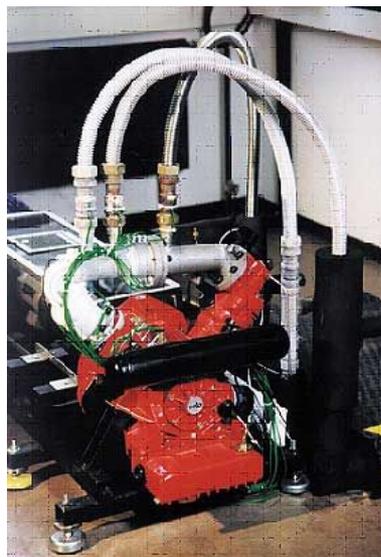


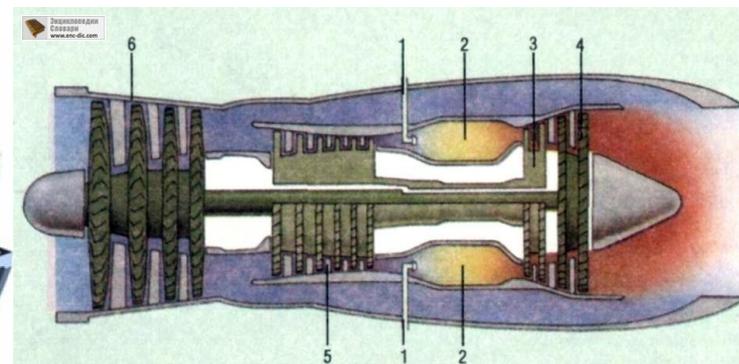
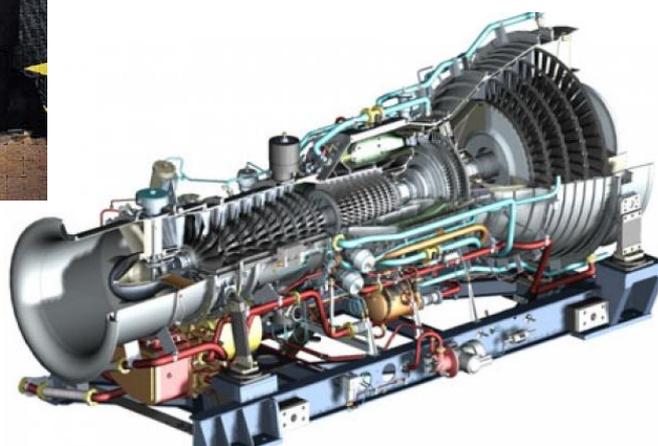


Тема 5. ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ДВИГАТЕЛИ СТИРЛИНГА



Учебные вопросы:

1. Газотурбинные двигатели.
2. Двигатели Стирлинга.



1. ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Общие сведения

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются одной из разновидностей двигателей внутреннего сгорания. Впервые принцип сжигания топлива непосредственно в рабочей полости двигателя был предложен английским инженером Джоном Барбером в 1791 г. Однако уровень развития производства не позволял создать работоспособную конструкцию и только к концу XIX в. Инженеры вновь вернулись к этой идее. В 1892 г. в России П.Д. Кузьминский создал ГТД, в котором процесс сжигания топлива осуществлялся при неизменном давлении.

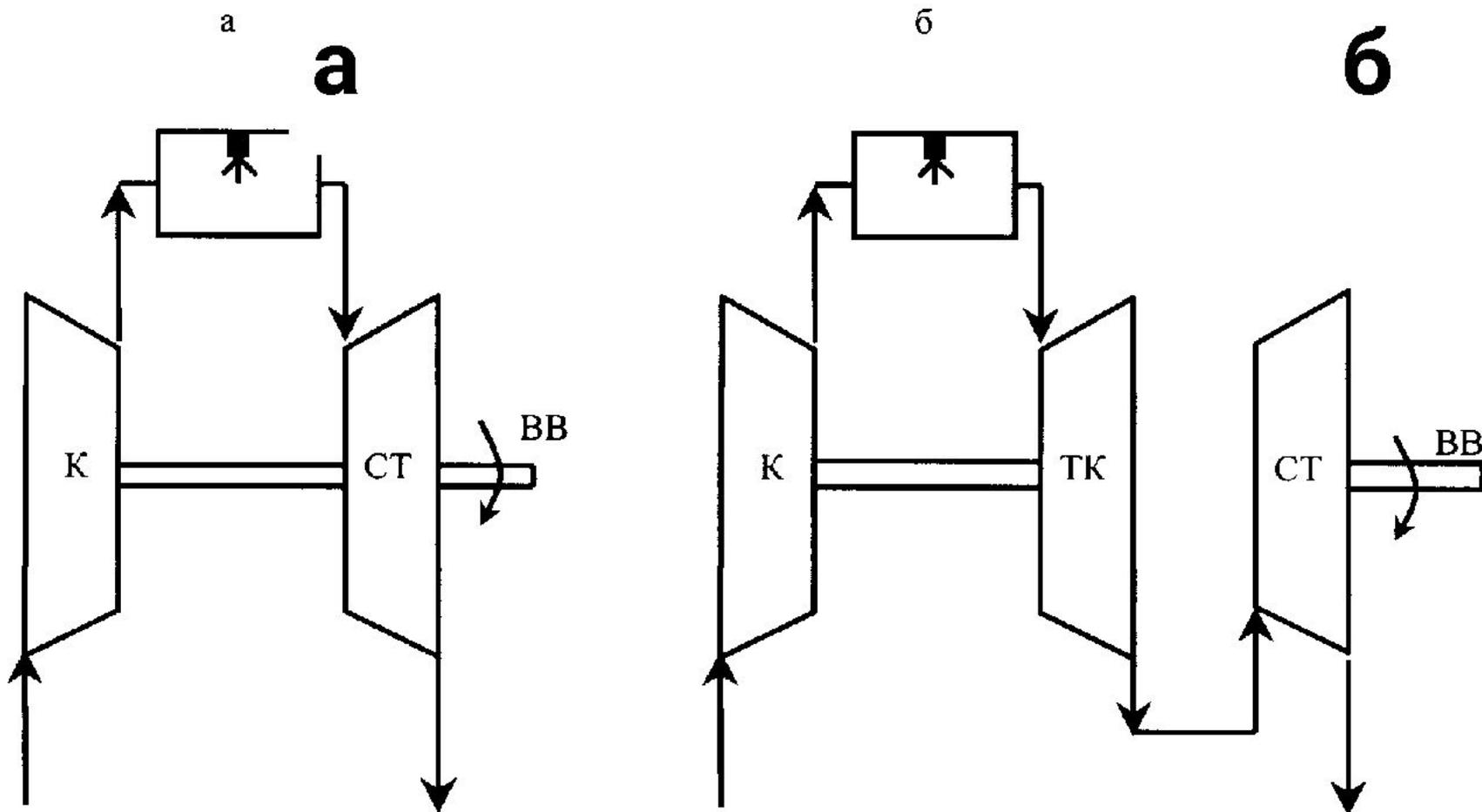
В России же в 1906 г. В.В. Караводин разработал и в 1908 г. реализовал проект ГТД, в котором процесс сжигания топлива происходил при неизменном объеме.

В 40-е гг. XX века развитие авиации потребовало замены поршневых ДВС на новые двигатели. Именно в это время под руководством талантливых конструкторов А.М. Люльки, В.Я. Климова, А.Д. Швецова, А.А. Микулина и ряда других были созданы мощные ГТД, ознаменовавшие новую эру в авиации.

С 50-х гг. начались работы и над автомобильными газотурбинными двигателями (АГТД). Разработки АГТД велись в США на фирмах: «Форд», «Крайслер», «Дженерал-Моторс»; в Англии на фирмах: «Остин», «Центракс и Ровер», «Парсонс»; в Швеции на фирме «Вольво» и др. В нашей стране АГТД занимаются на Горьковском автомобильном, Ярославском моторном заводах, НАМИ, МАМИ и в других организациях.

В последнее время разработка и создание АГТД проводятся в следующих направлениях: двигатели мощностью до 100 кВт - для легковых автомобилей; мощностью до 260-550 кВт - для грузовых автомобилей и большой мощностью - порядка 1100-1700 кВт - для особо тяжелых транспортных машин.

Принципиальные схемы одновального (а) и двухвального (б) ГТД



*К – компрессор; СТ – силовая турбина; ТК – турбина привода компрессора;
ВВ – выходной вал*

Преимущества ГТД перед поршневыми ДВС

1. Простота конструкции, связанная с отсутствием газораспределительного механизма, системы охлаждения и т. п.
2. Отсутствие возвратно-поступательно движущихся частей, что позволяет исключить большие инерционные нагрузки на детали, обеспечить высокую частоту вращения вала двигателя и его полную уравновешенность.
3. Высокая частота вращения вала газовой турбины, что позволяет существенно снизить массу и уменьшить габариты ГТД (отечественные двигатели транспортного типа ГТД-350Т и последние модификации ГТД НАМИ по габаритным показателям превосходят дизели на 27-45 %, по массовым показателям - в два-три раза).
4. Возможность использования любого жидкого и газообразного топлива (многотопливность).
5. Легкий пуск при низкой температуре окружающего воздуха.
6. Низкая токсичность отработавших газов, связанная в первую очередь с более полным сгоранием.
7. Значительно меньший расход масла (нет угара масла, так как оно не попадает в зоны с высокой температурой).
8. Простота технического обслуживания (не нужно производить регулировки газораспределительного механизма, системы питания).
9. Высокая ремонтпригодность, обусловленную отсутствием таких сложных операций ремонта, как шлифовка коленчатых валов, расточка и шлифовка гильз цилиндров и т. п.

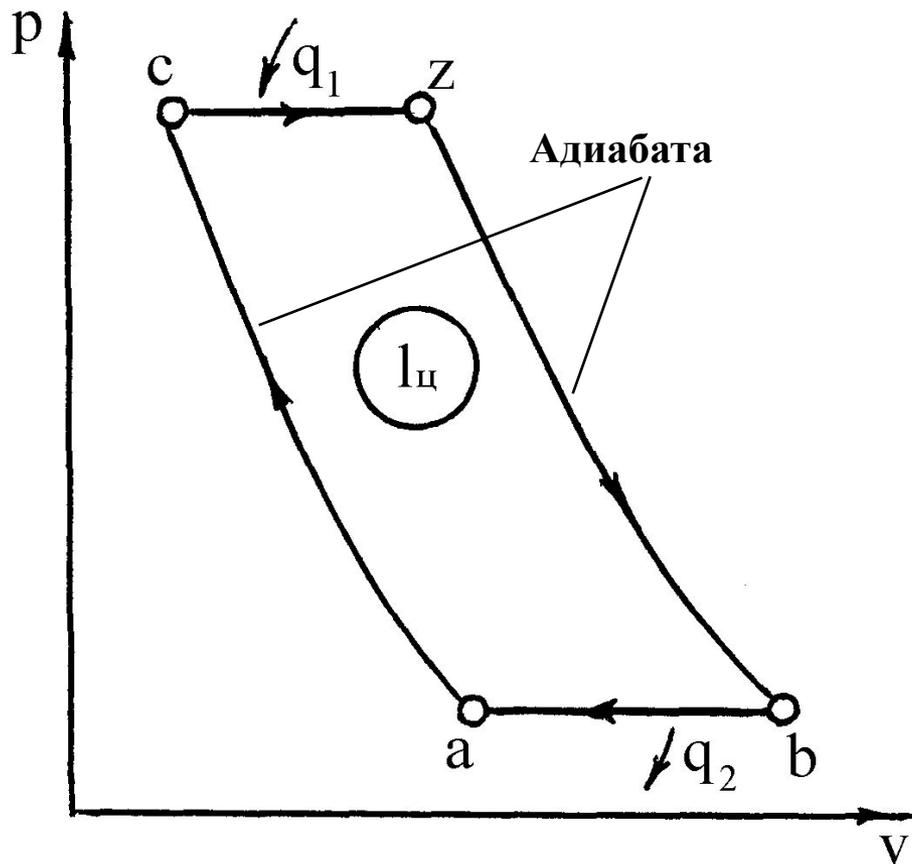
*Недостатки ГТД
в сравнении с
поршневыми ДВС*

1. Относительно низкая экономичность (эффективный КПД серийно выпускаемых ГТД составляет 0,25-0,32, а поршневых ДВС - 0,28-0,46), обусловленная сравнительно низкими максимальными температурами рабочего тела, ограничение которых связано с требуемой надежностью работы лопаток газовой турбины.

2. Трудность очистки воздуха в связи с большим его расходом.

3. Высокая стоимость материалов, используемых для изготовления деталей камеры сгорания и рабочих лопаток газовой турбины.

Термодинамический цикл ГТД
с непрерывным сгоранием топлива
(цикл с подводом теплоты при неизменном давлении)



Параметры цикла:

Степень повышения давления в компрессоре

$$\beta = \frac{p_c}{p_a}$$

Степень предварительного расширения

$$\rho = \frac{v_z}{v_c}$$

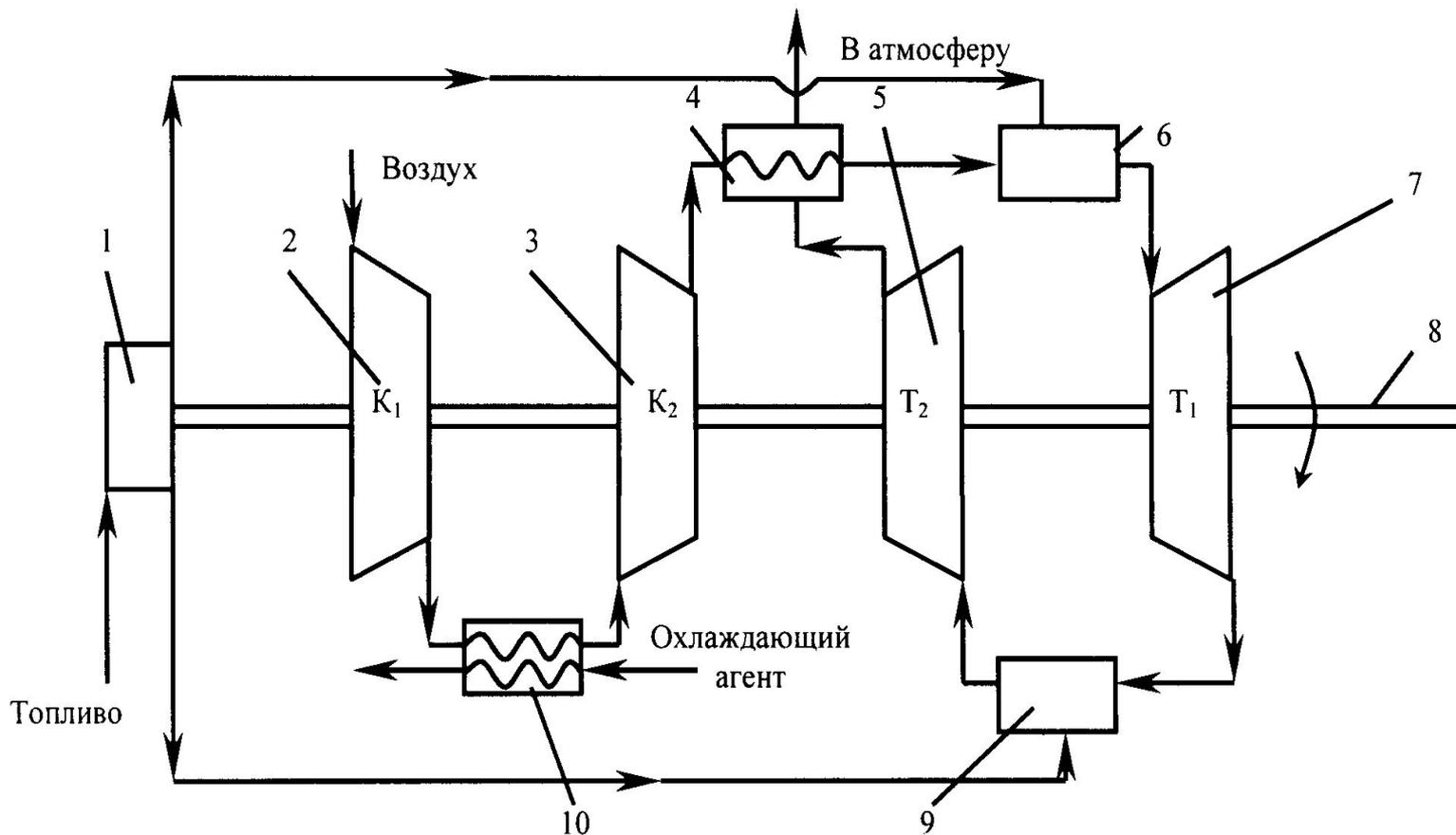
Термический КПД

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k}{k-1}}}$$

Работа цикла

$$\boxed{\Delta l_{ц}} = \frac{R_0 k}{k-1} T_a \beta^{\frac{k-1}{k}} (\rho - 1) \left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k}{k-1}}}\right)$$

Схема ГТД с двухступенчатым сжатием, двухступенчатым сгоранием, регенеративным подогревом и промежуточным охлаждением сжимаемого воздуха



K₁ – компрессор первой ступени; K₂ – компрессор второй ступени; T₁ – силовая турбина первой ступени; T₂ – силовая турбина второй ступени; 1 – топливный насос; 4 – теплообменник-нагреватель; 6 – камера сгорания первой ступени; выходной вал; 9 – камера сгорания второй ступени; 10 – теплообменник-охладитель ВВ – выходной вал

2. ДВИГАТЕЛИ СТИРЛИНГА

Двигатель Стирлинга - это тепловой двигатель с внешним подводом теплоты и с внешним её отводом от газообразного рабочего тела, работающий по замкнутому циклу

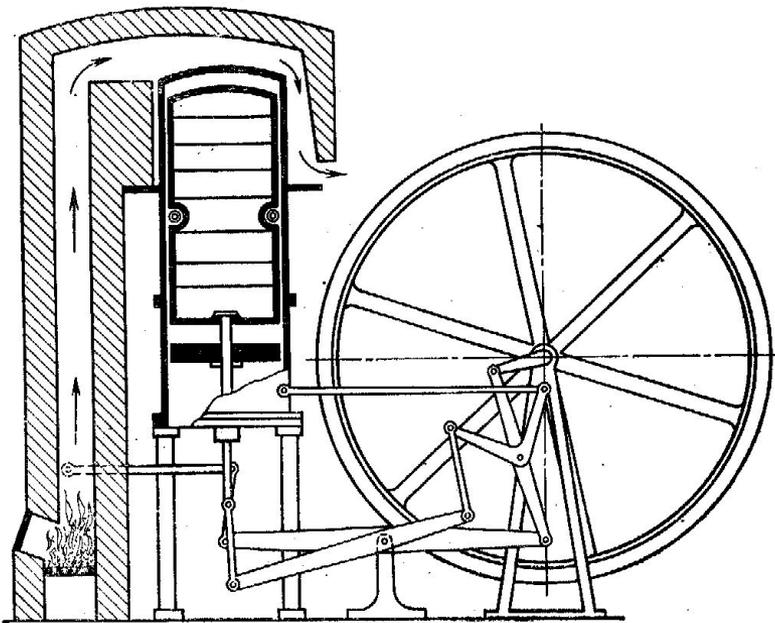
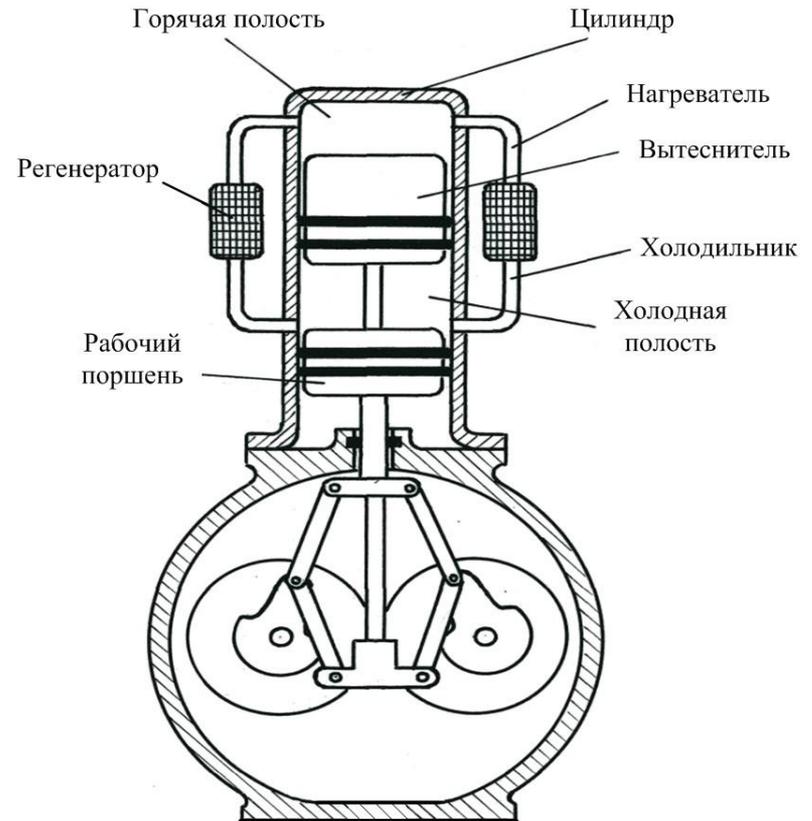
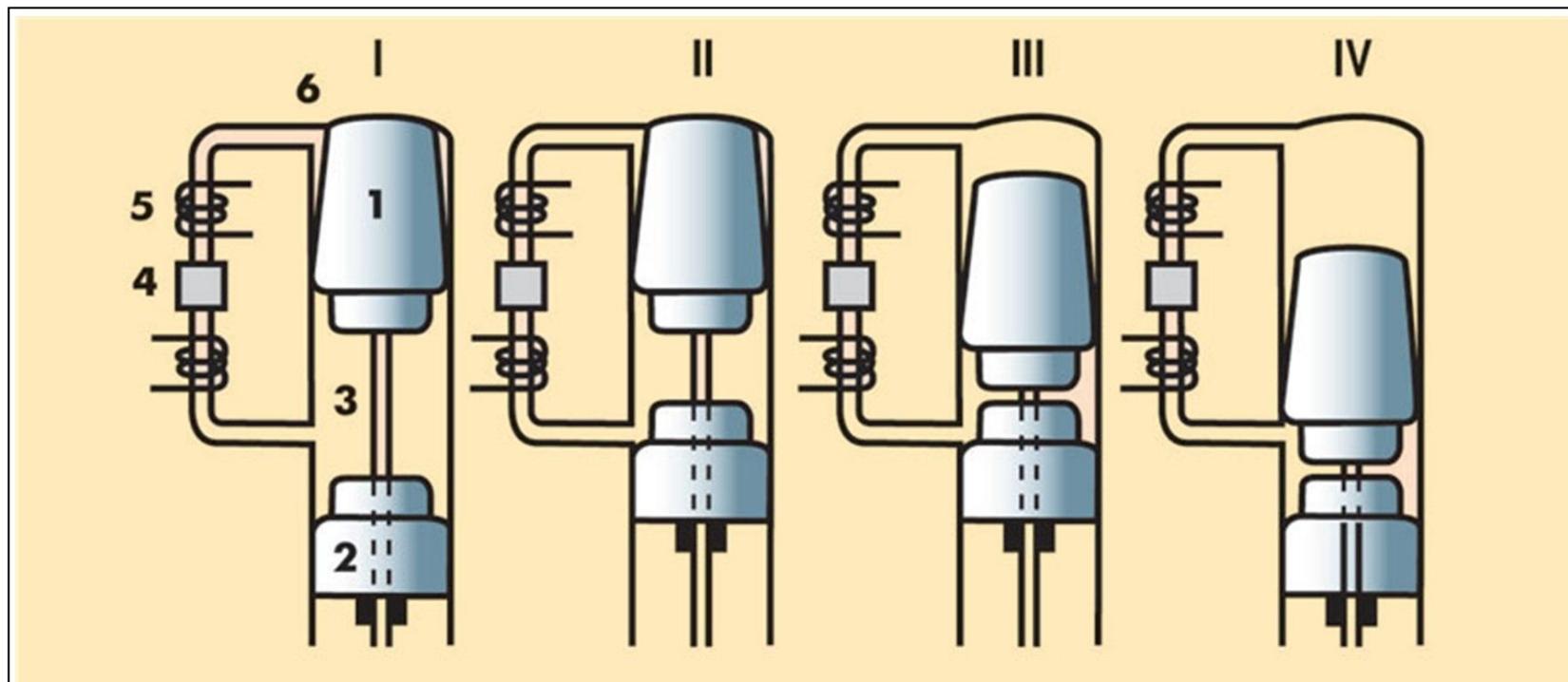


Схема первого двигателя Стирлинга (1818 г.)



Принципиальная схема двигателя Стирлинга

Принцип действия двигателей Стирлинга



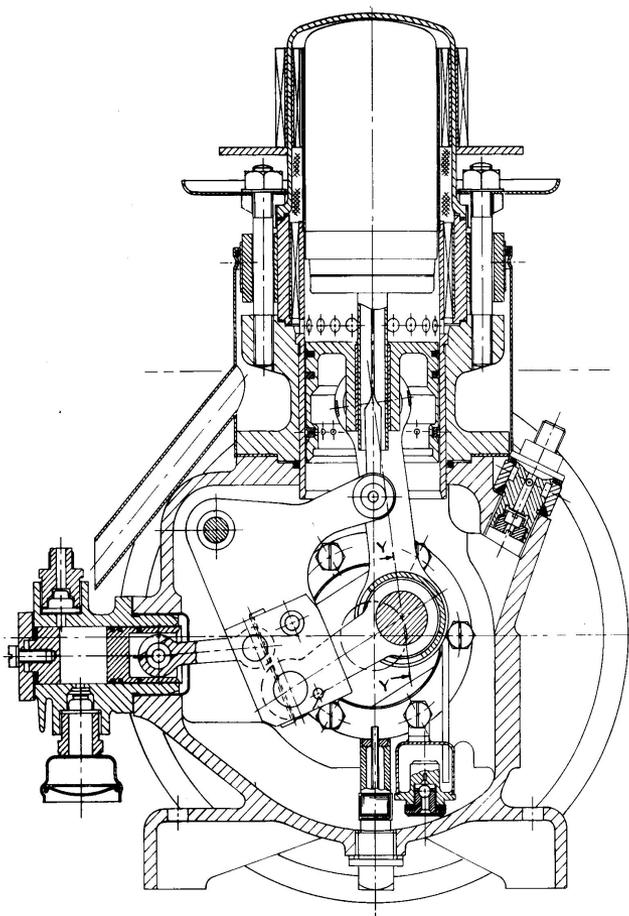
I - Поршень находится в крайнем нижнем положении, а вытеснитель - в крайнем верхнем. Весь газ - в холодной полости;

II - Вытеснитель остается в верхнем положении. Поршень сжимает газ при низкой температуре;

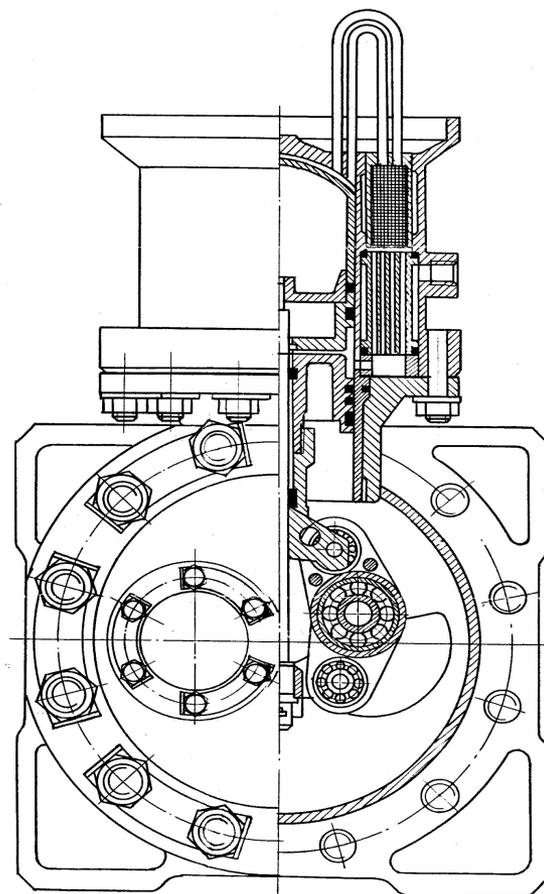
III - Поршень остается в крайнем верхнем положении. Вытеснитель переталкивает газ из холодной полости в горячую;

IV - Нагретый газ расширился. Поршень и вытеснитель находятся в своих крайних нижних положениях. В то время как поршень остается на месте, вытеснитель переталкивает газ в холодную полость. Потом цикл повторяется.

Двигатели Стирлинга XX века

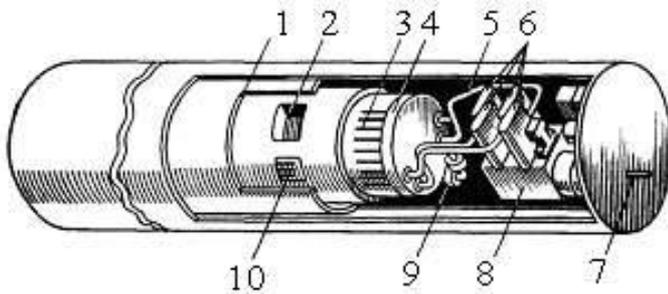


Двигатель Стирлинга фирмы
«Филипс» (1946 г.)



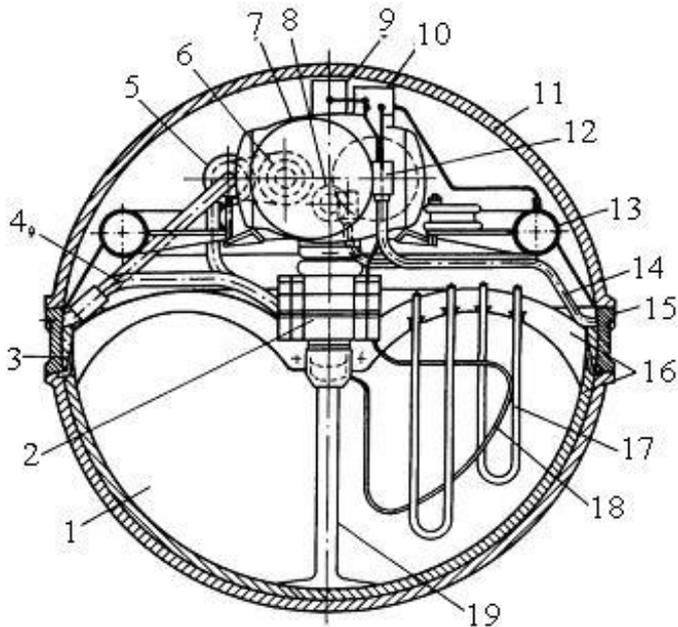
Двигатель Стирлинга ФТИ УзАН, ЧФНАТИ,
ЧВВАИУ (восемидесятые годы)

Современные двигатели Стирлинга



Энергетическая установка с двигателем Стирлинга, тепловым аккумулятором и тепловой трубой:

1 - тепловая изоляция; 2 - двигатель Стирлинга; 3 – промежуточный теплообменник; 4 - первичные тепловые трубы; 5 - вторичные тепловые трубы; 6 - нагреватели двигателя Стирлинга; 7 - выходной вал; 8 - стартер; 9 - двигатель Стирлинга; 10 - индуктор



Энергетическая установка с двигателем Стирлинга и тепловым аккумулятором:

1 - теплоаккумулирующий материал; 2 - двигатель Стирлинга; 3 - опора; 4 - водяной трубопровод; 5 - водяной насос; 6 - коленчатый вал (левый); 7 – электрический генератор; 8 - стартер; 9 - гелиевый компрессор; 10 - регулятор; 11 - корпус; 12 - коленчатый вал (правый); 13 – гелиевый бак; 14 - кабель; 15- скрепляющее кольцо; 16 - вакуумная изоляция; 17 - нагревательный элемент; 18 - трубка нагревателя двигателя Стирлинга; 19 - опора

мощности 5-

Достоинства двигателей Стирлинга

т 26-43 %, а в диапазоне мощностей до 0,2 кВт - 8-14 %.

Ведутся работы над двигателями с КПД в 50 %.

~~Надежный пуск двигателя при низкой температуре окружающей среды.~~ Надежность пуска зависит только от включения камеры сгорания, т. е. воспламенения в ней топлива. Свеча зажигания гарантирует это практически при любых параметрах окружающей среды.

~~Нечувствительность к запыленности окружающего воздуха.~~ Так как двигатель Стирлинга - это машина с внешним подводом теплоты, то пыль, попадающая с воздухом в камеру сгорания из окружающего пространства, не поступает в цилиндры и картер (в двигателях Стирлинга вентиляция картера не требуется). Поэтому исключается абразивный износ движущихся деталей. Вследствие малых скоростей движения воздуха и продуктов сгорания в камере сгорания и других узлах системы нагрева их эрозия весьма незначительна.

~~Низкий уровень шума.~~ Двигатели Стирлинга характеризуются низким уровнем шума. Причиной этого является отсутствие периодических вспышек рабочей смеси в двигателе и шума, связанного в поршневых ДВС с выпуском отработавших газов, так как в случае использования в двигателе Стирлинга органических топлив их сжигание производится практически при атмосферном давлении. Отсутствуют периодически работающие впускные и выпускные клапаны.

~~Отсутствие расхода смазочного масла.~~ В поршневых ДВС попадание масла в цилиндр, с одной стороны, ведет к выгоранию масла, а с другой - к его старению, вследствие соприкосновения с горячими газами и деталями двигателя. В современных двигателях Стирлинга масло практически не может попасть в рабочие полости и, кроме того, оно нигде не соприкасается ни с горячими газами, ни с

теплоту получают в результате сгорания топлива. Горение его, как отмечалось выше, происходит непрерывно в камере с горячими стенками при постоянной температуре и низком, близком к атмосферному, давлении. Нет проблем с обеспечением рациональной величины коэффициента избытка воздуха. При таких условиях обеспечивается практически полное сгорание углеводородного топлива лишь с незначительным содержанием оксидов углерода в отработавших газах. С выходом оксидов азота в двигателях Стирлинга успешно борются введением в камеру сгорания дополнительного количества воздуха, который понижает температуру и скорость реакции взаимодействия кислорода и азота.

~~*Допустимость значительных кратковременных перегрузок.*~~ Ресурс двигателя Стирлинга определяется скоростью наступления предела ползучести материала нагревателя, работающего при высокой температуре. С повышением давления во внутреннем контуре двигателя скорость наступления предела ползучести возрастает. Тем не менее кратковременные перегрузки не сильно влияют на ресурс Стирлинга, поскольку температура нагревателя остается неизменной. Поэтому, как

показывает опыт, двигатель Стирлинга может гарантированно выдерживать

двигателе Стирлинга рабочее тело всегда находится во внутреннем контуре, отвод теплоты от него практически полностью осуществляется через систему охлаждения

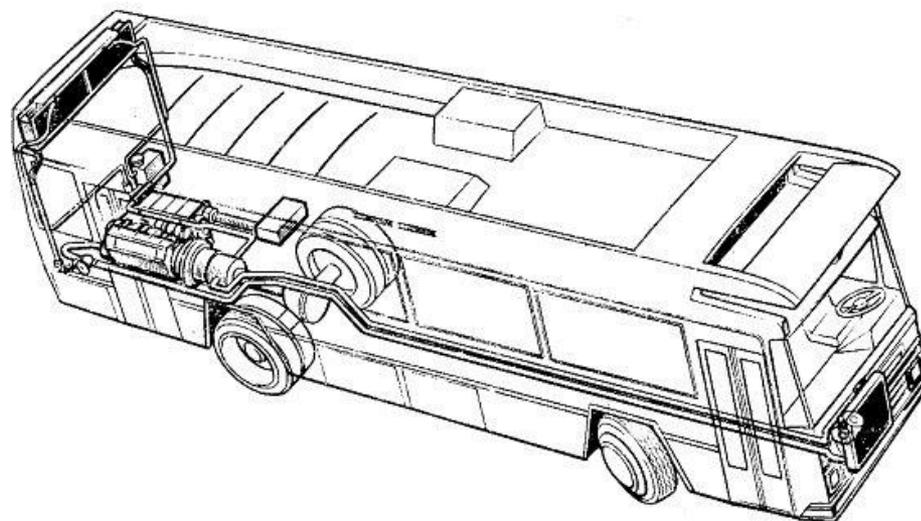
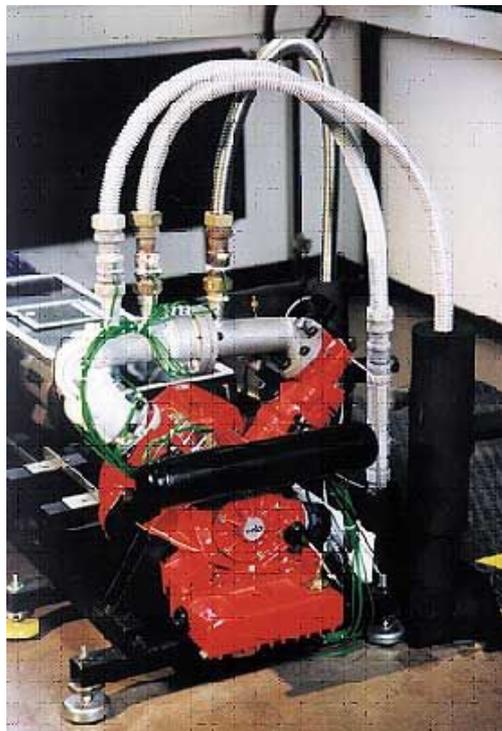
(около 50 % подведенной теплоты). Только около 9 % подведенной теплоты отводится с отработавшими газами.

Поэтому при одинаковых эффективных КПД с ДВС теплоотвод в систему охлаждения у двигателей Стирлинга в 2-2,5 раза больше. Соответственно и размеры радиатора должны быть больше. Так, при установке двигателя Стирлинга на автобусе потребовался радиатор с поверхностью охлаждения $0,67 \text{ м}^2$ вместо $0,42 \text{ м}^2$ при использовании дизеля.

~~—Трудность форсирования по частоте вращения вала.~~ Вследствие специфики рабочего процесса двигателя Стирлинга (перетекания газа попеременно из горячей полости в холод-ную и обратно; внешнего теплоотвода и теплоотвода через стенку) с увеличением быстро-ходности его мощностные показатели ухудшаются, так как возрастают гидравлические по-тери, сокращается время теплообмена и соответственно уменьшается количество теплоты, преобразующейся в работу. Максимальная частота вращения вала в двигателях Стирлинга составляет 5000 мин^{-1} .

~~—Высокая стоимость изготовления.~~ Вследствие относительной сложности конструкции и необходимости применения дорогостоящих материалов стоимость

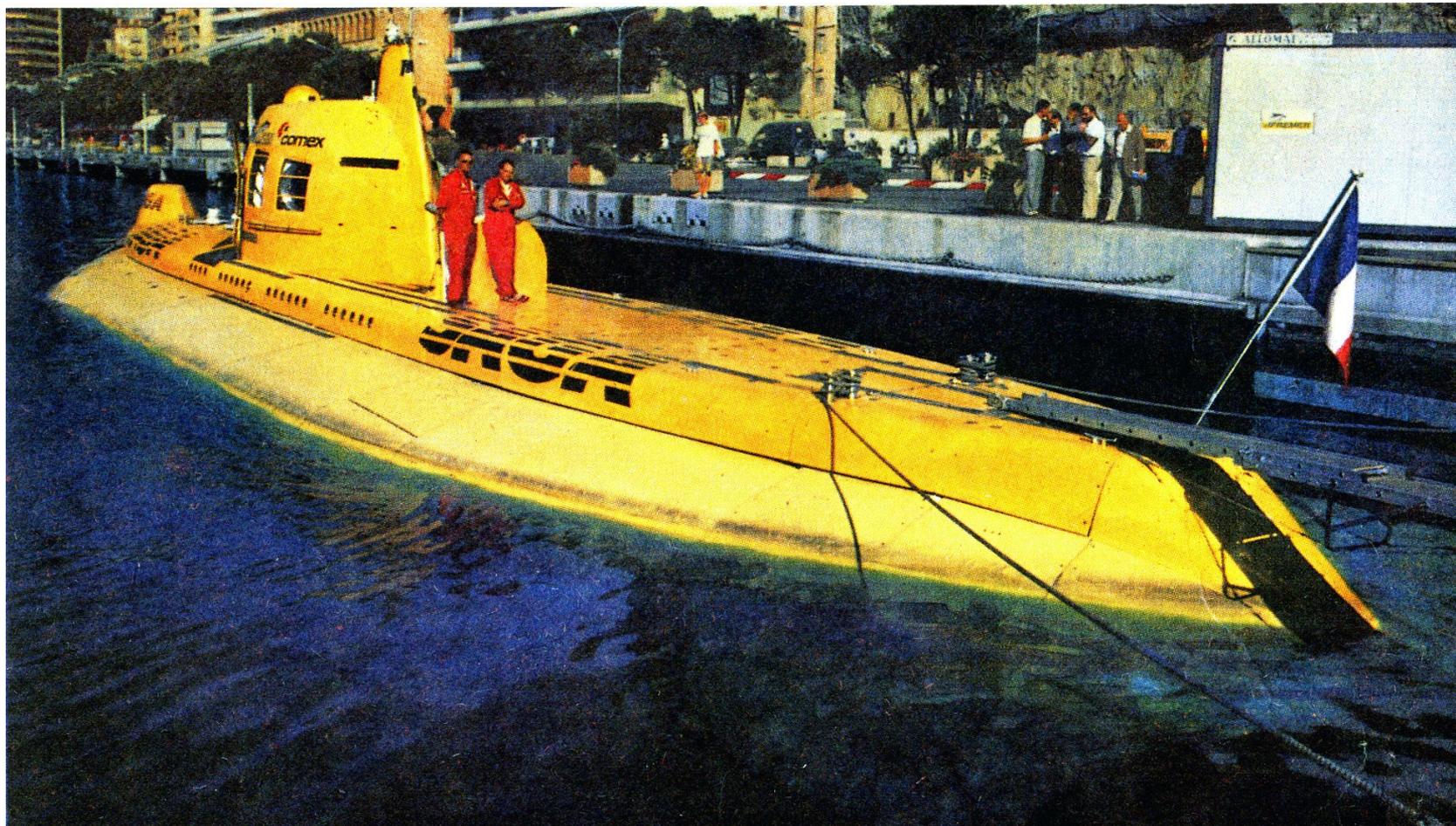
Современные двигатели Стирлинга



Двигатель P-75
шведской фирмы
«Юнайтед Стирлинг»
(мощность 75 кВт)

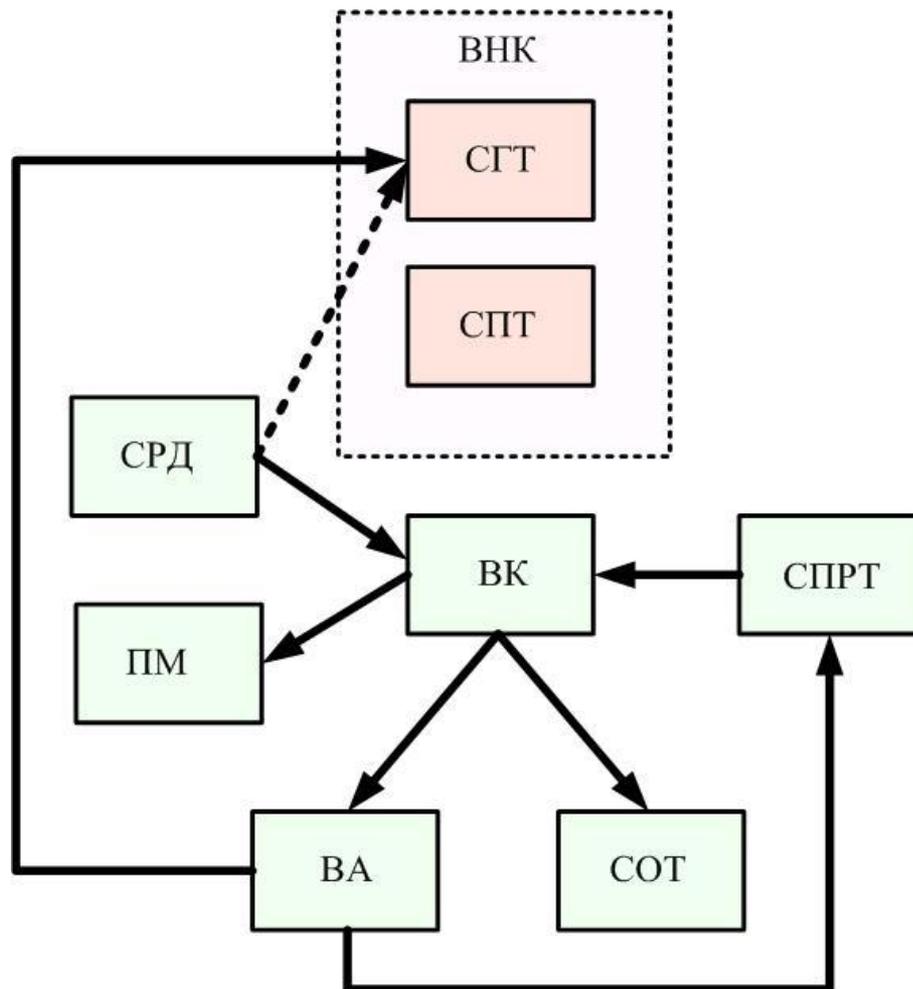
Схема расположения четырехцилиндрового двигателя
Стирлинга фирмы «Филипс» на автобусе «DAF»

Французская сверхмалая подводная лодка «Сага»

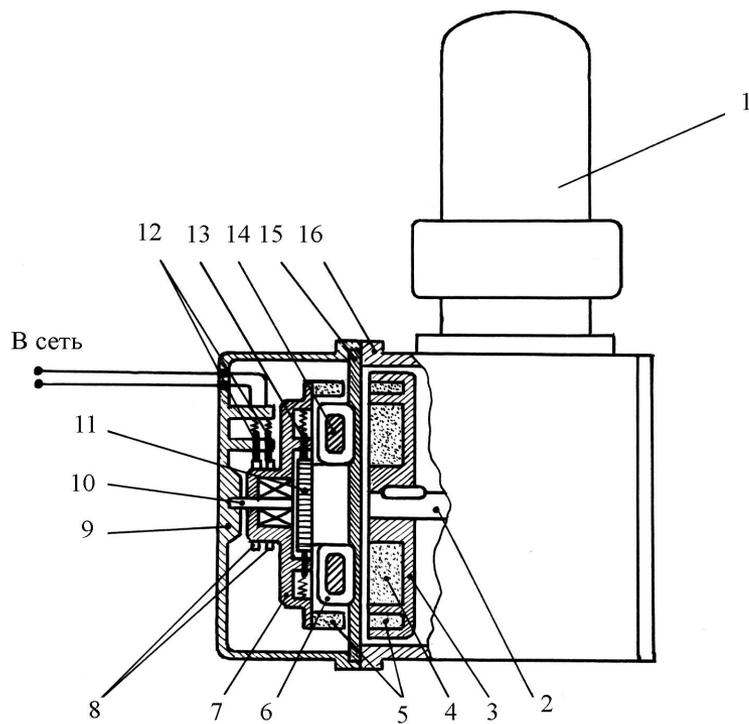


Техническая характеристика: длина – 28 м, диаметр корпуса – 3,5 м, энергетическая установка – дизель и два двигателя Стирлинга общей мощностью 2500 л.с. (1838 кВт)

Структурно-функциональная схема двигателя Стирлинга



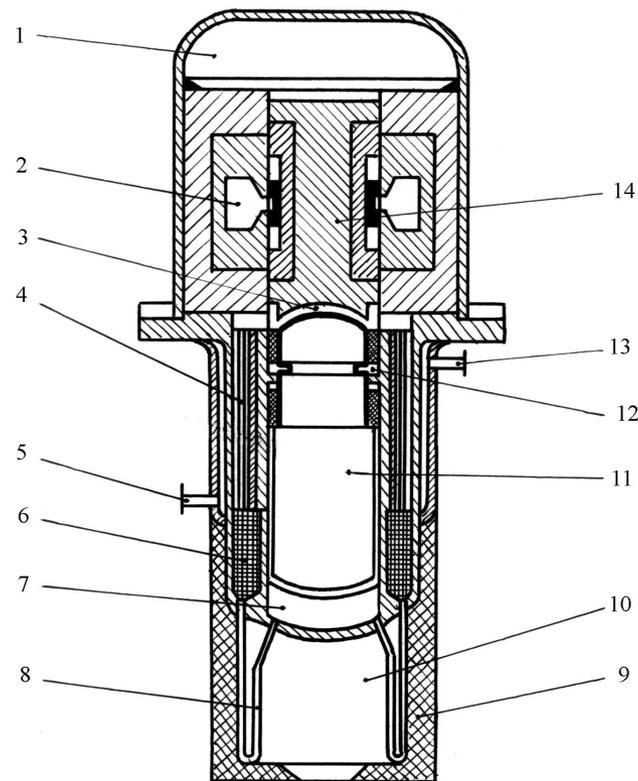
Стирлинг-электрические установки



Стирлинг-электрическая установка с приводом генератора через немагнитный экран (СВВАИУ)

1 - двигатель Стирлинга; 2 - коленчатый вал двигателя Стирлинга; 3 - сердечник индуктора; 4 - постоянные магниты индуктора;

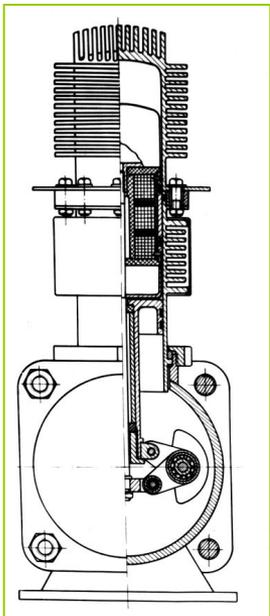
5 - магниты муфты; 6 - обмотка якоря; 7 - обойма; 8 - контактные кольца; 9 - корпус; 10 - ось обоймы; 11 - коллектор; 12 - щетки внешней электрической цепи; 13 - щетки коллектора; 14 - сердечник; 15 - немагнитный экран;



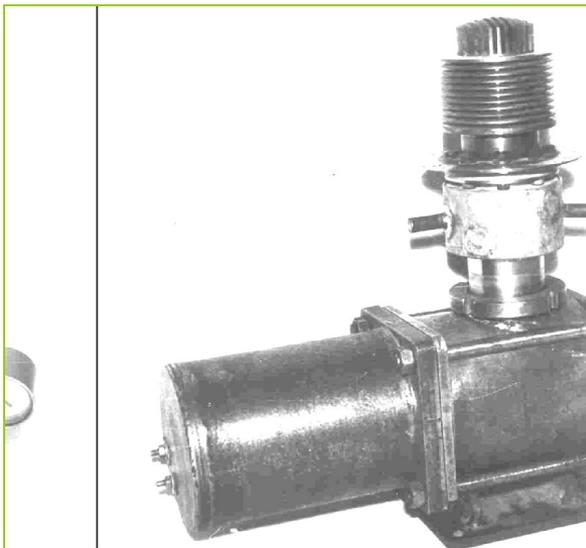
Система термоэлектрического генератора STRICE-0:

1 - упругая газовая подушка поршня; 2 - линейный генератор; 3 - полость сжатия; 4 - холодильник; 5 - подвод охладителя; 6 - регенератор; 7 - полость расширения; 8 - трубки нагревателя; 9 - теплоизоляция; 10 - полость нагрева; 11 - вытеснитель; 12 - упругая газовая подушка вытеснителя; 13 - отвод охладителя; 14 - поршень-якорь

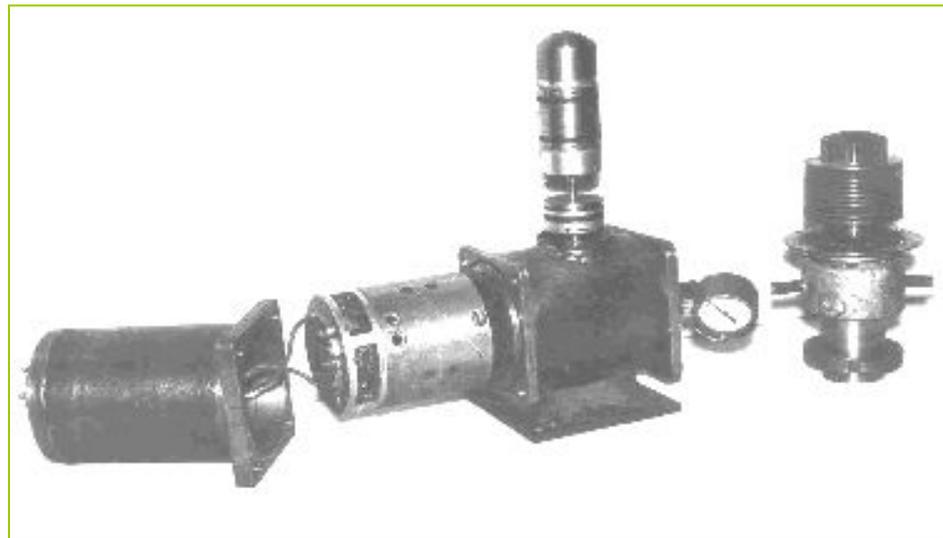
Стирлинг-электрическая установка СЭУ 5,5/2,1 (ЧФ НАТИ-ЧВВАИУ)



**Устройство
СЭУ**

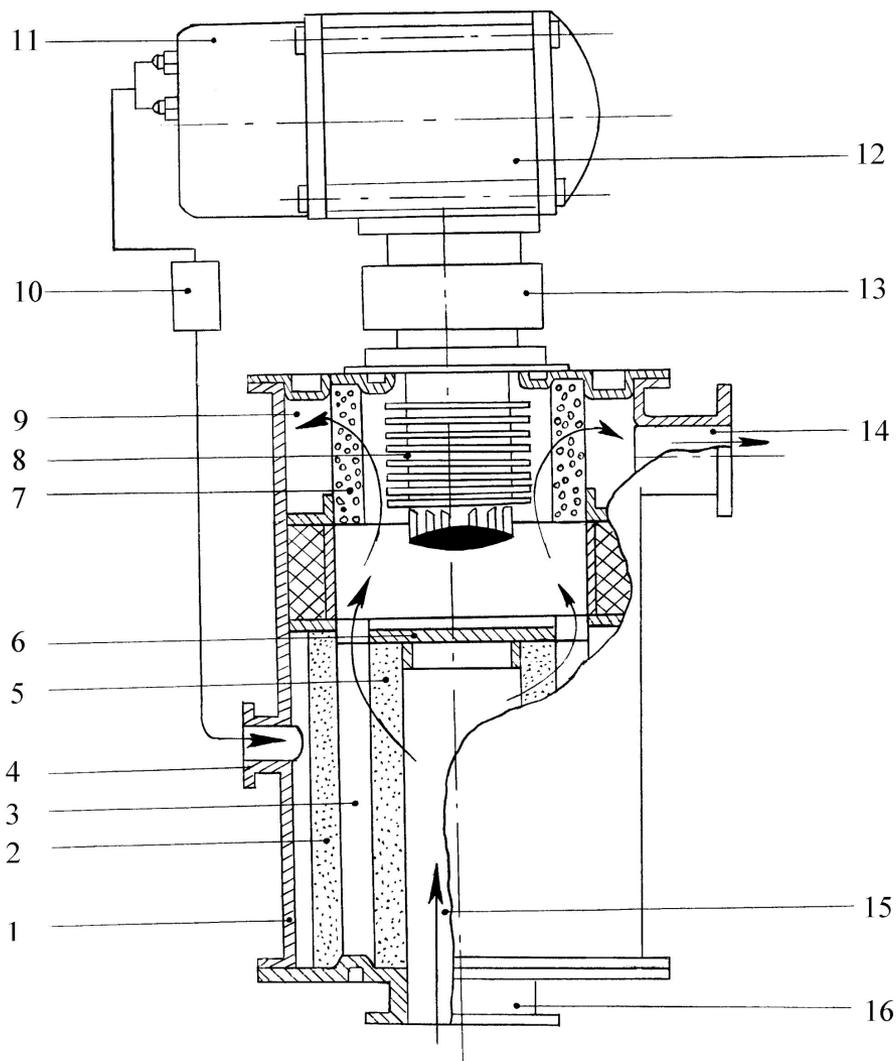


Общий вид СЭУ



**СЭУ со снятым цилиндром и
корпусом генератора**

Каталитический нейтрализатор, совмещенный с утилизационной СЭУ (ЧВВАИУ)



1 - корпус нейтрализатора; 2 - каталитический блок; 3 - окислительный реактор; 4 - патрубок для подачи воздуха; 5 - пористый каталитический окислительный блок; 6 - перегородка с окнами; 7 - блок восстановления; 8 - нагреватель; 9 - выпускная камера; 10 - нагнетатель воздуха; 11 - электрический генератор; 12 - корпус двигателя Стирлинга; 13 - охладитель; 14 - выпускной патрубок; 15 - впускная камера; 16 - впускной патрубок

Автономная отопительно-вентиляционная установка ОВ-65Б (ЧВВАИУ)

