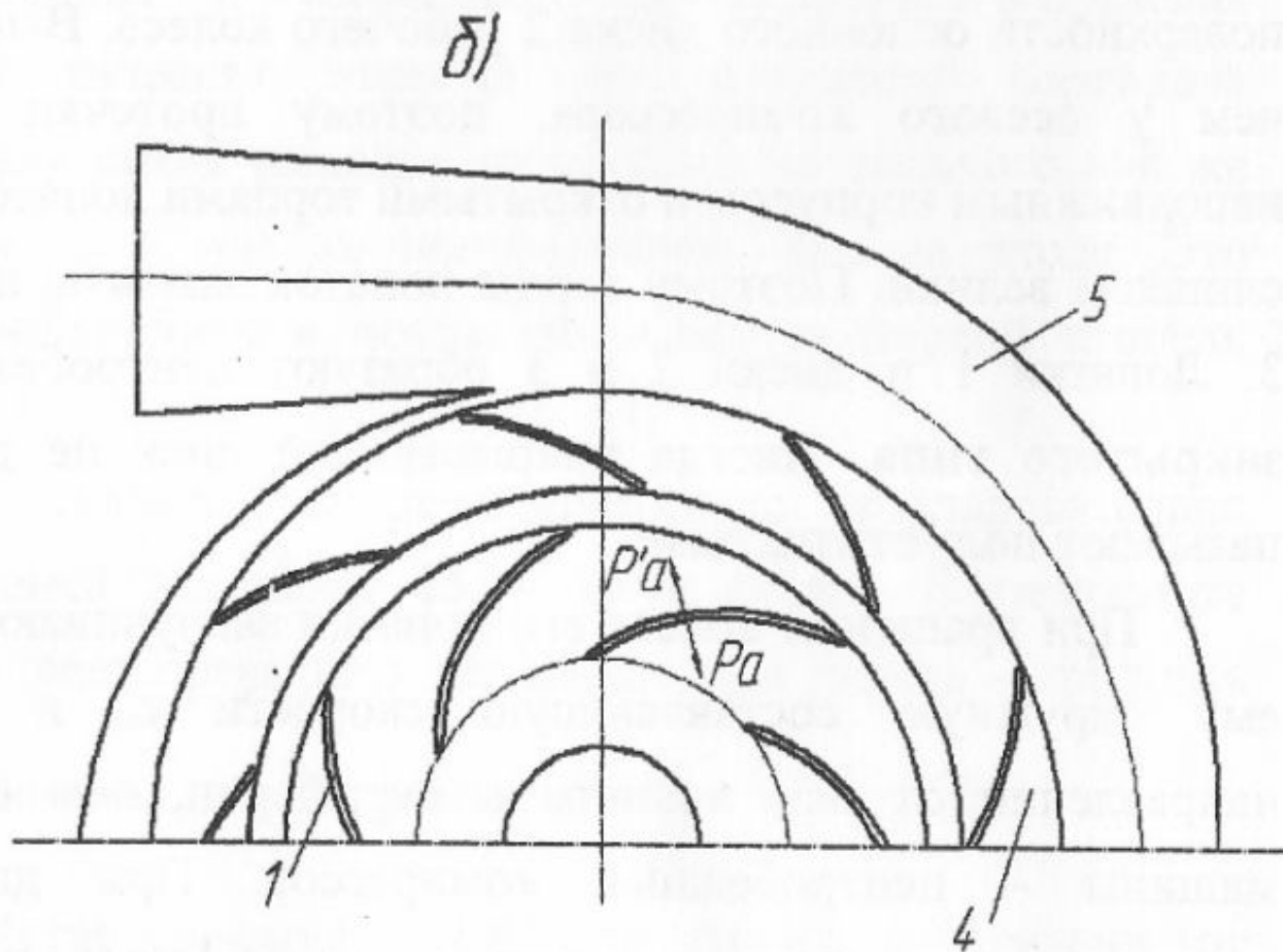
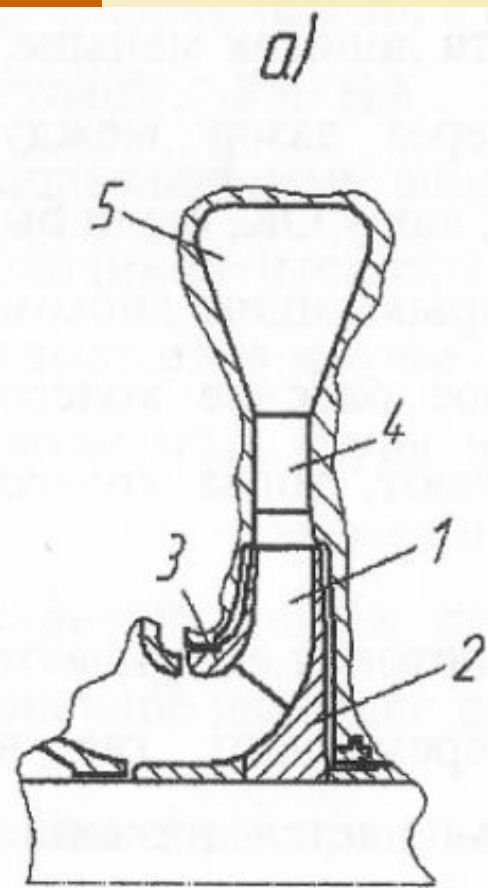
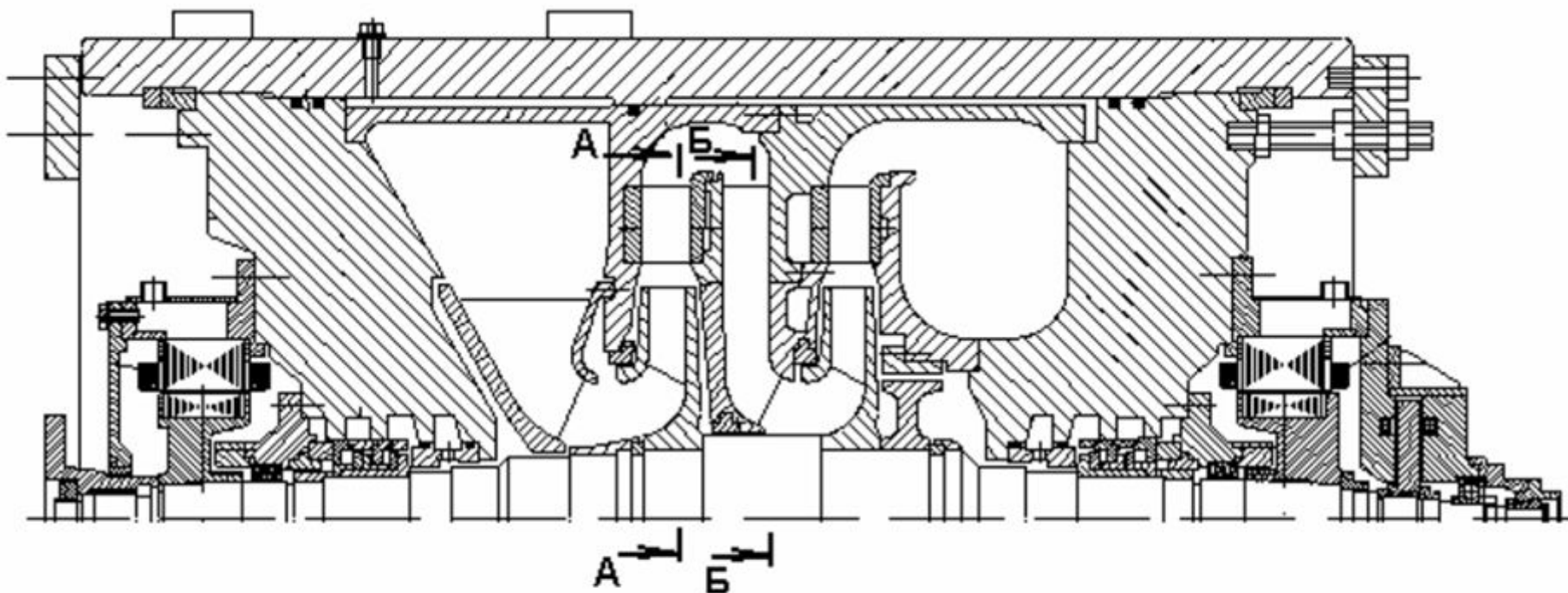
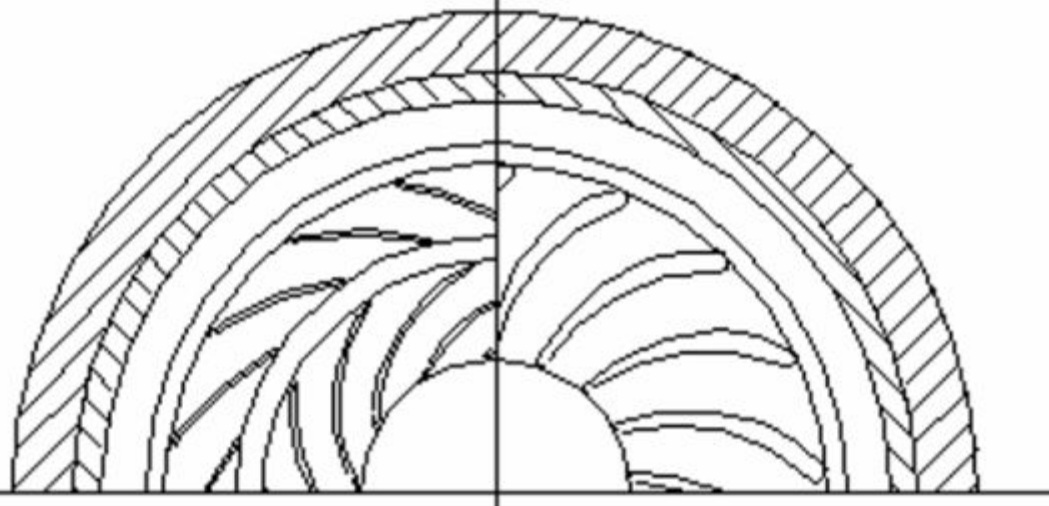


Схема одноступенчатого центробежного компрессора

а) – меридиональная плоскость, б) – радиальная плоскость

A-A

Б-Б



Двухступенчатый центробежный компрессор высокого давления.

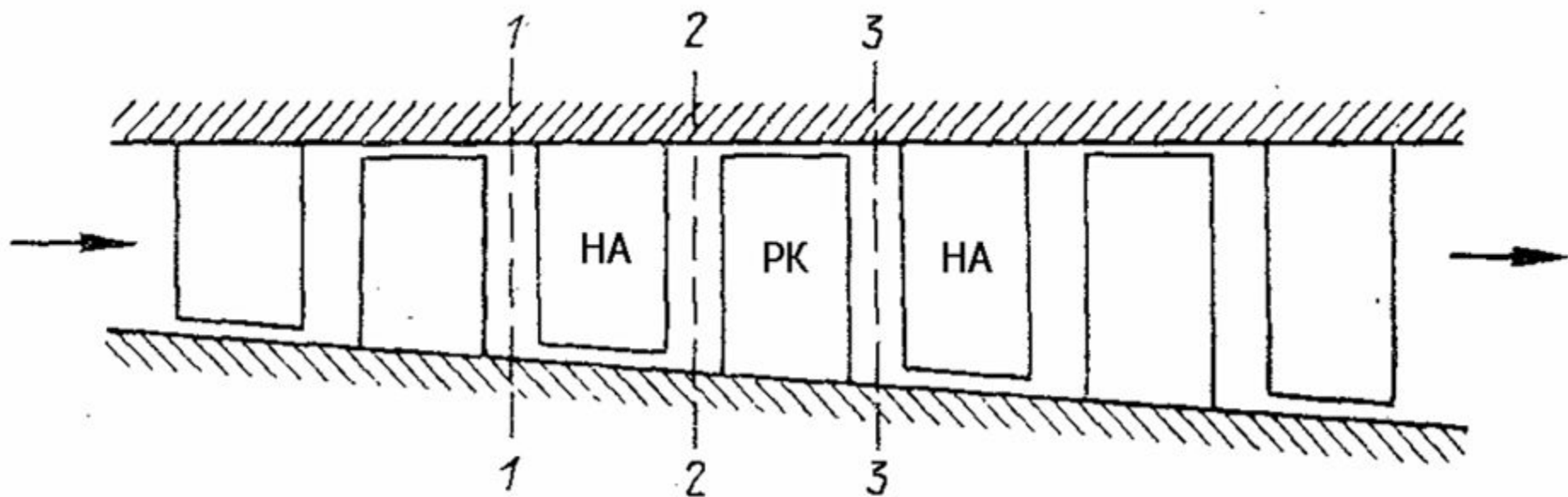
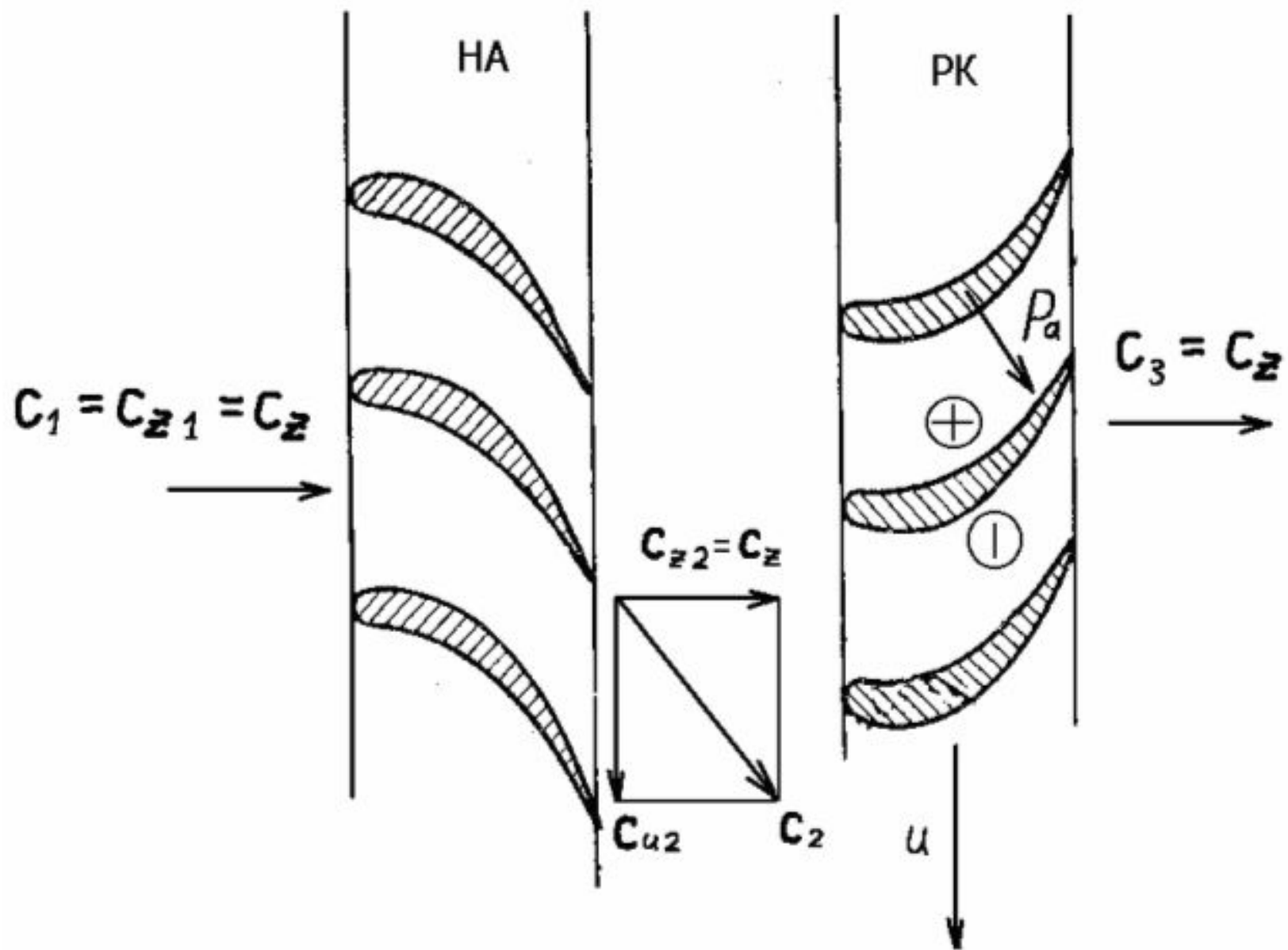


Схема проточной части осевой турбины



Взаимодействие газа с лопаточной решёткой направляющего аппарата (НА) и рабочего колеса (ПК) осевой турбины

Классификация турбомашин

Классификация турбокомпрессоров:

1. Осевые, центробежные, диагональные.
2. Осецентрированные.
3. Одноступенчатые и многоступенчатые.
4. Однопоточные и многопоточные.
5. Транспортные и промышленные (стационарные).
6. Одноваловые и многоваловые.
7. Однокорпусные и многокорпусные.
8. По степени повышения давления: вентиляторы ($\Pi < 1,2$), нагнетатели ($1,2 < \Pi < 2,0$), компрессоры ($\Pi > 2,0$).
9. По конечному давлению: низкого давления (до 1,5 МПа), среднего давления 1,5-10 МПа, высокого давления 10-100 МПа, и сверхвысокого давления более 100 МПа.
10. По сжимаемому газу - воздушные, газовые, а так же кислородные, водородные, хлорные и т.п.

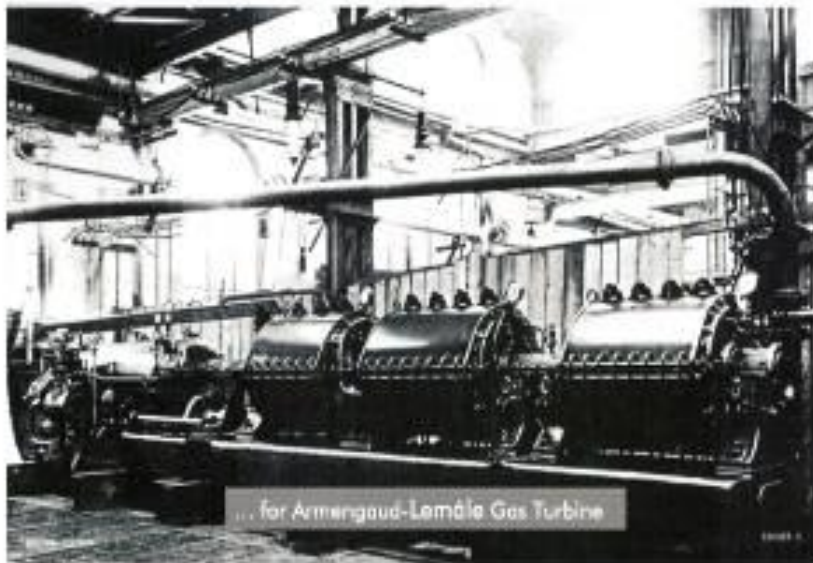
Области применения турбомашин

Области применения турбокомпрессоров:

1. Цикловые компрессоры газотурбинных двигателей.
2. Турбонаддув двигателей внутреннего сгорания.
3. Тягодутьевые машины.
4. Вентиляторы.
5. Обслуживание пневматических систем.
6. Производство чугуна.
7. Производство стали.
8. Блоки разделения воздуха.
9. Производство удобрений.
10. Химия и нефтехимия.
11. Холодильная техника.
12. Добыча нефти.
13. Газовая промышленность: дожимные компрессоры, линейные центробежные нагнетатели, компрессоры подземных хранилищ газа.

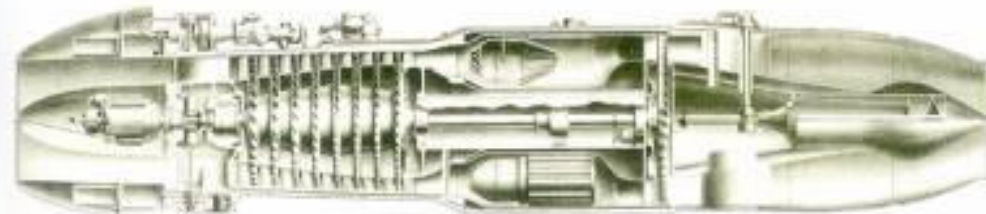
Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте



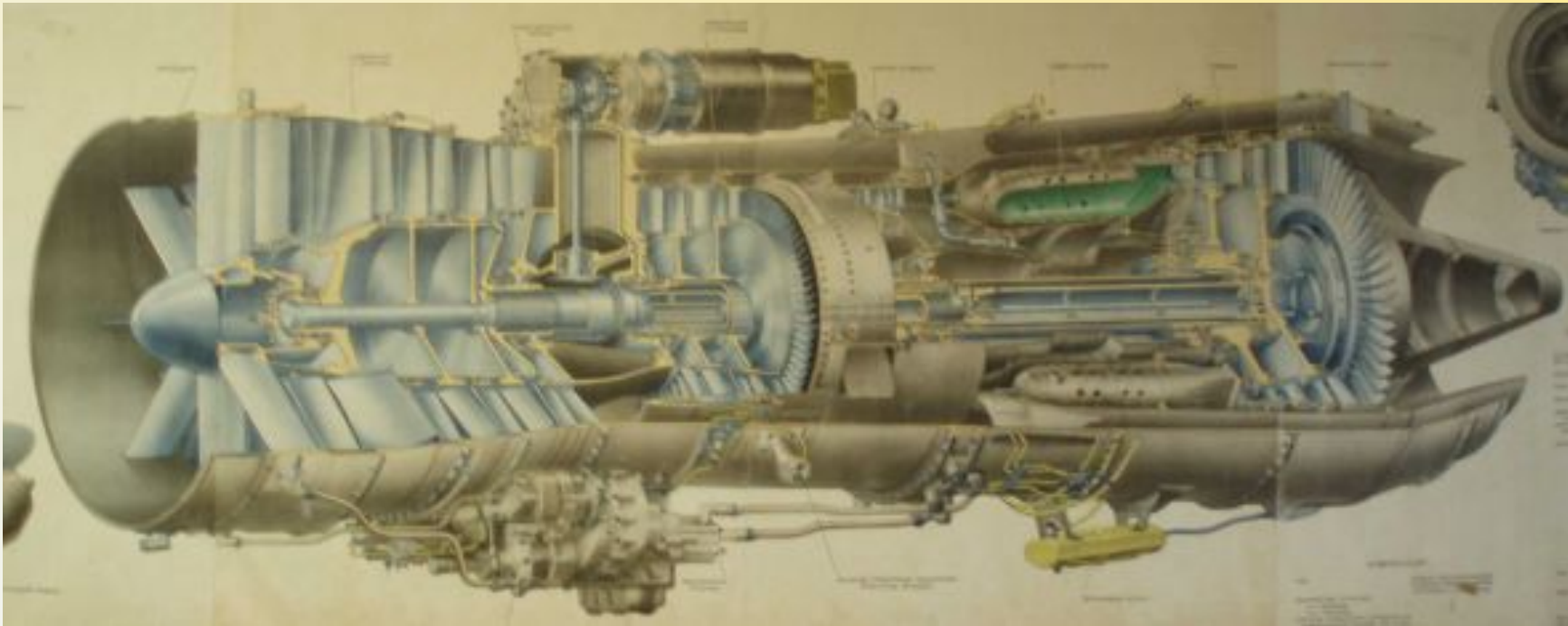
Первые опыты энергетического применения компрессоров. 25-ступенчатый трехкорпусной центробежный компрессор газотурбинной установки с КПД примерно 3%. Франция, 1906 г.

Первые реактивные двигатели боевых самолетов с осевыми компрессорами. Германия, 1944 г.



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

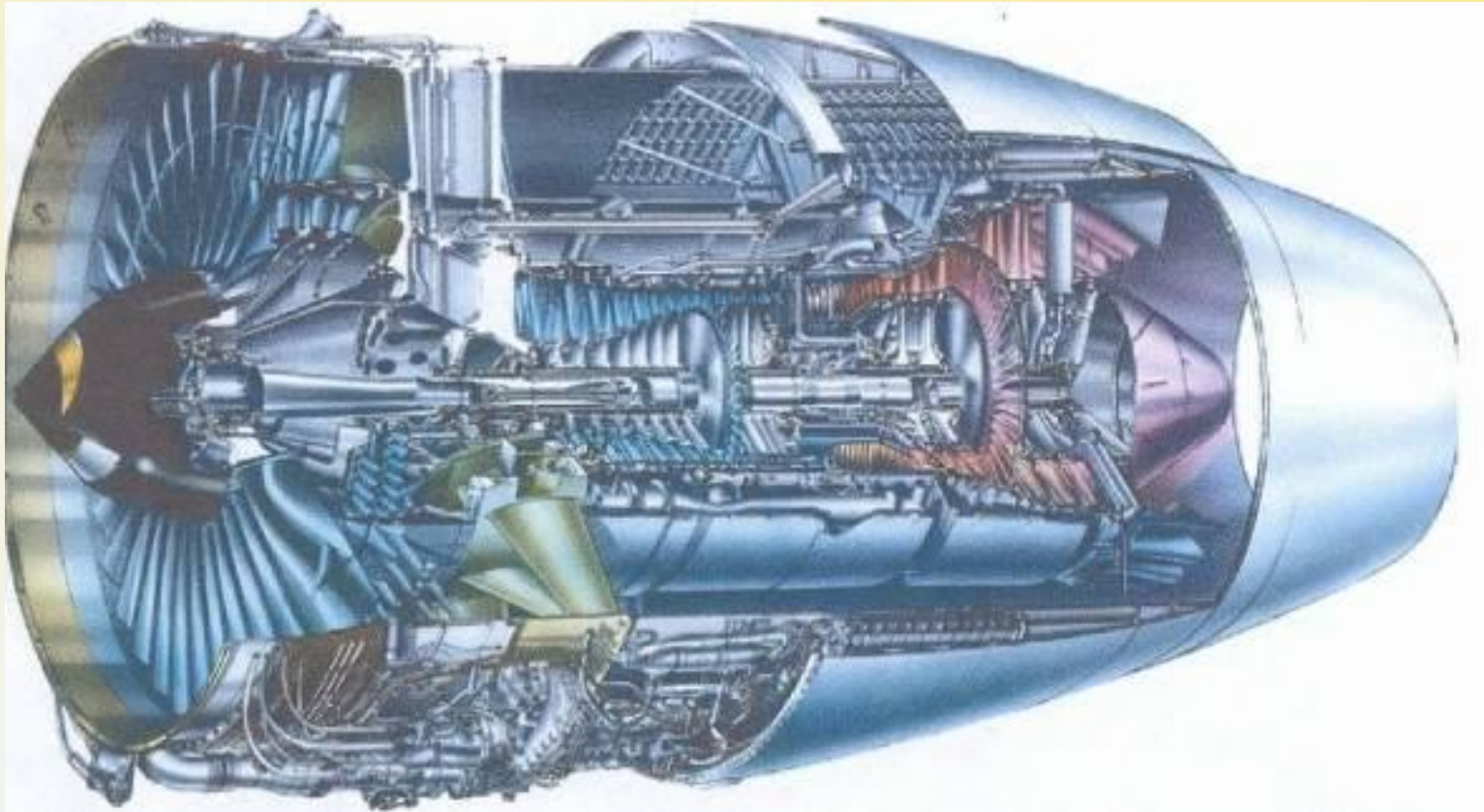
Турбомашины в промышленности и транспорте



Современный двухконтурный турбореактивный двигатель с двухкаскадным (два соосных ротора с разной скоростью вращения) осевым компрессором

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте



Двухконтурный турбореактивный двигатель пассажирского лайнера с турбовентилятором и осевым компрессором

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте



**Ротор современной энергетической газовой турбины
(компрессорная часть на переднем плане, сзади видны три
турбинные ступени)**

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ

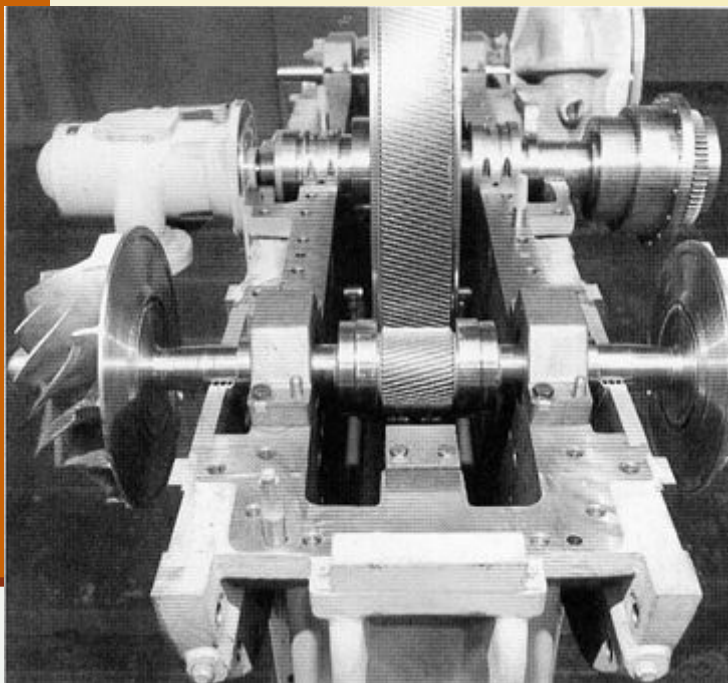


Компрессор Аэроком 43-120/ОМ5,
примененный в международном проекте "Морской старт"

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

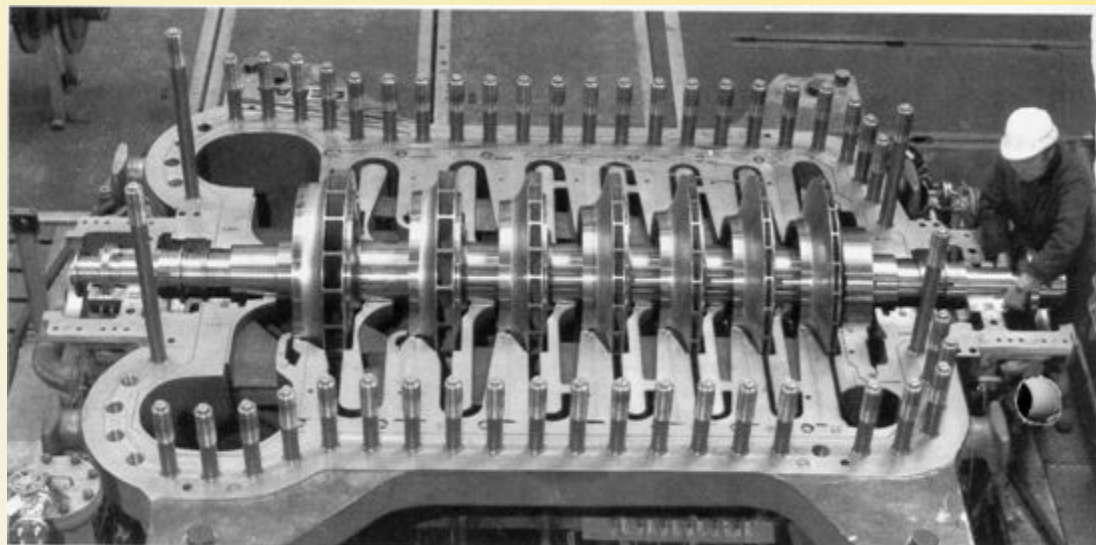
Турбомашины в промышленности и транспорте

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ



Многовальный центробежный компрессор с пространственными рабочими колесами

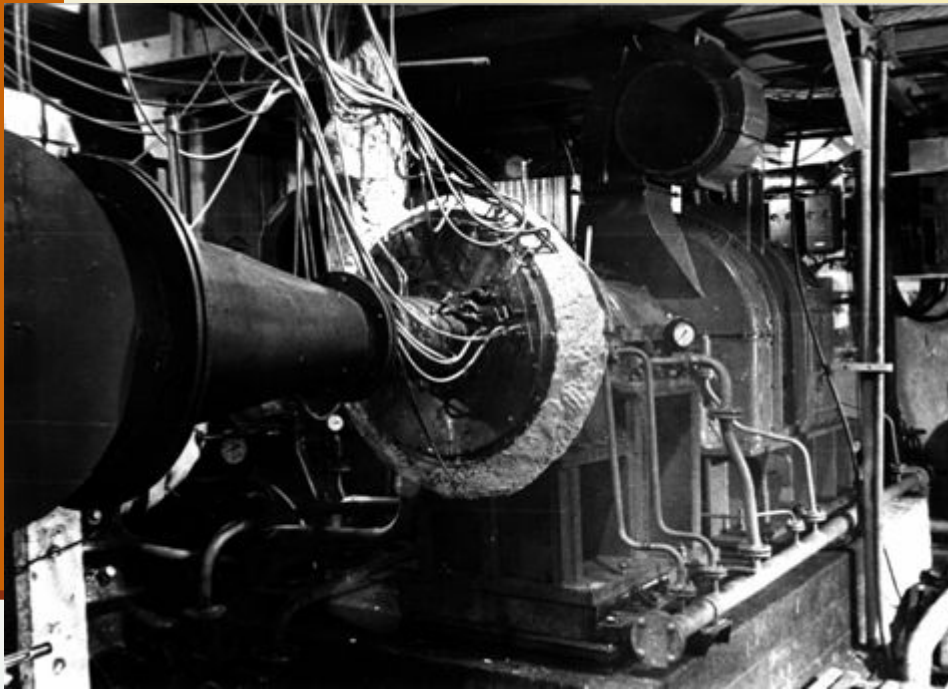
**Многоступенчатый центробежный компрессор среднего давления
(верхняя половина корпуса снята)**



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

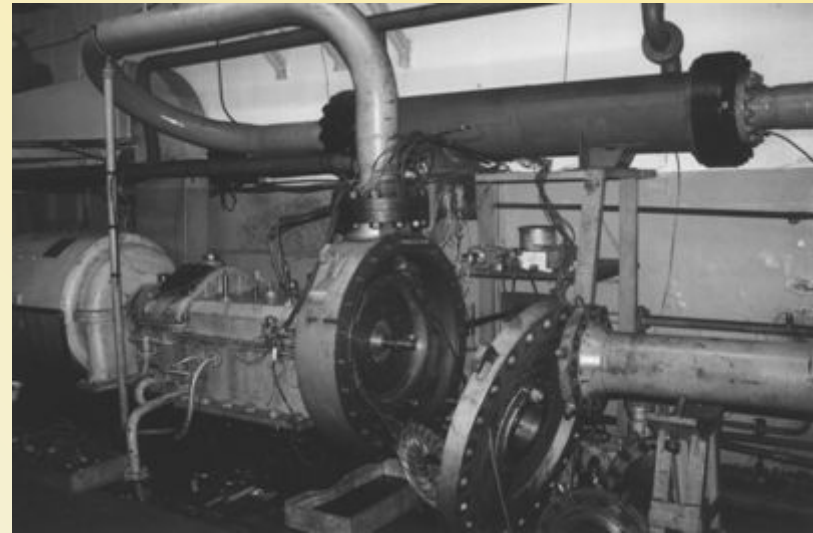
Турбомашины в промышленности и транспорте

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ



Стенд для испытания моделей центробежных компрессоров
(кафедра КВХТ СПбГПУ: мощность до 800 кВт,
регулируемое число оборотов до 18000 об/мин)

Стенд для испытания моделей
центробежных компрессоров
при давлении до 100 ата (кафедра КВХТ
СПбГПУ)



Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ

ОАО «Компрессорный комплекс»



Пятиступенчатый нагнетатель 108-51-1 с конечным давлением 12,3 МПа. (Первый компрессор нового поколения для газовой промышленности. Г/д проект кафедры КВХТ СПбГПУ)

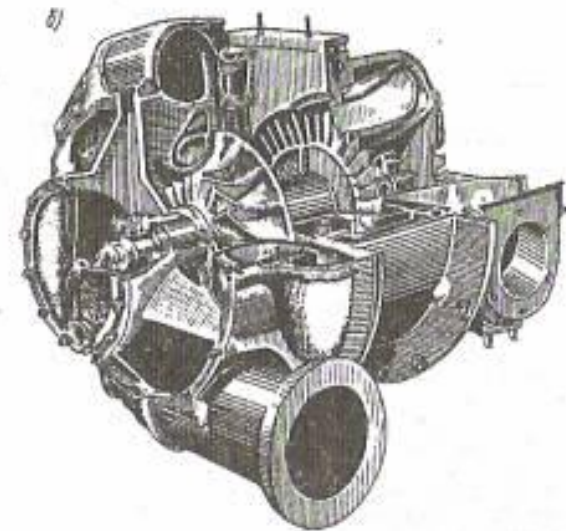
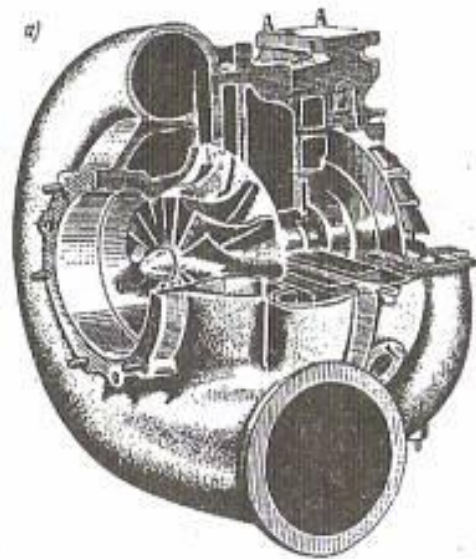
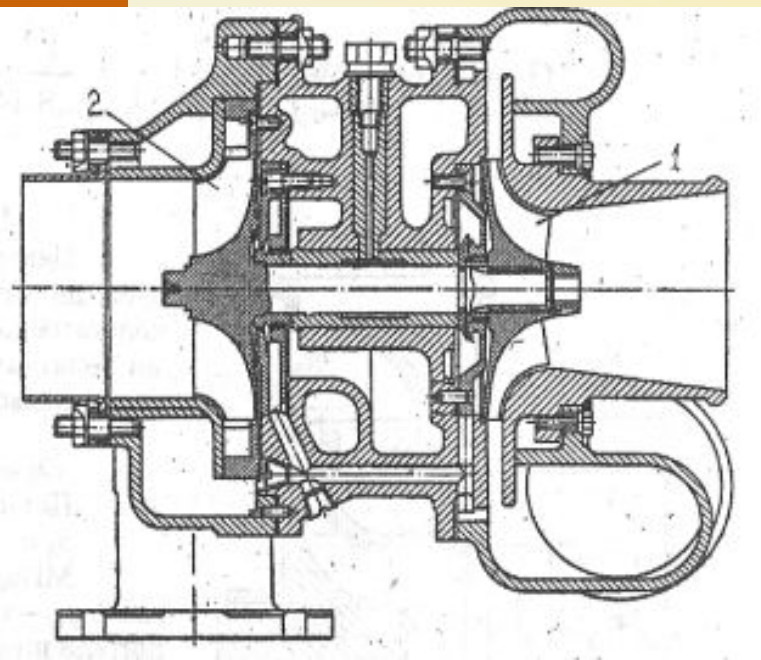


Современный компрессор ГПА с регулируемым электроприводом

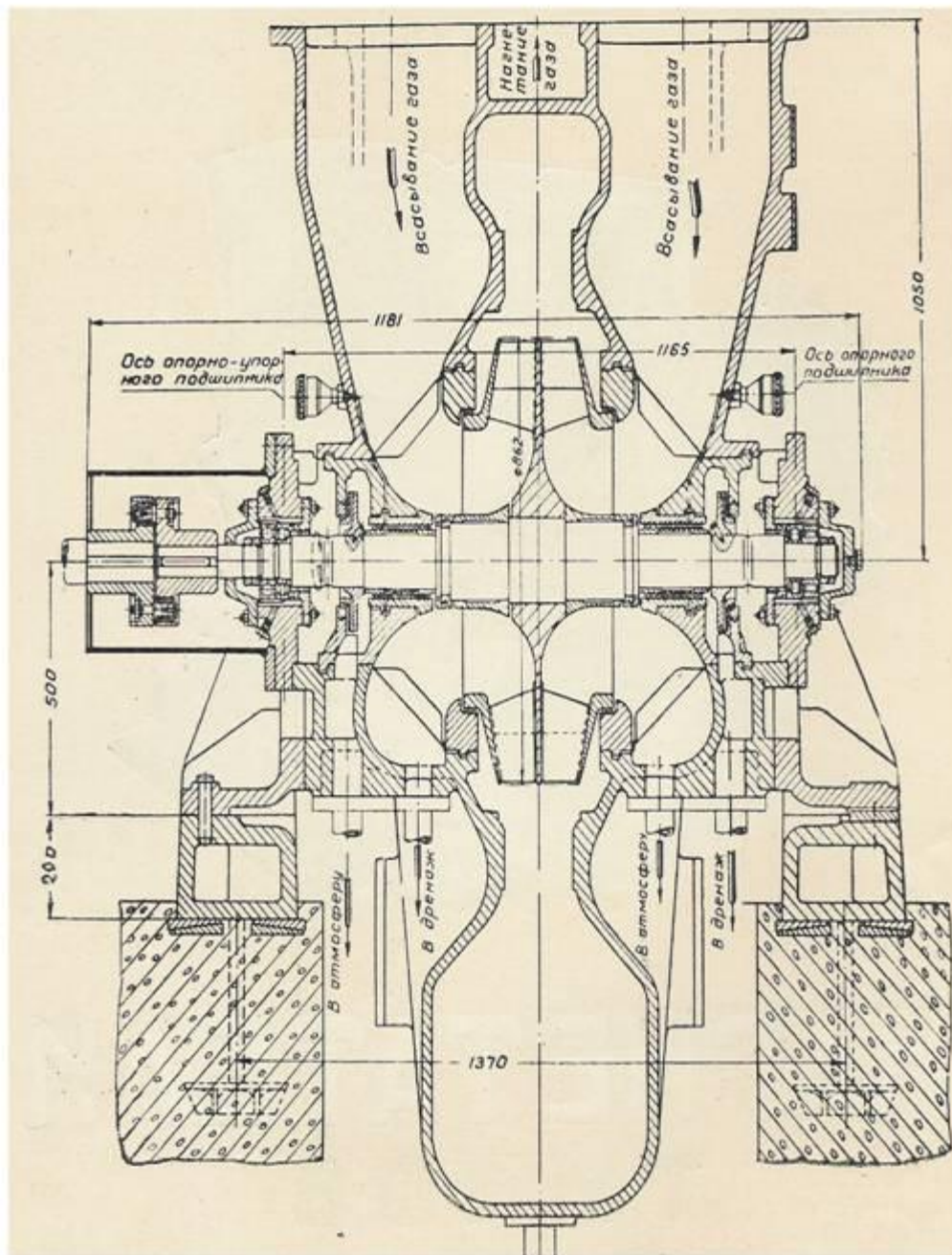
Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ



Агрегат турбонаддува ДВС



Типичный ЦК с небольшим повышением давления. Может применяться как тягодутьевой компрессор (при больших размерах корпус сварной), в производстве цемента и пр.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте

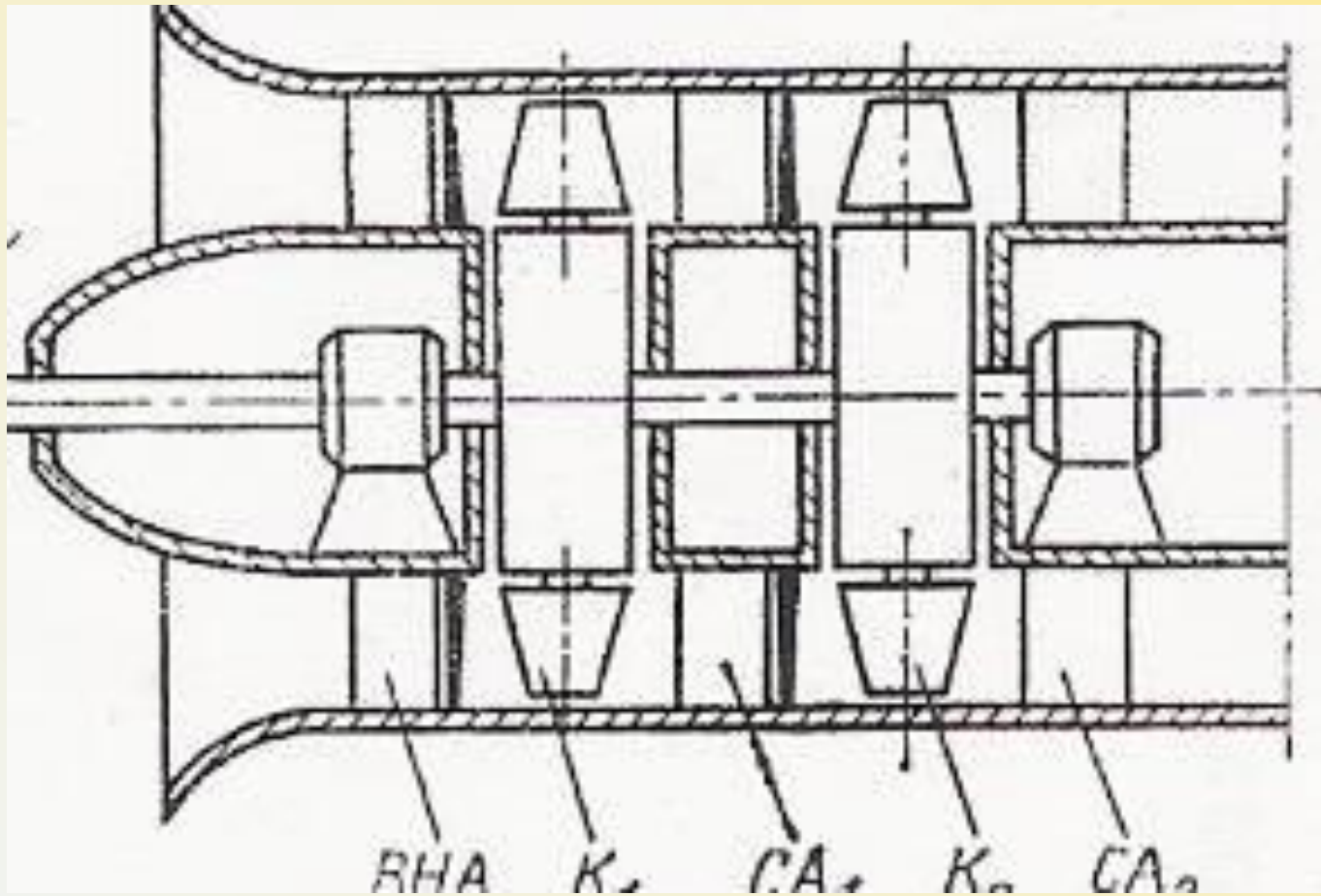
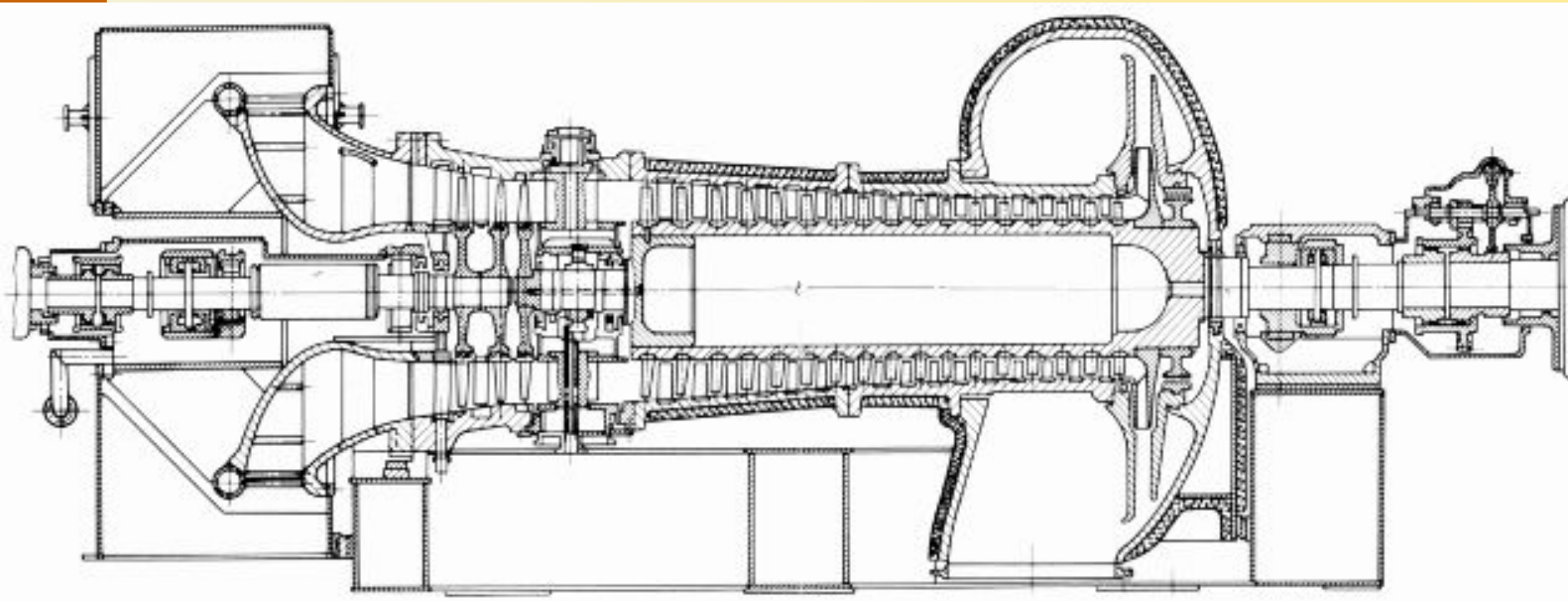


Схема двухступенчатого промышленного осевого вентилятора

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

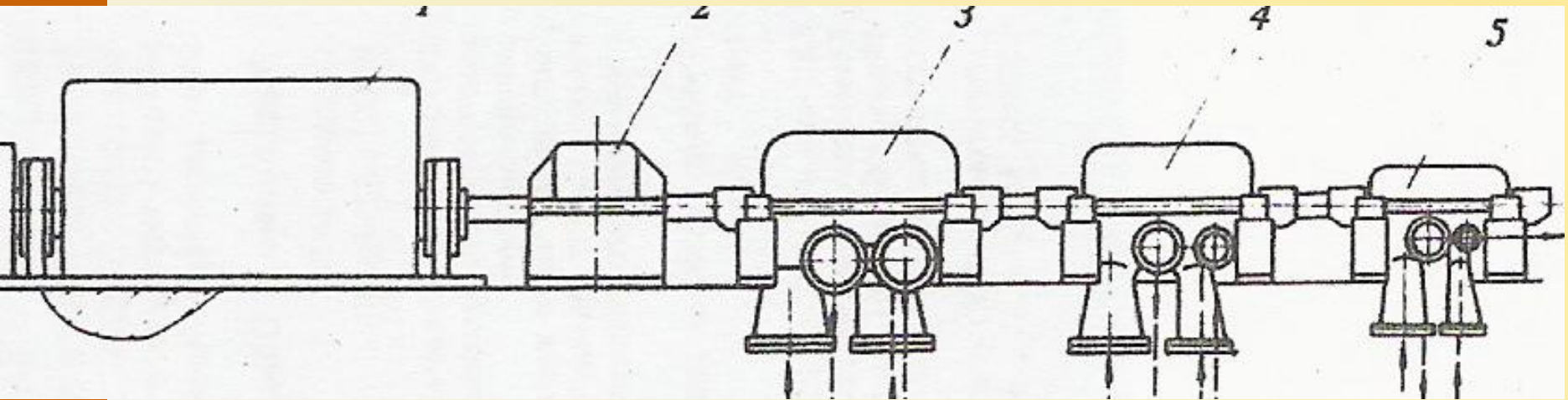
Турбомашины в промышленности и транспорте



Двухкаскадный доменный ОК с встречным вращением валов мощностью 30 мВт (НЗЛ)

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

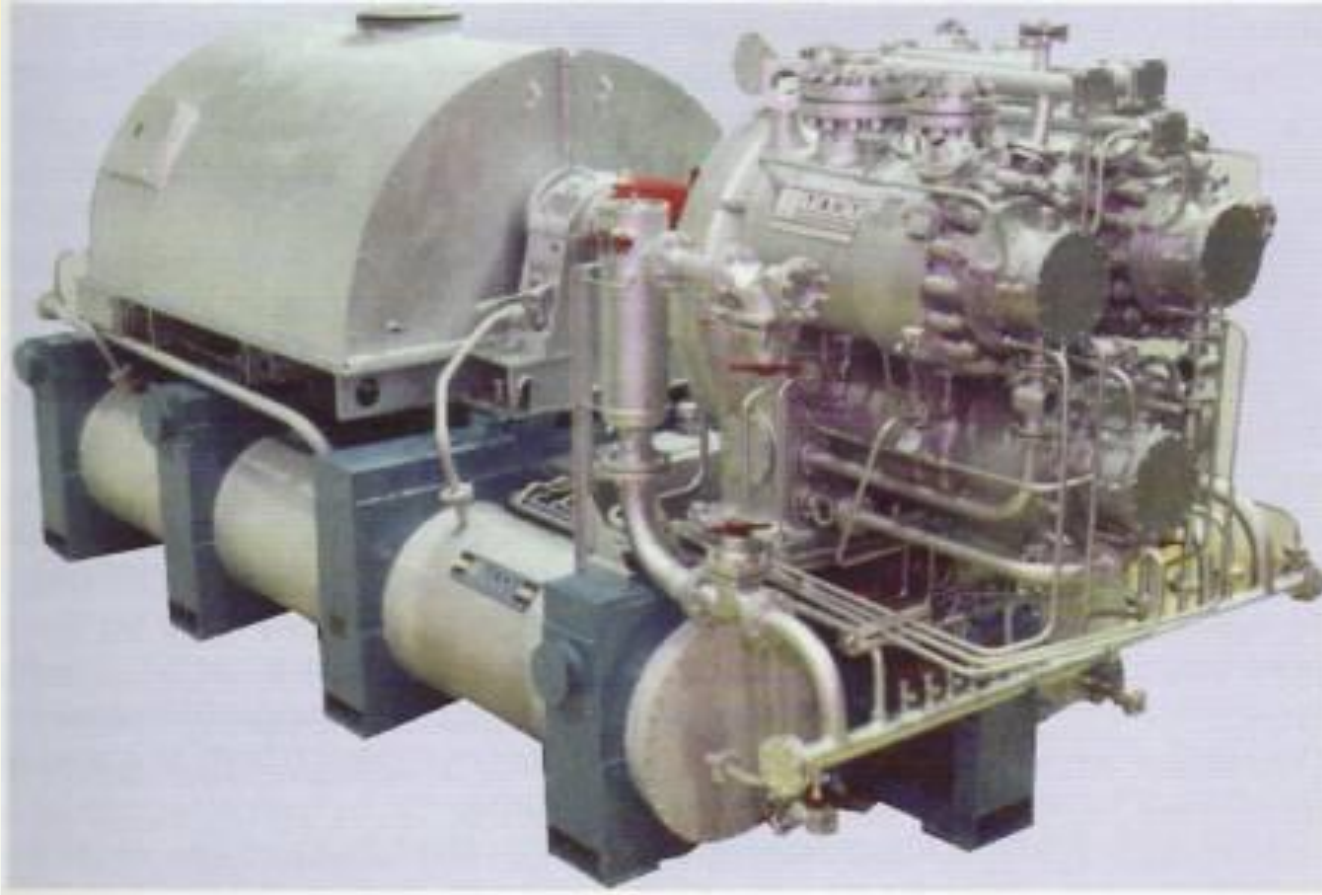
Турбомашины в промышленности и транспорте



Компоновка кислородного центробежного компрессора ЦЦК-500 для производства стали (НИИТК – ККЗ). Производительность 500 м³/мин, конечное давление 4,0 МПа, три корпуса, пять промежуточных охлаждений.

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

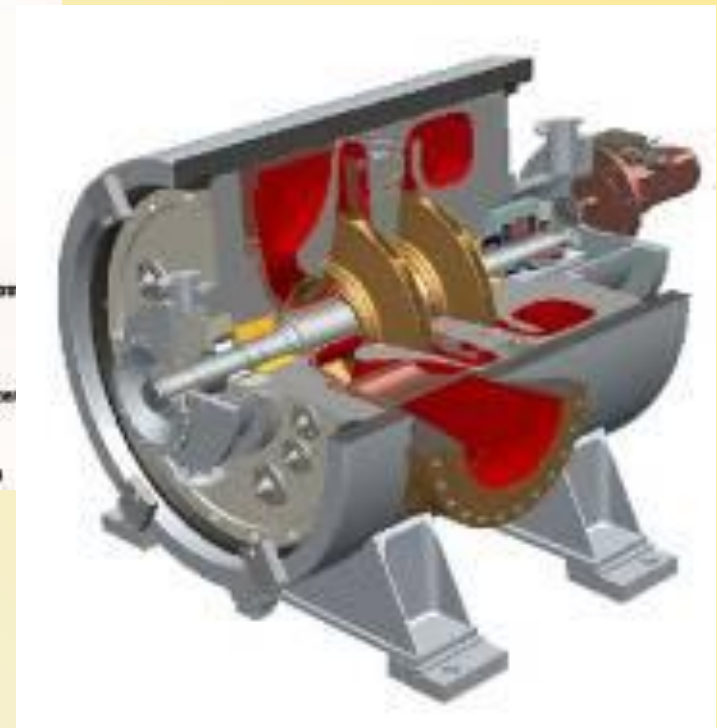
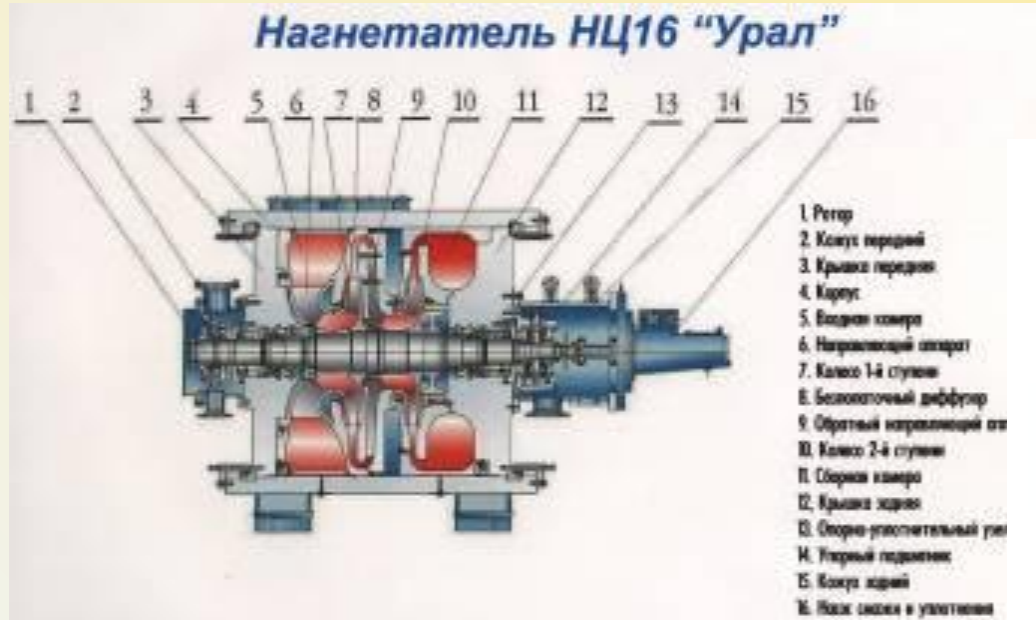
Турбомашины в промышленности и транспорте



Установка с трехвальным многоступенчатым центробежным компрессором для газлифта нефти (НИИТК – ККЗ).

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте



Первый центробежный компрессор НПО «Искра» собственной разработки для ГПА
16 мегаватт (газодинамический проект кафедры КВХТ СПбГПУ)

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

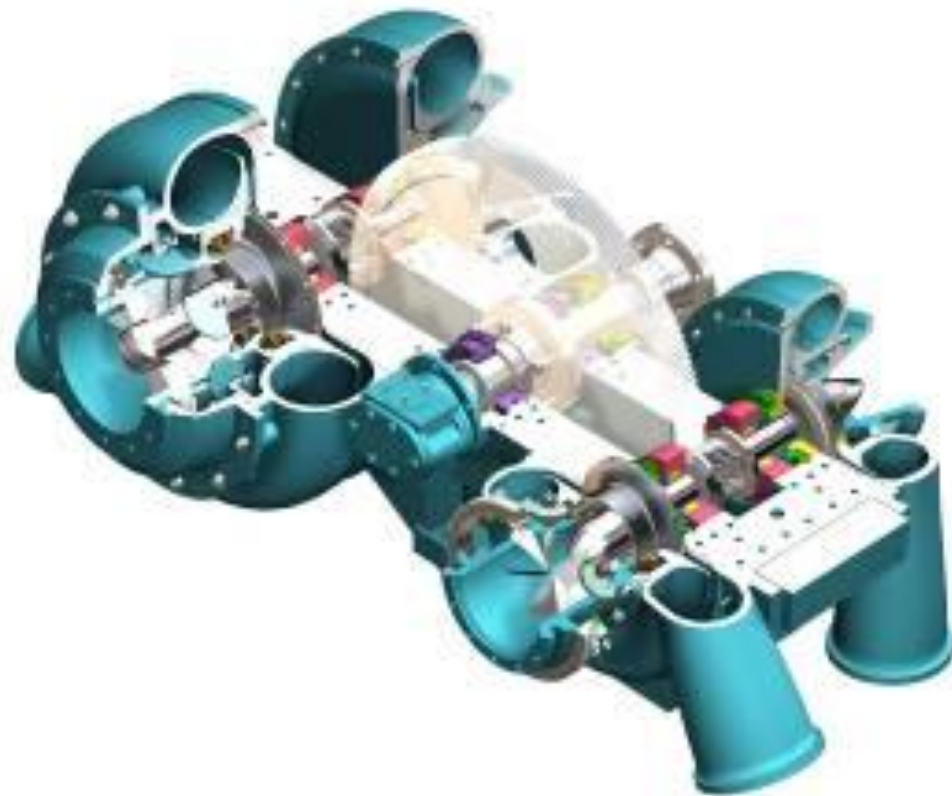
Турбомашины в промышленности и транспорте



**Турбонаддувочный агрегат с осевым компрессором
ОАО «Киров – Энергомаш»
(парогенераторы, антиобледенительные системы и пр.)**

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

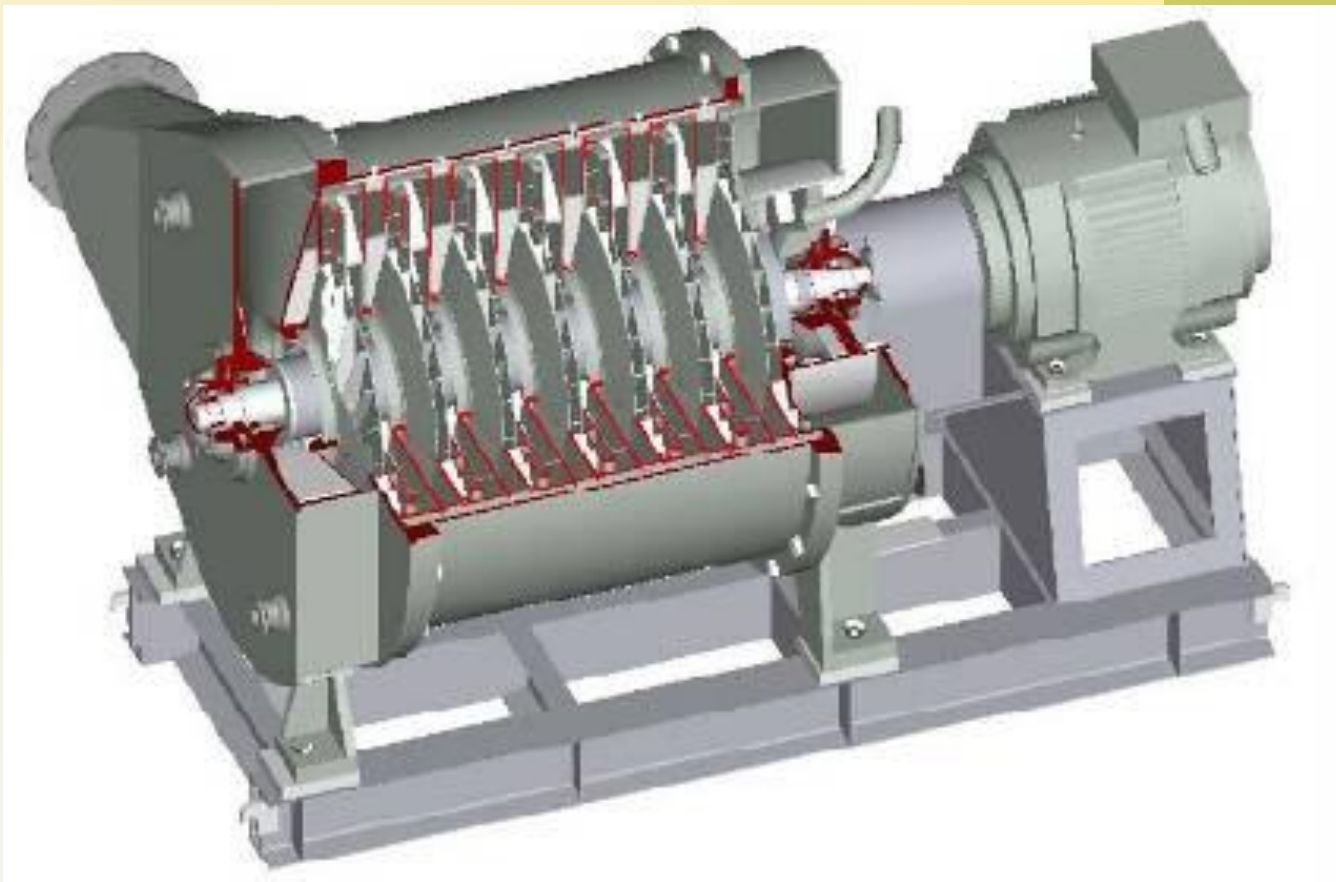
Турбомашины в промышленности и транспорте



Центробежные одновальный и
многовальный компрессоры
ОАО «Дальэнергомаш»

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

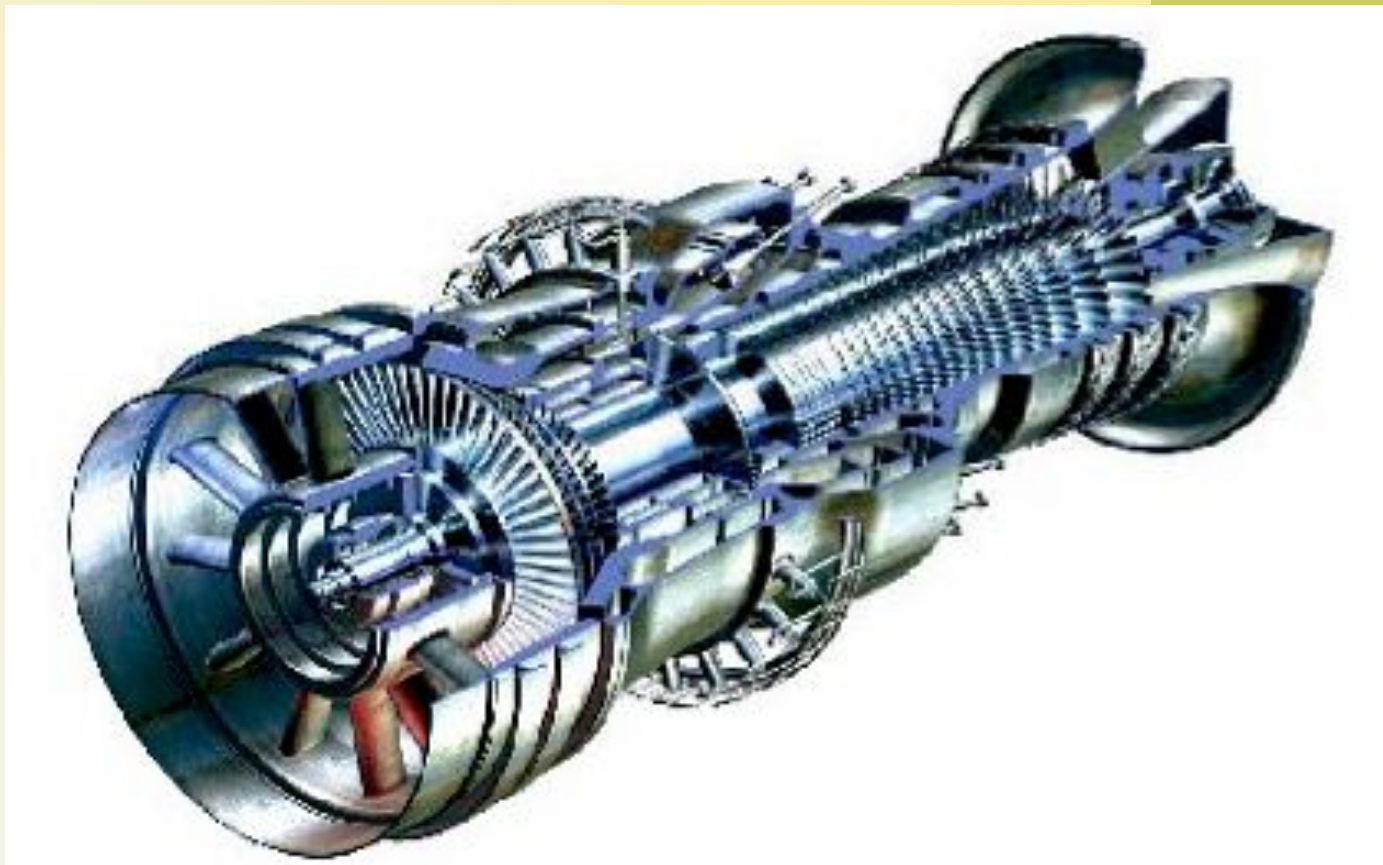
Турбомашины в промышленности и транспорте



**Низкооборотный центробежный компрессор
ЗАО «НПФ Невинтермаш» (г. С. – Петербург)**

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте



**Энергетическая газовая турбина ALSTOM GT24/26
мощностью 281 мВт**

Доц. Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Лекция 1.

Турбомашины в промышленности и транспорте

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ