

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*А.И. ДОВГЯЛЛО, В.Н. БЕЛОЗЕРЦЕВ,  
С.О. НЕКРАСОВА*

## БОРТОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2019

УДК 629.78(075)

ББК 39.62я7

Д58

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А. А. Кудин о в ;

д-р техн. наук, проф. В. Н. М а т в е е в

*Довгялло, Александр Иванович*

**Д58** **Борговая энергетика:** учеб. пособие / *А.И. Довгялло, В.Н. Белозерцев, С.О. Некрасова.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 144 с.: ил.

**ISBN 978-5-7883-1409-9**

Рассмотрено современное состояние энергопреобразующих и энергопотребляющих систем космических аппаратов, рассмотрены принципы выбора их типа для обеспечения режима работы различных устройств и систем на борту КА, в том числе космического назначения.

Учебное пособие предназначено для подготовки магистров по направлению подготовки 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов».

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

УДК 629.78(075)

ББК 39.62я7

ISBN 978-5-7883-1409-9

© Самарский университет, 2019

# Оглавление

<b>Введение</b> .....	5
<b>1 Бортовые системы и установки</b> .....	6
1.1 Основные типы бортовых систем космических аппаратов, их состав, назначение, параметры и характеристики.....	6
1.2 Обеспечивающее оборудование.....	7
1.3 Энергопроизводящие установки. Параметры и характеристики .....	13
1.3.1 Бортовые солнечные энергетические установки .....	14
1.3.2 Радиоизотопные источники энергии.....	19
1.3.3 Ядерные энергетические установки.....	26
1.3.4 Безопасность космических ЯЭУ и концепция развития космической ядерной энергетики в России.....	30
1.4. Энергетические установки на основе термомеханических преобразователей .....	34
1.4.1 Паротурбинная космическая энергетическая установка на цикле Ренкина .....	34
1.5 Термоэмиссионные преобразователи .....	40
1.5.1 Физические основы работы термоэмиссионных преобразователей.....	42
1.5.2 Режимы работы ТЭП.....	44
1.6 Термоэлектрические преобразователи .....	48
1.7 Электрохимические генераторы (ЭХГ).....	56
1.7.1 Электрохимические генераторы (топливные элементы). Основные параметры и характеристики.....	56
1.7.2 Физико-химические процессы в ЭХГ .....	59
1.8 Магнитогазо(гидро)динамический генератор .....	68
1.8.1 МГД генераторы плазменного типа .....	74
1.8.2 Газофазные ядерные двигатели для космических аппаратов ...	79
1.9 Химические термомеханические преобразователи.....	82
1.9.1 Обобщенный цикл термомеханических преобразователей .....	83
1.9.2 Двигатель Эррена.....	86
1.9.3 Свободнопоршневой дизель-генератор .....	89
1.10 Двигатели Стирлинга .....	90
1.10.1 Методика Шмидта расчёта двигателя Стирлинга .....	945
1.10.2 Построение P-V диаграммы рабочих полостей .....	97
1.11 Термоакустические двигатели .....	101
<b>2 Бортовые системы охлаждения</b> .....	109
2.1 Дроссельные системы охлаждения.....	113

2.1.1	Схема дроссельной СО, энергетический и эксергетический балансы .....	113
2.1.2	Замкнутые дроссельные системы охлаждения .....	116
2.2	Микрокриогенные системы на базе газовых криогенных машин ...	119
2.2.1	Теплоиспользующая ГКМ Волюмье-Такониса .....	123
2.2.2	Криогенератор Гиффорда–Мак Магона .....	126
2.2.3	Пульсационные криогенераторы .....	128
2.3	Термоэлектрические охладители .....	137
	<b>Список рекомендуемой литературы .....</b>	<b>140</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В современных летательных аппаратах большое значение имеют бортовые энергосистемы, обеспечивающие электропитание, функционирование и выполнение необходимых задач. Электропитание осуществляют энергопроизводящие преобразователи различных типов. Функционирование и выполнение поставленных задач осуществляют различные энергопотребляющие устройства и системы. К энергопроизводящим относят термоэлектрические, термомеханические и термоэлектронные системы, генераторы на радиоактивных изотопах и компактные атомные реакторы, а также электроаккумуляторы и батареи из полупроводниковых фотоэлектрических элементов. К энергопотребляющим относят системы групп бортового оборудования КА.

Система энергоснабжения космического аппарата (система энергопитания, СЭП) – это система космического аппарата, обеспечивающая электропитание других систем. Она является одной из важнейших, во многом именно она определяет геометрию космических аппаратов, конструкцию, массу, срок активного существования. Выход из строя системы энергоснабжения ведёт к отказу всего аппарата.

Важным направлением повышения эффективности целевого применения космических комплексов, а также срока их активного существования является использование систем на основе солнечных или ядерных энергоустановок и электрических ракетных двигателей.

# 1 БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ И УСТАНОВКИ

## 1.1 Основные типы бортовых систем космических аппаратов, их состав, назначение, параметры и характеристики

Космический аппарат (КА) состоит из нескольких составных частей, прежде всего – это целевая аппаратура, которая обеспечивает выполнение стоящей перед космическим аппаратом задачи. Помимо целевой аппаратуры обычно присутствует целый ряд служебных систем. Это системы энергообеспечения, терморегуляции, радиационной защиты, управления движением, ориентации, аварийного спасения, посадки, управления, отделения от носителя, разделения и стыковки, бортового радиокомплекса, жизнеобеспечения. В зависимости от выполняемой космическим аппаратом функции отдельные из перечисленных служебных систем могут отсутствовать.

Ниже рассмотрены основные цели и задачи наиболее часто встречаемых систем КА.

*Система обеспечения температурного режима.* Космический аппарат непрерывно получает тепло от внутренних источников (приборы, агрегаты и т. д.) и от внешних: прямого солнечного излучения, отражённого от планеты излучения, собственного излучения планеты, трения атмосферы планеты на высоте аппарата. Также аппарат теряет тепло в виде излучения. Многие узлы космических аппаратов требовательны к температурному режиму, не допускают перегрева или переохлаждения. Поддержанием баланса между получаемой тепловой энергией и её отдачей, перераспределением тепловой энергии между элементами конструкции аппарата и, таким образом, обеспечением заданной температуры занимается система обеспечения теплового режима.

*Система управления* – осуществляет управление двигательной установкой аппарата с целью обеспечения ориентации аппарата, выполнения манёвров. Обычно она имеет связи с целевой аппаратурой,

другими служебными подсистемами с целью контроля и управления их состоянием, а также с наземными службами управления.

*Система связи* обеспечивает контроль состояния космического аппарата, управления, передачи информации с целевой аппаратуры, требует канала связи с наземным комплексом управления.

В основном для этого используется радиосвязь. При большом удалении КА от Земли требуются остронаправленные антенны и системы их наведения.

*Система жизнеобеспечения* – необходима для пилотируемых КА, а также для аппаратов, на борту которых осуществляются биологические эксперименты. Она включает запасы необходимых веществ, а также системы регенерации и утилизации.

*Система ориентации* – включает устройства определения текущей ориентации КА (солнечный датчик, звёздные датчики и т. п.) и исполнительные органы (двигатели ориентации и силовые гироскопы).

*Двигательная установка* – позволяет менять скорость и направление движения КА. Обычно используется химический ракетный двигатель, но это могут быть и электрические, ядерные и другие двигатели; может применяться также солнечный парус.

*Бортовое оборудование космического аппарата* – комплекс систем и устройств, устанавливаемых на космическом аппарате, предназначенных для обеспечения заданных условий внутри космического аппарата и характеристик его движения, а также для решения специальных задач, связанных с достижением конечных целей полёта. Соответственно бортовое оборудование космических аппаратов подразделяется на обеспечивающее и целевое.

## **1.2 Обеспечивающее оборудование**

Состав и характеристики обеспечивающего бортового оборудования определяются назначением космического аппарата, а также отсутствием или наличием на нём экипажа. Наиболее разнообразное и сложное обеспечивающее бортовое оборудование устанавливается на пилотируемых космических аппаратах многократного применения. Оно включает следующие основные системы: управления полётом, защиты, терморегулирования, теплозащиты, аварийного спасе-

ния экипажа, посадки, радиосвязи и телеметрии, а также пиротехнические устройства.

Система энергоснабжения предназначена для питания всех групп бортового оборудования КА электроэнергией (рис. 1).

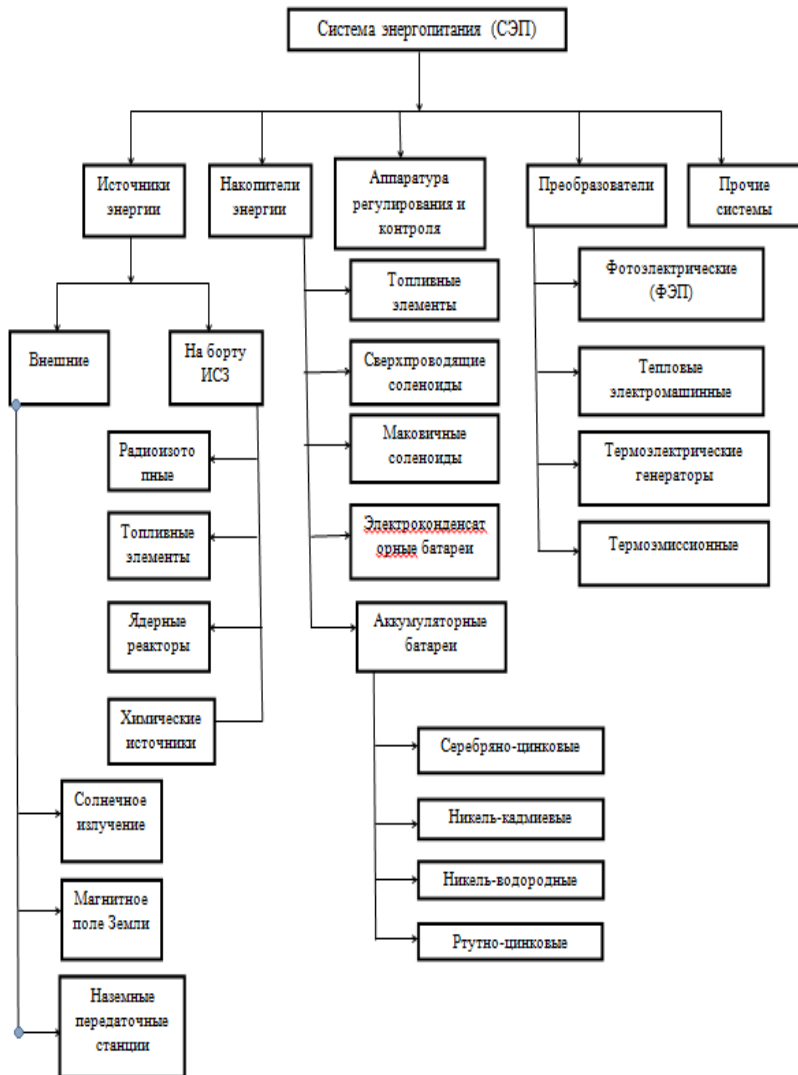


Рис. 1. Структурная схема системы энергоснабжения космического аппарата



На космических аппаратах с небольшой продолжительностью полёта применяются электроаккумуляторы, заряжаемые на Земле перед запуском. При длительном полёте на борту КА должны быть первичные источники энергии (химической, ядерной, солнечной и т.п.) и устройства для преобразования её в электрическую. Для межпланетных КА и ИСЗ на геоцентрических орбитах источником первичной энергии может быть Солнце, излучение которого непосредственно преобразуется в электроэнергию батареями, состоящими из полупроводниковых фотогальванических элементов. На КА длительного полёта и при больших мощностях электрооборудования могут использоваться генераторы на радиоактивных изотопах и компактные атомные реакторы. Для преобразования ядерной или солнечной энергии в электрическую могут применяться термоэлектрические, термодинамические и термоэлектронные преобразователи.

*Система жизнеобеспечения* поддерживает нормальные условия жизнедеятельности экипажа космического аппарата. В неё входит оборудование кондиционирования, водоснабжения и удаления отходов (на КА длительного полёта могут использоваться различные регенерационные циклы). Оборудование кондиционирования состоит из подсистем: снабжения кислородом, регулирования температуры и влажности, удаления углекислоты и очистки воздуха, контроля и регулирования состава воздуха. Для регенерации воды используются различные методы: вакуумно-пиролизный, испарительный, электродиализный. Пищевые и другие отходы удаляются или консервируются. В состав системы жизнеобеспечения входит оборудование для хранения и приготовления пищи.

*Система биологической защиты* предотвращает вредные воздействия проникающих излучений на организм членов экипажа космического аппарата (одновременно она предохраняет и чувствительные к радиации элементы бортового оборудования). Эти системы устанавливаются на КА с ядерными двигателями или ядерными энергоустановками, а также на аппаратах, приспособленных для длительного полёта в радиационных поясах Земли. На КА длительного

полёта система предохраняет экипаж от воздействия космического излучения и солнечных вспышек. Её основа – экраны из тяжёлых металлов и защитные прослойки.

*Система терморегулирования* обеспечивает заданные температурные режимы в обитаемых отсеках КА (кабинах экипажа) и отсеках бортового оборудования. Она включает чувствительные элементы, измеряющие температуру в определённых точках КА, электронные блоки управления системой, радиаторы для излучения избыточного тепла и исполнительные органы, непосредственно воздействующие на тепловые процессы. Система теплозащиты поддерживает допустимые температуры элементов силовой конструкции космического аппарата и его топливных баков.

Известны системы теплозащиты трёх типов: пассивная, активная и комбинированная.

*В пассивной системе* используются термостойкие экраны и покрытия, различные испаряющиеся (аблирующие) обмазки, а также теплоизоляционные прослойки из микропористых материалов.

*В активной системе* по полостям внутри обшивки прокачивается какой-либо теплоноситель (вода, жидкий водород, расплавленный металл), который охлаждается в радиаторах.

*Комбинированная система* сочетает оба принципа теплозащиты. Наибольшее распространение получила пассивная система.

Развитие орбитальных средств различного назначения характеризуется ростом общего уровня их энергопотребления и соответственно энерговооружённости, а следовательно и срока активного существования. В частности, уровень энергопотребления бортовой ретрансляционной аппаратуры и служебных систем коммуникационных геостационарных КА нового поколения будет составлять 5-10 кВт при уровне энерговооружённости 1,4-2,0 Вт/кг, что примерно в 2-3 раза выше, чем соответствующие показатели отечественных аппаратов, находящихся в настоящее время в эксплуатации. Удельная мощность систем электроснабжения (СЭС), являющаяся обобщённым показателем их совершенства, за последние 10 лет возросла примерно в 1,5 раза (с 4-5 до 6-9 Вт/кг). Имеются принципиальные

возможности дальнейшего увеличения удельной мощности СЭС в 2-3 раза за счет совершенствования систем генерации, накопления и преобразования энергии.

Важным направлением повышения эффективности целевого применения космических комплексов и систем, а также срока их активного существования, является использование двигательных систем на основе солнечных или ядерных энергоустановок и электрических ракетных двигателей. В частности, применение буксира с ЭРД позволяет в 2...2,5 раза увеличить массу КА (целевого модуля) на геостационарной орбите (ГСО). Подобные перспективные средства межорбитальной транспортировки характеризуются значительными уровнями энергопотребления (40...100 кВт) и энергомассового совершенства бортовых ЭУ.

Для удовлетворения возрастающих требований к системам энергоснабжения необходимы:

- повышение гарантированных удельных характеристик элементов СЭС в конце срока активного существования КА;
- переход на элементы нового типа;
- снижение уровня деградации СБ (начальных запасов ее мощности);
- создание адаптивных систем преобразования электроэнергии, управления СЭС и контроля ее работы для обеспечения наиболее эффективного использования возможностей данной системы;
- повышение ресурса и стойкости СЭС при воздействии факторов космического пространства.

Основная и вспомогательные энергетические установки являются важнейшими бортовыми системами КА (рис.2), от которых зависит исполнение основных функций аппарата, его габаритные размеры, масса и срок активного существования. Выход из строя энергоустановки влечет за собой выход из строя всего аппарата.

Масса бортовой энергетической установки отечественных КА находится в пределах 8...25 % от массы объекта, а для американских

космических аппаратов эта величина колеблется от 9 до 44 % и составляет в среднем около 25 %.

По мере расширения круга задач, решаемых в космическом пространстве с помощью КА, возрастает требуемая мощность бортовых энергоустановок (рис. 3). Так, если на первом искусственном спутнике земли (ИСЗ), запущенном на орбиту в 1957 г., мощность системы энергопитания (СЭП) составляла около 40 Вт, на американском КК «Джемини GT-IV», выведенном на орбиту в 1965 г., мощность энергоустановки составляла около 1 кВт, то на орбитальной станции «Спейслаб» (1983 г.) эта мощность составляла уже 6 кВт.

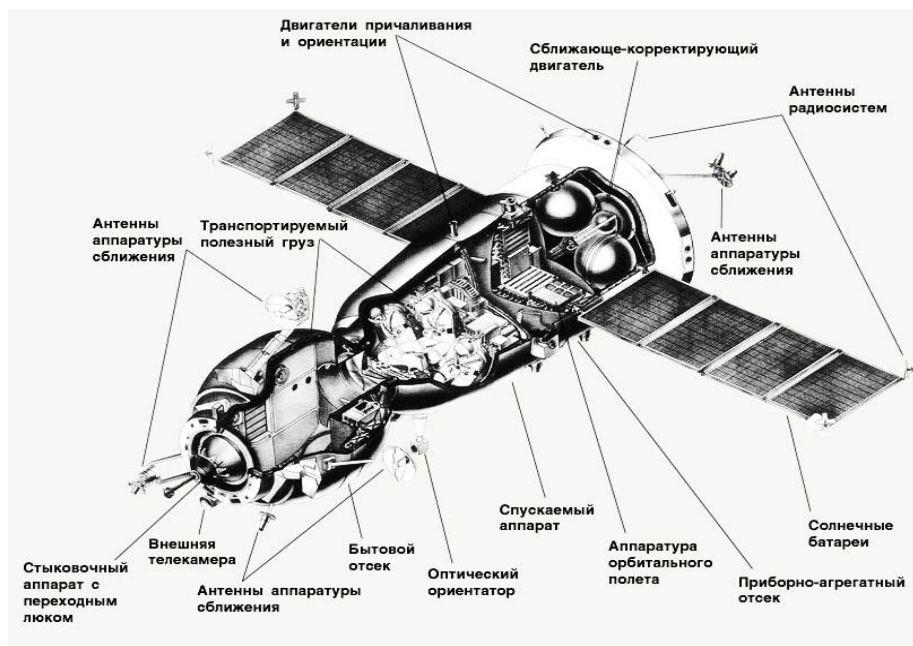


Рис. 2. Транспортный корабль снабжения «Союз-ТМ»

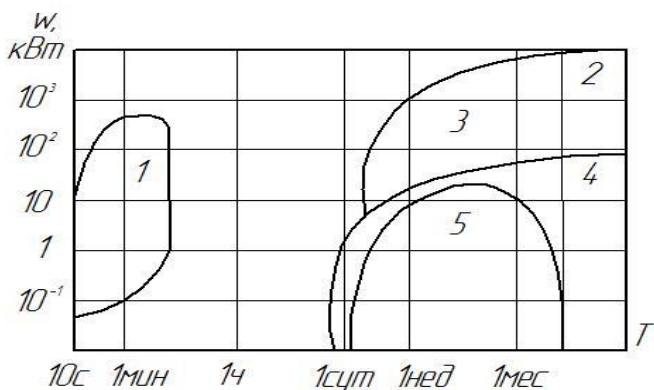


Рис. 3. Энергетическая потребность КА:

- 1 – ракеты-носители; 2 – межпланетные; 3 – лунные и космические станции;  
4 – ИСЗ; 5 – лунные КА

### 1.3 Энергопроизводящие установки. Параметры и характеристики

Солнечные батареи (фотоэлектрические преобразователи) – одни из основных устройств для получения электрической энергии на космических аппаратах: они работают долгое время без расхода каких-либо материалов и, в то же время, являются экологически безопасными в отличие от ядерных и радиоизотопных источников энергии (рис. 4).

Плотность потока излучения Солнца на орбите Земли составляет 1367 Вт/м<sup>2</sup>. Данная плотность энергии позволяет получать примерно 130 Вт электрической мощности с 1 м<sup>2</sup> поверхности солнечных батарей (при КПД 8...13 %). Солнечные батареи располагают или на внешней поверхности аппарата, или на раскрывающихся панелях. Для максимизации отдаваемой батареями энергии нормаль к их поверхности должна быть направлена на Солнце с точностью 10...15°. В случае жёстких панелей это достигается или ориентацией самого КА, или специализированной автономной электромеханической системой ориентации солнечных батарей, при этом панели подвижны относительно корпуса аппарата. На некоторых спутниках применяют неориентируемые батареи, располагая их на поверхности так, чтобы

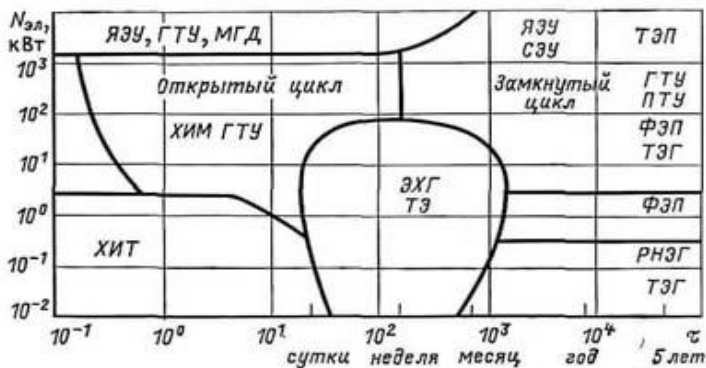


Рис. 4. Области использования энергетических установок:

- ЯЭУ – ядерная энергетическая установка; ГТУ – газотурбинная установка;  
 ХИМ – химический источник энергии; ХИТ – химический источник тока;  
 ЭГ – электрохимический генератор; ТЭ – топливный элемент; СЭУ – солнечная  
 энергоустановка; ТЭП – термоэмиссионный преобразователь;  
 ТЭГ – термоэлектрический генератор; ПТУ – паротурбинная установка;  
 ФЭП – фотоэлектрический преобразователь;  
 РНЭГ – радионуклеидный электрогенератор

при любом положении аппарата обеспечивалась необходимая мощность.

### 1.3.1 Бортовые солнечные энергетические установки

Проблема улучшения гарантированных удельных энергомассовых характеристик бортовых ЭУ, работающих с использованием солнечных батарей и химических источников тока, при одновременном увеличении их ресурса может решаться следующим образом:

– дальнейшим совершенствованием традиционных СЭС и их элементов с целью достижения высоких удельных характеристик фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе Si ( $170 \text{ Вт/м}^2$ ;  $100 \text{ Вт/кг}$ ) и GaAs ( $220 \text{ Вт/м}^2$ ;  $60 \text{ Вт/кг}$ ), солнечных батарей (СБ) (с плотностью энергии  $100\text{-}110 \text{ Вт/м}^2$ ;  $1,5\text{-}2,5 \text{ кг/м}^2$  – в конце ресурса, равного 10-15 годам на высоких орбитах и  $80\text{-}90 \text{ Вт/м}^2$  – после 5-7 лет работы на низких орбитах), а также совершенствованием существующих никель-кадмиевых аккумуляторов до достижения уровня

удельной энергоемкости 40...50 Вт·ч/кг при ресурсе до 5 лет – на низких орбитах и 10-15 лет – на ГСО;

– разработкой СБ на основе высокоэффективных ФЭП с повышенными КПД и радиационной стойкостью (в частности, у ФЭП на основе InP, КПД>20%), а также панелей СБ с концентраторами солнечной энергии для эксплуатации на особо радиационно-опасных орбитах. Ожидаемые удельные характеристики панели СБ с зеркальными солнечными концентраторами – 120-140 Вт/м<sup>2</sup>; 2-5 кг/м<sup>2</sup> – в случае деградации ФЭП на основе GaAs 2-3 % – за 5 лет и на основе Si – 15-20 % – за 5 лет при ресурсе 10 лет. Для эксплуатации на высоких и менее радиационно-опасных орбитах могут использоваться разрабатываемые СБ с линзовыми концентраторами (ожидаемые характеристики модуля с гетерогенными арсенид-галлиевыми ФЭП – 200 Вт/м<sup>2</sup>; 4 кг/м<sup>2</sup>);

– созданием СБ на основе сверхтонких ФЭП, гибких и бескаркасных панелей (достижением удельной массы панели СБ 1,5-2,5 кг/м<sup>2</sup>);

– разработкой накопителей энергии новых типов на основе электрохимических источников тока: никель-водородных аккумуляторных батарей (АБ) с общим газовым коллектором в целях достижения их удельной энергии 45-60 Вт·ч/кг и ресурса 25 000 циклов на низких орбитах и 10 лет на ГСО; серно-натриевых АБ с удельной энергией 110-140 Вт·ч/кг, удельной мощностью 120-180 Вт/кг и ресурсом 4000 циклов; регенеративных накопителей энергии на основе водородно-кислородной электрохимической системы для работы в составе СЭС и энергодвигательных систем с высокими удельными характеристиками (120 Вт·ч/кг) и длительным ресурсом (10 лет), а также разработкой систем энергоснабжения на основе электромеханических накопителей энергии с удельной энергией 30 Вт·ч/кг для КА с длительным циклическим ресурсом (10 лет) и сильноточными нагрузками;

– разработкой адаптивных комплексов электропреобразующей аппаратуры, включая систему преобразования электроэнергии и управления электрическими ракетными двигателями (широкое применение которых предполагается для увеличения эффективности средств межорбитальной транспортировки КА и срока их активного

существования), с удельной мощностью до 100 Вт/кг при ресурсе 10-15 лет.

Одним из перспективных направлений развития бортовых ЭУ является разработка солнечных газотурбинных установок (СГТУ) с электрической мощностью 10 кВт и выше, что обусловлено их следующими преимуществами:

- более высоким КПД преобразования солнечной энергии в электрическую (25 % и в перспективе до 50 %);
- меньшими габаритами СГТУ по сравнению с размерами ЭУ на базе СБ;
- возможностью генерирования переменного тока повышенного напряжения;
- длительным ресурсом работы (за счет применения газовых подшипников в опорах турбокомпрессора);
- меньшей стоимостью энергоустановки;
- возможностью работать совместно с ядерными и химическими источниками энергии;
- возможностью применения теплового аккумулятора энергии.

Ракету, спутник или автоматическую межпланетную станцию трудно представить без веера солнечных батарей для питания бортовой аппаратуры. Но с Солнцем приходится считаться и это не всегда удобно, солнечные батареи должны быть постоянно повернуты к источнику света, иначе они теряют эффективность. В земных условиях этим неудобством можно пренебречь, запасая энергию в аккумуляторах. Но в космосе бесполезное утяжеление конструкции недопустимо. Приходится разворачивать аппарат, чтобы удерживать правильную ориентацию. Космические исследования требуют независимости – в том числе и от источника энергии.

В космосе можно использовать практически любые силовые агрегаты и источники энергии. Вопрос только в стоимости доставки топлива на орбиту. Именно поэтому в качестве альтернативы солнечной энергии рассматриваются порой весьма экстравагантные варианты.



Солнечные батареи более или менее приемлемы разве что в условиях земной орбиты. Но уже на орбите Марса их площадь и масса для получения той же мощности должны быть увеличены в 2,5 раза, на орбите Юпитера – в 27 раз, на орбите Сатурна – в 91, а на орбите Нептуна – аж в 900. В любом случае аккумуляторы первых спутников, а также генераторы, использующие энергию химических реакций, не могут рассматриваться в качестве альтернативы солнечным батареям. Уже на заре космической эры надежду возлагали на радиоизотопные источники.

На рис. 5 показаны солнечные батареи орбитального космического аппарата, обеспечивающие электроэнергией его аппаратуру и оборудование. В СЭП обычно входят первичный и вторичный источники электрической энергии, автоматика системы энергоснабжения, зарядные и преобразующие устройства.

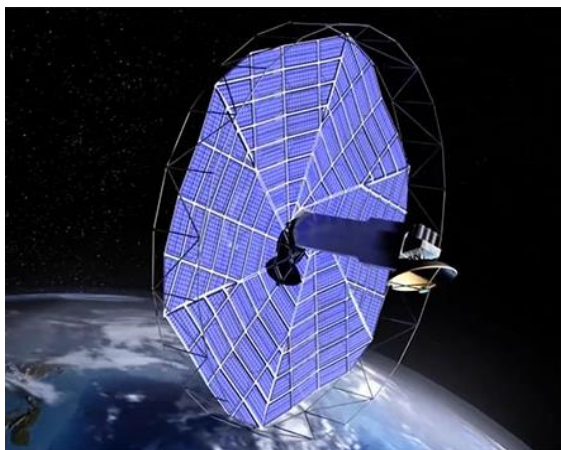


Рис. 5. Солнечные батареи на ИСЗ

В последние годы в отечественной космической отрасли осуществляется кооперация такого состава: ОАО «Сатурн», фирма AZUR – ФЭП и фотогенерирующая часть, фирма «Технология» (г. Обнинск) – сотопанель, «НПО им. С.А. Лавочкина» – конструкция каркаса СБ. КПД ФЭП достигает 31%, масса каркаса при этом составляет 0,4...0,5 кг/м<sup>2</sup>, удельная мощность СБ – 5,1 кг/кВт (табл.1).

Таблица 1. Характеристики перспективных СБ

Параметр	Spectrolab (перспективный уровень)	ФЭП AZUR каркас ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева»	ФЭП AZUR каркас ОАО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева»	ФЭП AZUR каркас НПО им. С.А. Лавочкина, ОНПП «Технология»
КПД ФЭП, %	28,2...29,5		29,1	31
Удельная масса ФЭП, кг/м <sup>2</sup>	0,732		0,732 (0,453)	
Удельная мощность на начало САС по ФЭП, Вт/м <sup>2</sup>	330 (366)	356	360	381
Удельная мощность на 15 лет САС по ФЭП, Вт/м <sup>2</sup>	260 (290)	279	272	293
Удельная масса БФ, кг/м <sup>2</sup>	1,75	1,60	1,5..1,6	1,33..1,40 (~1,0)
Удельная масса каркаса, кг/м <sup>2</sup>	0,6..0,8	>1,0	0,7	0,4..0,5
Удельная масса СБ (БФ+каркас), кг/м <sup>2</sup>	2,35...2,5	>2,6	2,22...3	1,73...1,90 (<1,5)
Удельная масса СБ, кг/кВт	8,1..8,8	-	7,58..7,93	5,1

Представленные значения удельной массы (мощности) возможны при применении тонких ФЭП толщиной 80...100 мкм. Технология изготовления таких ФЭП в ОАО «Сатурн» близка к освоению. Таким образом, масса панелей СБ мощностью 200 кВт будет весить чуть больше 100 кг. Здесь сотопанель уже не трехслойная, а по существу двухслойная с ребрами (рис. 6).

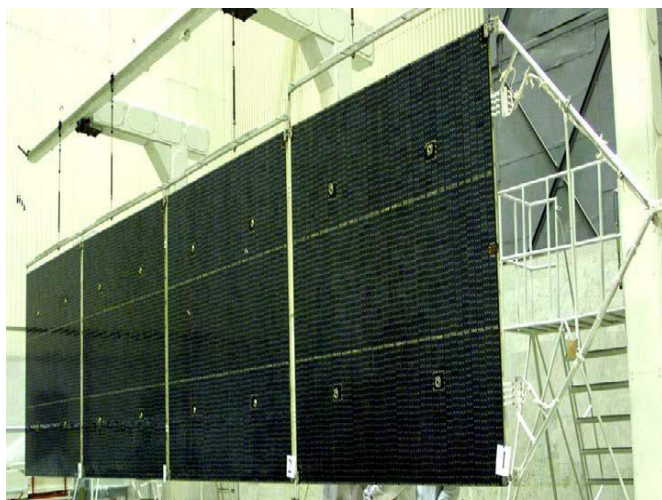


Рис.6. Крыло СБ КА «Ямал-200». Сотовые панели

Автоматика системы энергопитания – это совокупность устройств для автоматического управления работой системы энергопитания КА и контроля ее параметров. Обычно автоматика осуществляет поддержание параметров системы (напряжения, температуры, давления и т.д.) в заданном диапазоне переключения, обусловленных изменением режима работы источников электроэнергии или их агрегатов (например, переход с так называемых основных источников электроэнергии на резервные и обратно); распознавание отказов и аварийную защиту источников электроэнергии; токовую защиту агрегатов системы энергопитания; контроль параметров системы с выдачей информации в радиотелеметрическую систему и на пульт космонавтов.

### ***1.3.2 Радиоизотопные источники энергии***

*Радиоизотопные источники энергии* – устройства различного конструктивного исполнения, использующие теплоту, выделяющуюся при радиоактивном распаде, для нагрева теплоносителя или непосредственно преобразующие её в электроэнергию.

Радиоизотопные источники энергии используют в основном в следующих случаях:

- большая длительность полёта;
- миссии во внешние области Солнечной системы, где поток солнечного излучения мал (Кассини-Гюйгенс, New Horizons и т. д.);
- разведывательные спутники с радаром бокового обзора из-за низких орбит не могут использовать солнечные батареи, но испытывают высокую потребность в энергии.

Радиоизотопный источник энергии принципиально отличается от атомного реактора тем, что в нём используется не управляемая цепная реакция, а энергия естественного распада радиоактивных изотопов.

Еще в 1913 году Генри Мозли изготовил первый генератор, преобразующий энергию спонтанных ядерных реакций в электрический ток. Устройство, изумительное по своей простоте, представляло собой полую, посеребренную изнутри сферу, в центр которой помещалось некоторое количество радия. Излученные радием электроны поглощались слоем серебра, что приводило к разделению заряда и возникновению разности потенциалов. Несмотря на то что энергия распада непосредственно трансформировалась в электрическую, КПД батареи Мозли оставался ничтожным. Источник производил почти исключительно тепло. Капсулы с полонием-210 в советских «Луноходах» служили именно для обогрева приборного отсека. Тем не менее, такие качества радиоизотопных генераторов, как предельная простота устройства, нетребовательность к обслуживанию и небольшая по отношению к выделяемой энергии масса, были отмечены уже тогда.

В середине прошлого века конструкция радиоизотопных источников энергии усложнилась. Капсула с изотопом стала рассматриваться только как тепловыделяющий элемент. Электричество же вырабатывалось полупроводниковым термоэлектрогенератором либо термоэмиссионным преобразователем, использующим эффект испускания электронов нагретыми телами. Современные генераторы используют для производства электроэнергии эффект Зеебека, или

термоэлектрический эффект – возникновение ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют различные температуры. Устройства такого типа эксплуатируются с 1960 года и применялись во время пилотируемых полетов на Луну.

Радиоизотопные генераторы показали себя идеально подходящими для космических аппаратов источниками энергии, очень компактными и эффективными. Особенно высокой оценки заслуживает надежность радиоизотопных батарей. Отказ возможен только в случае механического разрушения устройства.

Радиоизотопные источники питания подразделяются на следующие типы:

- радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ);
- радиоизотопные термоэмиссионные генераторы: используется термоэмиссионный преобразователь;
- радиоизотопные комбинированные генераторы: используются термоэмиссионный преобразователь (1-я ступень) и термоэлементы (2-я ступень преобразования);
- радиоизотопные паротурбинные генераторы: парортутные турбины или водопаровые турбины и электрогенератор;
- атомные элементы: альфа- и бета-излучающие изотопы, помещённые в вакуумные капсулы, создают очень высокое напряжение при малых токах;
- атомные полупроводниковые элементы: облучение полупроводниковых сборок в заданном направлении;
- радиоизотопные пьезоэлектрические источники;
- радиоизотопные оптико-электрические источники;
- радиоизотопные источники высокопотенциального тепла: получение нагретых жидкостей (вода, топливо и др.) и газов для отопления, обогрева резервных батарей и др.;
- радиоизотопные подогреватели и ионизаторы воздуха: подогрев (частичный) и сильная ионизация воздуха или кислорода, подаваемого в металлургические печи (интенсификация горения топлива);

- радиоизотопные ракетные двигатели: используются высококонцентрированные и тугоплавкие соединения радиоизотопов с максимальным выделением энергии для нагрева рабочих тел (водород, гелий) в ракетных двигателях малой мощности (коррекция орбиты спутников).

Регулирование работы радиоизотопных источников энергии представляет известные трудности ввиду того, что сам источник (радиоизотоп) обладает фиксированными параметрами тепловыделения, повлиять на которые (ускорить или замедлить) современная технология в настоящее время не в состоянии. В то же время можно регулировать параметры вырабатываемой электроэнергии (а также давление рабочих газов или жидкостей). В настоящее время все методы регулирования радиоизотопных источников энергии сводятся к следующему:

- регулирование потока тепла от радиоизотопа к преобразователю;
- регулирование параметров вырабатываемой электроэнергии;
- регулирование давления рабочих тел.

При производстве радиоизотопных источников энергии применяются различные конструкционные и вспомогательные материалы, обладающие специфическими физико-химическими, механическими и ядерно-физическими свойствами, позволяющими повысить КПД устройств и обеспечить высокий уровень безопасности как при нормальной эксплуатации, так и в аварийных условиях.

При создании радиоизотопных источников энергии инженеры руководствуются максимально возможными характеристиками материалов и соответственно лучшим итоговым результатом. В то же время при создании конструкции необходимо также учитывать экономические факторы и вторичные опасности. Так, например, при использовании альфа-излучающих рабочих изотопов с большим удельным энерговыделением часто необходимо снизить концентрацию рабочего изотопа для уменьшения тепловыделения. В качестве разбавителей используются различные металлы, в случае применения

изотопа в форме оксида или другого соединения – разбавление производится подходящим инертным оксидом и др. Следует учитывать вторичные реакции частиц, излучаемых рабочим радиоизотопом, с материалом-разбавителем; так, хотя бериллий или его тугоплавкие соединения (оксид, карбид, борид) удобны в качестве разбавителя бета-активных изотопов (вследствие большой теплопроводности, малой плотности, большой теплоемкости), но в контакте с альфа-активным изотопом источник тепла превратится в весьма опасный и чрезвычайно мощный источник нейтронов, что по соображениям безопасности совершенно недопустимо.

При конструировании защитных оболочек от гамма-излучения наиболее предпочтительными материалами являются прежде всего свинец (ввиду его дешевизны) и обеднённый уран (ввиду гораздо лучшей способности к поглощению гамма-излучения).

При создании полониевых излучательных элементов важную роль в разбавлении играет то обстоятельство, что полоний, подобно теллуру, весьма летуч и требуется создание прочного химического соединения с каким-либо элементом. В качестве таких элементов предпочтительны свинец и иттрий, так как они образуют тугоплавкие и прочные полониды. Золото также образует весьма технологичный полонид. Экономически эффективно использование обеднённого урана для защиты от гамма-излучения (эффективность поглощения гамма-квантов ураном в 1,9 раза больше, чем свинцом) ввиду необходимости ассимиляции больших накопленных запасов обеднённого урана в технике.

Улучшение КПД радиоизотопных генераторов идёт по трем направлениям:

- улучшение полупроводниковых материалов, эмиссионных преобразователей;
- применение новых материалов для конструкции теплообменников и других узлов (уменьшение тепловых потерь);
- снижение стоимости топлива (в этой связи несколько снижаются требования к КПД, так как материалы дешевле и их можно использовать в больших количествах) (рис. 7).



Рис. 7. Радиоизотопный электрогенератор на полупроводниковых термоэлектрических элементах

Несмотря на доработки, проведенные со времен Мозли, недостатком радиоизотопных источников остается крайне низкий КПД: в электроэнергию удастся преобразовать не более 7% энергии распада ядер.

В настоящее время американские исследователи работают над усовершенствованным ядерным генератором, имеющим много общего с известным еще с 1816 года двигателем Роберта Стирлинга [11].

Преобразование ядерной энергии в тепловую, потом в кинетическую и только потом – в электричество представляется чрезмерно сложным процессом. Атомная энергетическая установка с поршнем, в отличие от РИТЭГ (рис.8), выглядит экстравагантно, поскольку наличие движущихся частей создает дополнительные проблемы. Но первое впечатление обманчиво: нет никаких препятствий объединению принципов термоэлектрогенерации и тепловой машины Стирлинга. В последнем случае поршень позволит преобразовать в электричество до 30% энергии распада.



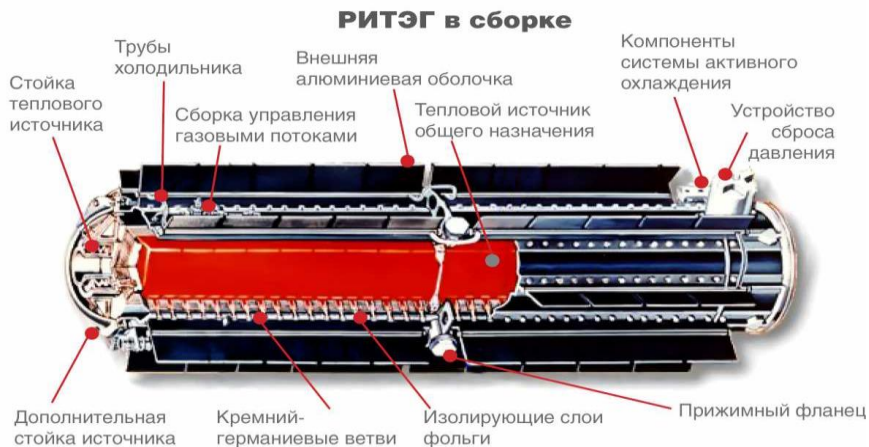


Рис. 8. Сборка радиоизотопного электрогенератора

Не исключено, что в будущем окажется пересмотренной и основная концепция ядерных источников энергии космического назначения. Рабочим телом в двигателе Стирлинга может быть и сам делящийся материал в газообразной фазе.

Некоторые характеристики низкотемпературных РИТЭГ на стронции-90 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики низкотемпературных РИТЭГ

№	Параметр	Тип РИТЭГ						
		Бета-М	«Эфир»	ИЭУ-1	ИЭУ-2	ИЭУ-2М	«Пингвин»	57-ИК
1	Выходная электрическая мощность в начале срока службы, Вт	9,0	30	80	14	20	2,0	0,5
2	Напряжение на номинальной нагрузке, В	6 или 14	35	24	6	14	3,0	1,3

3	Тепловая мощность РИТ, Вт	230	680	2130	580	650	60	29
4	Габаритные размеры, мм:							
	- диаметр (длина)	600	805	(1510)	900	(900)	400	40
	- высота	655	1275	1350	720	870	300	
	- ширина	—	—	760	—	750	—	

### *1.3.3 Ядерные энергетические установки*

Ядерные реакторы на космических аппаратах применяются в случае, если необходимое количество энергии невозможно получить другими способами.

Реактор в космосе применяется редко. Тем не менее будущее космонавтики немыслимо без управления ядерными реакциями. До сих пор большинство атомных энергетических установок космического назначения не использовали цепную реакцию, полагаясь лишь на тепло, выделяющееся при естественном распаде плутония-238 или стронция-90 (то есть радиоизотопные источники). Такое решение уравнивало последние с солнечными батареями по крайней мере в одном отношении: регулирование поступления энергии оставалось невозможным. Если требовалось в какие-то моменты резко повышать ее расход, нельзя было обойтись без аккумуляторов, подзаряжающихся в периоды относительного покоя. А это – лишний вес и явный шаг назад.

Первым ядерным реактором, применённым на космическом аппарате, стал американский SNAP-10A (System of Nuclear Auxiliary Power) на борту аппарата Snapshot массой 440 кг, запущенный 3 апреля 1965 года ракетой-носителем «Атлас». Предполагалось провести лётные испытания реактора в течение 90 суток. Реактор был разработан компанией Boeing по заказу ВВС и Комиссии по атомной энергии США. Реактор на тепловых нейтронах использовал уран-235 в качестве топлива, гидрид циркония как замедлитель и натрий-калийевый расплав в качестве теплоносителя. Тепловая мощность ре-

актора составляла около 40 кВт. Электрическая мощность, обеспечиваемая термоэлектрическим преобразователем, составляла от 500 до 650 Вт.

Реактор успешно проработал 43 дня – до 16 мая 1965 года. В этот день был впервые включен экспериментальный ионный двигатель, также установленный на борту. Его работа сопровождалась многочисленными высоковольтными пробоями, электромагнитный импульс от которых нарушил работу бортовой аппаратуры. Советский термоэлектрический реактор-преобразователь «Ромашка» был впервые запущен в Институте атомной энергии («Курчатовский институт») 14 августа 1964 года. Реактор на быстрых нейтронах имел тепловую мощность 40 кВт и использовал в качестве топлива карбид урана. Термоэлектрический преобразователь на кремний-германиевых полупроводниковых элементах выдавал мощность до 800 Вт.

Сергей Павлович Королёв намеревался использовать «Ромашку» на космических аппаратах в сочетании с импульсными плазменными двигателями. Следующая ядерная энергетическая установка БЭС-5 «Бук» была использована на спутнике радиолокационной разведки УС-А. Первый аппарат этой серии был запущен 3 октября 1970 года с Байконура («Космос-367»). Сам «Бук» разрабатывался с 1960 г. в НПО «Красная Звезда».

Электрическая мощность установки составляла 3 кВт при тепловой в 100 кВт, максимальный ресурс работы БЭС-5 – 124 (по другим данным 135) суток. Двухконтурная установка имела реактор на быстрых нейтронах БР-5А и термоэлектрический генератор, теплоноситель обоих контуров – эвтектика натрий-калий, температура в первом контуре 700 °С, во втором – 350 °С. Масса всей установки около 900 кг.

Активная зона реактора состоит из 37 твэлов с минимально возможным зазором между ними. Каждый твэл содержит три уран-молибденовых блока длиной по 55 мм и два бериллиевых блока длиной по 100 мм, образующих торцовые отражатели. Общая масса урана 30 кг, обогащение по 235-му изотопу – до 90%. Корпус реактора в виде шестигранной призмы с размером «под ключ» 140 мм окружён боковым бериллиевым отражателем толщиной 100 мм. В отражателе

могут перемещаться параллельно друг другу шесть бериллиевых стержней – органы управления реактором.

Боковой отражатель состоял из отдельных секций, стянутых стальной лентой. Предполагалось, что при сходе спутника с орбиты и попадании его в плотные слои атмосферы лента должна быстро перегореть, отражатель развалиться на части, а активная зона должна сгореть. После неудачного падения «Космоса-954» конструкция была изменена: все ТВЭЛы стали принудительно выбрасываться газовым исполнительным механизмом.

Следующей советской космической ядерной энергетической установкой стала ТЭУ-5 «Тополь» («Топаз-1»), впервые выведенная на орбиту 2 февраля 1987 г. в составе экспериментального КА «Плазма-А» («Космос-1818»). Топливом в реакторе служил диоксид урана с 90 % обогащением, теплоносителем – натрий-калиевый расплав. Реактор имел тепловую мощность 150 кВт, причём количество  $^{235}\text{U}$  в реакторе было снижено до 11,5 кг по сравнению с 30 кг в БЭС-5 «Бук».

В «Топазе» использовался термоэмиссионный преобразователь тепловой энергии в электрическую. Такой преобразователь подобен электронной лампе: катод из молибдена с вольфрамовым покрытием, нагретый до высокой температуры, испускает электроны, которые преодолевают заполненный ионами цезия под низким давлением промежуток и попадают на анод. Электрическая цепь замыкается через нагрузку. Выходная электрическая мощность преобразователя составляла от 5 до 6,6 кВт.

При расчётном ресурсе в один год уже на втором КА «Плазма-А» («Космос-1867») «Топаз» проработал более 11 месяцев.

Реактор-преобразователь «Енисей» («Топаз-2») предназначался для работы в составе спутника непосредственного телевизионного вещания «Экран-АМ», но этот проект был закрыт. Изделие представляло собой реактор, в активной зоне которого находились не традиционные тепловыделяющие элементы, а интегральные электрогенерирующие каналы. Они представляли собой «таблетки» диоксида урана, обогащённого до 96 %, катод, анод, цезиевый канал и всю остальную «обвязку». Тепловая мощность «Енисея» была порядка

115-135 кВт, электрическая мощность 4,5-5,5 кВт. Теплоносителем являлся натрий-калиевый расплав.

В 1992 году США приобрели в России за \$13 млн две ЯЭУ «Енисей» («Топаз-2»). Один из реакторов предполагалось после тщательных наземных испытаний использовать в 1995 г. в «Космическом эксперименте с ядерно-электрической ДУ» (Nuclear Electric Propulsion Spaceflight Test Program). Однако в 1993 году из-за сокращения бюджета было решено ограничиться только наземными испытаниями, а в 1996 году проект был закрыт [12].

Невелик и срок службы реактора – всего около года. Извлечение отработанного горючего и перезаправка на орбите если теоретически возможны, то нерентабельны. Предельная же миниатюризация и упрощение конструкции реактора приводят к тому, что цепная реакция прекращается даже при незначительном падении содержания 235-го изотопа. Лишь применение газообразного горючего, которое можно автоматически подавать в активную зону, позволит исправить ситуацию. Характеристики установок на ядерном реакторе сведены в табл.3.

Таблица 3. Основные параметры энергопроизводящих установок на ядерном реакторе

Характеристики отечественных космических ядерных энергетических установок				
Обозначение энергоустановки	«БУК»	«Топаз-1» («Тополь»)	«Топаз-2» («Енисей»)	«Топаз 100/40»
Назначение	Электропитание аппаратуры КА			Электропитание ЭРД и аппаратуры КА
Источник тепла	Реактор на быстрых нейтронах			
Принцип получения электроэнергии	п/п термо-электрогенератор	Термоэмиссионный реактор-преобразователь		
Теневая защита	Гидрид лития			
Мощность тепловая, кВт	100	150	-	-
Мощность электрическая, кВт	3	более 5 (перв.6.6)	5.5	40 (100**)
Максимальная температура теплоносителя, °С	370	610	610	-
Загрузка <sup>235</sup> U, кг	30	11.5	20	45
Масса установки, кг	890*	980	780	4400
Ресурс, лет	0.5	1	1	7 (1***)
Аппарат, на котором используется установка	УС-А	«Плазма-А»	-	«Космическая звезда»

\* головной блок, без САУ; \*\* в режиме питания ЭРД; \*\*\* включая работу на режиме 100 кВт. п/п – полупроводниковый

Ядерный реактор не может составить конкуренцию радиоизотопному источнику энергии, способному проработать 30-40 лет, прежде чем генерируемая мощность упадет вдвое. Актуальной остается и проблема утилизации реакторов, выполнивших свою задачу. Практикуемый с 1970-х годов перевод активной зоны на «орбиту захоронения» высотой 1000 км означает лишь отсрочку неизбежного. Когда-то их придется возвращать на Землю.

### ***1.3.4 Безопасность космических ЯЭУ и концепция развития космической ядерной энергетики в России***

В нашей стране с самого начала работ по космическим аппаратам с ЯЭУ большое значение придавалось обеспечению экологической безопасности на всех этапах эксплуатации таких КА. С учетом специфики работы реактора, накопления в нем радиоактивности и ее последующего спада были приняты следующие принципы обеспечения безопасности:

- сохранение реактора ЯЭУ в подкритичном состоянии (т.е. без протекания реакции деления) до выхода КА на орбиту, в том числе во всех аварийных ситуациях;
- включение реактора только на рабочей орбите КА;
- обязательное выключение реактора после выполнения спутником заданной программы, а также при возникновении аварийной ситуации;
- изоляция ЯЭУ от населения Земли в течение времени, необходимого для снижения радиоактивности выключенного реактора до безопасного уровня;
- при невозможности изоляции – диспергирование (дробление) ЯЭУ до уровней, обеспечивающих безопасность населения на территории выпадения фрагментов установки.

Эти принципы были в дальнейшем одобрены Комитетом ООН по космосу и закреплены в ныне действующем документе «Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в кос-

мическом пространстве», принятом Генеральной Ассамблеей ООН в 1992 году.

Как видно из истории, использование ядерной энергии в космосе остается опасным и дорогостоящим делом. В настоящее время в России ведется отработка и создание космических ядерных энергетических установок следующего поколения. Ранее созданные установки «Бук» и «Тополь» имели уровень мощности 3-10 кВт и ресурс работы от 3 месяцев до одного года. Имеется практический задел по созданию установок мощностью до 100 кВт с ресурсом работы от 5 до 10 лет.

Применение ядерных энергоустановок в космосе в соответствии с принятой идеологией предусматривает их использование только в тех сферах, где нет возможности решить задачу с помощью других источников энергии. Главным источником энергии на околоземных орбитах являются солнечные элементы, мощность и КПД которых за последнее время значительно выросли. Если еще несколько лет назад разработчики ЯЭУ ориентировались на уровень мощности 20 кВт, то сегодня такой уровень планируется обеспечивать солнечными источниками энергии. В то же время для полетов в дальний космос использование ЯЭУ практически не имеет альтернативы. Для таких масштабных проектов, как экспедиция на Марс, преимущество использования ядерной энергетики не вызывает сомнений. Причем ЯЭУ может служить не только источником энергии для жизнеобеспечения экипажа и питания аппаратуры, но и средством, обеспечивающим движение, в том числе с помощью ядерного ракетного двигателя. В соответствии с современными представлениями это может быть транспортно-энергетический модуль, обеспечивающий вывод аппарата на орбиту или возможность смены орбиты. Такая двухрежимная установка с уровнем мощности около 100 кВт обеспечит вывод космического корабля на рабочую орбиту и уже там обеспечит энергопитание на более низком уровне мощности.

В США после долгого перерыва решили вернуться к использованию космических ЯЭУ. В августе 2006 года президентом Бушем и конгрессом был принят очень важный документ – «Национальная

космическая политика США». В нем недвусмысленно говорится о необходимости достижения государственного приоритета в области космических технологий, в том числе атомных. В США уже ведутся предварительные исследования по созданию первой в мире межпланетной станции, использующей ядерный реактор как источник питания бортовой электрореактивной двигательной установки и научной аппаратуры с высоким уровнем энергопотребления. Станция предназначена для исследования трех из четырех галилеевых спутников Юпитера – Европы, Ганимеда и Каллисто – и потому названа ЛМО (Jupiter Icy Moon Orbiter – Орбитальный аппарат для ледяных лун Юпитера). Она должна окончательно установить, существуют ли под ледяной корой этих больших спутников океаны, в которых может быть жизнь.

Проект ЛМО должен продемонстрировать безопасность ядерных реакторов и надежность эксплуатации ядерных реакторов в космосе. Ядерная энергетическая установка этого аппарата должна дать в 100 раз больше электроэнергии, чем энергетические установки, применявшиеся для межпланетных перелетов ранее. Все это откроет новые возможности для исследований, включая более гибкий план полетов, в меньшей степени зависящий от взаимного расположения планет, а значит дающий большее время для целевых работ в одной миссии.

В 1998 г. Правительство Российской Федерации приняло постановление «О концепции развития космической ядерной энергетики в России».

Ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) космического аппарата содержит энергетический блок, который включает газоохлаждаемый ядерный реактор, машинные преобразователи энергии, радиационную защиту, агрегаты системы теплоотвода с соединяющими их элементами конструкции, а также холодильник-излучатель (рис. 9, 10).

Машинный преобразователь состоит из турбины и компрессора с генератором. Турбина установлена параллельно оси энергетической установки, при этом входной патрубков турбины присоединен к выходному коллектору ядерного реактора. Компрессор с генерато-



ром расположены за радиационной защитой, а вал турбины соединен с общим валом компрессора и генератора рессорой.

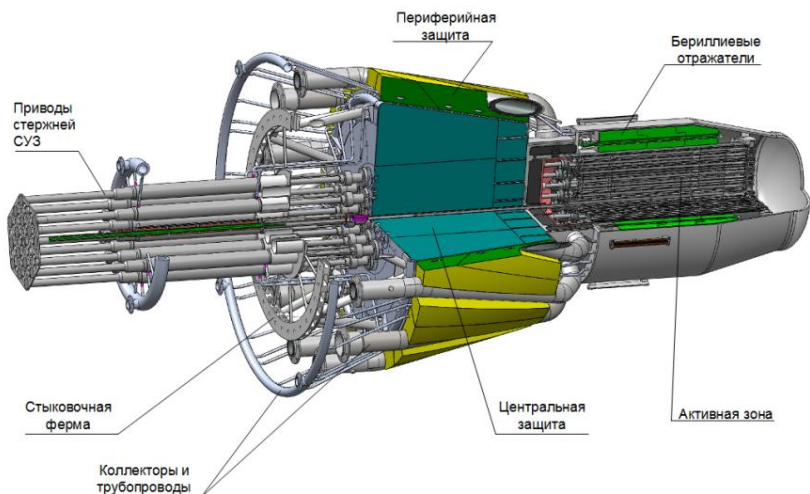
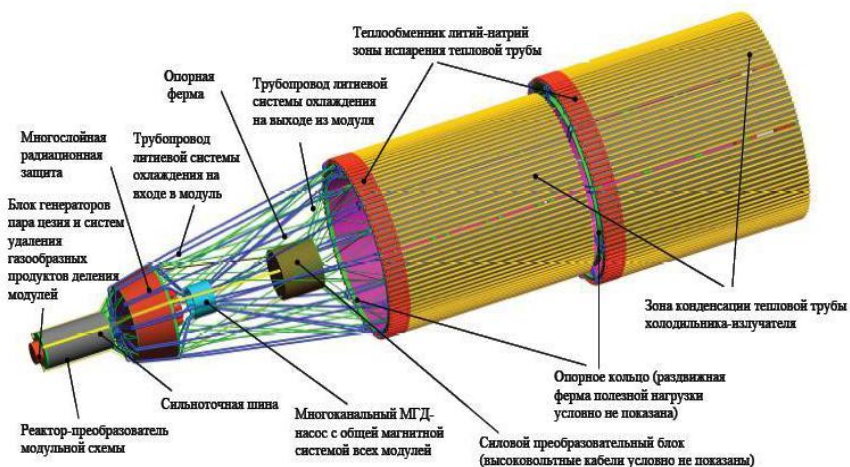


Рис. 9. Ядерная энергетическая установка «Топаз-150»



Масса ЯЭУ – 6900 кг; длина – 14,6 м; максимальный диаметр – 3,8 м.

Рис. 10. Перспективная космическая ЭУ «Геркулес»

За весь период эксплуатации с 1970 по 1988 гг. в составе космических аппаратов морского радиолокационного наблюдения на низкие околоземные орбиты был выведен 31 КА с ЯЭУ «Бук». Максимальная электрическая мощность установки составляла около 3 кВт, в процессе летной эксплуатации ее ресурс был доведен до 4400 часов, что приблизительно равно полугоду.

#### **1.4. Энергетические установки на основе термомеханических преобразователей**

К термомеханическим преобразователям (ТМПТ) относят тепловые машины и установки, преобразующие тепловую энергию в механическую (далее в электрическую) за счет реализации прямого термодинамического цикла, использующего сжимаемое рабочее тело. Источниками тепла для ТМПТ могут служить любые источники, генерирующие тепловую энергию или преобразующие иные виды энергии (ядерная, химическая, излучение...) в тепло.

##### ***1.4.1 Паротурбинная космическая энергетическая установка на цикле Ренкина***

Паротурбинная установка (ПТУ) работает по термодинамическому циклу Ренкина (рис. 11). Цикл состоит из двух изобар и двух адиабат, т.е. изобары подвода теплоты к жидкому рабочему телу и его парам при наивысшем давлении, изобары отвода теплоты отработавшего пара (до его полной конденсации), адиабаты сжатия жидкого рабочего тела в насосе и адиабаты расширения пара в турбине.

Выбор такого цикла определяют два главных фактора: очень малая работа сжатия и наибольшая простота осуществления изобарных процессов подвода теплоты и адиабатных процессов расширения и сжатия. Для ЯЭУ электрической мощностью 500 кВт наиболее целесообразно в качестве рабочего тела принять калий. Температуру на входе в турбину термодинамически выгодно иметь максимально

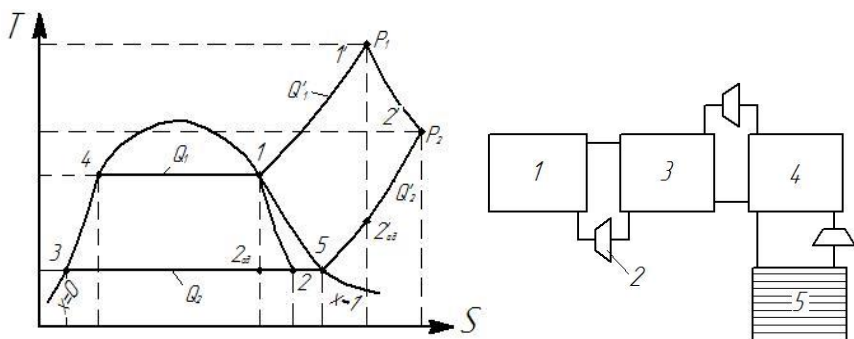


Рис. 11. Общая схема паротурбинной установки:  
 1 – источник тепла; 2 – насосы; 3 – парогенератор;  
 4 – турбогенераторный контур; 5 – холодильник-излучатель

высокой. Для лопаток турбины, выполненных из сплавов на основе ниобия, типичным значением является 1300 К.

Для определения оптимальных массогабаритных характеристик установки температуру на выходе из турбины принимают в диапазоне от 850 до 1050 К. Сухость пара на выходе из турбины для всех щелочных металлов лежит в пределах 0,82–0,9 при КПД турбины  $\eta_T \leq 0,8$ . В расчетах задается адиабатическая сухость на выходе из турбины 0,85. Устойчивая и надежная работа центробежного насоса обеспечивается при температуре рабочего тела  $\sim 640$  К. Повышением температуры рабочего тела в насосе за счет сжатия можно пренебречь, если давление заправки не превышает значений 4–5 МПа. Температуру горячего калия на входе в регенераторы принимают на  $\sim 10$  К выше температуры холодного калия на выходе регенераторов.

Простейшая схема паротурбинной установки включает следующие основные элементы: источник теплоты, турбину, электрогенератор, насос и холодильник-излучатель. Это так называемая одноконтурная схема. Из-за сложности осуществления процессов парогенерации и конденсации в условиях невесомости, а также при использовании ядерных реакторов в качестве источников тепла число контуров увеличивается до двух или трех. В последнем случае парогенерация осуществляется в специальном парогенераторе, связанном с реактором особым контуром теплоносителя, а конденсация – в спе-

циальном конденсаторе, от которого тепло передается холодильнику-излучателю.

Полезная работа цикла равна разности работ турбины и насоса:

$$L_{\text{пол}} = L_T - L_H = L_T \left(1 - \frac{L_H}{L_T}\right) = L_T \delta_{\text{П}},$$

где  $\delta_{\text{П}}$  – доля мощности турбины, затрачиваемая на прокачку рабочего тела (в жидком состоянии) насосом.

Соответственно полезная электрическая мощность установки будет равна:

$$N_{\text{эл}} = M_{\text{сек}} \eta_{\text{э}} \delta_{\text{П}} L_T,$$

где работа турбины может быть легко определена по разности энтальпии в точках 1 и 2 (см. рис. 11) с использованием энтальпийных диаграмм для выбранного рабочего тела.

Общий КПД установки по-прежнему будет определяться отношением полезной электрической мощности к подведенной теплоте, а именно:

$$\eta_{\text{ЭУ}} = \frac{M_{\text{сек}} \eta_{\text{э}} \delta_{\text{П}} L_T A}{M_{\text{сек}} Q_1}.$$

В зависимости от максимальной температуры, определяемой главным образом типом источника тепла, в качестве теплоносителя, с помощью которого тепло подводится к рабочему телу, в настоящее время рассматриваются либо жидкие металлы, либо различные органические соединения. Жидкие щелочные металлы имеют преимущества с точки зрения термодинамической эффективности, но требуют больших затрат мощности на прокачку и являются весьма агрессивными.

В отличие от них органические теплоносители (дифенил, даутерм, толуол) имеют низкую упругость насыщенных паров при сравнительно высокой температуре кипения, требуют небольших затрат мощности на прокачку, обладают малой коррозионной активностью. Их недостатки состоят в низкой термодинамической эффек-

тивности, малых значениях коэффициента теплоотдачи, склонности к термическому разложению при высоких температурах.

Для ядерных источников теплоты в турбинном контуре, как правило, характерно использование щелочных металлов ( $T_T = 800-1000$  °С) или ртути ( $T_T = 500-600$  °С). В этом случае реализуется обычно цикл на насыщенном и влажном паре. Получение сухого пара требует дополнительного нагрева в несколько сотен градусов. Это в большинстве случаев оказывается весьма затруднительным как по условию безопасной работы реактора, так и турбинных лопаток. Для солнечных и изотопных источников тепла при ограниченной максимальной температуре ( $T_T = 500-600$  °С) характерно применение органических теплоносителей, интерес к которым в последние годы резко возрос.

Рассмотрим основные особенности подобных паротурбинных установок. Эти особенности определяются, в первую очередь, свойствами рабочего тела. Положительный наклон правой ветви кривой расширения означает, что можно сохранить пар на выходе из турбины сухим вплоть до входа в конденсатор. В результате нижняя температура цикла (температура за турбиной) оказывается существенно выше, чем температура конденсации, в то время как в цикле на влажном паре эти температуры совпадают. Отсюда – снижение термического КПД данного цикла. Однако значительный температурный перепад между турбиной и конденсатором позволяет перейти к регенеративному циклу, т.е. осуществлять предварительный подогрев жидкости паром, выходящим из турбины. Это дает возможность повысить КПД в 1,5-1,7 раза, т.е. полностью компенсировать снижение термодинамической эффективности из-за повышенных значений нижней температуры цикла.

Для конденсации пара в рассматриваемых установках используются так называемые струйные конденсаторы, применение которых в данном случае особенно целесообразно (по сравнению с установками на воде и жидких металлах). Объясняется это тем, что расход жидкости на конденсацию, определяемый отношением скрытой теплоты парообразования и удельной теплоемкости жидкости, у дифенила, который применяется в струйных конденсаторах в качестве рабочего тела, значительно ниже, чем у других теплоносителей.

В результате затраты мощности на прокачку теплоносителя оказываются незначительными. Струйные конденсаторы снимают также проблему конденсации в условиях невесомости.

Основные задачи и последовательность расчета паротурбинных установок в принципе сохраняются такими же, как и газотурбинных. Отличие состоит только в появлении дополнительных элементов (насосы, конденсатор, парогенератор).

Остановимся на устройстве, рабочих процессах и содержании расчетов установки на органическом теплоносителе с изотопным источником тепла. Схема и рабочий цикл этой установки изображены на рис.12. Здесь линия 1-2 показывает процесс расширения на турбине; 2-3 – повышение давления в диффузоре; 3-4 – отвод теплоты в регенераторе; 4-5 – расширение перегретого пара до критического отношения давлений на входе в камеру смешения струйного конденсатора; 5-6 – конденсация пара; 6-7 – переохладение жидкости в холодильнике-излучателе; 7-8 – повышение давления в насосе; 8-9 – нагрев жидкости за счет теплоты, отводимой от подшипников и генератора; 9-10 – подогрев конденсата в регенераторе; 10-1 – нагрев и испарение в парогенераторе. Конструкция паротурбинной установки с регенеративным циклом показана на рис. 13.

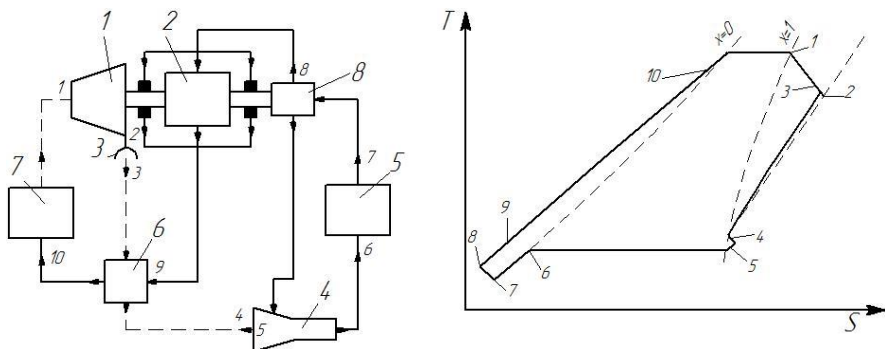


Рис. 12. Схема и рабочий процесс паротурбинной установки на органическом теплоносителе:

- 1 – турбина; 2 – генератор; 3 – диффузор; 4 – струйный конденсатор;  
5 – холодильник- излучатель; 6 – регенератор; 7 – парогенератор; 8 – насос

Выбор рода теплоносителя – даутерма – определил значение верхней температуры цикла (температуры перед турбиной), принятой равной 6-15 К. Для оптимизации основных элементов установки в качестве переменных параметров принимались: степень регенерации, коэффициент восстановления давления в струйном конденсаторе, падение температуры в холодильнике – излучателе.

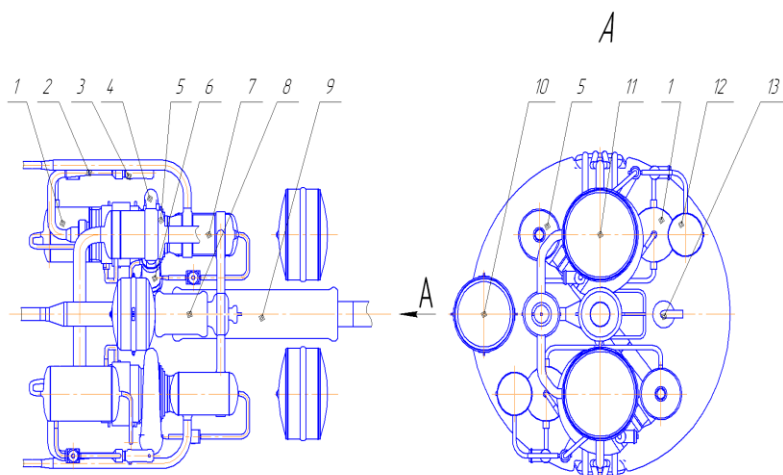


Рис. 13. Схема паротурбинной энергоустановки с регенеративным циклом:  
 1 – регенератор жидкостной; 2 – эжектор; 3 – теплообменник;  
 4 – турбогенератор; 5 – конденсатор; 6 – регенератор паровой;  
 7 – парогенератор; 8 – насос; 9 – насос электромагнитный;  
 10, 11 – компенсационные баки 1 и 3 контура; 12 – емкость пусковая;  
 13 – электромагнитный насос вспомогательного контура

Энергоустановки замкнутого цикла с ядерным источником тепла являются длительно функционирующими. Обобщенная схема установки приведена на рис.14. Привод компрессора 9 может осуществляться либо паровой (сплошные линии на рис.14), либо газовой (пунктирные линии) турбиной. В первом случае создается обычный парожидкостный цикл с парогенератором 4, конденсатором 6 и насосом 5. По аналогичным схемам выполняются также наземные стационарные или транспортные энергоустановки.

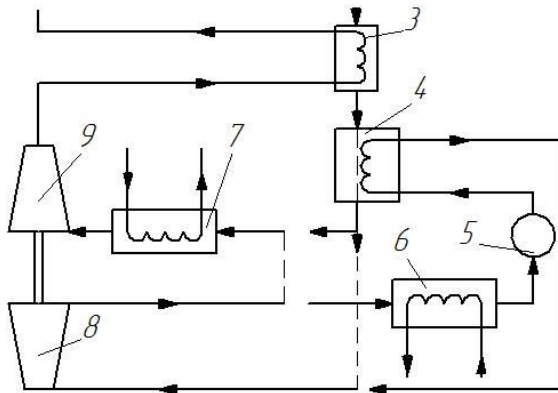


Рис. 14. Обобщенная схема энергоустановок с МГДП на базе «замкнутого» газового цикла с ядерным источником тепла и с приводом компрессора паровой (сплошные линии) или газовой (пунктирные линии) турбиной:  
1 – реактор; 2 – МГДП; 3 – регенератор; 4 – парогенератор; 5 – насос;  
6 – конденсатор; 7 – холодильник; 8 – паровая или газовая турбина;  
9 – компрессор

### 1.5 Термоэмиссионные преобразователи

Различные типы ТЭП разрабатываются для питания систем и оборудования КЛА, в особенности КЛА с ядерными АЭУ. При электрической мощности АЭУ порядка 0,1-1 кВт целесообразно применение РИТЭП и СТЭП. При мощностях более 1 кВт предпочтительны ЯРТЭП, которые наиболее перспективны для космических АЭУ длительного действия. Достоинства ТЭП – большой ресурс, относительно высокий КПД и хорошие удельные энергетические, а также массогабаритные показатели. В настоящее время выполняют ЯРТЭП по интегральной схеме совместно с ТВЭЛ ядерного реактора, при этом ТЭП-ТВЭЛ образуют конструкцию реактора-генератора. Возможно и раздельное исполнение реактора с ТЭП, в котором ТЭП вынесены из активной зоны реактора.

Недостатки ТЭП состоят в нестабильности характеристик и изменении межэлектродных размеров вследствие ползучести (свеллинга), а также в технологических затруднениях при выполнении малых



зазоров между электродами, необходимости компенсации объемного заряда электронов в межэлектродном зазоре (рис.15).

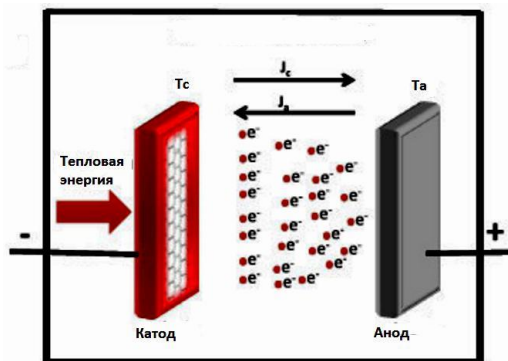


Рис. 15. Схема действия ТЭП

Совмещенные с ТВЭЛ цилиндрические элементарные ТЭП последовательно соединяются в гирлянду, образующую электрогенерирующий канал (ЭГК), размещаемый в активной зоне реактора. Уменьшение объема активной зоны ядерного реактора и массы радиационной защиты достигается при вынесении ЭГК из реактора. При раздельном исполнении ТВЭЛ и ТЭП энергия к ТЭП от ТВЭЛ может подводиться тепловыми трубами. Последние представляют собой устройства для передачи тепла от нагревателя к потребителю (или холодильнику) посредством использования для поглощения и выделения тепла фазовых (газожидкостных) переходов рабочего тела. Перемещение рабочего тела осуществляется капиллярными силами (при наличии «фитиля») или пористого элемента конструкции тепловой трубы), центробежными и электромагнитными силами в зависимости от конкретного устройства тепловой трубы.

Для получения необходимых параметров АЭУ (мощности и напряжения) ЭГК соединяют по последовательно-параллельным схемам. Различают вакуумные и газонаполненные ТЭП, причем газонаполненные ТЭП с парами цезия имеют лучшие показатели. Их характеризуют удельная масса электрогенерирующего канала  $M=3\div 10$  кг/кВт, поверхностная плотность мощности  $P=100\div 200$  кВт/м<sup>2</sup> (на еди-

ницу площади, эмитирующей электроны), плотность тока эмиттера  $I=5\div 8$  А/см<sup>2</sup>, КПД преобразования тепла в электроэнергию  $\eta=0,15\div 0,25$ , рабочий ресурс – более 104 ч (до 5 лет). Вакуумные ТЭП в настоящее время применяются сравнительно мало вследствие сложности технологии изготовления межэлектродных зазоров порядка 2...10 мм, при которых возможны удовлетворительные эксплуатационные показатели преобразователей.

### ***1.5.1 Физические основы работы термоэмиссионных преобразователей***

Работа основана на явлении термоэлектронной эмиссии (эффекте Эдисона) – испускании электронов нагретым металлическим катодом (эмиттером). Физическими аналогами вакуумных и газонаполненных ТЭП могут служить электронные лампы – вакуумные диоды и газотроны. В отдельных случаях вследствие упрощения эксплуатации целесообразно использовать вакуумные ТЭП, но лучшие характеристики имеют, как указывалось, ТЭП, наполненные парами легкоионизирующегося металла – цезия (Cs). Различают межэлектродные газовые промежутки ТЭП с частичной и полной ионизацией. Последние принадлежат к плазменным ТЭП, которые можно отнести к контактному преобразователям.

Процесс преобразования энергии в ТЭП рассмотрим вначале на примере анализа плоской вакуумной модели элементарного генератора (рис.16.) Промежуток  $\Delta$  между металлическими электродами – катодом (эмиттером) 1 и анодом (коллектором) 2, заключенными в вакуумный сосуд 3, откачан до давления 0,133 МПа (примерно 10,6 мм рт. ст.). Электроды и их выводы 4 изолированы от стенок сосуда. К эмиттеру подводится тепловая энергия  $Q_1$  и он нагревается до температуры  $T_1\approx 2000$ К. Коллектор поддерживается при температуре  $T_2 < T_1$  вследствие отвода от него тепловой энергии  $Q_2$ . Распределение электронов по энергиям в металле электрода зависит от его химической природы и определяется среднестатистическим уровнем Ферми. Это тот (наименьший) уровень, на котором располагались бы все электроны при температуре  $T=0$ . Если  $T > 0$ , то вероятность

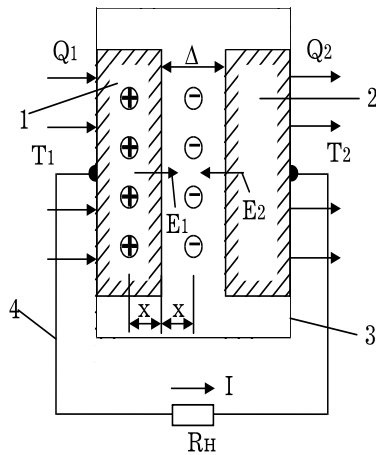


Рис. 16. Расчетная электростатическая модель ТЭП

наличия у электрона энергии уровня Ферми всегда равна 0,5. Вплоть до точки плавления металла уровень Ферми мало зависит от  $T$ .

Вертикальные гирляндные ЭГК образуют батарею ТЭП – электрогенерирующий блок (ЭГБ) реактора. Например, в серийных генераторах «Топаз» (СССР) содержится по 79 ТЭП с суммарной электрической мощностью ЭГБ до 10 кВт. Верхняя часть ЭГК патрубком соединена с термостатом с жидким цезием при  $T \approx 600\text{K}$ , испаряющимся вследствие низкого давления внутри ТЭП. Для поступления паров Cs отдельные ТЭВ в ЭГК сообщены каналами. Цезий имеет наиболее низкий потенциал ионизации  $\phi_{\text{Ц}} = 3,9\text{ В}$ , причем  $\phi_{\text{Ц}} < \phi_{\text{К}}$ . При соударении с горячей поверхностью катода атомы Cs отдают катоду электрон. Положительные ионы  $\text{Cs}^+$  нейтрализуют объемный заряд электронов в зазоре  $\Delta$  в диапазоне давления паров Cs до 100 Па, при температуре  $T_1 < 1800\text{ K}$  достигается бесстолкновительный (квазивакуумный) режим ТЭП. Изменение  $\phi(x)$  в  $\Delta$  для этого режима близко к линейному закону. При  $\Delta \approx 0,1\text{ мм}$  эффективность ТЭП повышается, если совместно вводятся пары цезия и бария. Адсорбируясь преимущественно на аноде с  $T_2 < T_1$ , они снижают его работу выхода.

### 1.5.2 Режимы работы ТЭП

Вакуумный, квазивакуумный и диффузионный режимы в настоящее время хорошо изучены и теоретическое описание их увязывается с экспериментом. В дуговом режиме много неясных вопросов и пока отсутствует теоретическая модель, достаточно хорошо согласующаяся с экспериментом. Хотя этот режим является одним из наиболее перспективных, при расчете генератора приходится основываться больше на экспериментальных данных, чем на теоретических характеристиках.

При разработке реального ТЭП важнейшими проблемами являются:

- создание электродов с определенной работой выхода, минимальной испаряемостью и малым сопротивлением;
- регулирование и поддержание необходимого вакуума и давления паров наполнителя (Cs, Cs+K, Cs+Ba);
- разработка коррозионно-стойкой оболочки корпуса ТЭП, надежного соединения различных частей преобразователя;
- подвод к эмиттеру теплового потока  $10-20 \text{ Вт/см}^2$  и отвод его с коллектора ТЭП.

Эмиттерный узел ТЭП обычно состоит из эмиттера и токовода, с помощью которого эмиттер присоединяется либо к токоведущей шине и гермоводу, либо к коллектору соседнего ТЭП.

Термоэмиссионные преобразователи удачно сочетаются с атомным реактором. Многочисленные расчеты показали, что масса и габаритные размеры такой атомной электростанции открывают благоприятные перспективы применения ее на космических объектах для питания бортовой аппаратуры и электрических двигателей.

Первым в мире (1970 г.) термоэмиссионным реактором-преобразователем стал российский реактор «Топаз». Аналогичные реакторы-преобразователи разрабатываются и в других странах. Так, в частности, достигнута стабильная работа ТЭП в лабораторных испытаниях с вольфрамовым эмиттером и ниобиевым коллектором (КПД 17%, удельная электрическая мощность –  $8 \text{ Вт/см}^2$ ) в течение

46000 ч. Основная цель термоэмиссионного преобразования энергии состоит в генерации электричества для использования в удаленных полярных районах, под водой и в космосе. Исчисляются также возможности использования ТЭП в качестве надстройки к обычным ТЭС. В газонаполненных генераторах компенсация пространственного заряда достигается путем введения положительных ионов в межэлектродное пространство, которое генерируется поверхностной или объемной ионизацией. Для этих целей обычно используют цезий. На рис. 17 изображен газонаполненный трехэлектродный генератор с объемной ионизацией.

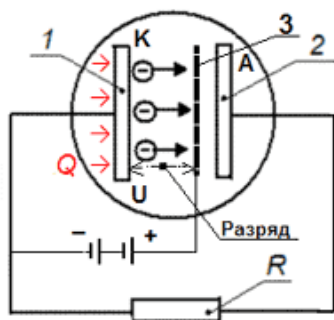


Рис. 17. Основные элементы ТЭП:

1 – катод; 2 – анод; 3 – вспомогательный электрод (экран);  
 $Q$  – нагревательный элемент;  $U$  – напряжение между катодом и экраном;  
 $R$  – нагрузка

Данный трехэлектродный генератор используется при низкой температуре катода, не превышающей 1500 К. КПД установки не дотягивает и до 10%. Теоретические значения эффективности термоэмиссионных преобразователей представлены на графике рис. 18. Показаны значения КПД без учета реальных потерь. Реальные значения существенно ниже и составляют порядка 10~15 %.

Первый в мире реактор-преобразователь «Топаз» был создан в СССР под руководством И.И.Бондаренко. Устройство петлевого канала с 5-элементным термоэмиссионным ЭГК показано на рис. 19.

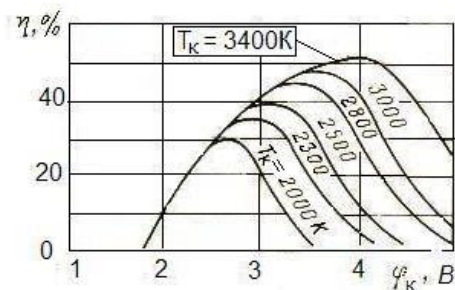


Рис. 18. Эффективность ГЭП в зависимости от температуры

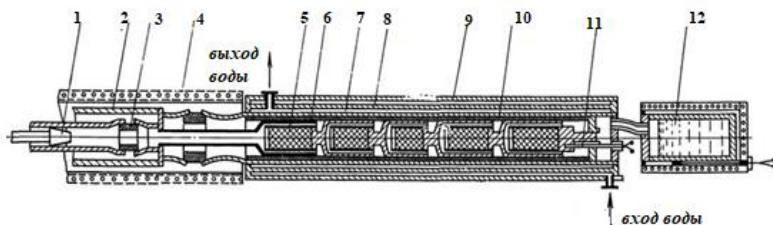


Рис. 19. Конструкционная схема петлевого канала с 5-элементным термоэмиссионным ЭГК:

- 1 – клапан; 2 – электрическая шина; 3 – герметичный ввод;
- 4 – нагреватель; 5 – эмиттер; 6 – коллектор; 7 – газовый зазор;
- 8 – водный теплоноситель; 9 – наружный чехол; 10 – электроизоляция;
- 11 – термопары; 12 – термостат

На рис. 19 показана конструкция термоэмиссионного канала первого в мире ТЭР «Топаз». Испытания каналов были проведены в реакторе Первой АЭС. Эмиттером служит оболочка из сплава на основе молибдена, в оболочку заключено ядерное топливо – двуокись урана высокой плотности, разбавленная для улучшения теплопроводности молибденом. После термовакuumной тренировки оболочка герметично заваривается. Межэлектродный зазор 0,4-0,5 мм обеспечивается системой дистанционирования. Материалом коллекторов служит ниобий. Конструкция заключена в тонкостенный цилиндрический стальной герметичный корпус. Отдельные электрогенериру-

Ющие элементы отличаются содержанием молибдена в топливе по высоте, что обеспечивает требуемый профиль тепловыделения. Более высокие удельные характеристики имеют термоэмиссионные ТВЭЛы, в которых эмиттер изготовлен из сплава на основе вольфрама. Многоэлементный электрогенерирующий канал состоит из шести последовательно соединенных ЭГЭ с диаметром эмиттера 10 мм. Типичные зависимости плотности тока эмиссии от напряжения представлены на рис. 20.

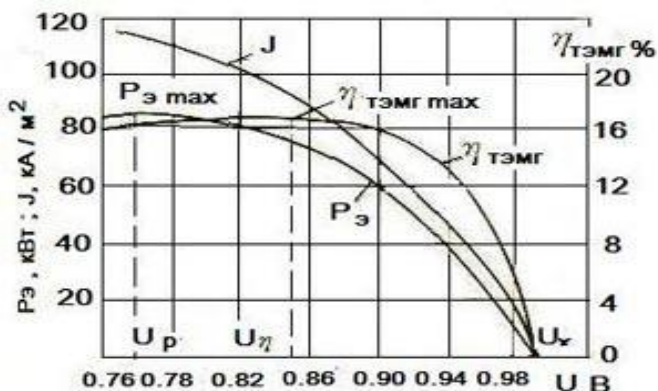


Рис. 20. Характеристики ТЭП

Плотность тока эмиссии (т.е. максимальное количество электронов, которое можно отобрать в единицу времени с единицы поверхности электрода) определяется соотношением Ричардсона [А/см]:

$$i = AT^2 \exp\left[-\varphi / kT\right],$$

где  $A$  – 120 А/см·К – постоянная Ричардсона;  $T$  – температура эмиттера;  $\varphi$  – работа выхода материала эмиттера;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – универсальная постоянная Больцмана. Подводимая к катоду мощность теплового источника ( $P_T$ ) расходуется на электронное охлаждение катода ( $P_3$ ), взаимный теплообмен излучением ( $P_{и}$ ), потери с теплопроводностью ( $P_k$ ) и потери в подводящих проводах ( $P_{пн}$ ), т.е.:

$$P_T = P_3 + P_{и} + P_k + P_{пн}.$$

Электрогенерирующие установки на основе термоэмиссионного преобразователя рассматриваются в качестве базовых вариантов при разработке лунных исследовательских миссий (рис. 21).



Рис. 21. Перспективная энергосистема на базе ТЭП

## 1.6 Термоэлектрические преобразователи

Зеебек в 1821 г. установил, что в разомкнутой цепи, составленной из двух различных материалов, появляется электродвижущая сила, если спаи имеют разную температуру. В дальнейшем это явление использовалось при применении термоэлементов для нагрева и охлаждения, а также получения электрической энергии. Из-за различной концентрации носителей зарядов, характерной для различных металлов, в спаях возникают электродвижущие силы  $e_1$  и  $e_2$ , каждая из которых зависит от температуры спая, т.е.  $e_1 = f(T_1)$ ;  $e_2 = f(T_2)$ . Суммарная э.д.с.  $E = e_1 - e_2 \neq 0$  при  $T_1 \neq T_2$ . При применении в качестве элементов цепи полупроводников соответственно с дырочной и электронной проводимостью  $E = e_1 + e_2$ .



Пельтье в 1834 году обнаружил, что при пропускании тока по замкнутой цепи, состоящей из двух различных проводников, один из спаев охлаждается (холодный спай), другой нагревается (горячий спай). В открытых Зеебеком и Пельтье эффектах меняются местами причинно-следственные связи (рис. 22). Изучение эффектов привело к выявлению следующих закономерностей:

$$E = \alpha(T_1 - T_2); Q = \Pi \cdot I; \Pi = \alpha \cdot T,$$

где  $\alpha$  – коэффициент термоэлектрической движущей силы (коэффициент Зеебека), зависящий от вида проводников, образующих электрическую цепь;

$\Pi$  – коэффициент Пельтье;

$Q$  – тепловой поток, поглощаемый холодным или выделяемый теплым спаем, Вт;

$I$  – ток, А;

$T$  – температура, К.

Третий термоэлектрический эффект открыл Томсон и экспериментально в 1867 году подтвердил Леру. Суть открытого эффекта заключается в том, что при наличии градиента температур по длине проводника прохождение электрического тока вызывает поглощение или выделение теплоты, т.е.

$$Q = S(T_1 - T_2), dq = S \frac{\partial t}{\partial x},$$

где  $S$  – коэффициент Томсона.

При совпадении градиента температур и направления тока теплота Томсона выделяется, а при несовпадении – поглощается. Физическая сущность эффекта Томсона заключается в следующем. В проводниках концентрация и энергия свободных электронов пропорциональны температуре. При повышении температуры одного из концов проводника (или полупроводника с электронной проводимостью) в нем повышается концентрация и энергия свободных электронов. Вследствие этого формируется электронный поток (ток), направленный к холодному спаю. На холодном спае накапливается отрицательный заряд, а на горячем – некомпенсированный положи-

• **Эффект Зеебека**

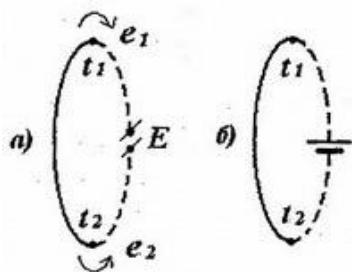
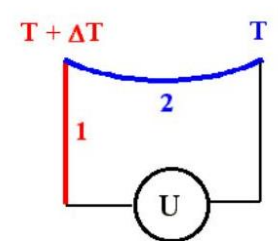
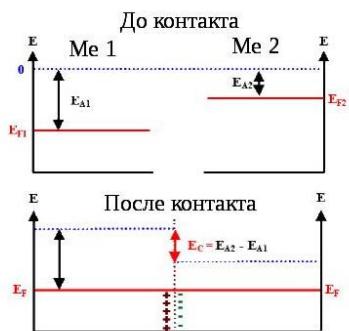


Рис. 22. Иллюстрация физических принципов:  
а – эффект Зеебека; б – эффект Пельтье

тельный. Эти явления имеют свои характерные параметры для каждого вида проводников и объясняют появление эффекта Зеебека. При совпадении по направлению температурного электронного потока и основного тока в цепи интенсифицируется выделение теплоты. Выделяемая теплота определяется суммой величины тока и она больше теплоты Джоуля, рассчитанной по величине основного тока.

Разность этих величин и объясняет эффект Томсона. При несовпадении градиента температур и направления основного тока электронный поток, обусловленный разностью температур, снижает суммарный ток и выделяемая теплота уменьшается. Такой же характер процессов и в полупроводниках с дырочной проводимостью. Но на горячем спае накапливается отрицательный заряд, а на холодных

– положительный. По этой причине в термоэлектрических преобразователях, составленных из полупроводников с электронной и дырочной проводимостью (рис. 23), коэффициенты Зеебека ( $\alpha$ ) имеют противоположные знаки.

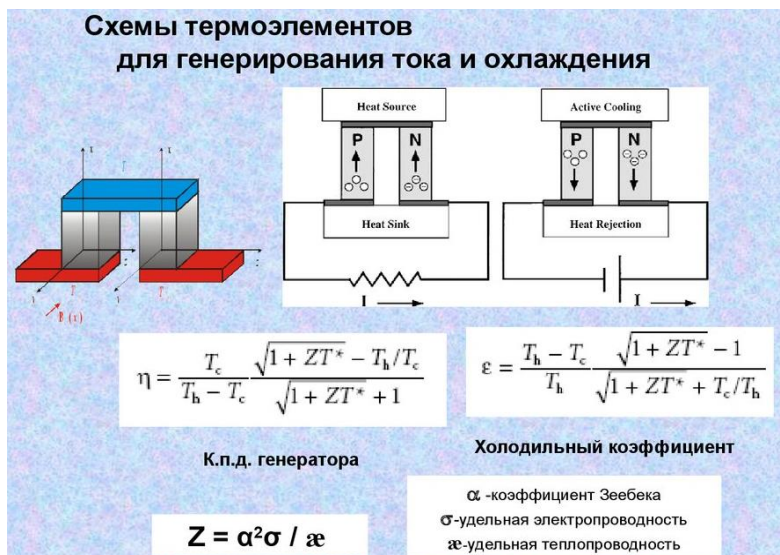


Рис. 23. Схемы термоэлементов

Эффект Зеебека в настоящее время находит широкое применение в технике измерения температур с помощью термопар. Преобразование тепловой энергии в электрическую и электрической в тепловую с помощью проводников из металлов не нашло применения ввиду малости коэффициентов  $\alpha$  и  $\Pi$ . Работы академика А.Ф. Иоффе и его учеников показали, что электротепловые преобразователи могут иметь практическое значение, если в качестве элементов цепи применять полупроводники. У полупроводников коэффициенты Зеебека ( $\alpha$ ) и Пельтье ( $\Pi$ ) значительно больше, чем у металлов.

Охлаждающие термоэлектрические панели представляют собой набор последовательно соединенных полупроводниковых элементов с электронной ( $n$ ) и дырочной ( $p$ ) проводимостью (рис. 24). Соедине-

ние элементов в цепь осуществляется с помощью медных пластин. Цепь образует термоэлектрическую батарею. Термоэлементы в батареях могут образовывать последовательные и последовательно-параллельные электрические цепи [15].

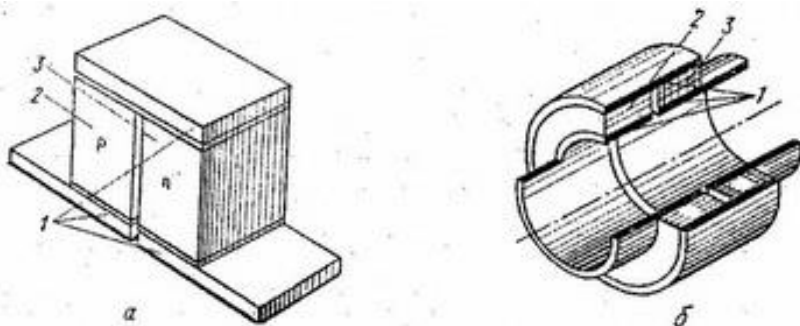


Рис. 24. Полупроводниковые термоэлементы:

а – плоский; б – кольцевой;

1 – медная пластина; 2,3 – полупроводники с  $n$  и  $p$  проводимостью

Место контакта медной пластины с каждым видом полупроводника определяет свое значение коэффициента Пельтье ( $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ). Холодопроизводительность элемента равна:

$$Q_{II} = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot I \cdot T_X .$$

Холодопроизводительность элемента будет большей, если  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  имеет различные знаки. Разность температур  $T_G$  и  $T_X$  приводит к возникновению процесса передачи теплоты от горячего спая к холодному путем теплопроводности, т.е.:

$$Q_T = \left( \lambda_1 \frac{F_1}{l_1} - \lambda_2 \frac{F_2}{l_2} \right) (T_G - T_X),$$

где  $\lambda$ ,  $F$  и  $l$  – соответственно коэффициент теплопроводности, площадь сечения и длина каждой ветви полупроводникового термоэлемента;

$T_G, T_X$  – соответственно температура холодного и горячего спаев.

При прохождении тока в цепи выделяется тепло Джоуля ( $\sim I^2 R$ ), которое тоже уменьшает охлаждающий эффект:

$$Q_{дж} = I^2 \left( \frac{l_1}{F_1 \sigma_1} + \frac{l_2}{F_2 \sigma_2} \right),$$

где  $\sigma$  – удельная электропроводность ветвей термоэлемента.

При этом теплота Джоуля (путем теплопроводности) будет подводиться к холодному и горячему спаям. С учетом приведенных выше замечаний холодопроизводительность элемента составит:

$$Q_D = Q_{\Pi} - 0,5Q_{дж} - Q_T.$$

При одинаковом градиенте температур токи в ветвях имеют противоположное направление, что при равенстве (или близости) коэффициентов Томсона приводит к взаимной компенсации выделяемой и поглощаемой теплоты. В одной ветви термоэлемента теплота выделяется, в другой поглощается. Тепло, поглощаемое холодным спаем, пропорционально току, а выделяемая «джоулева» теплота пропорциональна квадрату тока. При наличии двух противоположных по действию эффектов представляется возможность найти оптимальное значение тока ( $I_{opt}$ ), при котором разность температур между горячим и холодным спаями ( $T_G - T_X$ ) будет иметь максимальное значение ( $\Delta T_{max}$ ). После преобразований получено:

$$I_{opt} = \frac{\alpha \sigma F}{l} T_X;$$

$$\Delta T_{max} = 0,5 Z T_X^2;$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}.$$

Параметр  $Z$  называется эффективностью термоэлемента, или коэффициентом добротности. Наибольшее значение  $Z$  имеют полупро-

водники, с помощью которых можно получить  $\Delta T_{\max}$  до 90 К и  $t_x \approx -50 \dots -60$  °С при температуре горячего спая в области окружающей среды. Применение многокаскадных термоэлектрических охладителей позволяет в настоящее время получить температуры до  $-200$  °С. Типичные диапазоны температур и материала полупроводников ТЭП представлены на рис. 25.



Рис. 25. Температурные диапазоны применения ТЭП

Применение этого способа охлаждения, например в тепловизорах, позволяет получить компактные и удобные в пользовании приборы. Возможна оптимизация параметров термоэлементов по режиму максимальной холодопроизводительности от холодильного коэффициента. Сведения по выбору параметров термоэлементов с максимальной холодопроизводительностью или максимальным холодильным коэффициентом представлены в специальной литературе.

Модуль термоэлектрического преобразователя, используемого для СЭП планируемой миссии NASA на Марсе, показан на рис. 26.

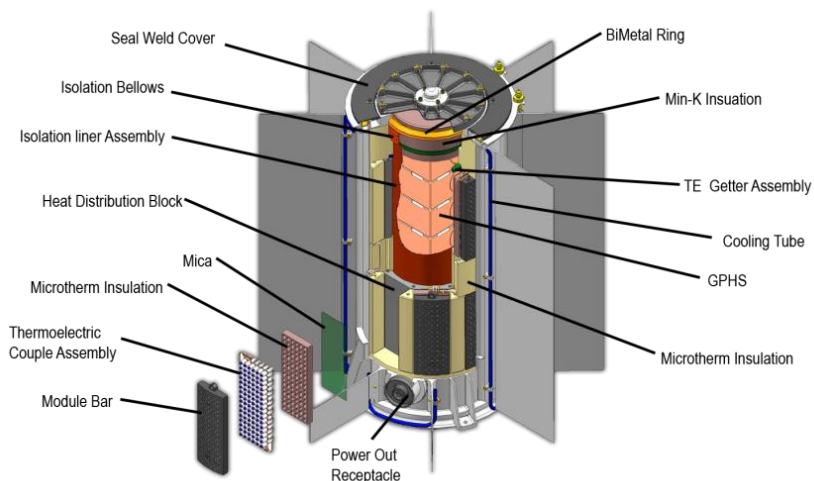


Рис. 26. Радиоизотопный термоэлектрический генератор (eMMRTG)

Применение ТЭП в космосе является наиболее освоенной технологией, обладающей, однако, низкой энерговооруженностью. Термоэлектрический генератор аппарата New Horizons (рис. 27) требует для питания 11 кг плутония. Вырабатываемая им мощность – порядка 240 Вт; каждые четыре года она будет падать примерно на 5% и по достижении Плутона будет составлять около 200 Вт.

Широкое использование термоэлектричества в качестве способа охлаждения в быту и в промышленном производстве следует ожидать при получении веществ с более высокой эффективностью ( $Z \rightarrow \max$ ), работа по созданию которых проводится в настоящее время. Термоэлектрические устройства не имеют рабочих веществ (масла, хладагенты), работают при полном отсутствии шума, обладают большой компактностью и малой массой, реверсивные. Изменение направления движения тока приводит к изменению направления переноса теплоты. Недостатки электротепловых преобразователей: низкая экономичность (на 20–50% ниже по сравнению с парокомпрессорными холодильными машинами) и высокая стоимость.



Рис. 27. Термоэлектрический генератор аппарата New Horizons

Термоэлектрические охладители хорошо управляемы, могут использоваться в ограждениях для переноса теплоты от наружной среды к внутреннему воздуху, например в переходные периоды года (весна, осень), и в качестве запирающего слоя, т.е. в качестве слоя, ограничивающего вынос теплоты из помещения в холодный период года. Наиболее отработанные направления применения термоэлементов: охладители и подогреватели потоков жидкости и газов; небольшие бытовые и автотранспортные холодильники; охладители лазеров, приемников излучения, фотокатодов, электронно-оптических устройств, электронных схем; медицинские приборы для общей и местной гипотермии, криоскальпели, криоэкстракторы; охладители для систем искусственного кровообращения и пересадки органов и т.д.

## 1.7 Электрохимические генераторы (ЭХГ)

### *1.7.1 Электрохимические генераторы (топливные элементы). Основные параметры и характеристики*

К ЭХП будем относить электрохимические генераторы (ЭХГ), т.е. батареи топливных элементов (ТЭ) со вспомогательными устройствами и химические аккумуляторные батареи. Топливным



элементом называется прямой преобразователь химической энергии в электрическую, в котором реакция электрохимического окисления происходит без расхода вещества электродов и электролита. Исходными реагентами служат горючее и окислитель, обладающие запасом энергии химических связей, которая преобразуется в энергию постоянного электрического тока (при получении конечного химического продукта взаимодействия компонентов топлива и выделении некоторого количества тепловой энергии). В обращенном или регенераторном режиме работы ТЭ подведенная к нему электроэнергия преобразуется в химическую энергию реагентов топлива.

Аккумуляторным элементом, входящим в состав химической АБ, называется накопитель электрической энергии при ее превращении в химическую энергию, который осуществляет также и обратное преобразование химической энергии в электроэнергию при изменении состава вещества электродов и участии электролита в токообразующей реакции.

Характерным показателем технического качества ЭХП служит удельная энергия  $W$  на единицу массы преобразователя. Применяемые в ЭХГ различные ТЭ принципиально могут работать на горючем органического или неорганического состава. В качестве окислителя используются преимущественно кислород  $O_2$ , а также перекись водорода  $H_2O_2$ , азотная кислота  $HNO_3$ , галогены  $Cl_2$ ,  $F_2$ .

При выборе рабочих тел ЭХГ учитывают:

- удельную энергию;
- конечные продукты реакции;
- стоимость;
- агрегатное состояние веществ;
- связанную с ним относительную массу тары (контейнеров, баллонов) для хранения реагентов;
- возможность их непрерывного подвода к электродам;
- скорость электрохимического взаимодействия (при наличии катализаторов и при заданных диапазонах температуры и давления).

Наиболее широко для ЭХГ в качестве горючего применяется водород  $H_2$  и гидразин  $N_2O_2$  в связи с их высокой активностью, легко-

стью подвода и отвода конечных продуктов реакции, достаточно высокой удельной энергией. Известны разработки ЭХГ с использованием метана  $\text{CH}_4$ , пропана  $\text{C}_3\text{H}_8$ , а также метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$ , аммиака  $\text{NH}_3$ , имеющих относительно низкую стоимость. Представляют интерес перспективные разработки полутопливных элементов (с подводом только окислителя) на основе встроенного в элемент твердотельного горючего (металлов  $\text{Zn}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Li}$  и др.). Отдельные разновидности компонентов топлива относятся к токсичным веществам, например угарный газ  $\text{CO}$ , гидразин, аммиак, галогены и т.п. Поэтому предпочтительно использование водород-кислородных ЭХГ, в особенности для автономных бортовых объектов. Конечным продуктом реакции данных ЭХГ служат пары воды, эти ЭХГ являются экологически чистыми. После сепарации и удаления электролита вода используется в системах жизнеобеспечения, в частности на КЛА, либо направляется для получения исходных продуктов реакции ( $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$ ) в регенерационных циклах.

Общим достоинством ЭХГ на ТЭ является высокий КПД. Применительно к автономным объектам существенное значение имеет бесшумность работы ЭХГ, отсутствие механически перемещающихся деталей и изнашивающихся частей. Ресурс ЭХГ определяется имеющимся запасом топлива (в открытых циклах) либо долговечностью вспомогательного оборудования в циклах с регенерацией; ресурс ЭХГ может превосходить 104 ч.

Энергетический уровень ЭХГ при мощности АЭУ  $P=10\text{...}100$  кВт характеризуется удельной энергией  $W = (1,5\text{...}2) \cdot 10^3$  кДж/кг на единицу массы генератора, заправленного топливом. (Для ряда разновидностей химических АБ значение  $W$  на порядок меньше.) В перспективе возможно создание ЭХГ мощностью  $P=103$  кВт при КПД  $\eta=0,9$ .

Недостатки ЭХГ состоят в сложности обеспечения сбалансированных электрохимических реакций и в относительно малой удельной мощности  $P$  на единицу массы генератора. Без учета массы запаса топлива параметр  $P = 0,15\text{...}0,2$  кВт/кг несколько ниже, чем в химической АБ. Ввиду специфики электрохимических реакций из ЭХГ нельзя достаточно быстро вывести электрическую энергию. Для обеспечения сбалансированной реакции в ЭХГ необходимо с помо-

пью специальных подсистем обеспечить разделение и дозированную подачу компонентов топлива, а также непрерывное удаление конечных продуктов токообразующей реакции. Показатели ЭХГ достаточно чувствительны к чистоте химреагентов, примеси существенно снижают эффективность ТЭ и их ресурс.

Применение ЭХГ нашли в основном для энергообеспечения АЭУ, в том числе подвижных и стационарных. Имеется значительный опыт, накопленный, в частности, за рубежом (США) по использованию ЭХГ в разработках для космических программ «Аполлон», «Джеммини», «Скайлеб», «Спейс Шаттл» и др. Проводятся многочисленные разработки и исследования по применению ЭХГ для наземных транспортных установок, например электромобилей, а также для морских судов.

### 1.7.2 Физико-химические процессы в ЭХГ

Как и в реакции горения (активируемого, например, зажиганием), стадии токообразующей электрохимической реакции также протекают одновременно, но локализованы в различных областях внутреннего пространства ТЭ. Основные данные некоторых применяемых на практике ТЭ приведены в табл. 4. В качестве типового примера рассмотрим работу водород-кислородного ТЭ. Стехиометрическое уравнение суммарной реакции:

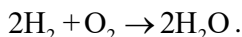


Таблица 4. Теоретические значения удельных показателей ТЭ для разработанных ЭХГ

Химические реагенты	Напряжение элемента, В	Расход на единицу генерируемой энергии, г/МДж			Энергия на единицу массы топлива, кДж/кг
		горючего	окислителя	топлива	
$\text{H}_2 - \text{O}_2$	0.9	10.6	91.6	102.2	9750
$\text{C}_3\text{H}_8 - \text{O}_2$	0.8	27	91.6	118.6	8460
$\text{NH}_3 - \text{O}_2$	0.7	83.4	116.6	200	5000
$\text{N}_2\text{H}_4 - \text{O}_2$	0.9	91.6	91.6	183.2	5450
$\text{N}_2\text{H}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$	0.9	91.6	197.4	289	3470

Уравнение имеет такой же вид, как при горении. Поясним устройство и принцип действия ТЭ, в котором электрохимическая реакция происходит на стыках трех фаз состояния веществ: газообразной (восстановителя  $H_2$  и окислителя  $O_2$ ), жидкостной (щелочного электролита – раствора  $KOH$ ) и твердой (пористых металлокерамических электродов). Схема ТЭ показана на рис. 28. Электроды анод 1 и катод 2 выполнены из композитного материала.

*Примечание:* с учетом влияния необратимых электрохимических процессов в реальных ТЭ удельный расход топлива возрастает в 1,5 – 2 раза, а его удельная энергия снижается в 1,5 – 2 раза по сравнению с соответствующими теоретическими показателями, приведенными в табл. 4 (например, из графитовой керамики с платиновым катализатором). Электроды 1 и 2 отделены слоем электролита – раствора щелочи  $KOH$ , который не пропускает нейтральные молекулы или атомы газов водорода и кислорода. Ионизированные газы, например ионы  $H^+$ , могут дрейфовать сквозь электролит. Корпус ТЭ выполняется из титанового сплава 4, химически не взаимодействующего с  $KOH$ .

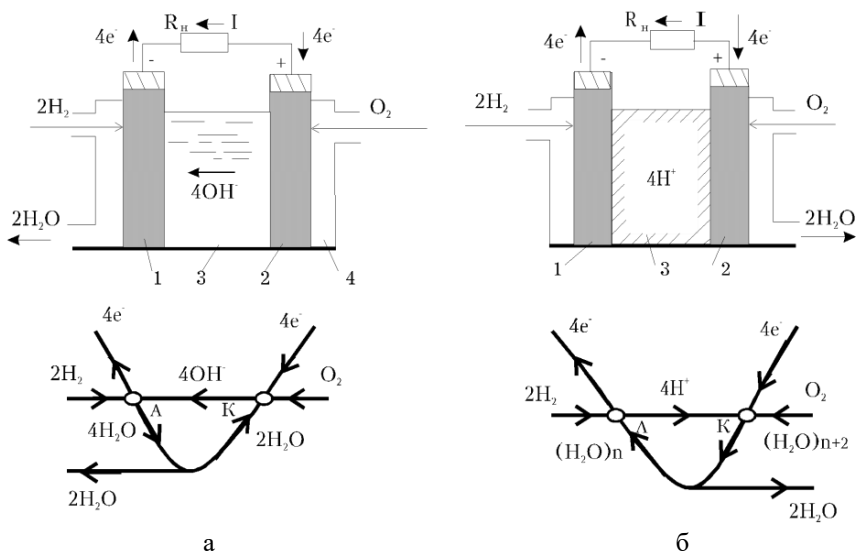


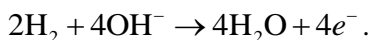
Рис. 28. Схемы водородно-кислородных топливных элементов:  
 а – с жидким электролитом (раствором  $KOH$ );  
 б – с ионообменной мембраной

Внешняя цепь ТЭ замкнута сопротивлением  $R_n$  нагрузки, которое подключено к металлическим наплавкам на электродах. Газообразные компоненты химического топлива – отдающий свои электроны восстановитель  $H_2$  и присоединяющий электроны окислитель  $O_2$  – непрерывно подводятся под избыточным давлением к порам анода и катода из резервуаров с запасом реагентов.

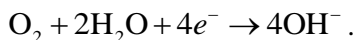
1. На поверхностях анода, смоченных раствором КОН, в электролите растворяется газообразный водород и абсорбируется на стенках пор электрода. В растворе гидроксид калия находится в диссоциированном состоянии:



Водород в присутствии ионов  $OH^-$  легко отдает электроны (окисляется), образуя воду:



2. На поверхности катода аналогичные явления приводят к реакции восстановления кислорода, который в присутствии воды отбирает у этого электрода образовавшиеся свободные электроны:



В итоге этих первой и второй стадий «холодного горения» на аноде образуется избыток электронов, а в примыкающем растворе – недостаток ионов гидроксила  $OH^-$ . На катоде же имеется недостаток электронов, а в окружающем его электролите – избыток ионов  $H^+$ . Вследствие этого протекают следующие две стадии реакции.

3. По внешнему участку цепи от анода к катоду через сопротивление  $R_n$  проходят электроны  $4e^-$ , совершая полезную электрическую работу (направление тока  $I$  противоположно перемещению электронов).

4. В электролите происходит диффузия ионов  $4OH^-$  с катода на анод и посредством ионного тока замыкается электрическая цепь (согласно уравнению непрерывности полного тока  $\operatorname{div} J = 0$ ).

Если сложить реакции для первой и второй стадии, получится результирующее уравнение реакции  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ , конечным продуктом которой является вода. Избыточное количество паров воды  $2\text{H}_2\text{O}$  удаляют из ТЭ, например с помощью продувки с последующей сепарацией или выпариванием. Очищенная от паров электролита вода может направляться для дальнейшей утилизации.

Сбалансированный ход реакций на указанных стадиях у поверхностей электродов определяется равновесием давлений газовой и жидкостной фаз:

$$p_r = p_э + p_k,$$

здесь  $p_r$  – внешнее давление газообразных реагентов (водорода или кислорода );

$p_э$  – гидростатическое давление электролита;

$p_k = (\sigma \cos\theta)/d$  – его капиллярное давление в порах электрода;

$\sigma$  – поверхностное натяжение (Н/м);

$\theta$  – угол смачиваемости;

$d$  – диаметр поры.

В изготовляемых двухслойными электродах ЭХГ поры выполняются с различными значениями  $d$ . Слой, который обращен к газовой среде ( $\text{H}_2$  или  $\text{O}_2$ ) и содержит измельченный катализатор (например, платину Pt), имеет толщину  $\delta \approx 0,5 \div 0,6$  мм и поры с  $\delta \approx 30 \div 50$  мкм.

В обращенном к КОН слое поры имеют  $d$  мкм. Давление  $p_э$  меньше на  $\Delta p \approx (0,3 \div 0,5) \cdot 10^5$  Па, чем давление  $p_r \approx (3 \div 5) \cdot 10^5$  Па, которое препятствует вытеканию электролита. Нейтральные молекулы или атомы газообразных компонентов при этом значении  $p_r$  также не могут проникнуть в электролит, преодолев капиллярные силы. На поверхности электродов обеспечивается равновесие фаз, поэтому через КОН возможно прохождение только ионов, образовавшихся в результате реакций.

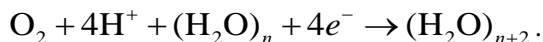
Наряду с КОН в ТЭ возможно использование кислотного электролита – раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Требующееся испарение воды из элементов с жидкостным электролитом, работающих при давлении  $p_r = 10^5$  Па и более, определяет эксплуатацию ТЭ на среднетемпературном (373...523 К) или высокотемпературном (более 523 К) уровне, что обуславливает необходимость наличия в составе ЭХГ ряда техниче-

ски сложных вспомогательных устройств. Для преодоления таких затруднений применительно к АЭУ разработаны водород-кислородные ТЭ с ионообменными мембранами (ИОМ) в виде квазитвердых веществ (гелей), разделяющих разнополярные электроды в ТЭ. Изготавливают ИОМ из фтороуглеродистого аналога – тефлона. На полимерной сетке-матрице закреплены ионы, они могут обмениваться на другие ионы, присутствующие в межэлектронной среде. На практике для ТЭ применяют ИОМ с сульфатными катионами, например,  $\text{SO}_3$ . По своим функциям ИОМ подобна электролиту, она способна противостоять воздействию нейтральных молекул и атомов  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$ . Схема ТЭ с ИОМ приведена на рис. 28,б. Пористые керамические электроды 1 и 2 прижаты к мембране 3. Контактующие с ИОМ поверхности анода и катода покрыты каталитическими слоями металла. Принцип работы ТЭ с ИОМ состоит в следующем.

На аноде подводимый газообразный водород ионизируется по реакции:



Ионы водорода под влиянием градиента их концентрации и соответствующего электрического поля перемещаются сквозь ИОМ к катоду, на котором протекает реакция:



Электроны  $4e^-$  через  $R_n$  поступают к катоду. Полученная вода  $(\text{H}_2\text{O})_n$  под действием градиента ее концентрации возвращается к аноду. Две молекулы воды  $(2\text{H}_2\text{O})$ , образующиеся в элементарном акте реакции, необходимо отводить из зоны реакции, например дренажным устройством. При работе ТЭ гель в ИОМ набухает и находится, как указывалось, в квазитвердом состоянии.

*Внешняя характеристика  $U=f(I)$ .* Отклонение от состояния равновесия при работе ТЭ практически приводит к уменьшению напряжения и снижению КПД по сравнению с их термодинамическими значениями вследствие изменения потенциала катода и анода при прохождении тока в цепи ТЭ. Совокупность этих явлений называют поляризацией. При совершении работы выхода (активации) из ме-

талла электрода в раствор электролита электрон преодолевает потенциальный барьер, образованный двойным слоем разноименных зарядов. На границе «электрод – электролит» наблюдается различие концентраций ионизированных реагентов. Электролит и электроды имеют собственное внутреннее сопротивление. Упрощенно совместное влияние перечисленных эффектов можно учесть с помощью падения напряжения на нелинейном внутреннем сопротивлении ТЭ  $R_{вн}$ . При этом уравнение внешней характеристики приближенно записывается в виде:

$$U = E_n - IR_{вн},$$

где  $E_n$  – ЭДС при нагрузке, учитывающая активационную и концентрационную поляризацию; сопротивление электролита  $R_{эл}$  практически равно  $R_{вн}$  и учитывает «омическую» поляризацию.

Общая форма внешней характеристики ЭХГ показана на рис. 29.

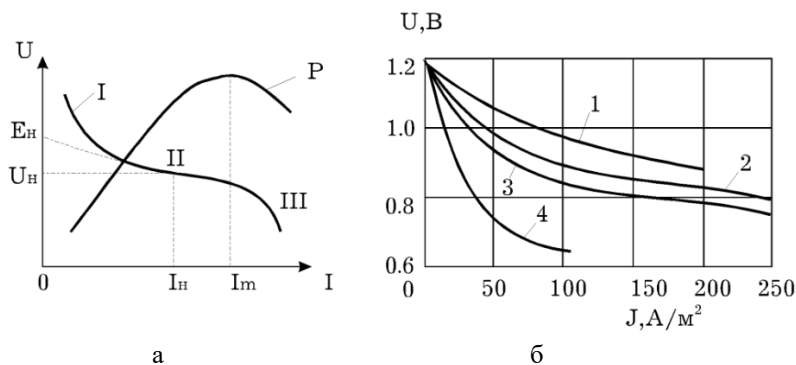


Рис. 29. Характеристики водородно-кислородного электрохимического генератора:

а – общая форма характеристики и зависимость полезной мощности от тока; б – аналоги внешней характеристики зависимости напряжения от плотности тока для ТЭ различного исполнения

(1 – с раствором электролита; 2 – с капиллярной мембраной; 3 – с ИОМ при  $T=355$  К; 4 – с ИОМ при  $T=313$  К)

Большая крутизна  $|dU/dI|$  при малых и повышенных значениях тока обусловлена соответственно поляризацией активации электро-



дов (участок I) и приграничной поляризацией концентрации (участок III). Линейный участок II с относительно малой крутизной  $|dU/dI|$  отражает влияние в основном «омической» поляризации. На этом же рис. 29 приведены аналоги внешних характеристик  $U = U(J)$  для конкретных ТЭ. Геометрическая плотность тока  $J$  (на единицу кажущейся поверхности электрода) может при кратковременных режимах достигать  $0,1 - 0,2 \text{ А/см}^2$ .

ЭХГ в целом, кроме батареи ТЭ и вспомогательного оборудования, включает ряд блоков, снабженных взаимными прямыми и обратными связями для обеспечения функционирования в заданном режиме. Можно классифицировать ЭХГ как техническую систему, состоящую из соответствующих подсистем. Укрупненная схема ЭХГ (рис. 30) в качестве главной подсистемы содержит батарею топливных элементов БТЭ, а также подсистемы: хранения горючего ПХГ и окислителя ПХО; обработки горючего ПОГ и окислителя ПОО; подачи горючего ППГ и окислителя ППО. Наряду с ними имеются подсистемы отводов продуктов реакции ПОПР, теплоотвода ПТО и подсистема контроля и автоматики ПКА, которая соединена двусторонними связями с подсистемами подачи и отвода. К подсистеме потребления и регулирования электроэнергии ППРЭ подключена БТЭ.

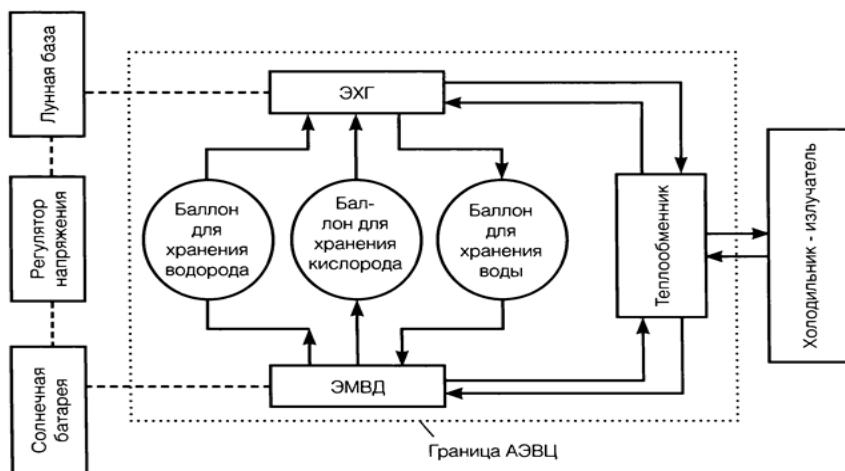


Рис. 30. Энергоустановка на базе ЭХГ

Применительно к водород-кислородному ЭХГ в ПХГ, ПХО осуществляется криогенное хранение сжиженных компонентов топлива, в ПОГ, ПОО производится нагрев  $H_2$  и  $O_2$ , которые в газообразном состоянии подводятся к ППГ, ППО. Эти подсистемы производят дозированную подачу реагентов при заданных параметрах (давлении, температуре) в БТЭ, где происходит реакция электрохимического окисления. Удаление паров воды в ЭХГ выполняет ПОПР. Для ЭХГ, применяемых на КЛА, важное значение имеет ПТО, содержащая холодильник-излучатель, к которому тепло доставляется с помощью циркуляционных устройств с жидкостным теплоносителем.

Для КЛА многоразового использования «Спейс Шаттл» фирма «Дженерал электрик» (США) выполнила ЭХГ с водород-кислородными ТЭ, имеющими позолоченные электроды с платиновыми катализаторами. Электроды разделены ИОМ, во избежание высушивания которых организован отвод тепла от анода, что создает движущий градиент концентрации для возвращения  $H_2O$  к аноду. Отвод воды – продукта реакции – реализован с помощью автоматически действующей схемы с микропористым сепаратором и волокнистыми фитилями, выступающими из сборки ТЭ.

На КЛА многоразового использования «Буран» установлены четыре ЭХГ мощностью по 10 кВт ( суммарная мощность 40 кВт ) серии «Фотон» на водород-кислородном топливе  $H_2 - O_2$ . Напряжение одного генератора, состоящего из 128 топливных элементов, составляет 29,2 В ( схема генератора содержит четыре параллельные ветви, в каждой из которых включено последовательно по 32 элемента). Масса ЭХГ составляет 145 кг, масса его блока автоматики – 15 кг (удельная масса 14,5 кг/кВт, а с учетом блока автоматики – 16 кг/кВт). Ресурс ЭХГ равен 2000 ч, его КПД – 62%.

Для длительной эксплуатации в АЭУ перспективны установки, в которых ЭХГ работает совместно с регенератором компонентов топлива, разлагающим воду на водород и кислород. Электролиз воды требует подведения извне энергии для разрыва химической связи  $H - O - H$ .

При мощностях менее 1 кВт целесообразно интегральное исполнение ЭХГ и электролизера воды (ЭВ). При более высоких электри-

ческих мощностях ЭХГ и электролизер воды в раздельном исполнении имеют лучшие технико-экономические показатели, чем у интегрального устройства. В зависимости от вида подводимой к регенератору Р энергии принципиально возможны различные способы разложения воды. Высоким КПД отличается электролиз при пропускании через  $H_2O$  электрического тока: отношение теплоты сгорания полученного топлива к энергозатратам на выделение  $H_2$  и  $O_2$  достигает 70...80%. В особенности электролиз эффективен для АЭУ на КЛА при использовании Солнца в качестве источника первичной энергии с последующим ее преобразованием в ФЭП.

Разложение воды на  $H_2$  и  $O_2$  можно реализовать непосредственно в ТЭ при пропускании тока в обратном направлении по отношению к току генераторного режима, используя принцип обратимости ТЭ, который выполняет роль электролизной ячейки. При таком способе регенерации компонентов топлива ресурс регенеративного ТЭ ограничен объемом резервуаров для хранения  $H_2$  и  $O_2$ . Известны регенеративные ТЭ, в которых полученные газы  $H_2$  и  $O_2$  хранятся в пористых или губчатых устройствах внутри ТЭ. Данный тип ТЭ по принципу действия формально аналогичен химической АБ, причем электрическая емкость регенеративного ТЭ определяется количеством адсорбированных газов. Как и ТЭ, возможно выполнение электролизной ячейки с электролитом, ИОМ или капиллярной мембраной. Прикладываемое к электролизной ячейке при электролизе напряжение на 30 – 80% должно превосходить напряжение, генерируемое ТЭ, поскольку поляризационные эффекты в электролизной ячейке проявляются сильнее, чем в ТЭ.

Регенеративная электроэнергетическая установка (РЭУ) космической долговременной технологической базы включает несколько идентичных модулей данного типа, средняя энергетическая мощность каждого из которых составляет 12,5 кВт (рис. 31). Газовые баллоны рассчитаны на запас реагентов 9–11 кг, рабочее давление в баллонах поддерживается в диапазоне  $(6,9 \div 27,6) \cdot 10^5$  Па. За один цикл разрядного режима расходуется 3,03 кг реагентов (условная степень разрядки 33%). Регулятор постоянного тока, компенсирующий падение напряжения на выходе ЭХГ, позволяет вдвое повысить ресурс ТЭ, который может доходить до 10 лет.

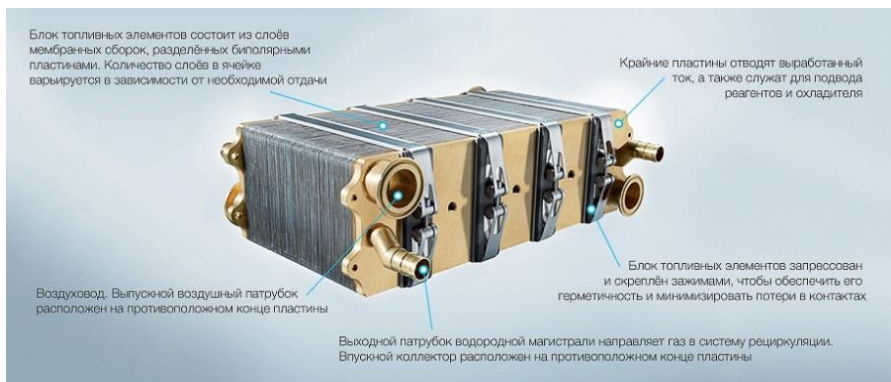


Рис. 31. Блок топливных элементов ЭХГ

## 1.8 Магнитогазо(гидро)динамический генератор

*Магнетогидродинамический (МГД) генератор* – устройство, в котором за счёт явления электромагнитной индукции в канале с наложенным магнитным полем внутри тепловая или (и) кинетическая и потенциальная энергии потока электропроводящей среды преобразуются в электрическую энергию. Рабочим телом МГД генератора могут быть низкотемпературная плазма или проводящая жидкость (жидкие металлы, электролиты). Низкотемпературная плазма в МГД генератора представляет собой продукты сгорания природных или специальных топлив с легко ионизируемыми добавками соединений щелочных металлов или инертных газов, а также с щелочными добавками в равновесном или термически неравновесном состояниях. Используются МГД генераторы в так называемых установках прямого преобразования энергии. Идея МГД-преобразования энергии была высказана М. Фарадеем ещё в 1831 г., а основные принципы устройства современной магнитогазо(гидро)динамики сформулированы в 1907-1922 гг., однако их практическая реализация оказалась возможной только в конце 1950-х гг. в связи с развитием главным образом магнитной гидродинамики, физики плазмы и аэрокосмической техники.

*Устройство и принцип действия.* МГД генератор состоит (рис.32) из канала, в котором формируется поток, индуктора, создающего стационарное или переменное (бегущее) магнитное поле, системы съёма энергии с помощью электродов (кондукционные МГД генераторы) или индуктивной связи потока с цепью нагрузки (индукционные МГД генераторы). Каналы могут иметь различную конфигурацию: быть линейными, дисковыми (с радиальным течением рабочего тела, вихревым), коаксиальными (в т.ч. с винтовым потоком) и др.

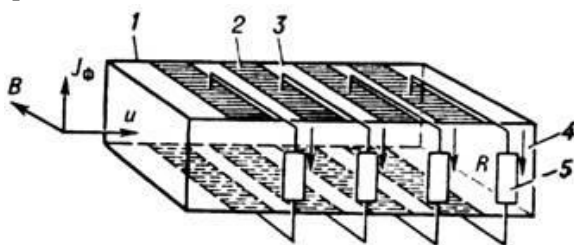


Рис. 32. Схема линейного фарадеевского секционированного МГД генератора: 1 – канал; 2 – электроды; 3 – межэлектродные изоляторы; 4 – боковые изоляционные стенки; 5 – сопротивления нагрузки (стрелками указано направление тока в нагрузке)

Оптимальной в каждом конкретном случае является конфигурация, в которой вектор скорости потока перпендикулярен силовым линиям магнитного поля для заданного типа магнитной системы. Используемые в МГД генераторах магнитные системы выполняются либо на основе традиционной технологии со стальным магнитопроводом (для МГД генератора небольшого масштаба), либо – безжелезными, со сверхпроводящими обмотками. ЭДС и ток, генерируемые в МГД потоке при использовании любого проводящего рабочего тела, направленные нормально к вектору скорости и магнитной индукции  $B$ , называются фарадеевскими.

Если рабочим телом МГД генератора является достаточно разреженная плазма, в которой циклотронная частота для электронов сравнима или больше частоты их столкновений с нейтронами и ионами, то электроны между столкновениями в плазме успевают

пройти заметную дугу по ларморовской окружности, т. е. они будут дрейфовать в направлении, перпендикулярном приложенным скрещенным электрическим и магнитным полям (рис. 33).

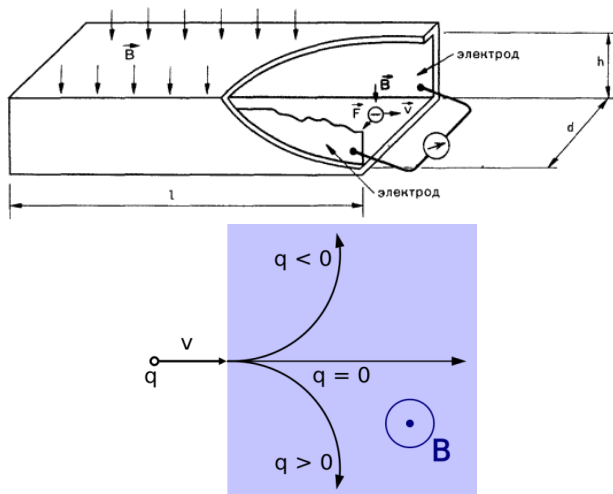


Рис. 33. Разделение положительно ( $q>0$ ) и отрицательно ( $q<0$ ) заряженных частиц под действием магнитного поля В

Как следствие этого дрейфа (Холла эффект) при замыкании цепи фарадеевского тока возникает холловская ЭДС, направленная по потоку, а электропроводность  $\sigma$  становится тензорной величиной. При этом холловский ток снижает эффективную электропроводность  $\sigma_{\text{эф}}$  рабочего тела.

Электрическая энергия в МГД канале генерируется за счёт работы потока  $N_r$  (здесь – отнесённой к единице объёма), совершаемой против объёмных сил электромагнитного торможения:  $N_r = -u[\bar{J}B]$ , где  $J$  – плотность полного тока.

Полезное взаимодействие обусловлено только фарадеевской компонентой тока  $J_{\text{ф}}$ . В то же время генерируемая мощность выделяется в цепи как фарадеевского, так и холловского тока при соответствующем нагружении.

По способу электрического нагружения различают МГД генератор:

- фарадеевского типа (см. рис. 32) с электродами, как правило, секционированными в продольном направлении при соответствующем секционировании нагрузки для предотвращения замыкания по ним холловского тока;
- холловского типа (рис. 34), в котором фарадеевская цепь замкнута накоротко для увеличения холловского напряжения и тока в нагрузке;
- серийного, т.е. с последовательным соединением электродов (рис. 35), где рабочими являются обе компоненты напряжения и тока.

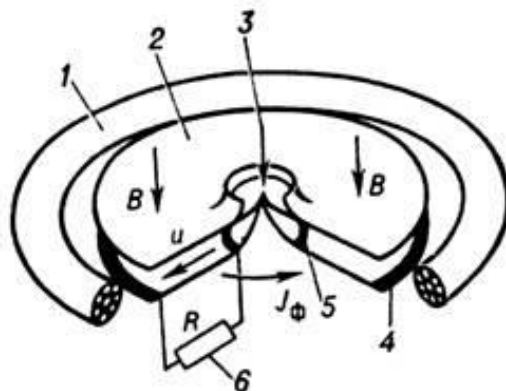


Рис. 34. Схема дискового холловского МГД генератора:

- 1 – обмотка индуктора; 2 – канал генератора; 3 – подвод рабочего тела;  
4 – выходной холловский электрод; 5 – входной холловский электрод;  
6 – нагрузка

Фарадеевский секционированный МГД генератор обладает наилучшими электрическими характеристиками, но наименее удобен для использования из-за необходимости гальванической развязки всех цепей нагрузки. Для холловского МГД генератора требуется единственная нагрузка, но в генераторе этого типа электрический КПД значительно ниже, чем у фарадеевского.

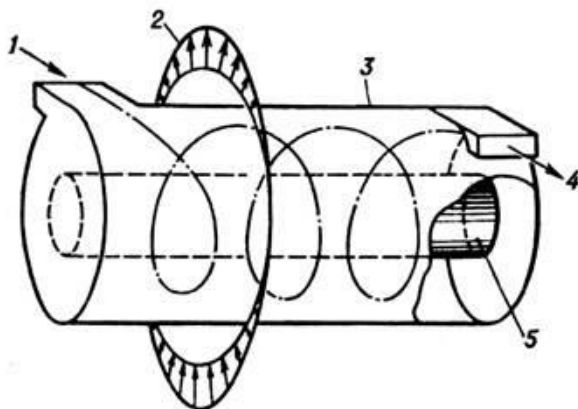


Рис. 35. Схема коаксиального индукционного МГД генератора:  
 1 – подвод рабочего тела; 2 – мгновенная эпюра бегущего магнитного поля;  
 3 – наружный корпус канала МГД генератора, на котором размещается волновая обмотка индуктора (статор); 4 – выхлоп; 5 – стенка и внутренний магнитопровод МГД генератора

Важнейшие характеристики МГД генераторов при их использовании в энергетических установках – мощность  $N$ , внутренний относительный КПД и коэффициент преобразования энергии. Мощность в единице объёма определяется как

$$N = \sigma_{эфф} u^2 B^2 \eta (1 - \eta).$$

Входящие в это выражение характерные величины

$$\eta = N / N_T < 1;$$

$$\sigma_{эфф} < \sigma$$

учитывают влияние на уровень генерируемой мощности джоулева тепловыделения, приэлектродных падений напряжения, электрических утечек и, соответственно, неоднородностей распределения проводимости в поперечном сечении канала и токов Холла. Условием эффективной работы плазменного МГД генератора является уровень энергоснабжения  $N \geq 20-50 \text{ МВт/м}^3$ , при котором относительные по-



тери за счёт теплоотдачи к стенкам и трения несущественны. При использовании термически равновесной плазмы проводимость очень сильно зависит от температуры, а разгон потока достигается за счёт срабатывания части его тепловой энергии. Даже при  $B \approx 5$  Тл (в стационарных условиях это возможно только при использовании сверхпроводящих магнитных систем) необходима начальная температура  $\geq 2500$  °С.

В жидкометаллических магнитных генераторах проблемой является разгон рабочего тела до высоких скоростей, осуществляемый за счёт расширения пара металлов, ускорения им жидкой фазы и последующей конденсации пара в устройствах типа эжектора перед магнитным генератором или путём сепарации жидкой фазы двухфазного потока, набегающего на клин. Эти процессы сопровождаются большой диссипацией энергии, КПД такого разгонного устройства  $\sim 10\%$ , что определяет низкую результирующую эффективность преобразования работы расширения пара в электрическую энергию.

Внутренний относительный КПД характеризует отношение мощности МГД генератора к мощности гипотетического преобразователя без диссипации энергии при одинаковом перепаде давления от входа до выхода устройства. В идеальном случае внутренний относительный КПД несколько ниже электрического. Оптимальное значение этого параметра для плазменного МГД генератора с большим срабатыванием температуры  $\sim 0,7$ ; оно характеризует затраты энергии в термодинамическом цикле на сжатие рабочего тела.

Коэффициент преобразования энергии в МГД генераторе – это отношение произведённой электрической энергии к энергии, подведённой к рабочему телу в плазменном МГД генераторе или к пару жидкого металла в энергетических установках с жидкометаллическим магнитным генератором. Этот результирующий показатель оценивается на уровне 0,1 для плазменных мобильных, автономных энергетических МГД установок, 0,25 – для крупных комбинированных теплоэлектрических станций и 0,1 – для жидкометаллических.

Исследования и разработки МГД генераторов широко развёрнуты в СССР, США, Японии, Нидерландах, Индии и др. В США эксплуатируется опытная МГД установка на угле с тепловой мощностью более 50 МВт.

### 1.8.1 МГД генераторы плазменного типа

При достаточно высоких температурах плазмы (до 3000 К) и интенсивностях магнитного поля до нескольких Тл в МГД генераторах можно получить КПД значительно более высокий, чем у обычных тепловых электростанций, неограниченную мощность, компактность и удешевление цикла производства электроэнергии (рис.36). МГД генераторы могут быть использованы для большой энергетики и успешно применяться в ряде специальных областей техники.

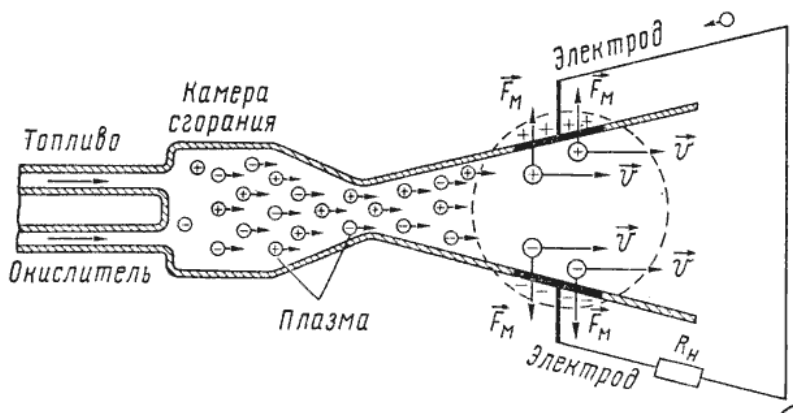


Рис. 36. Схема плазменного МГД генератора с соплом

Легко получить выражение для максимальной мощности МГД генератора. Действительно, единичная мощность любого генератора может быть определена как

$$p = -\bar{J} \cdot \bar{E},$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в рабочем режиме при протекании в рабочем теле тока плотностью  $J$ .

В зависимости от конструкции канала и проводимости рабочего тела напряженность имеет вид:

$$\bar{E} = \hat{\epsilon}[\bar{v} \cdot \bar{B}].$$

Плотность тока определяется соотношением

$$\bar{J} = \sigma \left[ \bar{E} + [\bar{v} \cdot \bar{B}] \right],$$

отсюда:

$$p = -\bar{J} \cdot \bar{E} = \hat{e}(1 - \hat{e})\sigma \cdot v \cdot B^2.$$

Внутреннее сопротивление генератора:

$$\hat{e} = \frac{R}{R + R_i},$$

где  $R$  – сопротивление внешней цепи;

$R_i$  – внутреннее сопротивление генератора.

Полная максимальная мощность  $P$ , которую можно получить от генератора, равна:

$$P = \frac{1}{4} \sigma v^2 B^2 V,$$

где  $V$  – объем рабочего канала.

МГД генераторы принципиально могут быть, как и обычные электрические машины, двух типов:

- генераторы кондукционного типа – генераторы постоянного тока;
- генераторы переменного тока (с бегущим магнитным полем) асинхронного и синхронного типа.

При достаточно низкой проводимости плазмы генераторы индукционного типа должны быть менее эффективными, чем генераторы кондукционного типа. Поэтому здесь рассматриваются генераторы только 1-го типа. Принципиальная схема МГД генератора представлена на рис.37. Канал, в котором движется холодная плазма со скоростью  $v$ , находится в поперечном магнитном поле  $B$ . На электродах канала индуцируется напряжение  $U$  и выводится в нагрузку  $R$ .

Для обеспечения  $B = \text{const}(x, y, z)$ ;  $v = \text{const}(x, y, z)$  необходима соответствующая форма канала. Полное описание процессов, происходящих в МГД генераторе, дается замкнутой системой уравнений

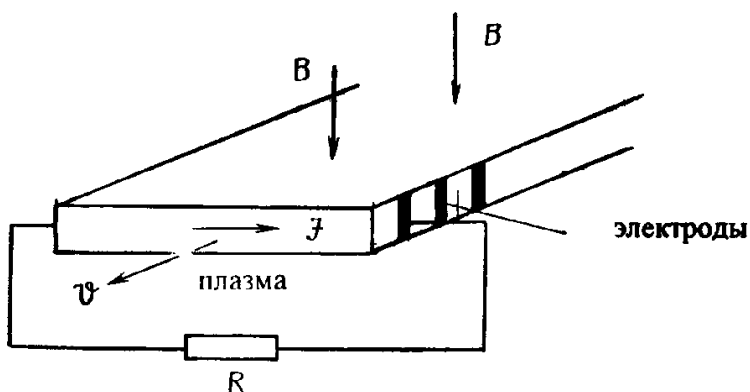


Рис. 37. Принципиальная схема МГД

магнитной гидродинамики и уравнений состояния и переноса тепла (уравнений баланса энергии). В силу низкой проводимости газа магнитное число Рейнольдса мало ( $Re_{\mu} \approx 10^{-2}$ ) и уравнения несколько упрощаются. Однако число Рейнольдса  $Re \approx 10^6$ , т.е. режим в канале турбулентный. Число Гартмана велико ( $M \approx 100$ ). С учетом сжимаемости газа и других осложняющих факторов точное решение проблемы МГД генерации энергии составляет очень сложную задачу. Достаточная сложность появляется и при учете электронных токов Холла, так как они сравнимы с кондукционным током. Для исключения влияния эффекта Холла токоотводящие электроды секционируются и к каждой их паре, расположенных друг против друга, подключается независимая нагрузка.

Выясним теперь порядок основных величин, характеризующих работу плазменного МГД генератора. Из рис. 38, на котором приведены скорости газа от разности температур для криптона, аргона, продуктов сгорания органического топлива, а также гелия и водорода, непосредственно следует, что при  $\Delta T = 1000$  К могут быть получены скорости порядка  $10^3$  м/с.

На рис. 39 приведена средняя плотность мощности в зависимости от скорости газа. Индукция здесь и далее ориентировочно принята 2 Тл.

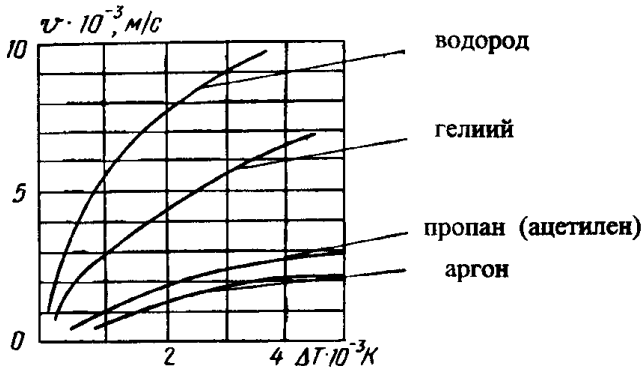


Рис. 38. График скорости газов от разности температур для криптона

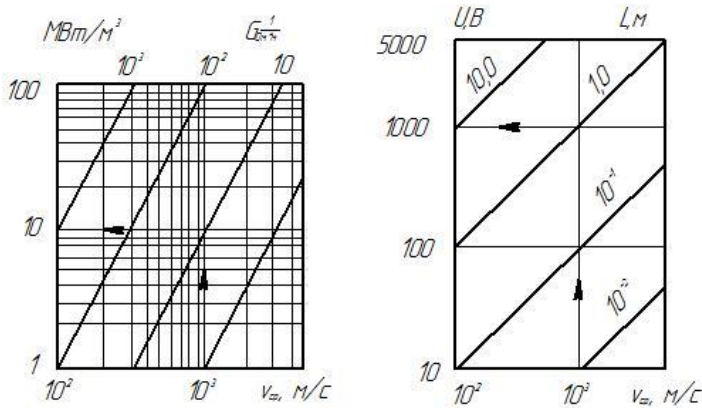


Рис. 39. Средняя плотность мощности и генерируемое напряжение в зависимости от скорости газов

На рис.39 показана зависимость генерируемого напряжения от скорости газа. При расстоянии между электродами около 1 м и скорости  $10^3$  м/с напряжение получается около  $10^3$  В.

Из приведенных зависимостей следует, что при достижимых скоростях  $v = 10^3$  м/с и проводимости газа  $10 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$  длина генераторного канала должна быть не меньше 110 м, так как в длинных ка-

налах будут большие потери тепла на стенках канала, а в коротких – неудовлетворительные электрические показатели. Давление газа в канале может составлять 1...10 атм.

В наше время прорабатываются серьезные проекты по созданию плазменных ускорителей для космических ракет большой грузоподъемности, так как МГД генератор, как и электрическая машина, обладает принципом обратимости.

В основе главной ДУ «Аякса» – ПВРД, работающего в диапазоне чисел  $M$  от 6 до 16, лежит концепция магнитоплазмохимического двигателя (рис. 40).

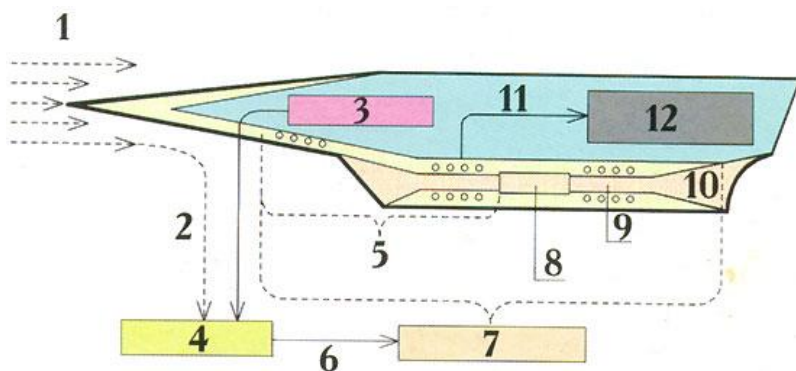


Рис. 40. Схема концепции ВКС «Аякс»:

- 1 – набегающий поток воздуха; 2 – аэродинамическое тепло;
- 3 – топливо; 4 – система химической регенерации тепла;
- 5 – воздухозаборник, управляемый МГД генератором;
- 6 – модифицированное топливо; 7 – МПХД; 8 – камера сгорания;
- 9 – МГД ускоритель; 10 – сопло; 11 – электрическая энергия;
- 12 – система управления аэродинамическими характеристиками

Его цикл включает МГД контур преобразования энергии, позволяющий управлять параметрами входного потока и его профилем в большом диапазоне скоростей при фиксированной геометрии воздухозаборника. Электроэнергия МГД генератора используется для создания пучков плазмы, уменьшающих аэродинамическое сопротивление ВКС, увеличивающих проводимость потока в МПХД, а

также увеличивает тягу двигателя в МГД ускорителе, стоящем позади камеры сгорания.

### *1.8.2 Газофазные ядерные двигатели для космических аппаратов*

Космические энергетические установки проектировались по открытой и замкнутой схемам. Если рабочее тело выбрасывается через реактивное сопло наружу, то установка представляет собой ядерный ракетный двигатель открытой схемы. В качестве рабочего тела используется водород, в который для обеспечения электропроводности и поглощения лучистого теплового потока добавляются присадки в виде паров NaK и Li, а также вольфрамового порошка (при этом одновременно достигается приемлемая температура водорода у стенки камеры). Такой ЯРД имел бы чрезвычайно высокие удельные характеристики (удельный импульс порядка 2000 : 3000 с). Если установка спроектирована таким образом, что рабочее тело выбрасывается наружу через МГД генератор с высоким КПД, то имеем ЯКЭУ открытой схемы. Двигательная энергетическая установка открытой схемы (рис. 41) включает в себя однополостной реактор с кольцевым выходным каналом и газофазным твэлом (ГФТЭ) с застойной плазменной зоной ядерного горючего. Стабилизация зоны осуществляется с помощью мощного внешнего соленоида. Применение двигателя такой схемы по экологическим соображениям возможно лишь на космических аппаратах, но не на носителях, стартующих с Земли. Для обеспечения энергией различных потребителей, в том числе соленоида и электропривода насосов, в установке предполагалось использовать комбинацию сопла и МГД генератора. ЯРД и ЯКЭУ, помимо схемного различия, отличаются степенью использования энергии газового потока в МГД генераторе: в первом случае преобразуется в электроэнергию не более 2 %, а во втором – 30...40 %.

В установках замкнутой схемы преобразователем энергии является МГД генератор, а все рабочие компоненты циркулируют по контуру, не имеющему связи с внешней средой. В этом случае получаем ЯКЭУ, имеющую весьма высокий КПД (30-40%), низкие значения

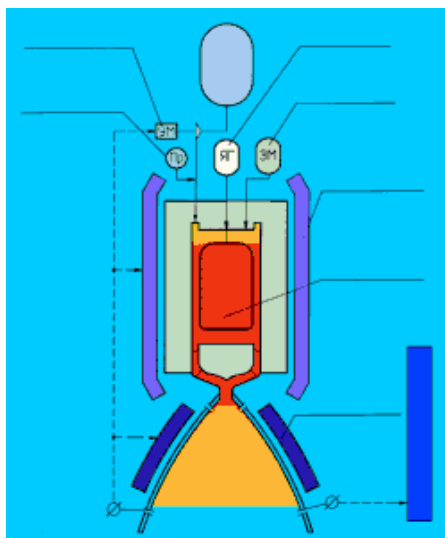


Рис. 41 – Двигательная энергетическая МГД установка открытой схемы

удельной массы преобразователя и удельного расхода рабочего тела. Присадки, вводимые в рабочее тело, помимо всего прочего призваны способствовать МГД взаимодействию. Рабочим телом является пар NaK в смеси с гелием. Выделяющееся избыточное тепло сбрасывается в космическое пространство с помощью излучателей. Вырабатываемая энергия используется для различных целей, одним из ее потребителей может быть электроракетный двигатель.

Преимуществом использования в замкнутых схемах ГФЯР, в котором вместо твердых твэлов используются газообразные, является принципиальная возможность обеспечения весьма длительного функционирования за счет соответствующей подпитки горючим взамен выводимых из контура во внешнюю среду продуктов ядерных реакций. Существенное значение имеет и то обстоятельство, что в замкнутых схемах требование к выносу ядерного горючего из реактора вместе с рабочим телом менее строгое, чем в открытых. Это позволяет рассматривать более простую организацию процессов, допускающих большую степень смешения ядерного горючего и рабочего тела. При этом отпадает необходимость в магнитной стабилизации



ции – плазменная зона из застойной превращается в струйную. Использование нескольких таких зон (многополостной реактор) улучшает массогабаритные характеристики ГФЯР.

Известно, что между тепловой мощностью реактора и возможностями обеспечения приемлемого температурного режима элементов конструкции существует определенная зависимость. Исследованиями было установлено, что оптимальная тепловая мощность ГФЯР открытой схемы должна быть не ниже 2 ГВт, а замкнутой – 300 МВт (при давлении в рабочей камере порядка 1000 кгс/см<sup>2</sup>).

Концептуальная разработка ядерной двигательной-энергетической установки для обеспечения марсианской экспедиции является последней по времени, вобравшей в себя весь предшествующий опыт. Установка основана на комбинированном однополостном газофазно-твердофазном реакторе трансформируемой конструкции массой 57,5 т. Тепловая мощность реактора – 2,14 ГВт. Твердофазные тепловыделяющие сборки (ТФТС), размещенные по кольцу вокруг центральной полости реактора и снабженные приводными механизмами, обеспечивают необходимый уровень нейтронного потока и критичность при запуске, когда ядерное горючее в полости газофазного твэла отсутствует. По мере подачи и накопления в центральной полости ядерного горючего, т.е. образования плазменной зоны и формирования газофазного твэла, ТФТС из активной зоны извлекаются, а реактор превращается в ГФЯР.

Благодаря трансформируемой конструкции установка может работать в двух режимах:

- двигательном (газофазном) с тягой 17 т при удельном импульсе 2000 с, имеющем место на разгонных и тормозных участках траектории;
- энергетическом (твердофазном) с электрической мощностью 200 кВт для обеспечения внутренних нужд космического аппарата без расходования рабочего тела, применяемом на маршевом участке траектории. Этот режим обеспечивается замкнутым газотурбинным контуром с гелий-ксеноновой смесью в качестве рабочего тела, преобразованием тепловой энергии в электрическую с КПД 20 % и

сбросом избыточного тепла через холодильник-излучатель (цикл Брайтона).

На двигательном режиме работы электроснабжение обеспечивается встроенным в сопло многополюсным МГД генератором мощностью 25 МВт с электродами и шинами возбуждения, ориентированными по образующим сопла.

Минимизацию массогабаритных характеристик ГФЯР обеспечивают:

- применение в качестве ядерного горючего урана  $U^{233}$ ;
- максимально возможное использование в замедлителе-отражателе реактора металлического, в том числе крупнокристаллического бериллия, а в остальной части – графита;
- максимально возможное использование для высокотемпературных элементов конструкций рабочей камеры тугоплавких металлов улучшенного изотопного состава, а для силовых корпусов реактора – высокопрочных титановых сплавов и упрочняющих углекомполитов;
- применение для сильноточных систем магнитной стабилизации, возбуждения МГД генератора и электропривода насосов гиперпроводящего алюминия (чистотой 0,9999), допускающего при жидководородном охлаждении плотность тока 50...100 А/мм<sup>2</sup> при удельном сопротивлении в десятки раз ниже, чем у меди.

## 1.9 Химические термомеханические преобразователи

Химические термомеханические преобразователи (ХМПТ) могут быть применены на орбитальных и лунных станциях в качестве аварийного или резервного источника энергии при наличии компонентов топлива горючего и окислителя.

Необходимым этапом рабочего процесса всех термомеханических преобразователей прямого цикла является превращение химической энергии в тепловую в процессе горения. Поэтому их удобно рассматривать, разделив по месту осуществления горения на три группы: двигатели внешнего, внутреннего и смешанного горения.

Двигатели внутреннего сгорания аналогичны наземным транспортным и стационарным ДВС, только окислитель и горючее для осуществления рабочего процесса заранее запасаются и хранятся в хранилищах. В частности, компонентами для ХМПТ могут быть основные компоненты, применяемые в ракетах.

### **1.9.1 Обобщенный цикл термомеханических преобразователей**

Общие для ХМПТ вопросы заключаются в следующем:

*Учет полной энергии химических энергокомпонентов.* Обычно в качестве критерия экономичности ХМПТ, работающих на газообразных энергокомпонентах, транспортируемых в баллонах под высоким давлением (изображение термодинамических циклов на рис. 42), рассматривается величина отношения адиабатой работы  $W_{TS}$  к тепловому эквиваленту  $Q'_x$  химической энергии израсходованных энергокомпонентов  $n_{in} = W_{TS} / Q'_x$ .

Однако при этом не учитываются:

- работа  $W_{s\text{ упр}}$ , недополучаемая из-за потерь упругостной энергии  $E_{\text{упр}}$  энергокомпонентов вследствие дросселирования их в регуляторе;
- работа  $\Delta W$ , которая могла бы быть получена при использовании тепла окружающей среды в случае изотермического опорожнения баллонов;
- тепловая  $Q''_x$  и упругостная  $E''_{\text{упр}}$  энергии неиспользованной части энергокомпонентов, остающихся в баллоне при давлении не более  $p_1$  (давление впуска).

На рис. 42 представлены теоретические циклы следующих типов двигателей:

а) с предвключенной поршневой расширительной машиной (РМ) и с изохорным подводом тепла;

б) с предвключенной турбиной РМ с изохорным подводом тепла;

в) то же, что и б), но подвод тепла изобарный;

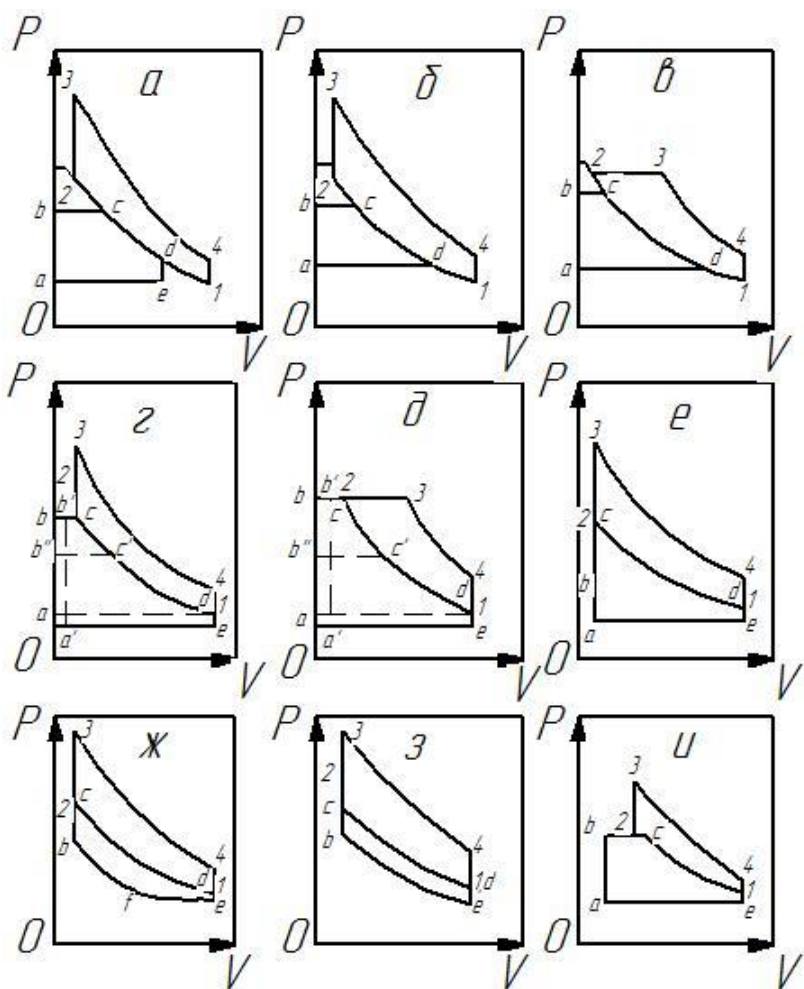


Рис. 42. Теоретические циклы двигателей внутреннего сгорания

г) с изобарным впуском энергокомпонентов и изохорным подводом тепла;

д) то же, что и б), но с изобарным подводом тепла;

е) с «мгновенным» изохорным впуском энергокомпонентов и изохорным подводом тепла без поджатия остаточных газов;

ж) то же, что и е), но с частичным поджатием газов;

- з) то же, что и е), но с полным поджатием остаточных газов;  
 и) с выпуском жидких энергокомпонентов по изобаре и разложением одного из них с выделением тепла по политропе 2-3, близкой к изохоре (РМ – расширительная машина).

При учете всех этих величин выражение КПД примет вид:

$$\eta_{\text{МПД}} = \frac{W_{TS} + W_{S_{\text{уип}}} + \Delta W}{Q'_{\text{x}} + Q''_{\text{x}} + E_{\text{уип}} + E''_{\text{уип}}}$$

Основные из изображенных на рис. 42 циклов можно свести к одному – обобщенному (рис. 43).

Если известны:

- $p_1$  и  $T_1$ ;
- степень повышения давления в цикле  $\lambda = p_3/p_1 = p_3/p_6 = p_4/p_6$ ;
- степень поджатия остаточных газов:  $\delta = v_1/v_2$ ;
- степень предварительного расширения при изобарном подводе тепла:  $\epsilon_p = v_4/v_3$ ;
- степень адиабатного расширения  $\epsilon_p = v_5/v_4$  (при этом  $\lambda_1 = p_2/p_1 = \delta^k$  и  $\lambda_2 = p_4/p_5 = \epsilon_p^k$ );
- полная степень расширения  $\epsilon_{\text{пн}} = \epsilon_p = v_6/v_3$ , то получим

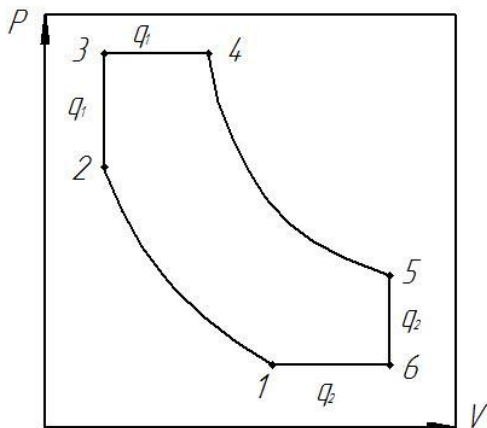


Рис. 43. Обобщенный вид ХТМП

следующее выражение для КПД:

$$\eta_{\tau\Sigma} = 1 - \frac{\varepsilon_{pn} \left( \frac{\lambda}{\varepsilon_p^k} - 1 \right) + k(\varepsilon_{pn} - \delta)}{\lambda - \delta^k + k\lambda \left( \frac{\varepsilon_{pn}}{\varepsilon_p} - 1 \right)}.$$

Отсюда получим формулы КПД других циклов, а также цикла пневматического двигателя. Так, например, КПД цикла «жж» (см. рис. 42) при  $\varepsilon_{pn} = \varepsilon_p$ :

$$\eta_{t(\text{жж})} = \frac{(\lambda - \varepsilon_p^k) / \varepsilon_p^{k-1} + k(\varepsilon_p - \delta)}{\lambda - \delta^k}.$$

Для цикла «зз» (цикла ДВС с изохорным подводом тепла) – при  $\varepsilon_{pn} = \varepsilon_p$ ,  $\varepsilon'_p = 1$  и  $\varepsilon_p = \delta$ :

$$\eta_{t(\text{з})} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_p^{k-1}}.$$

### 1.9.2 Двигатель Эррена

Дизельный двигатель Эррена был предложен в 1936 г. Это обычный дизель, приспособленный для работы не только на жидком углеводородном горючем, но и на газообразном – водороде. В отличие от других газовых двигателей и дизелей подача газа, находящегося на ППА в баллонах под высоким давлением, в двигателе Эррена происходит не в процессе всасывания воздуха (или кислорода), а в процесс сжатия его ближе к концу сжатия. Как известно, КПД обычных дизелей на частичных нагрузках ниже, чем на полной, вследствие уменьшения коэффициента наполнения и эффективного давления сжатия, так как регулирование осуществляется изменением подачи воздуха (количественное регулирование). В двигателе Эррена регулирование мощности происходит путем изменения расхода газа

при постоянном расходе воздуха или кислорода (качественное регулирование). Поэтому даже при малых нагрузках среднее эффективное давление сжатия выше, чем у обычных дизелей. Эта особенность имеет важное значение для двигателей, работающих с противодавлением (например продукты сгорания с большим давлением используются для создания тяги).

Двигатель Эррена может работать:

- 1) только на жидком горючем;
- 2) на жидком горючем с подачей газообразного горючего;
- 3) только на газообразном горючем;
- 4) с применением вместо воздуха чистого кислорода (в этом случае для снижения температуры рабочего тела в цилиндр подается вода или водяной пар).

Испытанный образец такого двигателя работал на всех указанных энергокомпонентах с одним видом газообразного горючего – водородом, но предполагалось, что он может успешно работать и на любых других газообразных горючих.

На рис. 44 показано схематически устройство двигателя Эррена для работы на  $H_2$  и  $O_2$ . Водяной пар служит охлаждающим балластом; после выпуска из цилиндра он конденсируется и подается в устройство, где конденсат испаряется, а затем снова поступает в цилиндр.

Водяной пар, образовавшийся в результате сгорания  $H_2$  и  $O_2$ , также конденсируется и поступает в камеру электролитического разложения, где снова получают  $H_2$  и  $O_2$ . Эти энергокомпоненты направляются обратно в двигатель для выполнения функций топлива.

В оборудование такого двигателя включается электрогенератор, позволяющий разлагать под давлением собранную воду на  $H_2$  и  $O_2$ . Таким образом, за борт никакие продукты (и даже вода) не выбрасываются.

Термодинамическая теория двигателя Эррена не имеет особых отличий от общеизвестной теории дизелей, поэтому излагать ее здесь нет необходимости, приведем только его разновидности (рис.45).

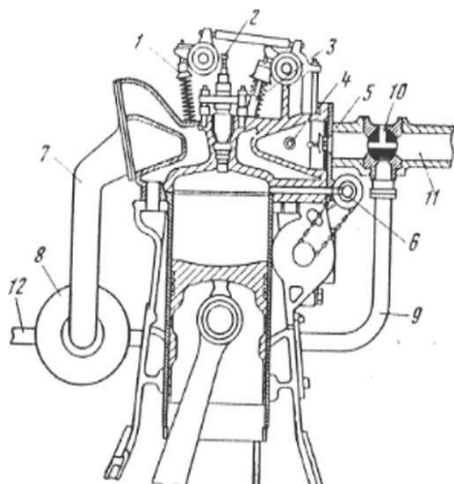


Рис. 44. Конструктивная схема двигателя Эррена для работы на водороде с кислородом:

- 1 – выпускной клапан; 2 – клапан впуска жидкого горючего; 3 – выпускной клапан; 4 – впуск кислорода; 5 – обратный клапан; 6 – впуск водорода; 7 – выпускная труба; 8 – паровой ресивер; 9 – впуск пара; 10 – двухходовой кран; 11 – впуск воздуха; 12 – выпуск к конденсатору

Особенностью является лишь то, что как горючее ( $H_2$ ), так и окислитель ( $O_2$ ) подаются в газообразном состоянии под давлением, т. е. являются носителями дополнительного количества энергии.

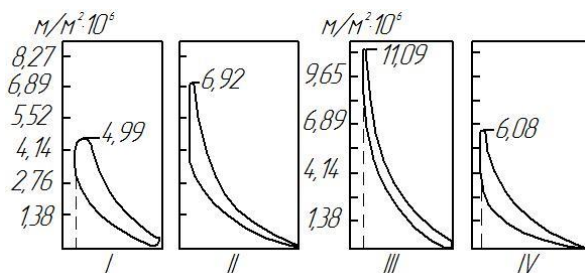


Рис. 45. Циклы двигателя Эррена:

- I – водород + кислород; II – водород + воздух; III – дизельное топливо, водород + воздух; IV – дизельное топливо + воздух



### 1.9.3 Свободнопоршневой дизель-генератор

Достоинства комбинации свободнопоршневых генераторов газа с турбинами известны:

- широкий диапазон мощностей (от 100 до 200 000 кВт);
- высокая экономичность ( $\eta_3 = 35 - 40\%$ ) как на номинальной мощности, так и на частичных нагрузках при легких условиях работы турбины –  $t_1 = 450-500^\circ \text{C}$ ;
- быстрый запуск и приемистость – практически любая мощность достигается за 5-10 циклов;
- возможность использования различных топлив;
- малый вес даже по сравнению с газотурбинной установкой;
- свобода размещения элементов установки вследствие отсутствия между ними жесткой связи;
- малое число оборотов вала турбины по сравнению с числом оборотов ГТУ и ПТУ;
- полная динамическая уравновешенность, что обеспечивает отсутствие вибраций, присущих поршневым двигателям с кривошипно-шатунными механизмами;
- возможность большого форсирования.

К недостаткам относятся:

- несколько больший износ, чем у турбин;
- относительно небольшие границы устойчивой работы;
- изменение качества продувки и наполнения цилиндра с изменением хода поршней;
- трудности привода ряда вспомогательных механизмов.

Использовать достоинства принципа свободнопоршневого дизеля с линейным электрогенератором (непосредственное получение электрической энергии и высокую единичную мощность) особенно выгодно с электрическими двигателями.

На рис. 46 схематически изображена одна из возможных конструкций такого свободнопоршневого дизель-генератора (СПДГ) с наддувом, отличающегося от аналогичного СПДГ без наддува большей мощностью и устойчивостью работы, но соответственно и большими размерами.

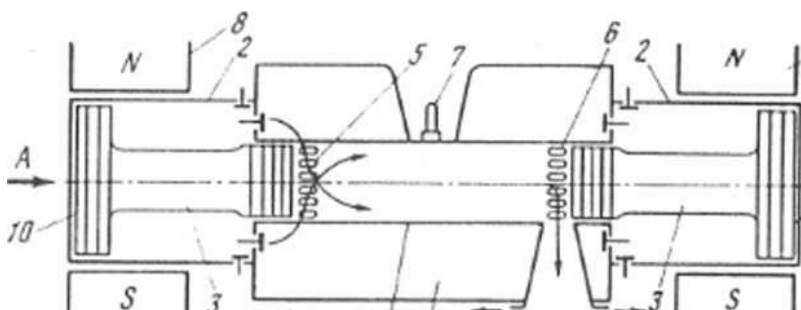


Рис. 46. Свободнопоршневой электродный дизель-генератор с наддувом:  
 1 – рабочий цилиндр; 2 – наддувочные цилиндры; 3 – двойные поршни;  
 4 – наддувочный ресивер; 5, 6—впускные и выпускные окна; 7 – форсунка  
 горючего; 8 – электромагниты; 9 – электроды; 10 —газовый буфер

Если в качестве окислителя используется воздух, то при внутреннем ходе поршней воздух между ними сжимается, а затем подается горючее, которое самовоспламеняется и сгорает. При наружном ходе происходит процесс генерации электроэнергии и сжатия воздуха. Выпуск отработавших газов и впуск окислителя осуществляется через специальные окна и зависит от положения поршней. Электрический ток в поршнях возникает перпендикулярно направлению их движения и полю и отбирается во внешнюю цепь через специальные электроды.

СПДГ могут работать и по безэлектродному принципу, для этого надо соответствующим образом подобрать материал поршней, источник магнитного поля и его направление. Изображение термодинамического цикла и выражение для КПД этого двигателя такие же, как и для других ДВС с изобарным или смешанным подводом тепла.

### 1.10 Двигатели Стирлинга

Двигатель Стирлинга был изобретен в 1816 г. в Эдинбурге, столице Шотландии, Робертом Стирлингом. Это было приблизительно за 80 лет до дизеля, и поэтому двигатель Стирлинга пользовался значительной популярностью до начала XX века.

Идеальный цикл Стирлинга является частным случаем обобщенного цикла Карно, имеет одинаковый с Карно термический КПД и состоит из двух изотерм и двух изохор (рис. 47).

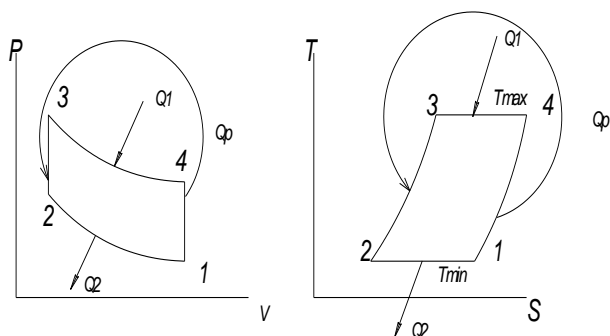


Рис. 47. P-V и T-S диаграммы цикла Стирлинга

Рабочий модуль двигателя Стирлинга представляет собой цилиндр, имеющий два противоположно расположенных поршня с помещенным между ними регенератором (рис. 48). Регенератор состоит из корпуса и пористой насадки, обладающей способностью поочередно поглощать и отдавать тепло. Насадка регенератора, как правило, представляет собой металлическую насадку, состоящую из отдельных проволочных сеток.

Работа цикла двигателя Стирлинга осуществляется следующим образом: в начале цикла поршень полости сжатия находится в верхней мертвой точке, а поршень полости расширения – в нижней мертвой точке, около торцевой поверхности регенератора.

В таком же положении все рабочее тело находится в холодной полости сжатия. Его объём максимальный, а давление и температура минимальные; это соответствует точке 1 на P-V и T-S диаграммах (рис. 47). Во время процесса сжатия (1-2) правый поршень движется по направлению к нижней мертвой точке, а поршень полости расширения остается неподвижным. Рабочее тело сжимается в полости сжатия и давление его увеличивается. Температура остается постоянной, так как теплота отводится от полости сжатия в окружающую среду.

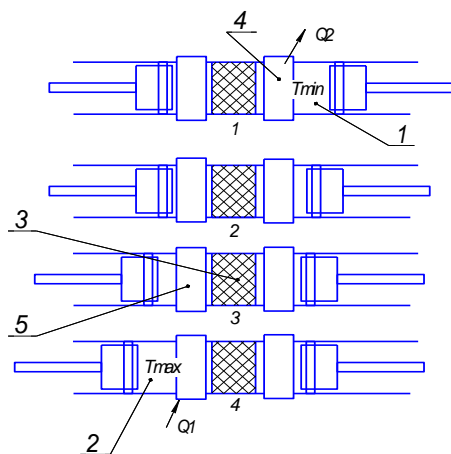


Рис. 48. Положение поршней в цикле:  
 1 – компрессорная полость; 2 – детандерная полость;  
 3 – генератор; 4, 5 – теплообменники

В процессе (2-3) оба поршня движутся одновременно: поршень полости сжатия – к регенератору, а поршень полости расширения – от регенератора. Движение поршней происходит таким образом, что объем между ними остается постоянным. Вследствие этого рабочее тело, проходя через пористую насадку регенератора, переходит из полости сжатия в полость расширения. При прохождении через регенератор температура рабочего тела за счет теплоты насадки повышается от  $T_{\min}$  до  $T_{\max}$ . Постепенное увеличение температуры газа при прохождении его через насадку регенератора при постоянном объеме вызывает повышение его давления.

В процессе расширения (3-4) левый поршень продолжает движение от регенератора в направлении верхней мертвой точки; правый поршень полости сжатия остается неподвижным в нижней мертвой точке, вблизи регенератора. Поскольку это процесс расширения, то с увеличением объема газа его давление уменьшается. Температура рабочего тела остается постоянной, поскольку теплота подводится к системе от внешнего источника.

Последний процесс в цикле 4-1, во время которого поршни одновременно движутся так, чтобы вернуть рабочее тело при посто-

янном объеме через насадку регенератора из полости расширения в полость сжатия. При прохождении газа через насадку регенератора теплота от рабочего тела передается материалу насадки и вследствие этого температура рабочего тела уменьшается и достигает  $T_{\min}$  – температуры полости сжатия. Теплота, переданная в этом процессе, сохраняется в насадке и передается рабочему телу в процессе 2-3 следующего цикла.

Таким образом, цикл состоит из четырех процессов: 1-2 – процесс изотермического сжатия, теплота от рабочего тела с температурой  $T_{\min}$  передается окружающей среде; 2-3 – процесс при постоянном объеме, теплота от насадки регенератора передается рабочему телу; 3-4 – процесс изотермического расширения, теплота от внешнего источника с температурой  $T_{\max}$  передается рабочему телу; 4-1 – процесс при постоянном объеме, теплота от рабочего тела передается насадке регенератора. Описанный выше идеальный цикл Стирлинга подразумевает прерывистое движение поршней и наличие сложного многозвенного привода. Термодинамическая эффективность двигателя не ухудшится, если привод с прерывистым движением поршней заменить гармоническим законом движения. Для этого необходимо, чтобы изменение объёма детандерной полости в зависимости от угла поворота коленчатого вала опережало на определённую величину  $\alpha = 70 - 110^\circ$  изменение объёма компрессорной полости. Это позволило реализовать различные модификации конструктивных схем двигателей Стирлинга (рис. 49).

В схеме «а» двигатель выполнен с двумя рабочими поршнями, оба поршня являются нагруженными давлением рабочего тела, заправленного в модуль (двигатель заправляется единожды и с точки зрения рабочего тела является безрасходным, т.е. масса заправленного рабочего тела остаётся неизменной). В этой схеме затруднён запуск двигателя, т.к. необходимо преодолеть силу давления заправленного рабочего тела. Схемы «б», «в», «г» лишены этого недостатка, в них один рабочий поршень заменён поршнем вытеснителем, который разгружен от действия сил давления заправки и выполняет только функцию вытеснения рабочего тела из одной полости в другую, преодолевая силы сопротивления от перепада давления в регенераторе.

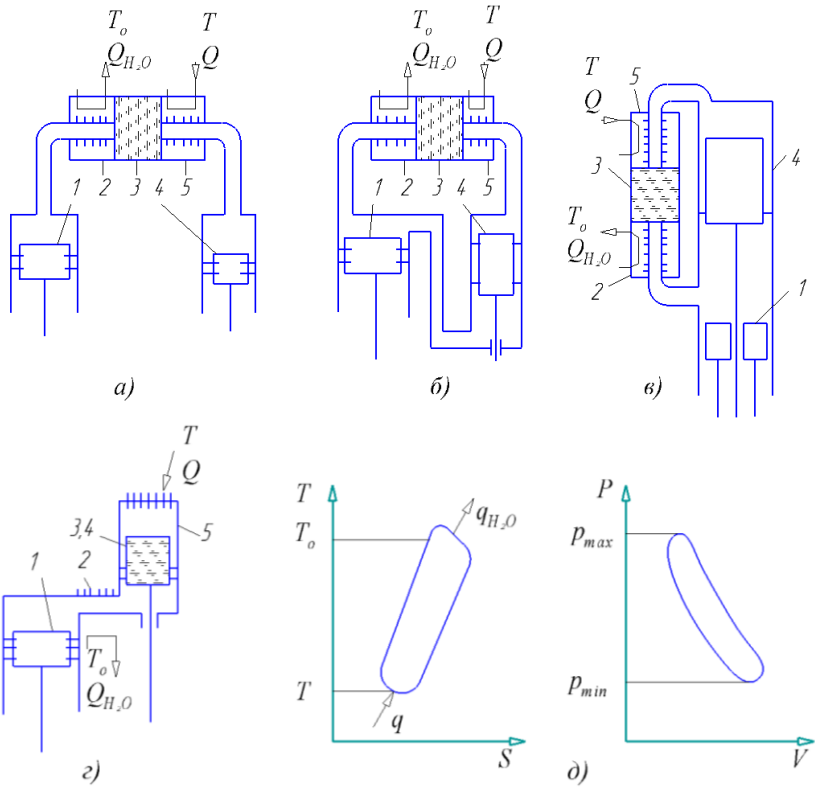


Рис. 49. Модификация кинематических схем двигателей Стирлинга с гармоническим приводом:

- а – с двумя рабочими (нагруженными) поршнями;
  - б – с одним поршнем и поршнем-вытеснителем (с двумя цилиндрами);
  - в – с одним рабочим поршнем и поршнем-вытеснителем, расположенными соосно;
  - г – с одним поршнем и перемещающимся регенератором-вытеснителем;
- 1 – «компрессорный» или рабочий поршень; 2 – водяной (или воздушный) холодильник; 3 – регенератор; 4 – «детандерный» поршень или вытеснитель; 5 – теплообменник для снятия нагрузки (охладитель)

Выражение термического КПД двигателя Стирлинга имеет вид:

$$q_1 = RT_{\max} \ln \frac{v_4}{v_3} = RT_{\max} \ln \frac{v_1}{v_2}; \quad |q_2| = RT_{\min} \ln \frac{v_1}{v_2};$$

$$\eta_i^{st} = 1 - \frac{RT_{\min} \ln \frac{v_1}{v_2}}{RT_{\max} \ln \frac{v_1}{v_2}} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}};$$

$$\eta_i^{st} = \eta_i^k.$$

Таким образом, привлекательность двигателя Стирлинга заключается в том, что его термический КПД равен предельно допустимому КПД обратимого цикла Карно.

### ***1.10.1 Методика Шмидта расчёта двигателя Стирлинга***

При гармоническом движении поршней цикл Стирлинга рассчитывается по методике Шмидта.

*Цель методики.* По заданным параметрам: температурам горячей и холодной полостей  $T_H$  и  $T_X$ ; мощности двигателя  $N$ ; оборотам вращения коленчатого вала  $n$ ; давлению заправки  $P_3$  определить геометрические размеры рабочих полостей и рассчитать энергетические характеристики базового образца – теплоты внешних источников  $Q_1$ ,  $Q_2$  и работу цикла  $L_{ц}$ .

В методике предусмотрено гармоническое движение поршней и отдельных узлов машины, но оставлены как основные допущения изотермичность процессов сжатия и расширения и идеальность регенерации. Таким образом, и эта теория идеализированная, но более реалистичная, чем идеальный цикл Стирлинга.

Основные допущения, принятые в цикле Шмидта:

- 1) регенеративные процессы идеальные;
- 2) мгновенные значения давлений в системе одинаковые;
- 3) рабочее тело подчиняется уравнению состояния для идеального газа;
- 4) отсутствуют утечки рабочего тела; масса рабочего тела остается постоянной;
- 5) изменения объёмов газа в рабочих полостях происходят синусоидально;
- 6) температурный градиент в теплообменниках отсутствует;
- 7) температуры стенок цилиндра и поршня постоянны;

8) в полостях цилиндра происходит идеальное перемешивание рабочего тела;

9) температура рабочего тела во вспомогательных полостях системы постоянна;

10) частота вращения машины постоянна, условия состояния – установившиеся.

#### *Расчет текущего давления в цикле*

Масса рабочего тела в горячей полости определяется по уравнению состояния как

$$m_G = \frac{P_G \cdot V_G}{R \cdot T_G},$$

аналогично для холодной полости

$$m_X = \frac{P_X \cdot V_X}{R \cdot T_X}.$$

При этом  $P_G = P_X = P_P = P$ .

Так как общая масса рабочего тела во внутреннем контуре остаётся постоянной, то

$$m_3 = m_G + m_X + m_P$$

или

$$m_3 = \frac{P \cdot V_G}{R \cdot T_G} + \frac{P \cdot V_X}{R \cdot T_X} + \frac{P \cdot V_P}{R \cdot T_{CP}} = \frac{P}{R} \cdot \left( \frac{V_G}{T_G} + \frac{V_X}{T_X} + \frac{V_P}{T_{CP}} \right).$$

Отсюда текущее давление в цикле

$$P = \frac{m_3 \cdot R}{\frac{V_G}{T_G} + \frac{V_X}{T_X} + \frac{V_P}{T_{CP}}}.$$

При известном объёме заправки  $V_3$ , температуре заправки  $T_3$  и давлении заправки  $P_3$  общая масса, т.е. масса заправки рабочего тела  $m_3$ , определяется как



$$m_3 = \frac{P_3 \cdot V_3}{R \cdot T_3}.$$

Если допустить, что изменение температуры рабочего тела в мёртвом объёме проходит в осевом направлении по линейному закону, то средняя температура рабочего тела в мёртвом пространстве определяется в первом приближении как среднеарифметическая

$$T_{CP} = \frac{T_\Gamma + T_X}{2}.$$

Текущее давление с учетом вышепринятого определяется выражением

$$\begin{aligned} P &= \frac{P_3 \cdot V_3}{T_3 \left( \frac{V_\Gamma}{T_\Gamma} + \frac{V_X}{T_X} + \frac{V_P}{T_{CP}} \right)} = \frac{P(V_X + V_\Gamma + X \cdot V_{Or})_{\varphi_{onm}}}{T_3 \left( \frac{V_\Gamma}{T_\Gamma} + \frac{V_X}{T_X} + \frac{X \cdot V_{Or}}{T_{CP}} \right)} = \\ &= \frac{P_3 \left[ K \cdot \frac{V_{Or}}{2} (1 + \sin \varphi_{onm}) + \frac{V_{Or}}{2} (1 + \cos \varphi_{onm}) + X \cdot V_{Or} \right]}{T_3 \left[ \frac{V_{Or}}{2 \cdot T_\Gamma} (1 + \cos \varphi) + \frac{K \cdot V_{Or}}{2 \cdot T_X} (1 + \sin \varphi) + \frac{X}{T_{CP}} \cdot V_{Or} \right]} = \\ &= \frac{P_3 \left[ \frac{K}{2} (1 + \sin \varphi_{onm}) + \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi_{onm}) + X \right]}{T_3 \left[ \frac{(1 + \cos \varphi)}{2 \cdot T_\Gamma} + \frac{K(1 + \sin \varphi)}{2 \cdot T_X} + \frac{X}{T_{CP}} \right]}. \end{aligned}$$

Следовательно  $P = P(\varphi)$ .

### 1.10.2 Построение P-V диаграммы рабочих полостей

При работе двигателя существенное отклонение от идеальности происходит вследствие непрерывного движения поршней в отличие от прерывистого движения для идеального случая. В результате цикл в P-V диаграмме несколько видоизменяется; в этом случае он имеет вид непрерывной плавной кривой, а четыре термодинамических процесса не имеют резких переходов.

Неизотермичность процессов сжатия и расширения – другая важная причина отклонения действительного цикла от идеального. По полученным результатам строятся P-V диаграммы детандерной, компрессорной и суммарной полостей (рис. 50).

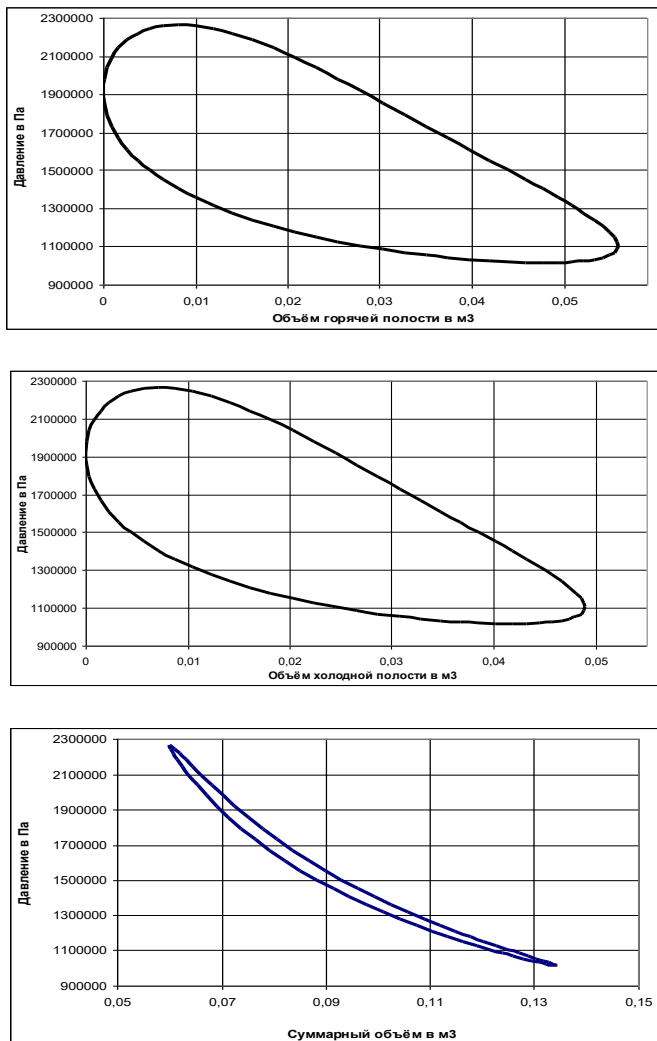


Рис. 50. Расчетные индикаторные диаграммы горячей, холодной полостей и цикла

Площади этих диаграмм, выраженные в численных значениях тепла и работы, являют собой соответственно: подведенное тепло к рабочему телу в цикле, отведенное тепло и работу цикла (рис. 51).

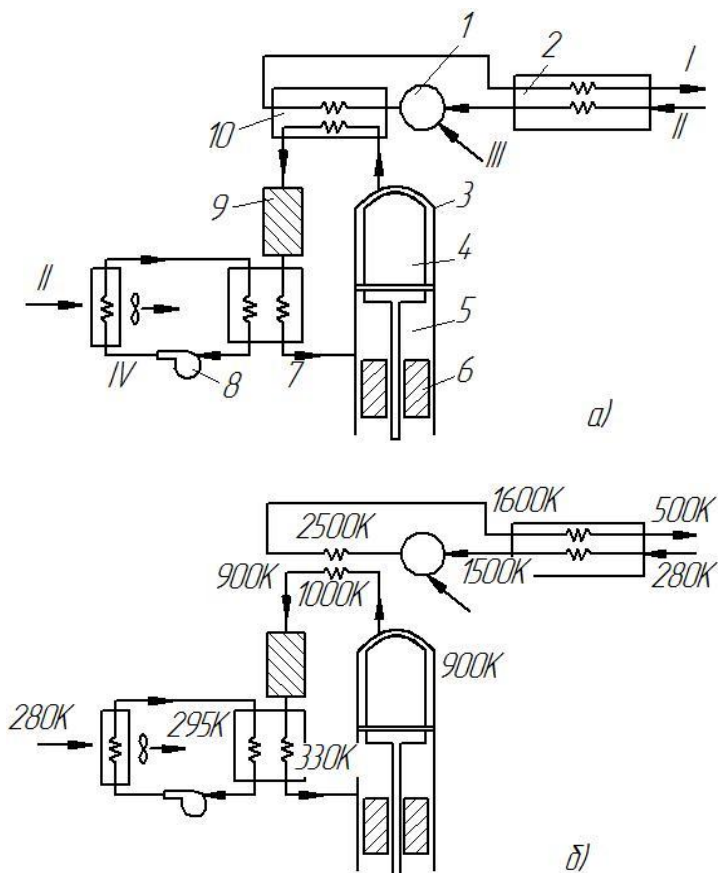


Рис. 51. Конфигурации двигателей Стирлинга:

а – теплообменники в двигателе Стирлинга;

б – распределение температур в двигателе Стирлинга;

1 – камера подвода тепла от первичного источника; 2 – теплообменник внешней регенерации тепла; 3 – полость расширения; 4 – вытеснитель;

5 – полость сжатия; 6 – рабочий поршень; 7 – холодильник;

8 – перекачивающий насос теплоносителя холодного контура;

9 – регенератор; 10 – теплообменник подвода тепла внутреннего контура

На рис.52 изображен электрогенератор на основе двигателя Стирлинга, применяемый американским и европейскими космическими агентствами в космических миссиях, осуществляемых с помощью беспилотных аппаратов-роверов (ESA Lander, рис. 53).

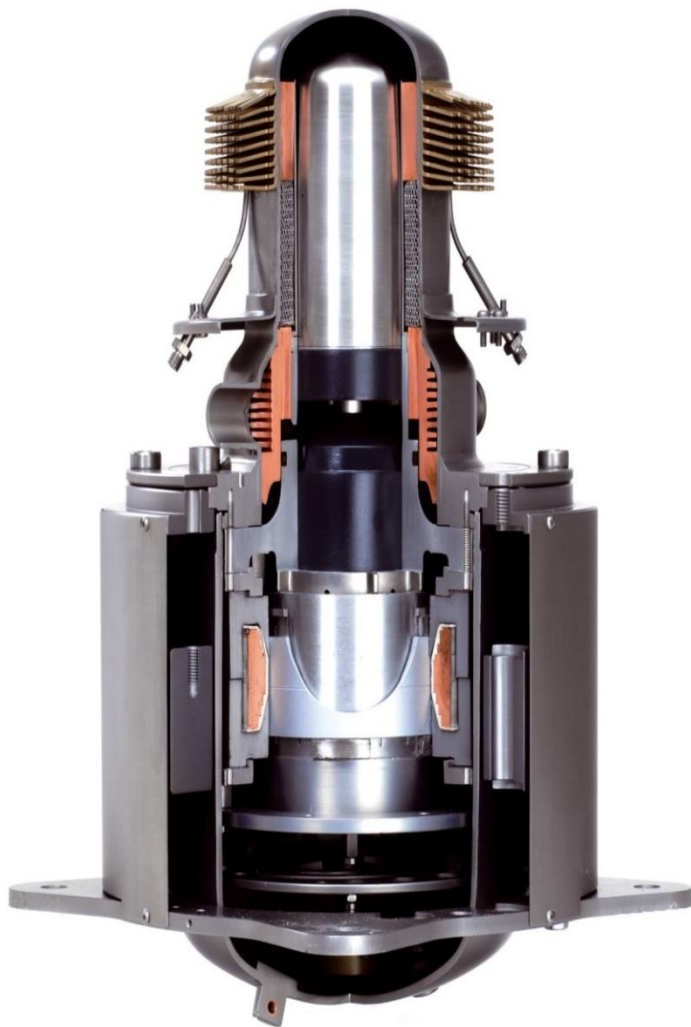


Рис. 52. Свободно-поршневой двигатель Стирлинга для космической энергоустановки с линейным электрогенератором

## 1.11 Термоакустические двигатели

Одним из направлений в разработке новых бортовых систем является создание термоакустических двигателей (ТАД). Являясь в некотором роде модификацией двигателя Стирлинга, ТАД существенно отличается от последнего организацией рабочего процесса. Двигатели внешнего подвода тепла (типа Стирлинг) имеют множество преимуществ: высокую эффективность, широкий диапазон сфер применения, использование любых типов источников тепла (рис. 53).

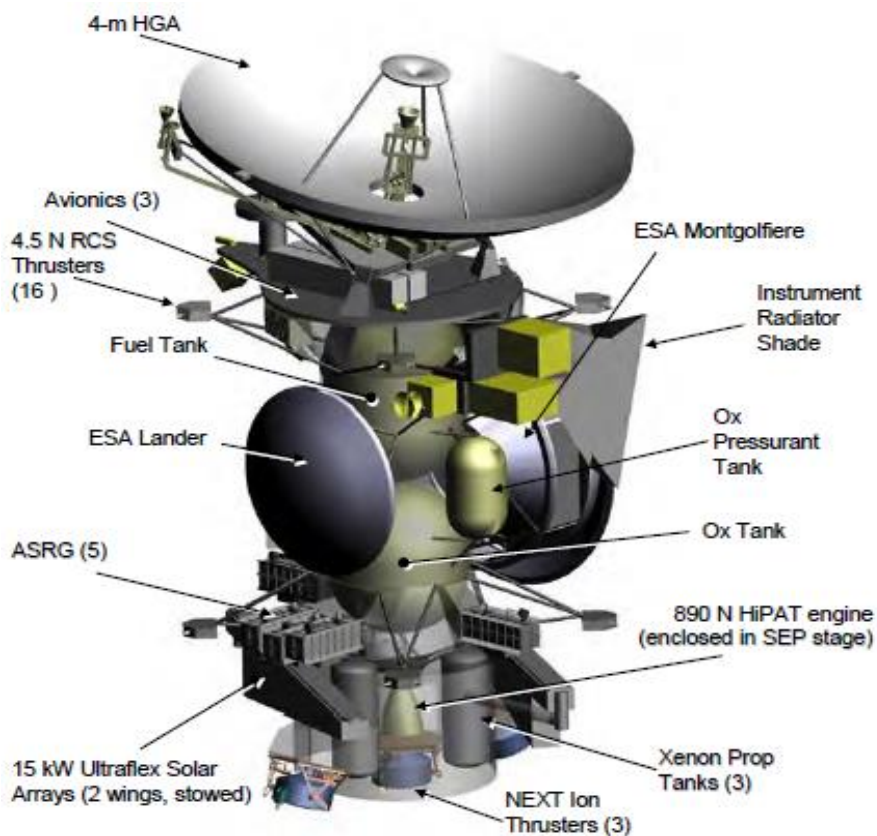


Рис. 53. Космический аппарат доставки исследовательских аппаратов с энергопитанием от термоакустического двигателя

Однако наличие в таких двигателях цилиндропоршневой пары в высокотемпературной зоне и сложных механизмов привода делают их конструктивно сложными, а ресурс и надежность недостаточно высокими.

Отмечается, что несмотря на несколько меньшую термодинамическую эффективность по сравнению со Стирлингом термоакустические двигатели (ТАД) внешнего подвода тепла имеют уникальные преимущества по ресурсу и надежности.

В настоящее время ТАД классифицируются по двум группам: на бегущей и стоячей волне. Они имеют различную компоновку с различными электромеханическими преобразователями.

На рис.54 представлены иллюстрации к физической гипотезе преобразования тепловой энергии  $Q = T_m s$ ,  $s = \rho_m \langle \overline{S\dot{U}} \rangle$  в акустическую мощность  $W_{ac}$ . Здесь в результате осуществления последовательных микроциклов происходит возрастание энтальпии акустической волны на величину работы потока, эквивалентной интегралу акустической интенсивности звука  $I$  по площади поперечного сечения и равной  $W_{ac} = \langle \overline{P\dot{U}} \rangle = 1/2 p u \cos \Phi$ , где давление  $P = p e^{i\omega t}$ ,  $U = u e^{i\omega t + \Phi} = u \sin \Phi e^{i\omega t + \pi/2} + u \cos \Phi e^{i\omega t}$  – объемная скорость, м<sup>3</sup>/с;  $\varphi_{pU}$  – разность фаз между колебаниями объемной скорости и давления соответственно.

Акустическая мощность, совершающая работу по перемещению частиц среды, называется работой потока и является аналогом индикаторной работы цикла (рис. 55), поскольку объемная скорость записывается как

$$U = dV / dt ,$$

тогда  $\dot{W}_{ac} = \omega / 2\pi \oint p U dt = \omega / 2\pi \oint p dV .$

Эффективность преобразования тепла в работу определится внутренним КПД, определяемым как отношение акустической мощности к подведенному к рабочему телу теплу  $\eta_i = W_{ac} / Q_h$ .

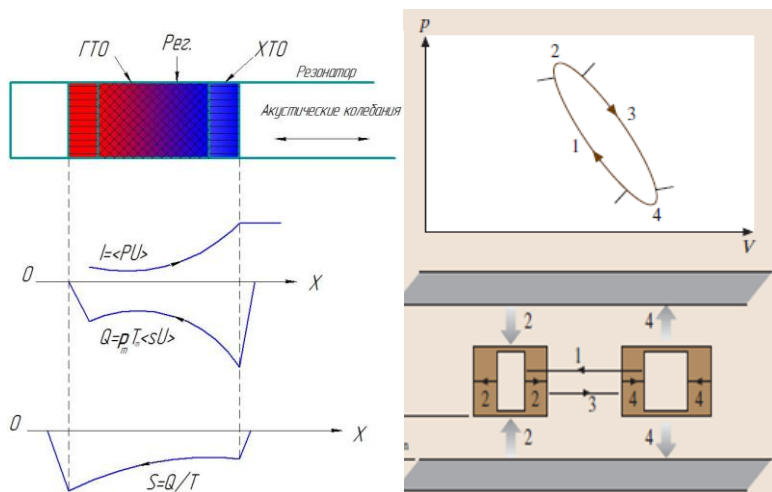


Рис. 54. Графическая интерпретация генерации полезной работы в результате преобразования тепловой энергии в акустическую мощность при осциллирующем движении столба газа и наличии градиента температур в канале

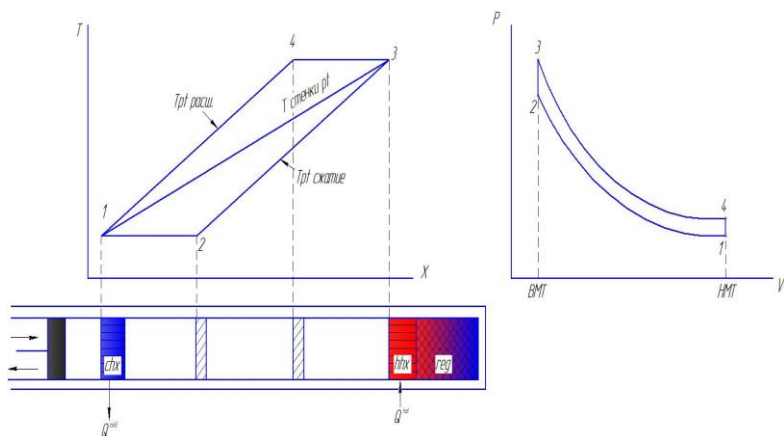


Рис. 55. Схема ГАД на стоячей волне с пульсационной трубой, термодинамический цикл двигателя

Преимуществом двигателя, в котором отсутствует поршень, а рабочий процесс организован на основе колебаний рабочего тела, позволяет с помощью электромеханического преобразователя тока

возвращать акустическую мощность в термоакустический контур, поддерживая, таким образом, устойчивость всей системы (рис. 56).

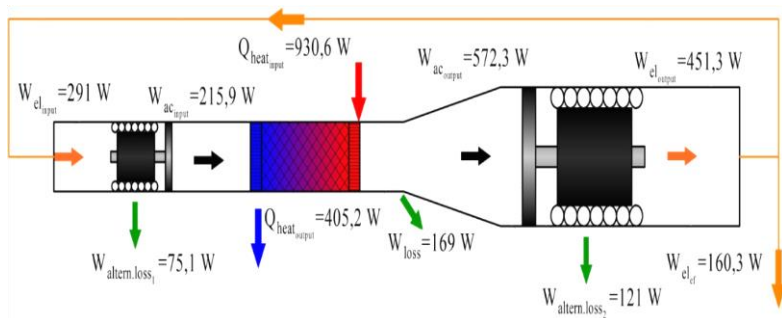


Рис. 56. Термоакустический электрогенератор для СЭП КА на основе двигателя на стоячей волне

Термоакустический двигатель на бегущей волне – устройство, которое преобразует тепловую энергию в энергию акустических колебаний в форме, близкой к бегущей волне. Конструктивной особенностью такого двигателя является наличие тороидального акустического канала с регенератором внутри, расположенным между двумя теплообменниками: нагревателем и охладителем. Такая конфигурация канала позволяет реализовать плоскую гармоническую волну, распространяющуюся по каналу, и обеспечить возврат волны обратно к регенератору, в котором происходит увеличение её мощности. То есть в тороидальном канале реализуется что-то вроде циркуляции акустической энергии, а регенератор выступает в качестве акустического усилителя с коэффициентом усиления, равным отношению температур на концах регенератора.

На рис.57 показан принцип работы термоакустического двигателя на бегущей волне.

Нагревателем обеспечивается подвод тепловой мощности  $\dot{Q}_h$  от горячего теплового источника с температурой  $T_h$  с одной стороны регенератора. С другой стороны регенератора охладитель отводит от газа тепловую мощность  $\dot{Q}_c$  к холодному тепловому источнику с температурой  $T_c$ .



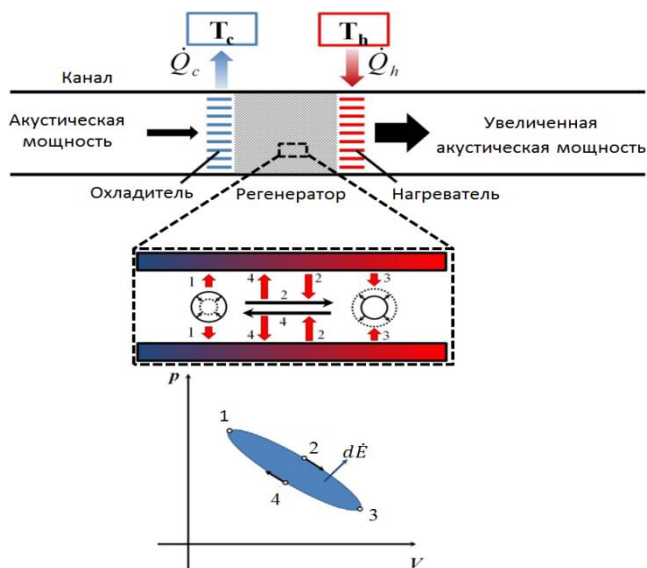


Рис. 57. Принцип работы термоакустического двигателя на бегущей волне

Генерация акустических колебаний в двигателе начинается в тот момент, когда продольный градиент температуры  $\nabla T$ , устанавливающийся в регенераторе за счет работы теплообменных аппаратов, начинает превышать некоторый критический уровень ( $\nabla T_{crit}$ ). С течением времени эти колебания стабилизируются по амплитуде и частоте  $f$ , продольный градиент температуры  $\nabla T$  в регенераторе устанавливается постоянным и часть подведенной тепловой мощности  $\dot{Q}_h$  преобразуется в акустические колебания мощности  $\dot{W}$ , которые реализуются в форме, близкой к бегущей волне. При этом тепловое расширение частиц газа в регенераторе происходит при большем давлении, чем тепловое сжатие. Следовательно  $\oint p dV > 0$ , что говорит о том, что газ совершает положительную работу над соседними частицами газа. За счет этого каждая частица газа на определенном участке регенератора поглощает теплоту в «горячей» его части и сбрасывает в «холодной». Таких частиц по всей длине каналов в регенераторе достаточно много. Они располагаются последовательно

друг за другом и, как по «пожарной цепочке», осуществляют перенос теплоты через весь регенератор от нагревателя к охладителю.

Проблему низкой эффективности двигателя на бегущей волне в тороидальном контуре решили С. Бэкхаус и Г. Свифт. Они предложили новый тип термоакустического двигателя на бегущей волне, который представлял собой тороидальный акустический канал, соединенный с резонатором. Двигатель получил название термоакустический двигатель Стирлинга (TASHE – Thermoacoustic Stirling Heat Engine). Схема и общий вид термоакустического двигателя Стирлинга представлены на рис. 58.

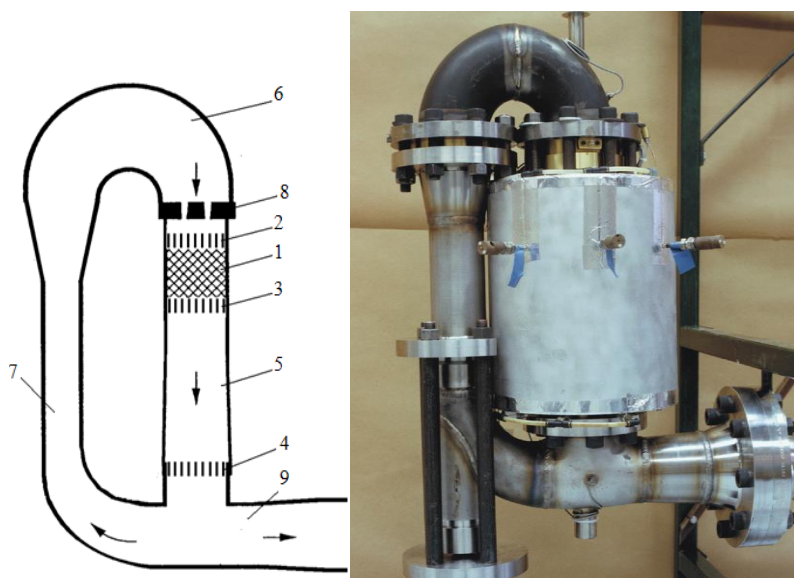


Рис. 58. Схема и общий вид термоакустического двигателя на бегущей волне:

- 1 – регенератор; 2 – основной охладитель; 3 – нагреватель;
- 4 – дополнительный охладитель; 5 – термическая буферная труба;
- 6 – акустическая емкость; 7 – инерционная труба;
- 8 – супрессор; 9 – отвод к резонатору

Первый термоакустический электрогенератор для использования в космосе был разработан в 2004 году специалистами компании

Northrop Grumman Space and Technology и Los Alamos National Laboratory (рис. 59, 60).

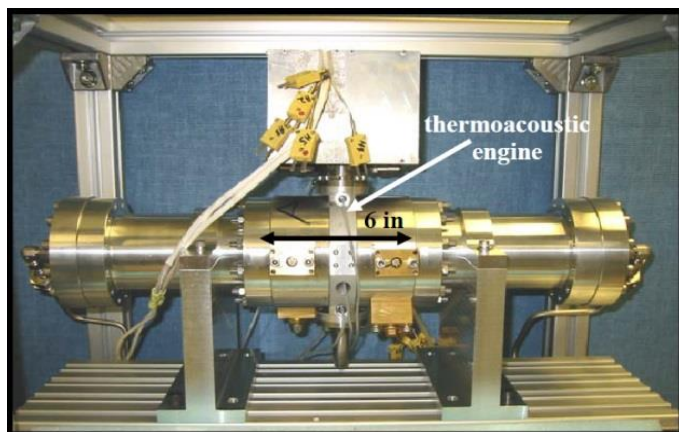


Рис. 59. Термоакустический электрогенератор для использования в космосе с оппозитным расположением блоков



Рис.60. Блок термоакустического двигателя электрогенератора компании Sunpower

Основные сравнительные характеристики двигателей на основе термодинамического цикла Стирлинга приведены в табл. 5.

**Таблица 5. Сравнение различных типов бортовых СЭП на основе Стирлинг-генераторов**

Типы преобразователей прямого цикла Стирлинга	Достоинства	Недостатки
Свободнопоршневой Стирлинг	Отсутствие кинематического механизма и скользящих уплотнений; КПД относительно цикла Карно до 55%	Вибрации поршня альтернатора, обязательная оппозитная компоновка
Стирлинг со свободным вытеснителем (ASRG)	Сниженные вибрации при высокой удельной мощности и меньшей массе изотопного топлива, чем для термоэлектрического генератора	Необходимость оптимизации холодной части при изменении температуры окружающей среды, ограничение по горячей температуре
Термоакустический Стирлинг	Высокий ресурс в условиях низких температур и работоспособность при повышенной горячей температуре (до 1200 °С); меньшая масса Pu <sup>238</sup> и меньшая на 70% генератора в сравнении с термоэлектрическим	Увеличенный мертвый объем для отдельных конструктивных схем, Нестабильность запуска

## 2 БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

В космических аппаратах, станциях и в перспективных лунных поселениях необходимы системы, поддерживающие соответствующий температурный режим (СОТР) и обеспечивающие условия для функционирования бортовой аппаратуры и технологического оборудования. Это могут быть приборы, нагревательные устройства, системы охлаждения и криостатирования (например, инфракрасных приемников излучения, лидаров, лазеров, антенных устройств и др.). Эти системы, в отличие от представленных в предыдущих разделах, являются энергопотребляющими. Так как их эффективность определяется минимумом энергетических затрат на выполнение технической или технологической операции, то вполне очевидно, что в месте с энергопроизводящими установками и системами они будут определять совершенство бортового энергокомплекса и энергоэффективность космического аппарата или станции.

В связи с тем, что наиболее сложным и энергозатратным является получение холода криогенного уровня температуры, последующие разделы будут посвящены в основном криогенным системам.

Для охлаждения инфракрасных (ИК) детекторов и поддержания элемента детектора при постоянной температуре существуют четыре основных способа охлаждения:

- с использованием запасов хладагента в зависимости от необходимой температуры криостатирования (жидкий азот при 77 К, твердая углекислота – «сухой лёд» при 196 К);
- термоэлектрические охладители;
- рефрижераторы высокого давления, реализующие простой цикл дросселирования (эффект Джоуля-Томсона);
- микрокриогенные газовые машины;
- погружные системы с сосудом Дьюара.

*В погружных системах* охлаждения ИК детектор размещается внутри специализированной вакуумной емкости – сосуде Дьюара со

встроенным обзорным стеклом. Как правило, такой детектор может работать на запасе хладагента в течение примерно восьми часов. Температура криостатирования регулируется давлением паров над зеркалом жидкости (рис. 61).

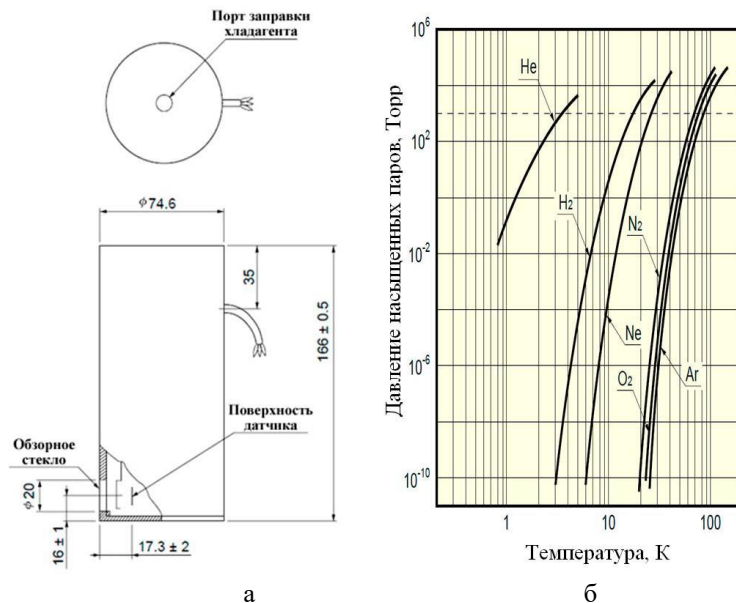


Рис. 61. Криостатирование ИК датчика погружным способом:  
 а – общий вид вакуумной емкости с ИК датчиком;  
 б – зависимость давления насыщенных паров от температуры ИК датчика и вида хладагента

*Охлаждение термоэлектрическими элементами Пельтье.* Термоэлектрические криостатирующие устройства для ИК детекторов используют одно; двух- или трехкаскадные схемы включения термоэлементов (рис. 62). Соответствующие разницы температур между охлаждающим элементом и основанием первого каскада 50, 70 и 100 градусов.

Особенности применения термоэлектрических охладителей:

- необходимость в обеспечении максимального теплового контакта между термоэлементом и охлаждаемым датчиком.

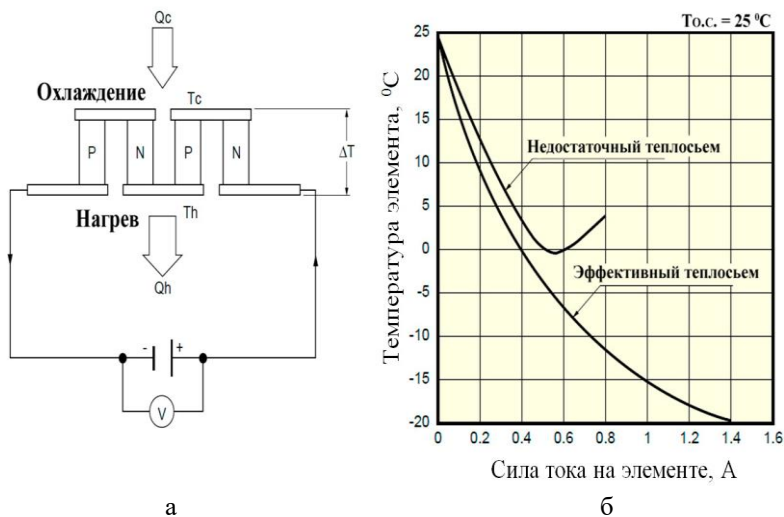
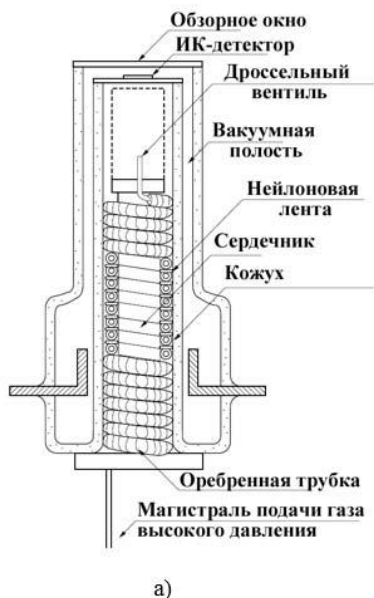


Рис. 62. Термоэлектрический охладитель:  
 а – схема; б – зависимость температуры термоэлемента от  
 силы тока и эффективности теплоотвода от поверхности радиатора

При этом полезная холодопроизводительность непосредственно зависит от эффективности (термического КПД) используемого теплообменника-радиатора (теплообменника, отводящего теплоту от теплого каскада). На рис. 62,б показана зависимость температуры холодного каскада от силы тока для двух вариантов теплоотвода с радиатора;

- следует учитывать, что внезапный перегрев ИК датчика приводит к повреждению его структуры;
- необходимым условием работы является наличие источника питания с низким уровнем пульсаций, поскольку если ток выше заданного значения (1,5 А для однокаскадного и 1,0 А для двухкаскадного и трехкаскадного термоэлектрического охладителя), инфракрасный детектор может перегреваться за счет выделения собственной джоулевой теплоты;
- зависимость температуры криостатирования от температуры окружающей среды.

Рефрижераторы высокого давления, реализующие простой цикл дросселирования (эффект Джоуля-Томсона). Применение баллонных рефрижераторов на запасах сухого воздуха, аргона, азота или гелия под высоким давлением (150 бар), реализующих дроссельный цикл с регенерацией теплоты для охлаждения ИК датчиков – классический и до недавнего времени единственный надежный способ обеспечения необходимых криогенных температур от 90 до 4,2 К (рис. 63).



б)



в)

Рис. 63. Микрофрижератор высокого давления:

а – элементы конструкции; б, в – баллонный рефрижератор (общий вид)

Разработчиками таких систем сегодня являются ОАО «Сибкриотехника» и ОАО «Московский завод «Сапфир». Особенности работы и основные элементы конструктивного исполнения подробно описаны в [4]. Время выхода на режим от 1,5 до 3,0 мин, длительность непрерывной работы от 120 до 540 мин при массе системы от 2 до 35 кг.



Способ не подходит для использования в течение длительного периода времени, поскольку по мере использования из-за снижения давления газа в баллоне холодопроизводительность системы снижается, а температура криостатирования начинает увеличиваться.

## 2.1 Дроссельные системы охлаждения

### 2.1.1 Схема дроссельной СО, энергетический и эксергетический балансы

На рис. 64 показаны схема и процессы в  $T-S$  диаграмме, дроссельной системы охлаждения (СО), работающей по циклу Линде. Она состоит из следующих основных элементов: I – компрессор, II – холодильник, III – теплообменник, IV – дроссельный вентиль, V – испаритель.

Необходимым условием работы такой установки является наличие положительного дроссель-эффекта при температуре окружающей среды:  $\Delta i_T > 0$ . Эти циклы называются газо(паро)жидкостными, так как агрегатное состояние рабочего тела меняется.

Для этого процесса характерно, что давление обратного потока может быть как больше, так и меньше давления окружающей среды, так как процесс по рабочему телу замкнут.

Рассмотрим процесс получения холода подробнее. Газ в состоянии 1 поступает в компрессор. Процесс сжатия в реальном случае идёт не по изотерме, а представляет собой чередование нескольких процессов адиабатного сжатия и изобарного охлаждения в холодильнике.

При первом прохождении газа через теплообменник обратный поток ещё не охлаждён и поэтому точка 2 и точка 3 совпадут; газ дросселируется до точки 4' и охлаждает прямой поток, который будет дросселироваться уже до более низкой температуры  $T_4''$ . Так процесс идёт до тех пор, пока после дросселирования не попадает в двухфазную область (рис. 65).

Энергетический баланс установки для  $G$  кг/ч газа, циркулирующего в контуре (рис. 64), представится в виде соотношения:

$$Gi_2 + Q_0 + Q_{из} = Gi_6,$$

где  $i_2$  и  $i_6$  – соответственно энтальпия газа на входе и выходе из теплообменника;

$Q_0$  – холодопроизводительность установки;

$Q_{из}$  – теплоприток через изоляцию.

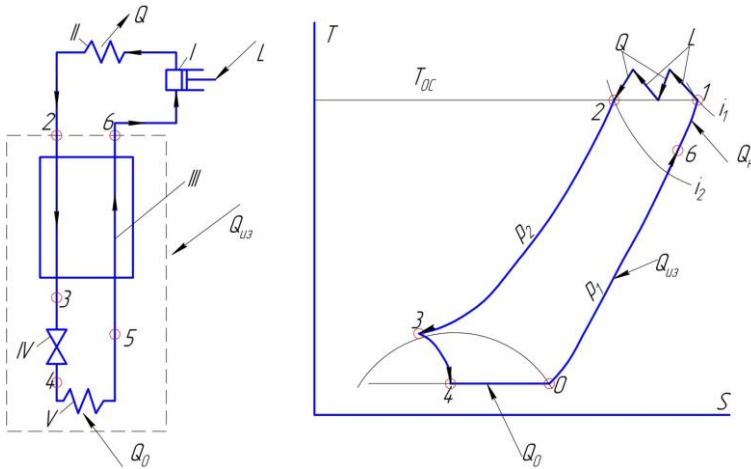


Рис. 64. Схема и процессы в  $T-S$  диаграмме рефрижераторной установки, работающей по циклу Линде

Энергия с потоком газа выводится из системы в большем количестве, чем поступает ( $i_6 > i_2$ ), а разница в подводимой и отводимой энергии показывается за счёт подвода тепла  $Q_0$  и  $Q_{из}$ .

$$Q_0 + Q_{из} = G(i_6 - i_2) = G(i_6 - i_1) - G(i_2 - i_1),$$

где  $i_1 - i_2 = \Delta i_T$  – дроссель-эффект газа при  $T = T_1$ ;

$i_1 - i_6 = \Delta i_{II}$  – потеря холода от недорекуперации газа в теплообменнике. Тогда суммарная холодопроизводительность системы:

$$Q_0 + Q_{из} = G\Delta i_T - G\Delta i_{II}.$$

равна величине изотермического дроссель-эффекта минус потери холода от недорекуперации.

Баланс эксергии установки представляется в виде:

$$Ge_2 = Ge_6 + Q_e + \sum_{T=T_6}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{из} \cdot \tau_e) + \sum D_i.$$

где  $e_2$  и  $e_6$  – соответственно эксергия на входе и выходе из теплообменника;

$Q_e$  – приведенная холодопроизводительность;

$\sum_{T=T_6}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{из} \cdot \tau_e)$  – суммарный приведённый теплоприток через

изоляция;

$\sum D_i$  – сумма внутренних потерь эксергии в элементах контура.

В отличие от энергии эксергия с потоком газа вводится в систему в большем количестве, чем выводится ( $e_2 > e_6$ ), а разность в подводимой и отводимой эксергии расходуется на получение полезной приведённой холодопроизводительности  $Q_e$ , на внутренние потери эксергии  $\sum D_i$  и внешние  $\sum D_e$ , связанные с теплопритоками через изоляцию  $Q_{из}$ .

$$Q_e + \sum_{T=T_6}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{из} \cdot \tau_e) + \sum D_i = Ge_2 - Ge_6 = Ge_2 - Ge_1 - Ge_6 + Ge_1,$$

где  $e_2 - e_1 = \Delta e_p$  – повышение эксергии газа в компрессоре;

$e_6 - e_1 = \nabla e_n$  – потери эксергии от недорекуперации в теплообменнике.

Тогда

$$Q_e + \sum_{T=T_g}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{из} \cdot \tau_e) = G \Delta e_p - (G \nabla e_n + \sum D_i).$$

Суммарная приведенная холодопроизводительность системы  $Q_e + \sum_{T=T_g}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{из} \cdot \tau_e)$  равна возрастанию эксергии в компрессоре с холодильником минус сумма потерь эксергии от недорекуперации (внешние потери) и внутренних потерь.

### 2.1.2 Замкнутые дроссельные системы охлаждения

В отдельных случаях применяются дроссельные системы охлаждения с замкнутым циклом, на рис. 6б показана система охлаждения холодопроизводительностью 0,75 Вт. Рассмотрим рабочий процесс данной системы охлаждения с помощью диаграммы (см. рис. 65). При переходе из точки 4 в 5 происходит процесс дросселирования. Точка 5 находится в двухфазной зоне и тепловыделение охлаждаемого объекта поглощается при испарении частично ожиженного хладагента, что соответствует переходу из точки 5 в 6. Обычно хладагент,

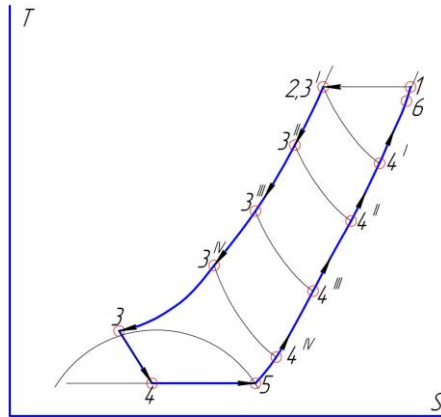


Рис. 65. T-S диаграмма рефрижераторной установки

например газообразный азот, сжимается приблизительно до 18 МПа в многоступенчатом компрессоре. Тепло сжатия отводится с помощью теплообменника внешнего контура охлаждения.

После сжатия очищенный азот высокого давления поступает в миниатюрный противоточный теплообменник, где охлаждается обратным потоком низкого давления. При прохождении через дроссель температура его падает, что приводит к частичному ожижению азота. Скрытая теплота испарения жидкого азота используется для локального охлаждения объекта. Газ низкого давления охлаждается в теплообменнике (точка 3), газ высокого давления возвращается на вход компрессора (точка 1).

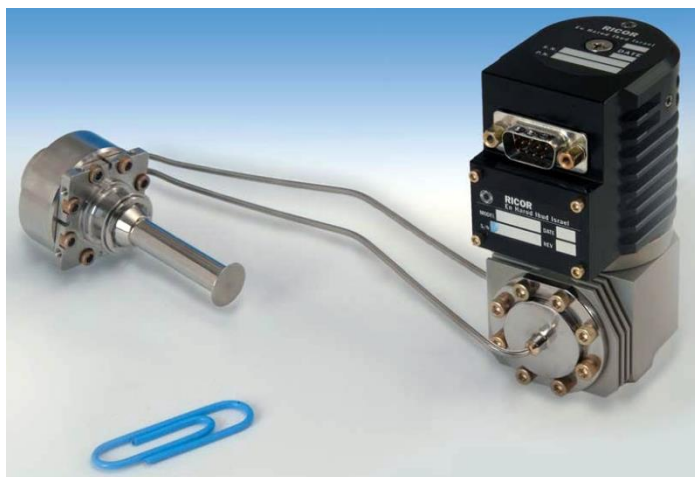


Рис. 66. Замкнутая дроссельная система охлаждения с компрессором

К линии низкого давления для нормальной работы системы подсоединяется небольшой резервуар с хладагентом для того, чтобы компенсировать количество хладагента, перешедшего в жидкую фазу.

Локальное охлаждение обычно осуществляется путём испарения сжиженного хладагента на конце медного хладовода, находящегося на внутренней оболочке криостата, внутри которого происходит процесс сжижения. Поскольку криостат герметичен, хладагент пол-

ностью находится в системе охлаждения. Таким образом, детектор в сосуде Дьюара не подвергается действию колебания давления в системе.

Данные по основным параметрам замкнутых дроссельных систем представлены на рис. 67.

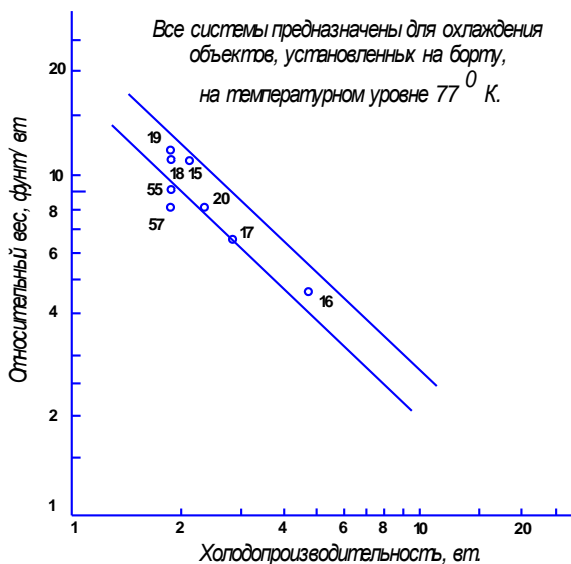


Рис. 67. Зависимость относительной массы от холодопроизводительности для систем охлаждения с замкнутым циклом

Основное преимущество систем охлаждения с использованием замкнутого дроссельного цикла заключается в том, что компрессор может быть размещён на некотором расстоянии от объекта охлаждения, это представляет большие возможности при компоновке.

Система может обеспечить ресурс безрегламентной работы в интервале от 200 до 500 ч, а с регламентными работами – от 1000 до 2000 ч.

Другим преимуществом замкнутой дроссельной системы является то, что температура окружающей среды не оказывает заметного влияния на температурный уровень охлаждения. Кроме того, система может быстро выходить на режим, а именно в течение 3–5 мин.

Основными недостатками системы, использующей замкнутый цикл, с точки зрения применения на борту космического аппарата является относительно высокая потребляемая мощность, поэтому эти системы не получили широкого применения для космических систем.

Также недостатком системы является то, что она обеспечивает охлаждение объекта только при температуре ожижения хладагента, что ограничивает ее применение.

Дроссельные системы охлаждения изготавливаются следующими компаниями: «RICOR», Cryogenic&Vacuum Systems, «Garret Corporation» («Air Research Manufacturing Company»), «Janis Research Company», «Thematic Engineering Company», «Hughes Aircraft Company». «Advanced Research Systems», ООО НТК «Криогенная техника» Омск и др.

## **2.2 Микрокриогенные системы на базе газовых криогенных машин**

В газовых микрокриогенных машинах (ГКМ) реализуются циклы Гиффорда–Мак-Магона, Стирлинга на основе пульсационной трубы.

Такие машины автономны, герметичны, позволяют поддерживать температуру криостатируемого объекта вплоть до 4,2 К при различных значениях тепловой нагрузки до 100 и более Вт.

Криогенными называются машины, в которых хотя бы один процесс рабочего цикла протекает при температурах ниже 120 К. Их можно подразделить на машины, производящие холод, и на машины, обеспечивающие сжатие и транспортировку криоагентов.

В ГКМ работа расширения газа в холодной полости передается через поршень и вал или вытеснителем к газу, находящемуся в тепловой полости. В ГКМ теплообменные аппараты размещены в мертвых объемах поршневой машины. Простейшая ГКМ эквивалентна криогенной установке, состоящей из поршневого детандера и теплообменных аппаратов, а КГС Стирлинга – криогенной установке, состоящей из поршневых компрессора и детандера и теплообменных

аппаратов. Теплоиспользующие ГKM производят холод за счет подвода теплоты от высокотемпературного теплового источника. В этом случае ГKM состоит из теплового двигателя, компрессора и криогенной установки.

Основой современных микрокриогенных систем (MКС) являются системы на базе ГKM. По распространенности они находятся на втором месте после дроссельных систем. Одноступенчатые машины используют для криостатирования устройств в диапазоне температур 150–30 К, двухступенчатые – от 30 до 10К, машины с тремя и более ступенями – в диапазоне 8–6,5 К. На рис. 68,а приведена упрощенная схема компоновки машины с криостатируемым устройством. Однако обладая рядом ценных на практике преимуществ перед другими системами, анализируемые системы имеют два существенных недостатка. Первый заключается в необходимости размещения ГKM, выполненной в виде единого с приводным двигателем агрегата, вблизи криостатируемого устройства, что требует принятия специальных конструктивных мер по эффективной защите устройства от вибраций ГKM и радиопомех, возбуждаемых электродвигателем.

Наиболее простым решением снижения уровня вибрации является связь холодной головки ГKM с криостатируемым объектом посредством упругого теплопровода (рис. 68, а). Однако пока не удалось найти конструкцию теплопровода, полностью исключающего передачу вибраций.

Сегодня есть примеры разработки MКС для космических объектов на базе ГKM Стирлинга. Так, например, система криостатирования спектрометра гамма-излучения на базе четырех ГKM Стирлинга непрерывно проработала без обслуживания на орбите в течение более 860 суток.

На рис. 69 представлена схема гелиевого рефрижератора на базе двух ГKM Стирлинга, которые обеспечивают промежуточное охлаждение гелия, циркулирующего в дроссельном контуре. В этом случае криостатируемое устройство не имеет жесткой связи с машинами, т.е. можно обеспечить допустимый уровень вибраций и эффективную защиту от радиопомех.

В настоящее время основными производителями MГKM различных модификаций на базе обратного цикла Стирлинга являются



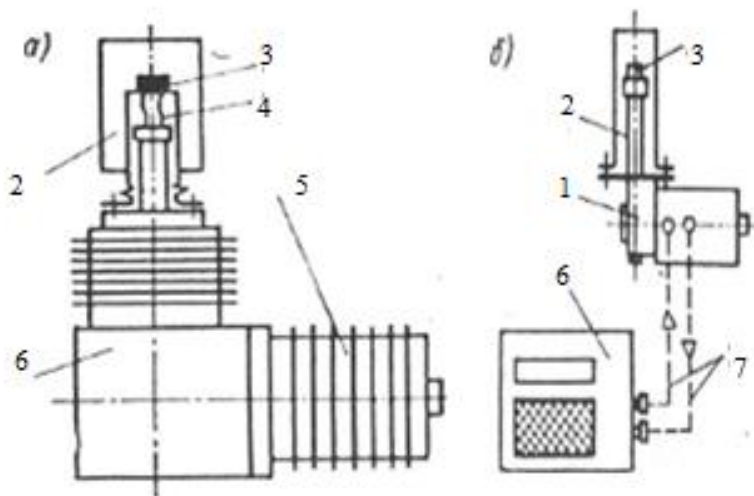


Рис. 68. Схемы компоновки микрохладителей с криостатируемым объектом:

а – на базе ГKM Стирлинга; б – на базе ГKM Гиффорда-Мак-Магона;

1 – ГKM; 2 – вакуумный криостат; 3 – криостатируемый объект;

4 – теплопровод; 5 – электродвигатель; 6 – компрессор;

7 – гибкие трубопроводы

зарубежные компании: «Ricor», «LG Electronic Inc», «Stirling Technology Company», «Sunpower Inc.» и др., продукция которых ограничена в распространении и продаже во многих странах, в том числе и в России.

На протяжении почти 50 лет в России разработчиком и изготовителем микрокриогенных систем (МКС) для криостатирования фотоприемных устройств (ФПУ) является ОАО «Сибкриотехника». Для криостатирования ФПУ искусственных спутников Земли серий «Ресурс – О», «Изумруд – М», «Метеор – 3» и межпланетного аппарата «Фобос» были разработаны МКС Стирлинга с ресурсом от 2 до 5 тысяч часов, позволившие организовать постоянное наблюдение за определенными участками земной поверхности, а также расширить научные представления о развитии Солнечной системы (рис. 69, 70).

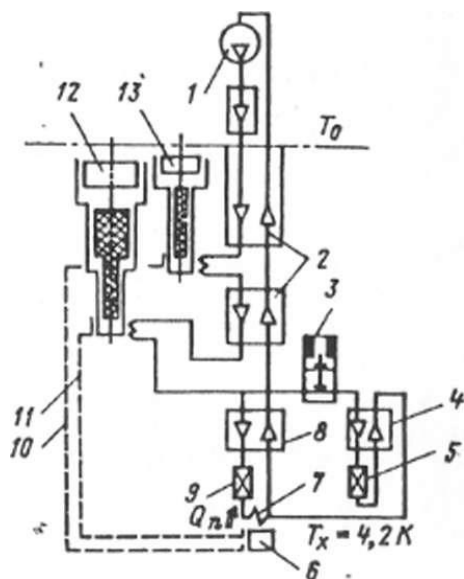


Рис. 69. Микрокриогенная система на базе двух ГКМ для криостатирования ИК приемников телескопа БСТ-1А на уровне 4,2 К: 1 – компрессор; 2 – рекуперативные теплообменники; 3 – соленоидный клапан; 4 – теплообменник пускового контура; 5,9 – дроссели; 6 – камера телескопа; 7 – теплообменник нагрузки; 8 – концевой теплообменник; 10,11 – тепловые экраны; 12 – двухступенчатая ГКМ при  $T_{x1} = 20$  К;  $Q_{x2} = 2.5$  Вт; 13 – одноступенчатая ГКМ при  $T_{x1} = 80$  К;  $Q_{x1} = 4$  Вт



Рис. 70. Общий вид МКС на базе газовых микрокриогенных машин Стирлинга: а – микрокриогенная газовая машина; б – вакуумный криостат с фотоприемным устройством; в – комплекс в сборе

Сравнительные характеристики «энерговооруженности» – масса-холодопроизводительность различных типов криоохладителей представлены на графике рис. 71.

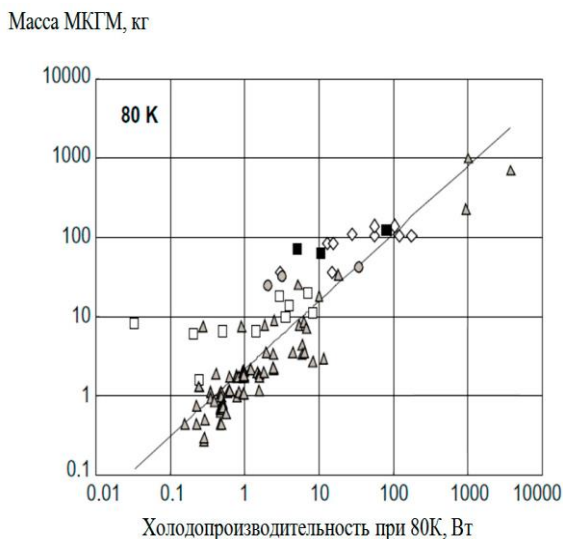


Рис. 71. Зависимость массы ГКМ от холодопроизводительности:  
 □ – МКГМ Гиффорда Мак-Магона; ■ – низкочастотная пульсационная труба; ◇ – высокочастотная пульсационная труба;  
 ▲ – МКГМ Стирлинга; ● – дроссельный рефрижератор

### 2.2.1 Теплоиспользующая ГКМ Волюмье-Такониса

*Цикл Волюмье-Такониса.* В последнее время все больший интерес вызывают холодильные машины, работающие по циклам без затрат внешней работы с использованием трех резервуаров теплоты на различных температурных уровнях.

Термодинамический анализ подобной идеально работающей системы сводится к следующему. Представим механически замкнутую систему, состоящую из холодильной машины и двигателя, причем последний развивает мощность, необходимую холодильной машине. Для такой системы:

$$l = q_0 - q_{\text{об}}; q = q_x - l; l = q_0(T_0 - T'_0) / T_0; q = lT / (T'_0 - T);$$

$$q'_0 = q_{\text{об}} + q_x = q_0 + q.$$

Отсюда:

$$\left(\frac{q}{q_0}\right)_{\max} = \frac{T(T_0 + T'_0)}{T_0(T'_0 - T)};$$

$$\left(\frac{q}{q'_0}\right)_{\max} = \frac{T(T_0 - T'_0)}{T'_0(T'_0 - T)};$$

$$\left(\frac{q'_0}{q_0}\right)_{\min} = \frac{T'_0(T_0 - T)}{T_0(T'_0 - T)}.$$

Эти выражения определяют наилучшие теоретически возможные соотношения между количествами переданной и отданной теплоты («холода»). Для иллюстрации в табл. 6 приведены значения этих отношений, вычисленные при  $T_0 = 300$  К,  $T'_0 = 77$  К и разных температурах  $T$ .

**Таблица 6. Теоретически возможные параметры холодильного цикла для температурного уровня  $T'_0 = 77$  К**

$T_x, \text{ К}$	40	30	20	10
$(q/q_0)_{\max}$	0,805	0,476	0,261	0,111
$(q/q'_0)_{\max}$	0,446	0,322	0,207	0,1
$(q'_0/q_0)_{\min}$	1,8	1,476	1,26	1,11
$\varepsilon_c = T/(T_0 - T)$	0,154	0,111	0,0715	0,0345

Организация такого цикла требовала создания машины, в которой вся совокупность процессов осуществляется за один цикл. Принцип ее работы сводится к следующему (рис. 72). В цилиндрах различных диаметров расположены вытеснители. Рабочий объем машины постоянный. Давление в цикле меняется за счет теплообмена с источниками теплоты.

В фазе I–II при неподвижном холодном вытеснителе рабочее тело проталкивается через регенератор из промежуточного объема

$V_{пр}$  в теплый объем  $V$ . В результате подвода теплоты к газу давление увеличивается (линия  $a-b$ ). В фазе II–III при неподвижном теплом вытеснителе рабочее тело проталкивается через регенератор холодного цилиндра из объема  $V_{пр}$  в холодный объем  $V_0$ . Одновременно сообщается теплота  $Q$  (полезная нагрузка), однако суммарный эффект от подвода теплоты  $Q$  и отвода теплоты  $Q_{рег}$  в регенераторе приводит к уменьшению давления (линия  $b-c$ ).

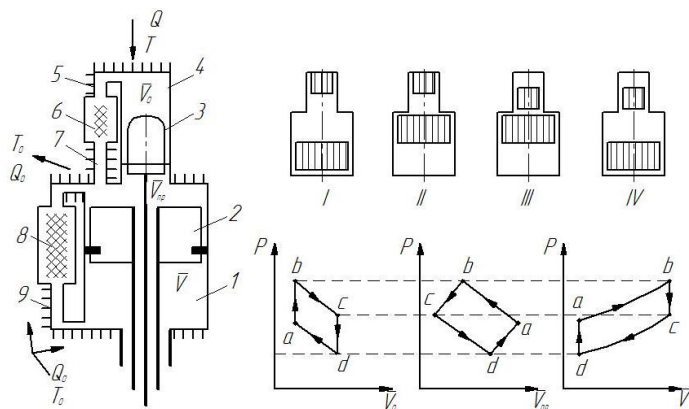


Рис. 72. Схема действия холодильной машины Волюмье-Такониса с двумя вытеснителями:

- 1 и 4 – теплый  $b$  и холодный цилиндры; 2 и 3 – теплый и холодный вытеснители; 5 – охладитель (температура  $T$ );
- 6 и 8 – регенераторы холодного и теплового цилиндров;
- 7 – промежуточный теплообменник; 9 – теплообменник

В фазе III–IV происходит аналогичный процесс проталкивания рабочего тела из теплового объема  $V$  в промежуточный  $V_{пр}$  при неподвижном холодном вытеснителе, сопровождающийся уменьшением давления (линия  $c-d$ ). В заключительной фазе IV–I рабочее тело из холодного объема  $V_0$  переталкивается в полость  $V_{пр}$  при некотором повышении давления (линия  $d-a$ ).

Практически, как и цикл Стирлинга, эту последовательную совокупность процессов можно реализовать в машине с гармоническим движением поршней, причем для идеализированной машины гармо-

ническое движение поршней не должно приводить к дополнительной необратимости.

### 2.2.2 Криогенератор Гиффорда–Мак-Магона

В 1959 г. Гиффорд и Мак-Магон предложили оригинальную охлаждающую систему с неравновесным расширением рабочего тела и передачей энергии в форме теплоты в окружающую среду (рис. 73). Позже были разработаны подобные системы с двух- и трехступенчатым расширением. В 1960 г. Гиффорд построил несколько измененную машину с газовым приводом поршня-вытеснителя. Такие машины проще, чем машины Стирлинга, но термодинамически менее эффективны, так как холодопроизводящим процессом является процесс выхлопа. Криогенератор типа Гиффорда–Мак-Магона работает следующим образом. После открытия впускного клапана рабочее тело с температурой  $T_0$  заполняет теплую полость А цилиндра 4, происходит впуск и температура газа в теплой полости цилиндра повышается в общем случае с  $T_H$  до  $T_k$  (процесс 1'-2' на рис. 73, в) в соответствии с

$$T_k = kT_0 T_H \frac{p_1}{p_2} / \left[ T_H \left( \frac{p_1}{p_2} - 1 \right) + kT_0 \right].$$

Затем при открытом впускном клапане поршень-вытеснитель поднимается и газ перемещается и холодную полость Б цилиндра 4, где температура близка к  $T$  (процесс 2'-4'). Одновременно в связи с тем, что в регенераторе газ охлаждается и его объем уменьшается, через впускной клапан в регенератор поступает дополнительное количество газа:

$$\Delta G \approx (V_y p_1 / R) / (1/T - 1/T_k),$$

где  $V_y$  – объем цилиндра 4.

Очевидно, что температура газа на входе в регенератор (точка 3') является температурой смешения потока от компрессора ( $\Delta G$ ) с температурой  $T_0$  и потока из теплой полости цилиндра с температурой  $T_H$  (процесс 2'-3').

Когда вытеснитель достигает верхней мертвой точки, впускной клапан закрывается и вслед за этим открывается выпускной клапан. Происходит очень быстрое расширение газа в процессе свободного выпуска из цилиндра и температура газа падает (процесс 4'-5'). Затем при открытом выпускном клапане поршень-вытеснитель опускается и газ из холодной полости цилиндра проталкивается через регенератор (процесс 6'-1'). К холодной полости цилиндра или регенератора подводится теплота  $q$  (полезная холодопроизводительность). Выходя на теплой стороне из регенератора, газ частично направляется в компрессор и там сжимается; другая часть газа заполняет теплую полость А цилиндра 4.

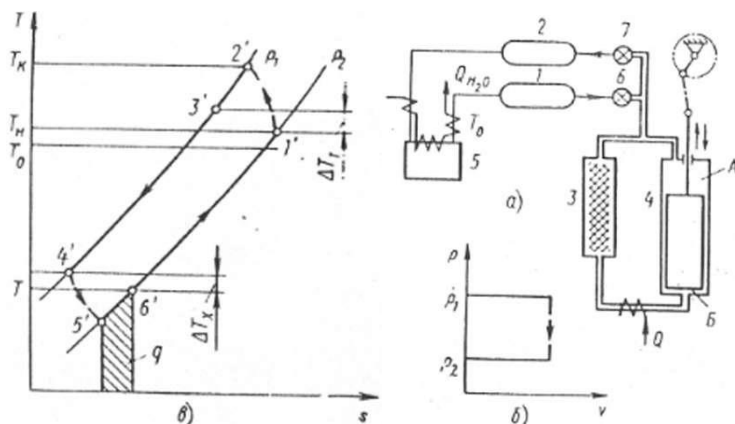


Рис. 73. Криогенератор Гиффорда–Мак-Магона:

а – схема; б, в – диаграммы  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ ;

1, 2 – ресиверы; 3 – регенератор; 4 – рабочий цилиндр с вытеснителем;

5 – компрессор; 6, 7 – клапаны впускной и выпускной;

А, Б – соответственно теплая и холодная полости цилиндра

Когда поршень-вытеснитель достигает нижней мертвой точки, выпускной клапан 7 закрывается, вслед за этим снова открывается впускной клапан 6 и цикл повторяется. Для определения холодильного коэффициента  $\varepsilon = Q/\Sigma L$  необходимо учитывать, что часть рабочего тела сжимается в компрессоре, а другая его часть в теплой части цилиндра в процессе впуска, т. е. адиабатно-неравновесно.

$$\varepsilon \approx T \left( \frac{P_1}{P_2} - 1 \right) / \left[ \left( T_0 \frac{P_1}{P_2} - T \right) \ln \frac{P_1}{P_2} \right].$$

Экспериментально установлено, что одноступенчатый холодильный цикл Гиффорда–Мак-Магона можно применить для генерации небольших количеств холода на уровне до 35 К, а двухступенчатый – на уровне до 7 К (рис.74). В двухступенчатой машине наиболее низкая достигнутая температура 6,7 К.

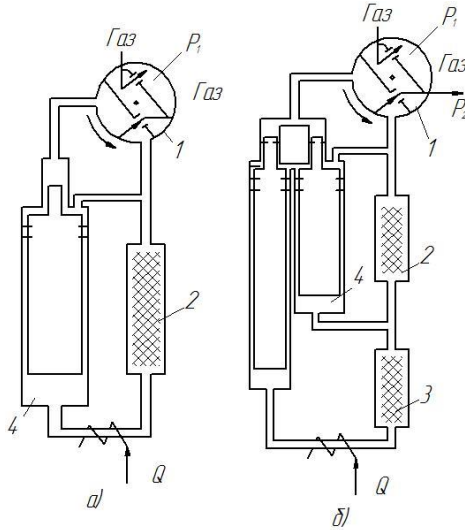


Рис. 74. Схемы одно-(а) и двухступенчатой (б) машины Гиффорда–Мак-Магона с золотниковым газораспределителем:  
1 – вращающийся золотник; 2 и 3 – регенератор соответственно первой и второй ступени

### 2.2.3 Пульсационные криогенераторы

Для создания охлаждающего устройства (криогенератора) необходимо найти способ передачи части энергии рабочего газа в окружающую среду в форме работы или теплоты. Так, в циклах Клода, Стирлинга и Капицы энергия рабочего тела уменьшается при совершении работы. В циклах Линде, цикле с вихревой трубой и цикле



Гиффорда–Мак-Магона часть энергии рабочего тела передается в окружающую среду в виде теплоты. В 1964 г. Гиффорду и Лонгсворту удалось построить оригинальное охлаждающее устройство без вытеснителя, в котором, как и в машине Гиффорда–Мак-Магона, использован процесс выхлопа и оказалась возможной передача энергии в виде теплоты в окружающую среду непосредственно во время выпуска газа. Авторы изобретения назвали это устройство пульсационной трубой (рис. 75).

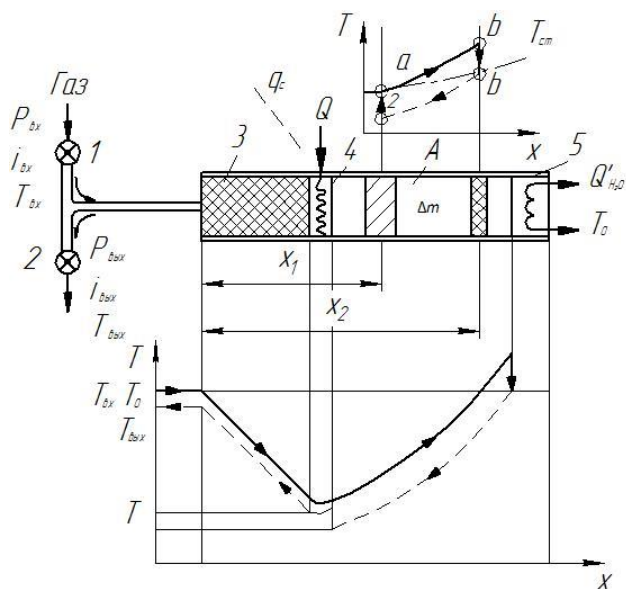


Рис. 75. Схема одноступенчатой пульсационной трубы и графики распределения температур газа по ее длине ( $T_{ст}$  – температура стенок трубы)

В основе принципа действия пульсационной трубы лежит физическое явление возникновения градиента температур при впуске и выпуске газа. После открытия впускного клапана 1 газ поступает в регенератор 3, где охлаждается, а затем входит в теплообменник 4 и в свободное рабочее пространство А с герметично закрытым дальним концом, где расположен водяной холодильник 5. В процессе за-

полнения газ сжимается неравномерно. Более высокие давления, а следовательно и температуры, наблюдаются у закрытого конца трубы, вблизи холодильника 5. Градиент температур тем более отчетливо выражен, чем меньше турбулентность в свободном пространстве трубы и чем меньше теплопритока в этот период. После окончания наполнения необходима небольшая пауза для того, чтобы теплота могла быть передана воде в холодильнике 5. Вслед за этим открывается выпускной клапан 2 и осуществляется свободный выпуск газа, при этом его температура снижается.

Так как часть энергии газа в виде теплоты  $Q_{H_2O}$  передана в окружающую среду, появляется возможность ввести в систему некоторое количество теплоты  $Q$  в виде полезной холодопроизводительности:

$$Q = Q'_{H_2O} - G(i_{ex} - i_{вых}) - Q_c,$$

где  $Q_c$  – теплоприток из окружающей среды.

Механизм переноса теплоты вдоль рабочего пространства трубы в направлении от холодного к теплому концу рассмотрен в работах академика Б. П. Константинова и профессора У. Гиффорда. Рассмотрим на рис.75 элемент газа  $\Delta m$  на расстоянии  $x_1$  от начала отсчета. Перед началом впуска температура газа близка к температуре стенки. В процессе впуска элемент газа сжимается и перемещается вправо к теплому концу рабочего пространства трубы. Процесс впуска протекает быстро, поэтому, оказавшись на расстоянии  $x_3$  от начала отсчета, элемент газа будет иметь более высокую температуру по сравнению с температурой стенки  $T_{ст}$ . В течение последующей паузы элемент охлаждается, отдавая теплоту стенкам, примерно до температуры  $T_0$ . Во время выхлопа элемент газа расширяется и перемещается влево, в первоначальное положение. При этом его температура становится ниже температуры стенок. Снова следует небольшая пауза и газ нагревается, отнимая теплоту от стенок и нагреваясь до температуры, примерно равной температуре  $T_0$ . Очевидно, что с каждым элементом газа в рабочем пространстве А происходят подобные изменения. В результате таких взаимодействий газа со стенками вдоль трубы осуществляется перенос теплоты в направлении к

теплому концу, где расположен холодильник 5. По степени термодинамического совершенства пульсационная труба практически уступает машине Гиффорда–Мак-Магона с вытеснителем. Это объясняется тем, что не удастся полностью избежать турбулентных потоков и теплообмена со стенками во время процессов впуска и выпуска, а эти явления существенно ухудшают работу такого криогенератора. Например, в первых конструкциях одноступенчатой трубы диаметром около 19 мм и длиной 150 мм с гелием в качестве рабочего газа при частоте 42 цикла в минуту, степени расширения около 2 и давлении на входе порядка 2 МПа достигнута температура около 180 К. В двухступенчатой трубе (рис.76) удалось понизить температуру до 140 К, в трехступенчатой – приблизились к 100 К.

В усовершенствованном варианте пульсационной трубы с дополнительным объемом и дюзой, разработанном в МВТУ им. И.Э. Баумана, достигнута минимальная температура  $T=100$  К, при расширении воздуха ( $p_{вх}/p_{вых} \approx 5$ ) в одной ступени.

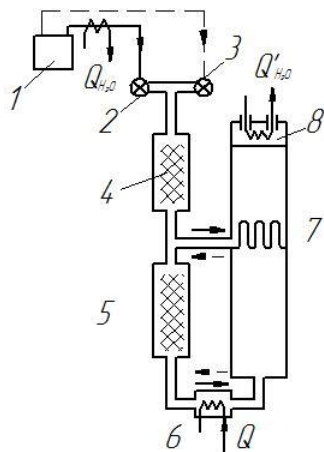


Рис. 76. Схема двухступенчатой пульсационной трубы:

- 1 – компрессор; 2 и 3 – впускной и выпускной клапаны;
- 4 и 5 – регенератор соответственно первой и второй ступени;
- 6 – охладитель второй ступени; 7 – теплообменник–охладитель первой ступени (холодильник второй ступени); 8 – холодильник первой ступени

Применение микроохладителя на базе пульсационной трубы в качестве замены криоохладителей Стирлинга зависит от возможности достижения необходимого КПД и массогабаритных характеристик. Radebaugh в 2000 году изучил потенциальное применение криоохладителей на базе пульсационной трубы и пришел к выводу, что внедрение представляется возможным применительно к требованиям SADA1 и SADA2. С тех пор в плане эксплуатационных характеристик был достигнут большой прогресс, за последние 10 лет КПД пульсационных криоохладителей стал сопоставим с криоохладителями Стирлинга, а ресурс работы уже превышает 50000 часов. На рис. 77 показаны конструктивные схемы ГKM Стирлинга и ГKM на базе пульсационной трубы.

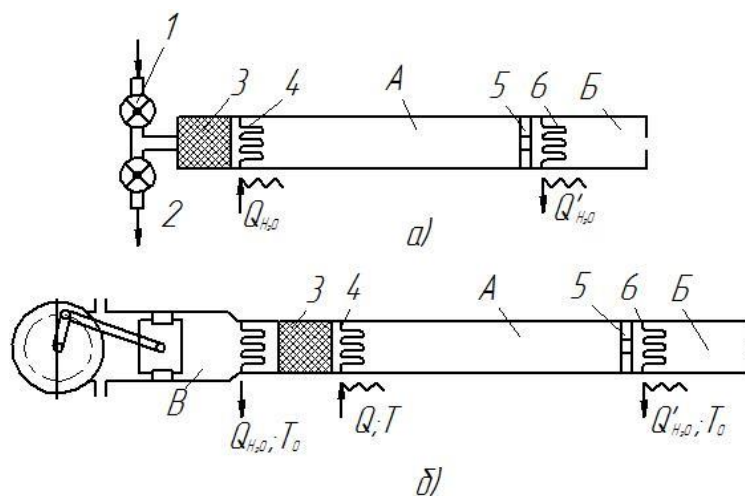


Рис. 77. Схема усовершенствованных конструкций пульсационной трубы: а – с клапанами; б – с присоединенным поршнем; 1 и 2 – впускной и выпускной клапаны; 3 – регенератор; 4 – теплообменник-охладитель; 5 – дюза (дрессельное отверстие); 6 – холодильник; 7 – концевой холодильник; 8 – компрессор-детандер; А – рабочее пространство трубы; В – ресиверный объем

Как видно из рис. 77, U-образная конструктивная схема расположения рабочих полостей аналогична конструктивной схеме ГKM

Стирлинга с неподвижным регенератором, а коаксиальная конструктивная схема аналогична схеме ГKM Стирлинга с подвижным регенератором. Фазовый сдвиг в ГKM Стирлинга обеспечивается за счет перемещения вытеснителя, а в ГKM на базе пульсационной трубы – за счет газового вытеснителя. Элементами, обеспечивающими фазовый сдвиг в ГKM Стирлинга, являются пружины (газовые, спиральные, плоские и др.), а в ГKM на базе пульсационной трубы – элемент гидросопротивления (инерционная труба, дюза, золотник и др.), перепускное отверстие и ресивер.

Для пояснения принципа работы ГKM на базе пульсационной трубы существует теория о существовании в цилиндре порции газа постоянной массы объемом  $V_g$  (объем газового вытеснителя), которая постоянно находится в цилиндре, разделяя его на объемы теплой  $V_T$  и холодной полости  $V_x$  (рис. 78). В процессе работы машины газовый вытеснитель совершает в цилиндре возвратно-поступательное движение, т.е. выполняет функции обычного вытеснителя. Перемещение газового вытеснителя обеспечивается наличием ресивера, гидросопротивления и перепускной линии с гидросопротивлением.

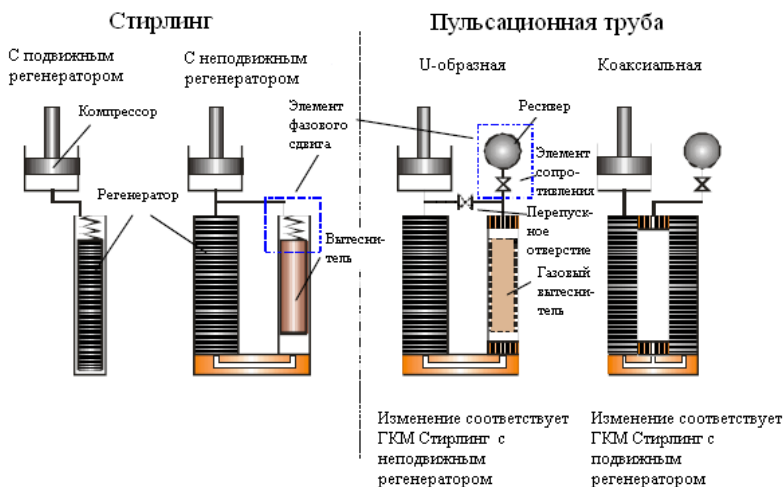


Рис. 78. Конструктивные схемы расположения рабочих полостей ГKM Стирлинга и ГKM на базе пульсационной трубы

ГКМ на базе пульсационной трубы (рис. 79) состоит из: «теплого» цилиндра 1 с поршнем 2, холодильника 3, регенератора 4, теплообменника нагрузки 5, пульсационной трубы 6 с газовым вытеснителем  $V_в$ , холодильником на теплом конце пульсационной трубы 7, элементом сопротивления 8 и ресивером 9. Объем цилиндра 1 между поршнем 2 и холодильником 3 является полостью сжатия, а объем цилиндра 6 между газовым вытеснителем  $V_в$  и теплообменником нагрузки 5 является полостью расширения  $V_х$ .

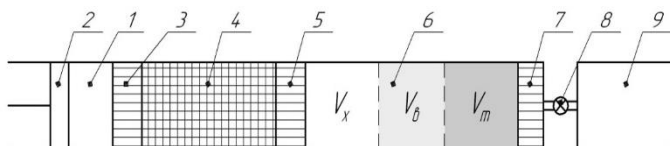


Рис. 79. Схема ГКМ на базе пульсационной трубы

Принцип работы ГКМ на базе пульсационной трубы с инерционной трубой (элемент сопротивления) иллюстрируется рис. 80:

а) поршень и газовый вытеснитель перемещаются одновременно (поршень от холодильника, газовый вытеснитель к теплообменнику нагрузки от холодильника на теплом конце пульсационной трубы). Происходит изохорное переталкивание рабочего газа из полости расширения в полость сжатия, через теплообменник нагрузки, регенератор и холодильник. Проходя через насадку регенератора, рабочий газ получает тепло от насадки и нагревается, достигая температуры полости сжатия. Газ из ресивера перемещается через элемент сопротивления (инерционную трубу) в пульсационную трубу, образуя теплую полость  $V_т$  за газовым вытеснителем (а-б);

б) поршень движется вправо (в сторону холодильника), газовый вытеснитель неподвижен. Происходит изотермическое сжатие, газ в полости сжатия сжимается, происходит поджатие газового вытеснителя со стороны холодильника на теплом конце газом из ресивера (температура постоянна, объем газа уменьшается, давление увеличивается). В холодильнике происходит отвод тепла сжатия в окружающую среду (б-в);

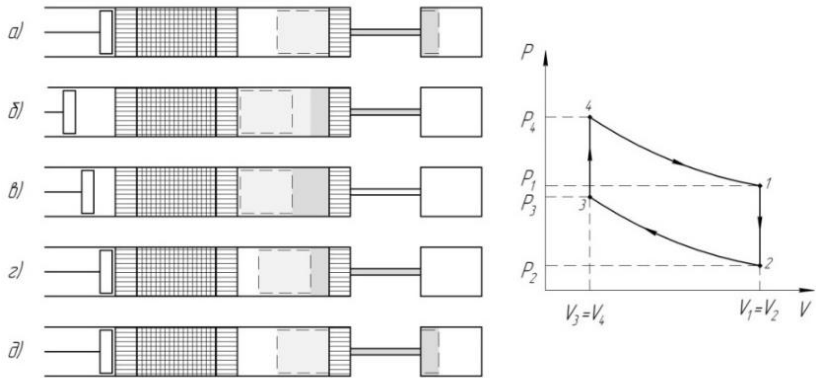


Рис. 80. Идеальный цикл ГКМ на базе пульсационной трубы

в) в процессе изотермического сжатия поршень и газовый вытеснитель перемещаются одновременно (поршень к холодильнику, газовый вытеснитель от теплообменника нагрузки к холодильнику на теплом конце пульсационной трубы). Газ при постоянном объеме переходит из полости сжатия через холодильник, регенератор и теплообменник нагрузки в полость расширения. При прохождении газа через насадку регенератора теплота от рабочего газа передается насадке регенератора, вследствие чего газ охлаждается и достигает значения температуры полости расширения.

Происходит поджатие газа в теплой полости пульсационной трубы и перетечка его из теплой зоны через холодильник на теплом конце, инерционную трубу в ресивер. В холодильнике на теплом конце происходит отвод тепла сжатия газа в теплой зоне пульсационной трубы (в-г);

г) газовый вытеснитель движется вправо (от теплообменника нагрузки к холодильнику на теплом конце), поршень неподвижен. Происходит изотермическое расширение, газ в полости расширения расширяется (температура постоянна, объем газа увеличивается, давление уменьшается). В теплообменнике нагрузки рабочему газу подводится тепло от объекта охлаждения. Газ из теплой полости пульсационной трубы перетекает в ресивер (г-д). Далее цикл повторяется.

Процессы в реальной ГKM существенно отличаются от процессов идеального цикла. В связи с этим эффективность реальных ГKM с циклом Стирлинга и ГKM на базе пульсационной трубы обусловлена не только совершенством их идеальных циклов, но и в значительной мере конструктивными решениями, обеспечивающими малые потери в ее действительном цикле (рис. 81).

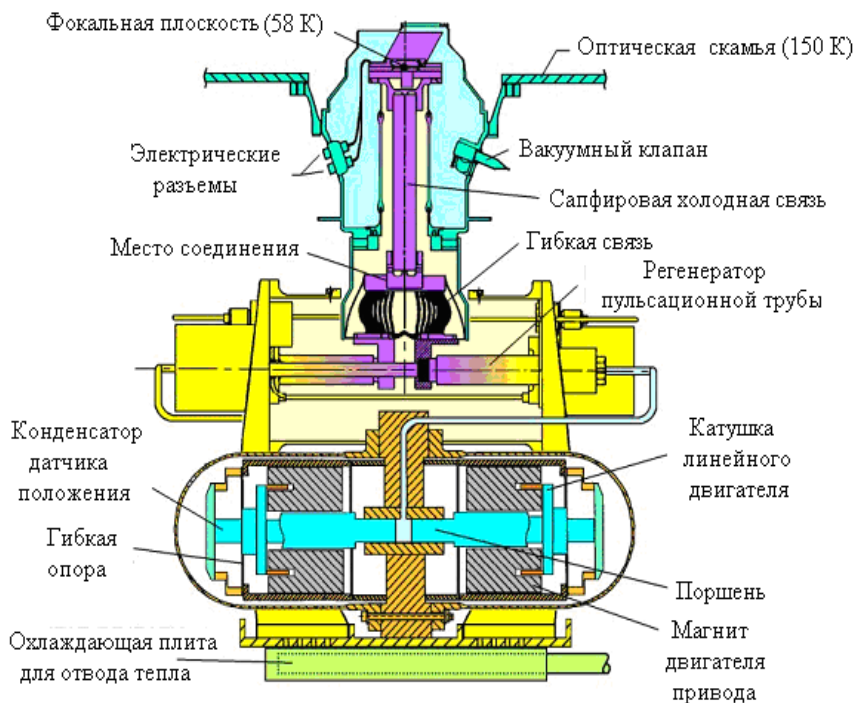


Рис. 81. Пульсационный криоохладитель в составе системы охлаждения ИК приемника излучения

Можно видеть (рис.82), что охладители с пульсационной трубой более компактны, так как отсутствуют габаритные элементы, такие как, например, инерционная труба, при этом достигается температура холодной головки в пределах 20...70 К при уровне подводимой мощности 30...90 Вт (рис. 83).





Рис. 82. Пульсационный криоохладитель SB160

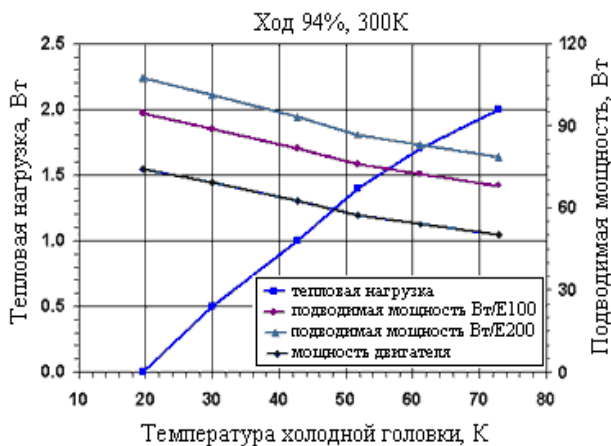


Рис. 83. Характеристики SB160

### 2.3 Термоэлектрические охладители

Экономичность термоэлемента (рис. 84), а также максимальное снижение температуры на спаях зависят от эффективности (добротности) полупроводникового вещества  $z$ , в которую входят удельная электропроводность  $\sigma$ , коэффициент термоЭДС  $\alpha$  и удельная

теплопроводность  $\lambda$ . Эти величины взаимосвязаны, так как зависят от концентрации свободных электронов или дырок.

Электропроводность  $\sigma$  пропорциональна числу носителей  $n$ , термоЭДС стремится к нулю с увеличением  $n$  и возрастает при уменьшении  $n$ . Теплопроводность состоит из двух частей: теплопроводности кристаллической решетки  $\kappa_p$ , которая практически не зависит от  $n$ , и электронной теплопроводности  $\lambda_e$ , пропорциональной  $n$  (рис. 84).

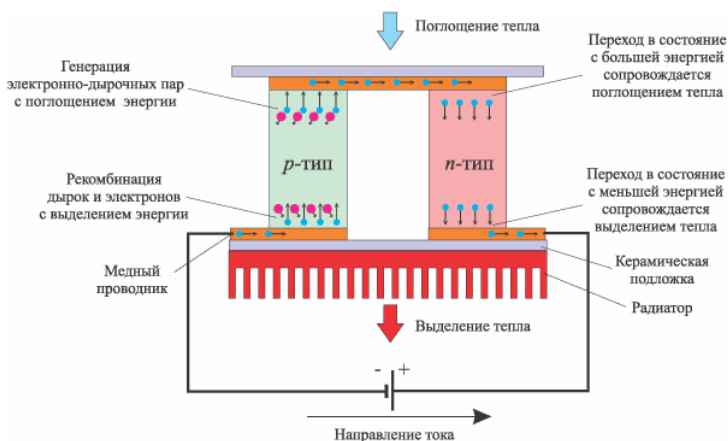


Рис. 84. Схема термоэлемента

Эффективность металлов и металлических сплавов мала из-за низкого коэффициента термоЭДС, а в диэлектриках — из-за очень малой электропроводности. По сравнению с металлами и диэлектриками эффективность полупроводников значительно выше, чем и объясняется их широкое применение в настоящее время в термоэлементах. Эффективность материалов также зависит от температуры.

Термоэлемент состоит из двух ветвей: отрицательной ( $n$ -тип) и положительной ( $p$ -тип). Так как материал с электронной проводимостью имеет термоЭДС с отрицательным знаком, а материал с дырочной проводимостью — с положительным, то можно получить большее значение термоЭДС. При увеличении термоЭДС растет  $z$ . Для термоэлементов в настоящее время применяют низкотемпера-

турные термоэлектрические материалы, исходными веществами которых являются висмут, сурьма, селен и теллур. Максимальная эффективность  $z$  для этих материалов при комнатных температурах составляет:  $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – для  $n$ -типа,  $2,6 \cdot 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – для  $p$ -типа (рис. 85). В настоящее время  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  применяют редко, поскольку созданные на его основе твердые растворы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Be}_2\text{Se}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  имеют более высокие значения  $z$ .



Рис. 85 – Термоэлектрический модуль

Эти материалы впервые были получены и исследованы в нашей стране и на их основе освоен выпуск сплавов ТВЭХ-1 и ТВЭХ-2 для ветвей с электронной проводимостью и ТВДХ-1 и ТВДХ-2 – для ветвей с дырочной проводимостью. Твердые растворы  $\text{Bi-Se}$  применяют в области температур ниже 250 К. Максимального значения  $z = 6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  достигает при  $T \approx 80 \div 90 \text{ К}$ . Интересно отметить, что эффективность этого сплава значительно повышается в магнитном поле.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архаров, А.М. Криогенные системы: основы теории и расчёта [Текст] / А.М. Архаров. – М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.
2. Архаров, А.М. Низкотемпературные газовые машины (криогенераторы) [Текст] / А.М. Архаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 224 с.
3. Фрадков, А.Б. Гелиевые и водородные криостаты без дополнительного охлаждения жидким азотом [Текст] / А.Б. Фрадков // Приборы и техника эксперимента», 1961.
4. Красночуб, Е.К. Микрокриогенные системы охлаждения космических летательных аппаратов инфракрасного наблюдения на основе микрокриогенных систем [Текст] / Е.К. Красночуб // Полет. – Самара, 2004. – №11. – С. 41-48.
5. Бродянский, В.М. Методика расчёта схем криогенных установок [Текст] : учеб. пособие / В.М. Бродянский, А.Г. Тащина. – М.: Моск. энергетич. инст., 1972. – 86 с.
6. Новотельнов, В.Н. Криогенные машины [Текст] / В.Н. Новотельнов, А.Д. Суслов, В.Б. Полтараус. – СПб.: Политехника, 1991. – 335 с.
7. Mc Cormick, J.A. Progress on the development of miniature turbo machines for low-capacity reverse-Braytoncryocoolers / J.A. Mc Cormick, W.L. Swift, H. Sixsmith // Cryocoolers 9, Plenum Press, New York, 1997.– P.– 475-483.
8. Nellis, G. Reverse Braytoncryocooler for NICMOS / G. Nellis, F. Dolan, J. Mc Cormick, W. Swift, H. Sixsmith, J. Gibbon, S. Castles // Cryocoolers 10, Plenum Press, New York, 1999.–P.–431-438.
9. Gedeon, D. DC gas flows in Stirling and pulse tube refrigerators / D. Gedeon // Cryocoolers 9, Plenum Press, New York, 1997.–P.–385-392.

10. Biberman, L.M. A brief history of imaging devices for night vision / L.M. Biberman, and R.L. Sendall // in *Electro-Optical Imaging: System Performance and Modeling*, edited by L.M. Biberman, SPIE Press, Bellingham, 2000. – Chapter 1. – P. 11-26.
11. Cryogenic coolers [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о фирме «Astrium». – Режим доступа: <http://www.astrium-space.com/>, свободный.
12. Baars, J. New aspects of the material and device technology of intrinsic infrared photo detectors / J. Baars // *Physics and Narrow Gap Semiconductors*, edited by E. Gornik, Springer, Berlin, 1982. – P. 280-282.
13. Elliott, C.T. An integrating detector for serial scan thermal imaging / C.T. Elliott, D. Day, B.J. Wilson // *Infrared Physics*, 1982. – № 2. – P. 31-42.
14. Köhler, J.W.L. Fundamentals of the gas refrigeration machine / J.W.L. Köhler, C.O. Jonkers // *Philips Tech*, 1954. – Rev. 16 № 3. – P. 69-78.
15. Little, W. A. Recent developments in Joule-Thomson cooling: gases, coolers, and compressors / W.A. Little // *Proc. 5th International Conference on Cryocoolers*. Monterey CA, 1988. – №2. – P. 3-11.
16. Кузьменко, Г.П. Разработка и исследование высокопроизводительных теплообменных каналов криогенных испарителей [Текст] / Г.П. Кузьменко, В.К. Орлов, В.Е. Позняк // *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1980. – № 3. – С. 13-15.
17. Фастовский, В. Г. Криогенная техника [Текст] / А.Г. Надольников, В.Г. Фастовский, Ю.В. Петровский. – М.: Изд-во «Энергия», 1967. – 273 с.
18. Скотт, Р.Б. Техника низких температур [Текст] / Р.Б. Скотт. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. – 435 с.
19. Radebaugh, R. Recent developments in cryocoolers / R. Radebaugh // *Proc. 19th International Congress of Refrigeration*, The Hague, Netherlands, 1995. – №2. – P. 973-989.
20. Radebaugh, R. A comparison of three types of pulse tube refrigerators: New methods for reaching 60 K / R. Radebaugh, J. Zimmerman,

D.R. Smith, B. Louie // Adv. in Cryogenic Engineering, Plenum Press, New York, 1986. –Vol. 31. – P. 779-789.

21. Чумак, И.Г. Холодильные установки [Текст] / И.Г. Чумак [и др.] – М.: Агропромиздат, 1991. – 416 с.

22. Грезин, А.К. Микрокриогенная техника [Текст] / А.К. Грезин, В.С. Зиновьев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.

Учебное издание

*Довгялло Александр Иванович,  
Белозерцев Виктор Николаевич,  
Некрасова Светлана Олеговна*

## **БОРТОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

*Учебное пособие*

Редактор Н.С. Купринова  
Компьютерная верстка Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 23.12.2019. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печ. л. 9,0.  
Тираж 25 экз. Заказ . Арт. – 7(РЗУ) /2019.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

