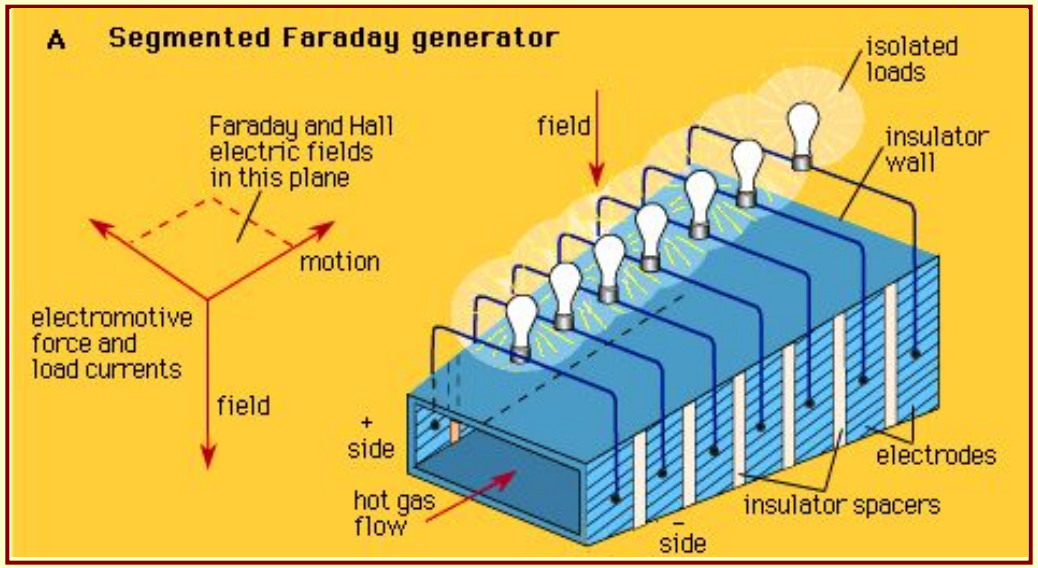
Раздел 5

МГД преобразователи энергии. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии



Содержание лекции

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

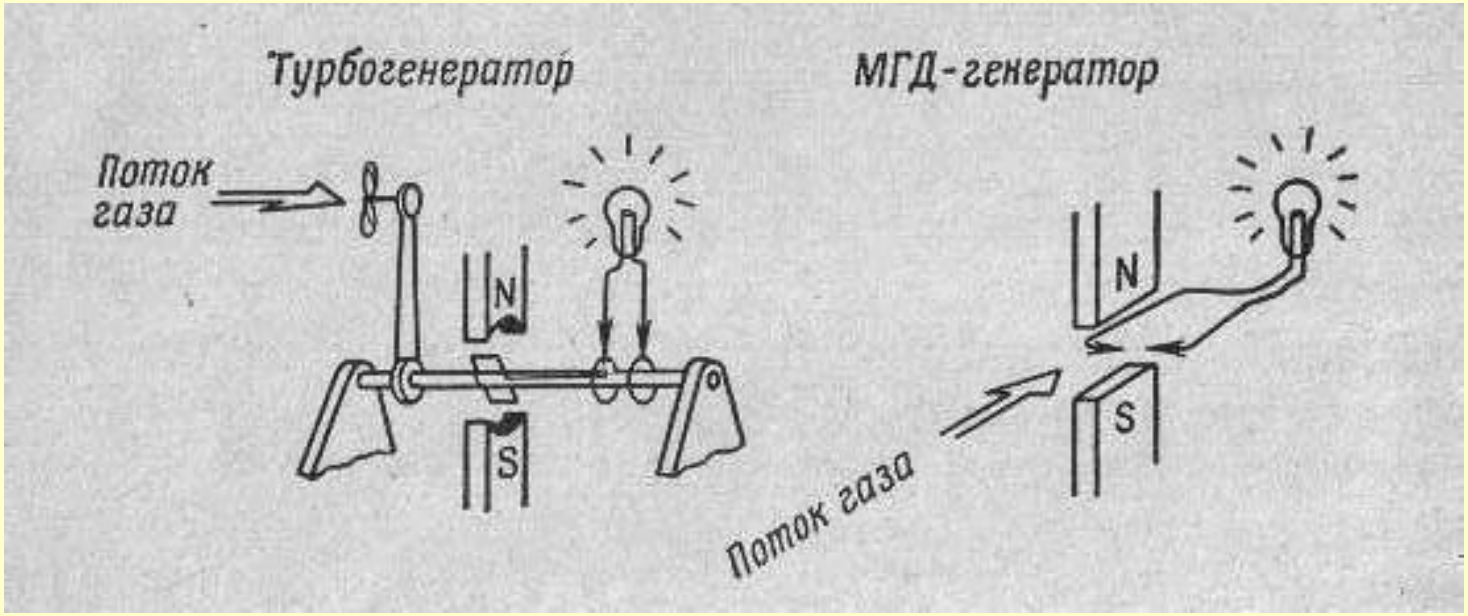
2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Сравнение МГД- генератора и турбогенератора



- В турбогенераторе внутренняя энергия газа преобразуется в кинетическую энергию пропеллера (ротора), а затем кинетическая энергия движущегося твердого проводника - в электрическую энергию
- В МГД генераторе движущейся газ сам является проводником. В результате внутренняя энергия электропроводного газа преобразуется в электрическую энергию.
- Движение проводников поперек магнитного поля приводит в обоих случаях к возникновению ЭДС и тока в соответствии с законом индукции Фарадея

История изобретения

- Впервые идею использования жидкого проводника была выдвинута ещё Фарадеем, в 1831 совершившим неудачную попытку применения её на практике. В дальнейшем, в 1851 году английскому учёному Волластону удалось измерить ЭДС, индуцированную приливными волнами в Ла-Манше
- Первый работающий МГД-генератор был построен только в 1950-х годах благодаря развитию теории **магнитной гидродинамики** и **физики плазмы**, исследованиям в области физики высоких температур и созданию к этому времени жаропрочных материалов, использовавшихся тогда прежде всего в ракетной технике. Источником плазмы с температурой 3000 К в первом МГД-генераторе, построенном в США в 1959 году, служил **плазмотрон**, работавший на аргоне с присадкой щелочного металла для повышения степени ионизации газа. Мощность генератора составляла *11,5 кВт*.

Принцип действия МГД генератора

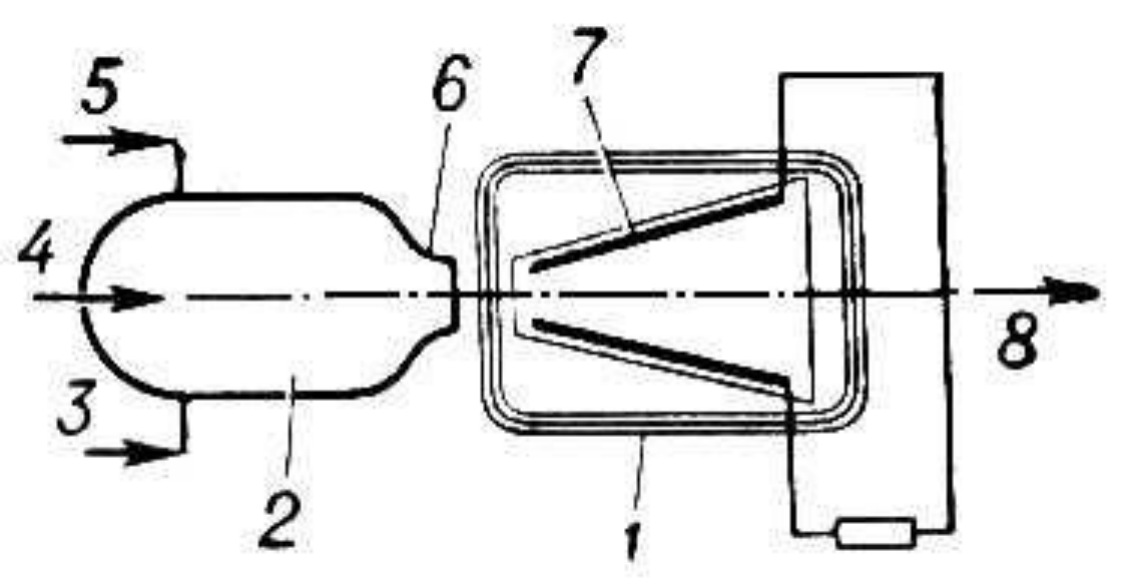


Рис. 1. Простейшая схема установки с МГД-генератором: 1 — обмотка электромагнита; 2 — камера сгорания; 3 — присадка; 4 — воздух; 5 — топливо; 6 — сопло; 7 — электроды с последовательно включенной нагрузкой; 8 — выход продуктов сгорания.

Достоинства

- Основное преимущество МГД-генератора — отсутствие в нём движущихся узлов или деталей, непосредственно участвующих в преобразовании тепловой энергии в электрическую – рост КПД η

- Температура газа на входе в МГД генератор, работающий на продуктах сгорания органических топлив, может достигать 2500—2600° С против максимум 650°С в паровых и 1100° С в газовых турбинах. Таким образом, верхняя температура рабочего тела в МГД генераторе соответствует температуре горячего источника тепла; благодаря этому резко снижаются потери, обусловленные необратимостью процесса передачи тепла от горячего источника к рабочему телу и значительно возрастает также термический КПД теплосиловой установки.

$$\eta = \left(T_н - T_х\right)/T_н$$

- Теоретически КПД могут достигать 50-60 %!!!

- В сочетании с паросиловыми установками, МГД-генератор позволяет получить большие мощности в одном агрегате, до *500—1000 МВт*

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

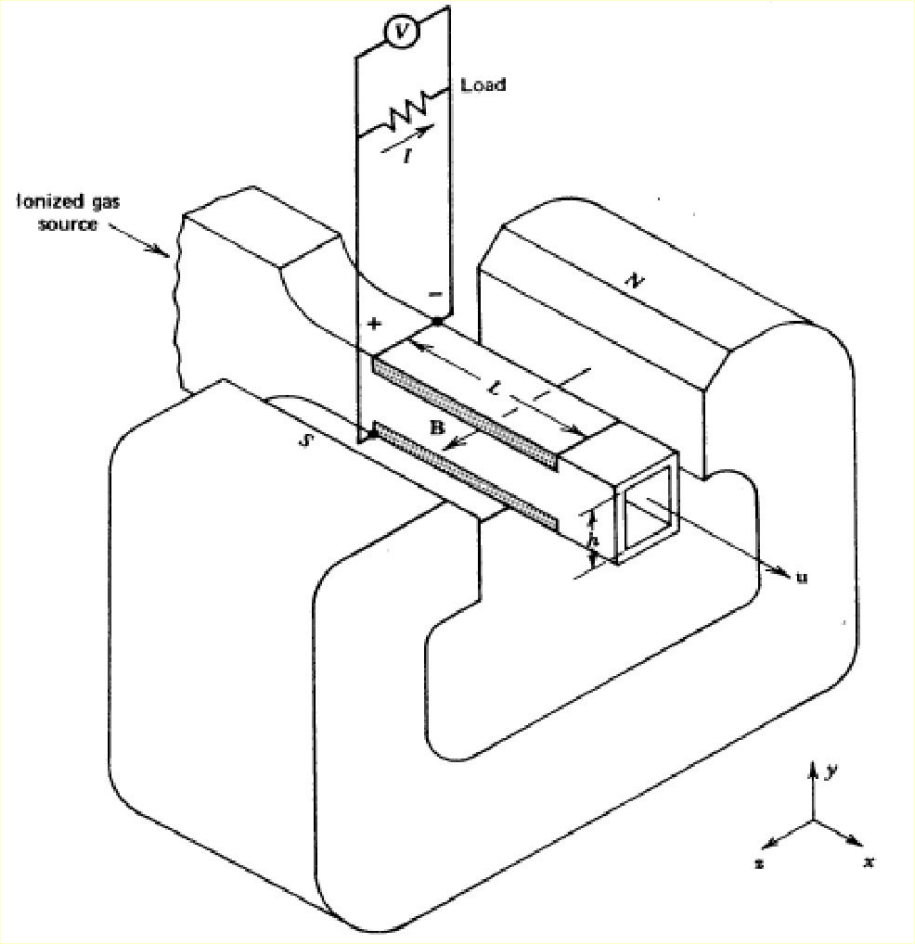
2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Физические принципы фарадеевского генератора



Пренебрегая вязкостью, инерцией и эффектом Холла, обобщенный заком Ома

$$\vec{j} = \sigma\left(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}\right)$$

$$j_y = \sigma\,(u \cdot B - E_y)$$

E_y – внешнее электрическое поле, обусловленное нагрузкой.

Для открытой цепи $J_y = 0$

Для u= 1000 м/с, B = 2 Т $\Rightarrow E_y$ = 2 кВ/м

Ток короткого замыкания $J_y = -\sigma uB$

Вводят коэффициент загрузки $K = E_y / uB$

Это дает следующие соотношения для выходного напряжения и удельной мощности от тока

$$j_y = (1-K)\sigma uB,\;\; E_y = uB - j_y/\sigma,\;\; P = j_y uB - j_y^2/\sigma$$

Как видно, напряжение линейно меняется с током, а мощность – как квадрат тока, т.е. так же, как и для большинства источников электроэнергии. Это не будет так, если u, B и σ зависят от тока.

Физические принципы фарадеевского генератора (2)

Удельная сила на единицу объема F_x, тормозящая газ, равна

$$F_x = j_y B = (1-K)\sigma u B^2$$

Чтобы газ мог двигаться в генераторе против этой силы, между входом и выходом генератора должна существовать разность давлений.

$$\Delta p = F_x L = (1-K)\sigma u B^2 L = j_y BL, где\, L - длина\, канала$$

Мощность, затрачиваемая газом на преодоление этой тормозящей силы, равна

$$P_m = F_y u = (1-K)\sigma u^2 B^2$$

Вкладываемая электрическая мощность $P = j_y E_y = (1-K)K\sigma u^2 B^2$

Максимальная мощность при K =1/2!

Отношение вкладываемой электрической мощности P к P_m представляет электрический КПД

$$\eta_e = P/P_m = K$$

Физические принципы фарадеевского генератора (3)

$$P = j_y E_y = (1 - K) K \sigma u^2 B^2$$

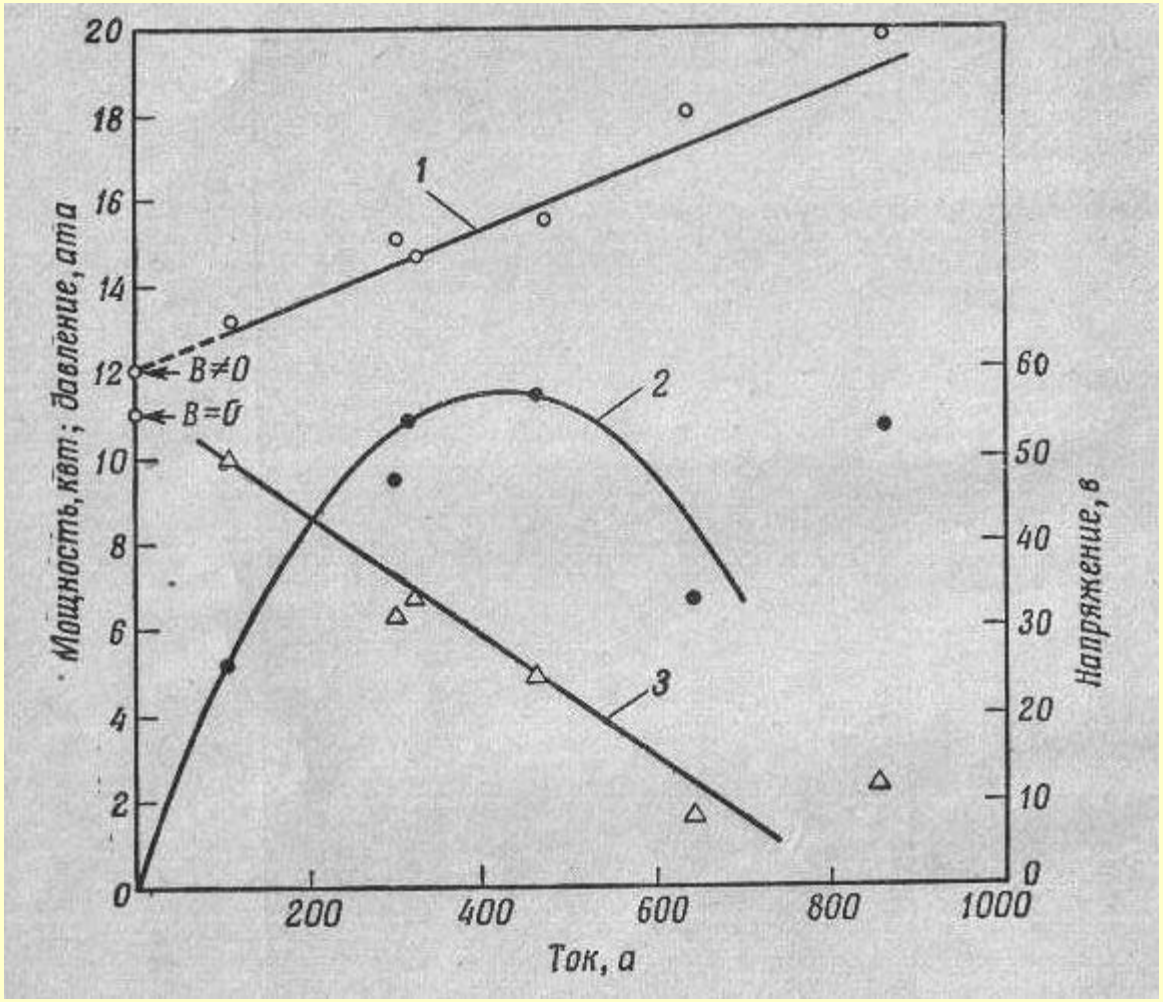
Мощность МГД генератора пропорциональна проводимости рабочего тела, квадрату его скорости и квадрату напряжённости магнитного поля.

Для газообразного рабочего тела в диапазоне температур 2000—3000 К проводимость пропорциональна температуре в 11—13-й степени и обратно пропорциональна корню квадратному из давления.

Скорости потока в МГД генераторе могут быть в широком диапазоне — от дозвуковых до сверхзвуковых.

Индукция магнитного поля определяется конструкцией магнитов и ограничивается значениями около 2 Т для магнитов со сталью и до 6—8 Т для сверхпроводящих магнитных систем.

Пример реального эксперимента



Давления (1), выходная мощность (2) и напряжение (3) в зависимости от тока нагрузки в МГД генераторе «Марк-I».

Камера сгорания ракетного двигателя – при расходе топлива 45 г/с мощность 32 МВт, из них 8.5 МВт для питания электромагнита.

Учет эффекта Холла

С учетом эффекта Холла, обобщенный закон Ома $\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - \frac{\omega\tau}{B}(\vec{j} \times \vec{B})$

$$j_x = \frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(E_x - \omega\tau \cdot E_y - \omega\tau \cdot uB)), \; j_y = \frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(E_y + uB + \omega\tau \cdot E_x)$$

В МГД генераторе со сплошными электродами такие электроды шунтируют входное и выходное сечение канала, и можно положить $E_x = 0$.

$$j_x = -\frac{\sigma\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}(E_y + uB)), \; j_y = \frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(E_y + uB)$$

$$P = -j_y E_y = -\frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(uB + E_y)E_y$$

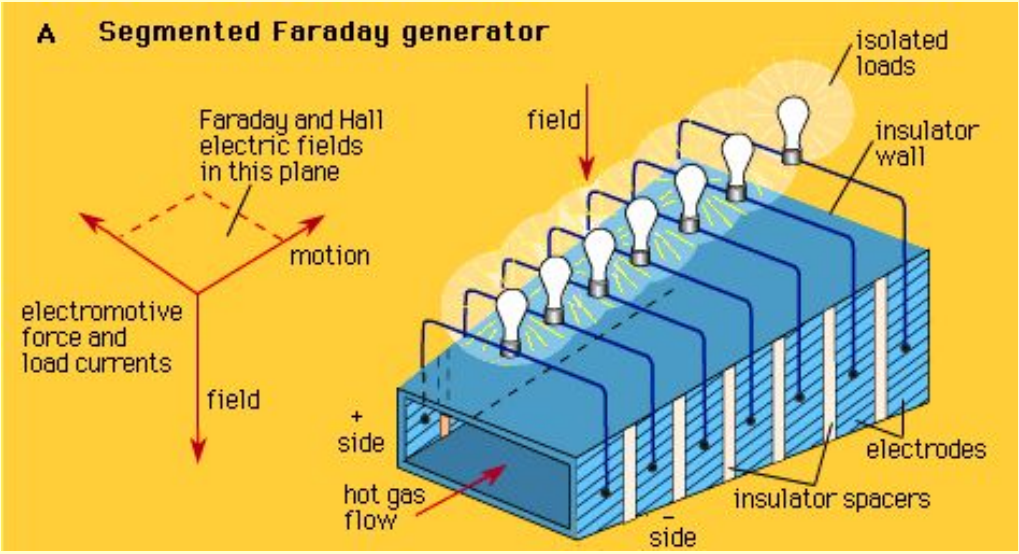
Таким образом, в генераторе со сплошными электродами из-за эффекта Холла происходит уменьшение тока и мощности в нагрузку примерно в $(1+\omega^2\tau^2)$ раз, а также возникает холловский ток, который протекает в направлении движения газа и замыкается через сплошные электроды.

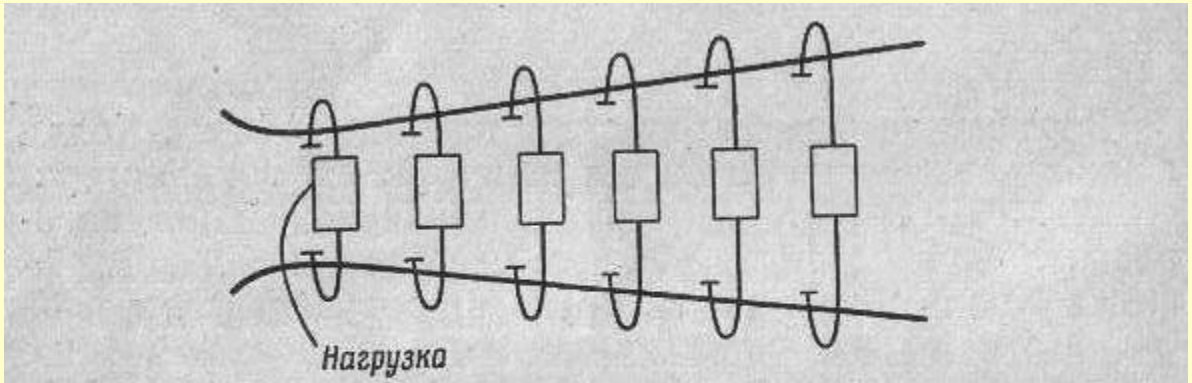
Предположим, что мы разделили электроды на множество изолированных со своими нагрузками. В этом случае холловский ток $j_x = 0$

$$E_x = \omega\tau(E_y + uB), \; j_y = \sigma(E_y + uB)$$

Как и в генераторе со сплошными электродами в отсутствии эффекта Холла!

Конструкция секционированного Фарадеевского генератора

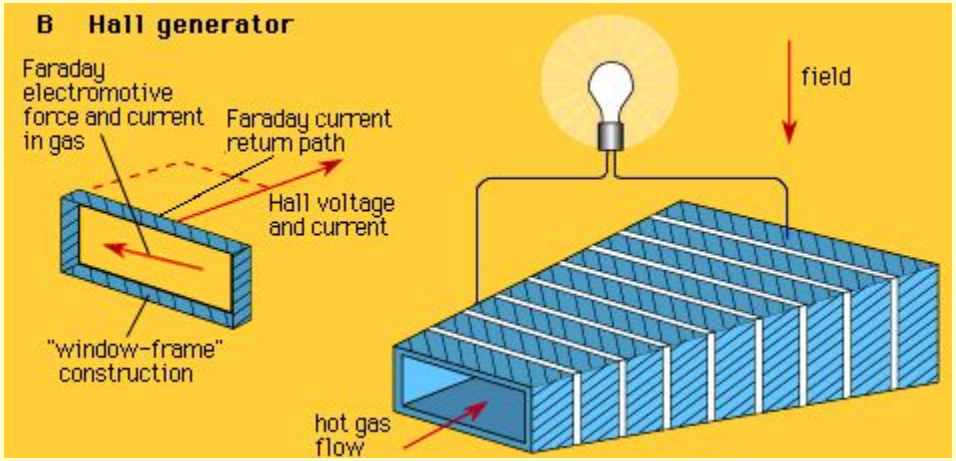


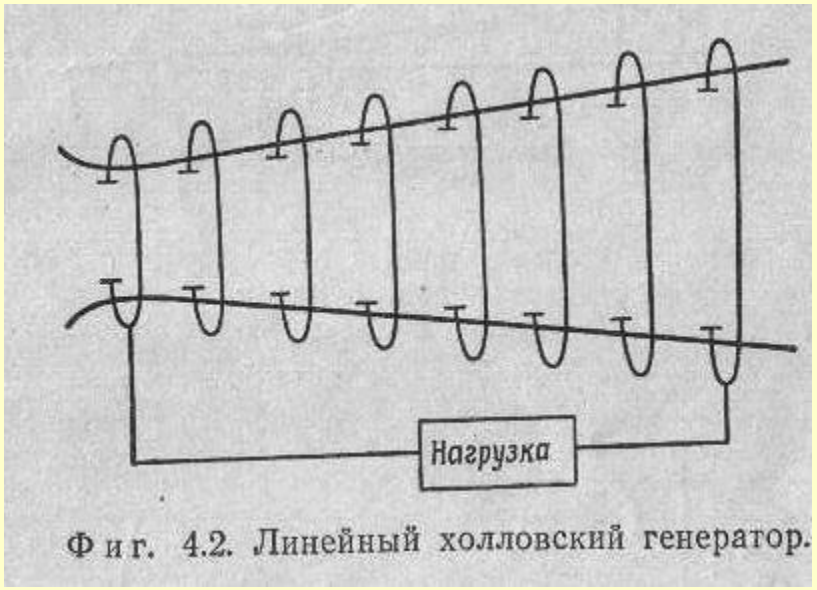


Фиг. 4.1. Линейный фарадеевский генератор с секционированными электродами.

Фарадеевский генератор со сплошными или секционированными электродами.
Секционирование электродов в фарадеевском МГД-генераторе делается для того, чтобы уменьшить циркуляцию тока вдоль канала и через электроды (эффект Холла) и тем самым направить носители зарядов перпендикулярно оси канала на электроды и в нагрузку; чем значительнее эффект Холла, тем на большее число секций необходимо разделить электроды, причём каждая пара электродов должна иметь свою нагрузку, что весьма усложняет конструкцию установки.

Конструкция Холловского генератора





Фиг. 4.2. Линейный холловский генератор.

Холловский генератор, в котором расположенные друг против друга электроды короткозамкнуты, а напряжение снимается вдоль канала за счёт наличия поля Холла. Применение наиболее выгодно при больших магнитных полях. За счёт наличия продольного электрического поля можно получить значительное напряжение на выходе генератора.

Холловский генератор

При больших значениях параметра Холла, можно создать «чистый» Холловский генератор. В нем противолежащие электроды закорочены, E_y=0

$$j_x = \frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(E_x - \omega\tau \cdot E_y - \omega\tau \cdot uB)), \; j_y = \frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(E_y + uB + \omega\tau \cdot E_x)$$

Тогда

$$j_x = \frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(E_x - \omega\tau \cdot uB), \; j_y = \frac{\sigma}{1+\omega^2\tau^2}(uB + \omega\tau \cdot E_x)$$

$$P = -j_x E_x = \frac{\omega^2\tau^2\sigma u^2 B^2}{1+\omega^2\tau^2}(1-K_x)K_x, \text{где } K_x = \frac{E_x}{\omega\tau \cdot uB}$$

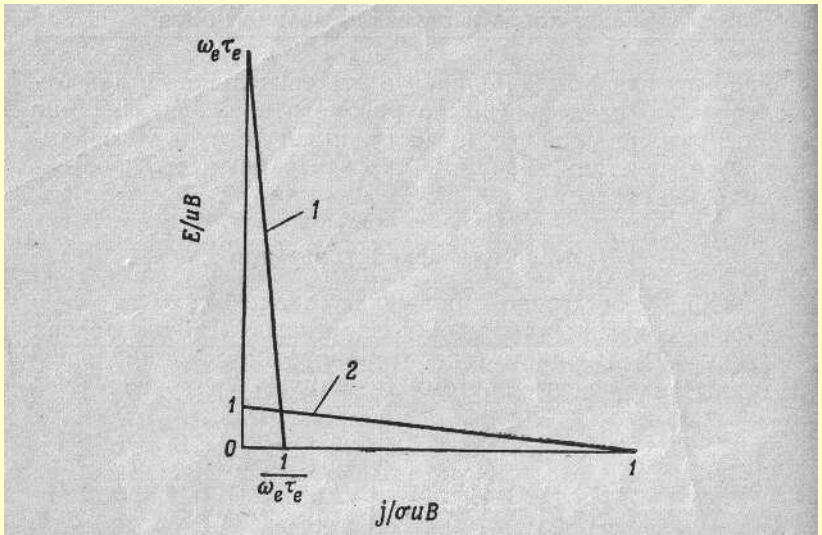
Электрический КПД можно получить

$$\eta_e = \frac{j_x E_x}{j_y uB} = \frac{\omega^2\tau^2 K_x}{1+\omega^2\tau^2 K_x}(1-K_x) \quad \Rightarrow \quad K_{x,\max} = \frac{1}{\omega^2\tau^2}(\sqrt{1+\omega^2\tau^2}-1)$$

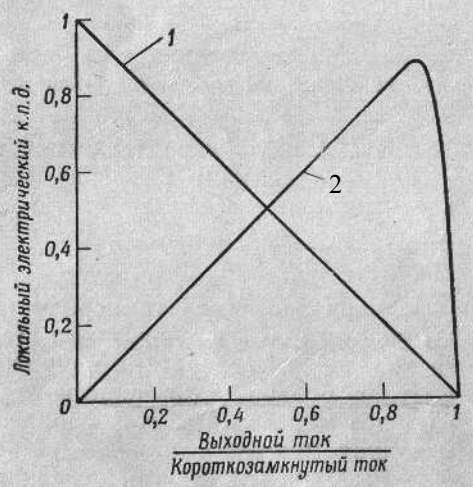
$$\eta_{e,\max} = 1 - \frac{1}{\omega^2\tau^2}(\sqrt{1+\omega^2\tau^2}-1), \quad \lim(\eta_{e,\max})\Big|_{\omega\tau\to\infty} = 1 - 2/\omega\tau$$

Нужен большой параметр Холла!

Сравнение ВАХ Холловского и Фарадеевского генераторов



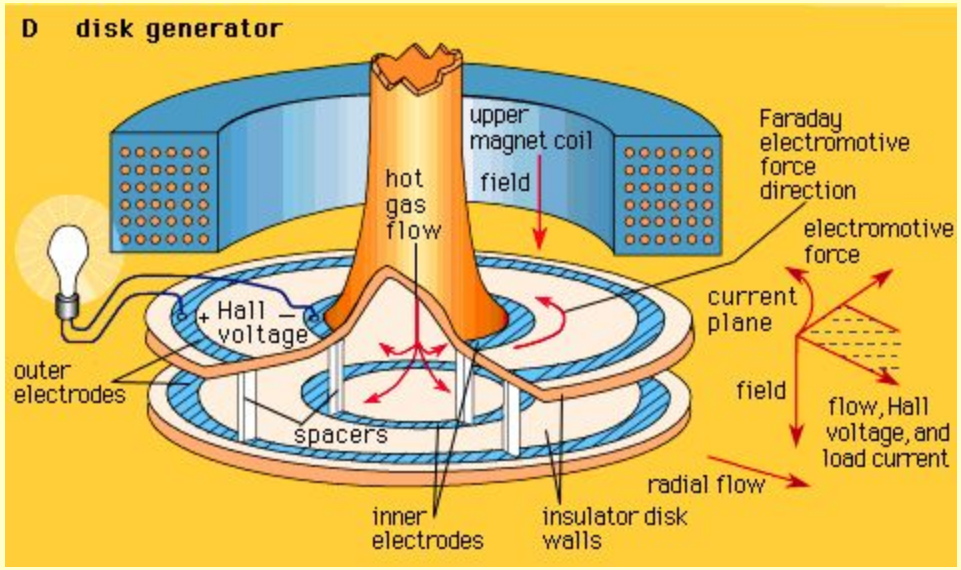
Фиг. 4.3. Сравнение вольтамперных характеристик холловского и фарадеевского генераторов.
1 — холловский генератор; 2 — фарадеевский генератор.

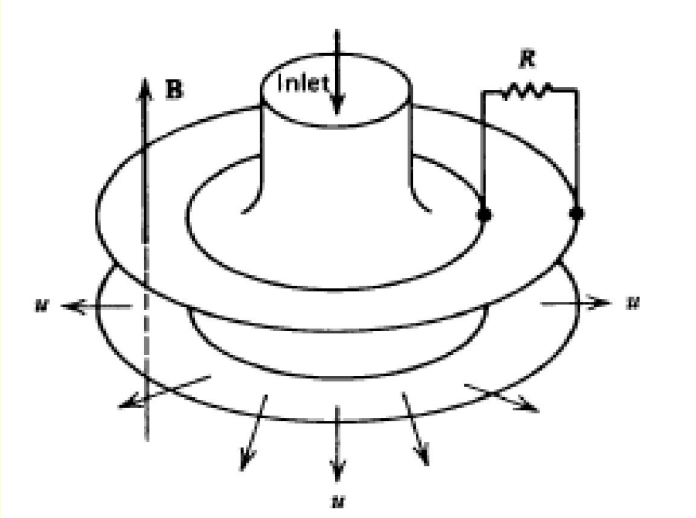


Фиг. 4.4. Сравнение зависимости электрического к. п. д. от приведенного тока I для холловского и фарадеевского генераторов.
1 — фарадеевский генератор; 2 — холловский генератор.

- В Холловском генераторе напряжение холостого хода в $\omega\tau$ раз больше, а ток короткого замыкания в $(1+\omega^2\tau^2)/\ \omega\tau$ раз меньше, чем для Фарадеевского генератора
- В отличие от Фарадеевского генератора эффективность Холловского генератора достигает максимума в области, близкой к режиму короткого замыкания
- В Холловском генераторе в результате взаимодействия продольного тока с магнитным полем возникает градиент давления, перпендикулярный потоку. Делают криволинейный канал, чтобы центробежная сила уравновесила силу $j_x B$

Конструкция дискового Холловского генератора





Сериесный (диагональный) генератор

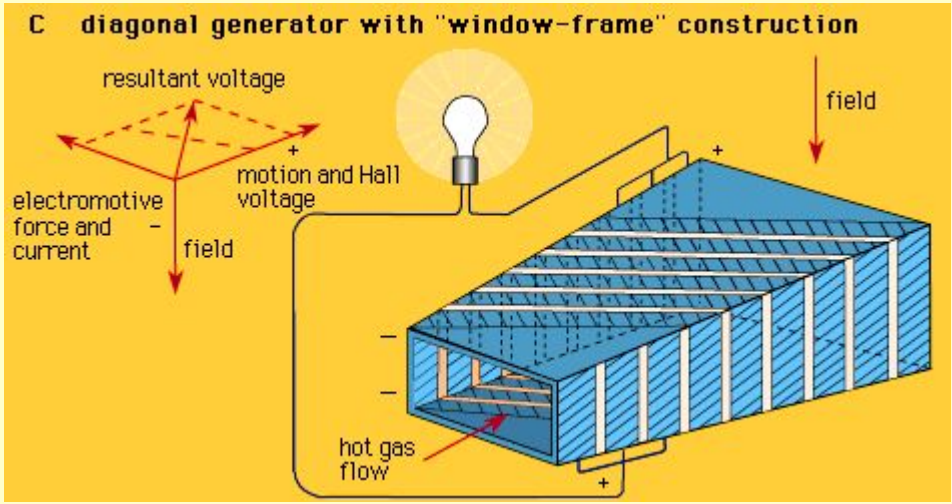
В секционированном фарадеевском генераторе угол между электрическими полями

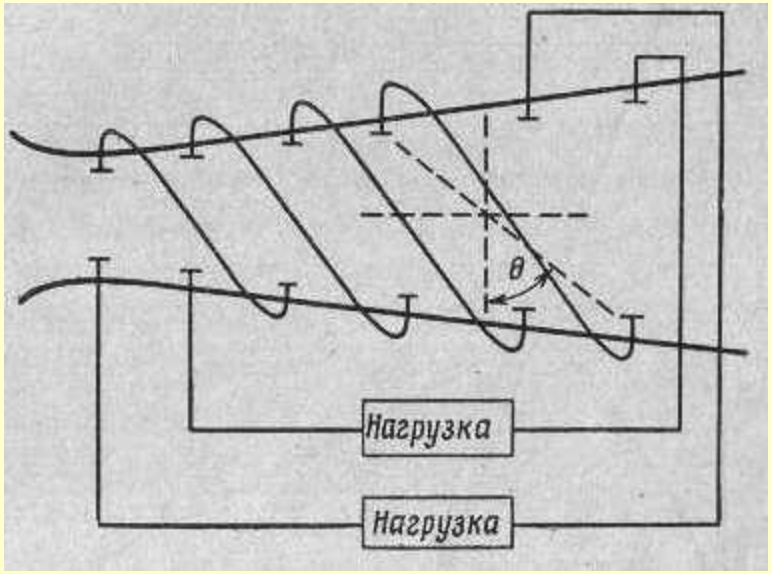
$$tg\theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{E_y}{\omega\tau(E_y + uB)} = \frac{K}{\omega\tau(1-K)},\ K = E_y / uB$$

Если накоротко соединить электроды под углом θ, то холловский ток не может протекать (в силу эквипотенциальности нахождения электродов) и эффективность такого генератора равна эффективности Фарадеевского генератора с секционированными электродами.
При этом, также повышается выходное напряжение и уменьшается число внешних цепей как это было в генераторе Холловского и Фарадеевского типов! Комплекс этих преимуществ особенно сильно проявляется при промежуточных значения параметра Холла.

Однако, проблема такого генератора – при фиксированном K угол θ должен быть фиксирован! Можно, конечно, при изменении нагрузки менять соединение электродов, но технически это сложно.

Конструкция Сериесного (диагонального) генератора





Диагональное соединение электродов

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Классификация (1)

По источнику тепла

- Реактивные двигатели;
- Ядерные реакторы;
- Теплообменные устройства;

По рабочему телу

- Продукты сгорания ископаемых топлив
- Инертные газы с присадками щелочных металлов (или их солей);
- Пары щелочных металлов;
- Двухфазные смеси паров и жидких щелочных металлов;
- Жидкие металлы и электролиты.

По типу рабочего цикла

- **МГД-генераторы с открытым циклом**. В данном случае продукты сгорания являются рабочим телом, а использованные газы после удаления из них присадки щелочных металлов выбрасываются в атмосферу.
- **МГД-генераторы с замкнутым циклом**. Здесь тепловая энергия, полученная при сжигании топлива, передаётся в теплообменнике рабочему телу, которое затем, пройдя МГД-генератор, возвращается через компрессор, замыкая цикл.

Классификация (2)

По форме канала

- **Линейные** — для кондукционных и индукционных генераторов;
- **Дисковые** и **коаксиальные холловские** — в кондукционных;
- **Радиальные** — в индукционных генераторах.

По системам соединений электродов

- **Фарадеевский генератор, Холловский генератор, Сериесный генератор**.

Наибольшее распространение с 1970-х годов получили линейные МГД-генераторы на продуктах сгорания ископаемых топлив с присадками щелочных металлов, работающие по открытому циклу

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Установка У-25

- В СССР первая лабораторная установка «У-02», работавшая на природном топливе, была создана в 1965. В 1971 году была пущена опытно-промышленная энергетическая установки «У-25», имеющая расчётную мощность *20—25 МВт*.
- «У-25» работала на продуктах сгорания природного газа с добавкой K_2CO_3 в качестве ионизирующейся присадки, температура потока — около 3000 К. Установка имела два контура: первичный, разомкнутый, в котором преобразование тепла продуктов сгорания в электрическую энергию происходит в МГД-генераторе, и вторичный, замкнутый — паросиловой контур, использующий тепло продуктов сгорания вне канала МГД-генератора. Электрическое оборудование «У-25» состояло из МГД-генератора и инверторной установки, собранной на ртутных игнитронах.

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Применение и современное состояние

- Тепловые электростанции с МГД-генератором на продуктах сгорания топлива (открытый цикл); такие установки наиболее просты и имеют наибольшую перспективу промышленного применения;
- Атомные электростанции с МГД-генератором на инертном газе, нагреваемом в ядерном реакторе (закрытый цикл); перспективность этого направления зависит от развития ядерных реакторов с температурой рабочего тела свыше 2000 K;
- Циклы с МГД-генератором на жидком металле, которые перспективны для атомной энергетики и для специальных энергетических установок сравнительно небольшой мощности.

Энергетические установки с МГД-генератором могут применяться как резервные или аварийные источники энергии в энергосистемах, для бортовых систем питания космической техники, в качестве источников питания различных устройств, требующих больших мощностей на короткие промежутки времени (например, для питания электроподогревателей аэродинамических труб и т. п.).

Применение и современное состояние (2)

Несмотря на заманчивые перспективы и бурное развитие исследований в области МГД-генераторов в 1970-е, устройства на их основе так и не нашли широкого промышленного применения вплоть до настоящего времени!

Основные причины:

1. Не разработаны ядерные реакторы на инертном газе, нагреваемом свыше 2000 K
2. В ТЭС с МГД-генератором на продуктах сгорания топлива (открытый цикл) успешно конкурируют и пока вытеснили газовые турбины.
3. Проблемы электродов при больших токах, мощностях и длительном использовании.
4. Проблема проводимости (развитие турбулентных состояний плазмы из-за ионизационной, перегревной и других неустойчивостей)

Роза Р. Магнитогидродинамическое преобразование энергии. Изд-во Мир. Москва, 1970.

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Установка У-25.

1.4. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Мотивация

- В энергетике основная доля выработки тепловой, механической и электрической видов энергии производится путем сжигания углеводородного топлива. Растущая стоимость добываемого топлива приводит к необходимости поиска путей его экономного расходования. Особенно остро стоит проблема эффективного преобразования тепла сжигания топлива в электрическую энергию.
- Выработка электроэнергии паросиловыми агрегатами, составляющими основу современной электроэнергетики, из тепловой энергии осуществляется с малым коэффициентом полезного действия, значение которого не превосходит 30-35%.
- Проблема более эффективного преобразования тепловой энергии в электрическую не решается и с помощью тепловых машин внутреннего сгорания -дизельных газотурбинных. КПД машин внутреннего сгорания лишь незначительно превосходит КПД паросиловых агрегатов, при этом используются дорогие виды топлива.

Мотивация (1)

- При решении задачи эффективного использования тепловой энергии в электрическую особую актуальность приобретает проблема использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) в металлургии. Металлургия является одной из самых энергоемких отраслей народного хозяйства Российской федерации. В 2002 году потребление энергоресурсов в целом по отрасли составило 152,2 млн. тонн условного топлива, из них на долю электроэнергии приходится 48,6%. По причине низкого значения КПД преобразования паросиловых агрегатов стоимость электрической энергии превосходит стоимость тепловой энергии в 3-4 раза. Доля тепла сжигаемого топлива, полезно используемого при выплавке металлов, не превосходит 25%. Остальное тепло плавки уходит с дымом в атмосферу!!! Применяемые в металлургии для полезного использования "бросового" тепла котлы-утилизаторы и элементы испарительного охлаждения вырабатывают пар и горячую воду, большая доля тепловой энергии которых в летний период времени не находит применения.
- Существующее положение вызывает незатухающий интерес к разработкам преобразователей химической, солнечной, термоядерной и других видов энергии непосредственно в электрическую.

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

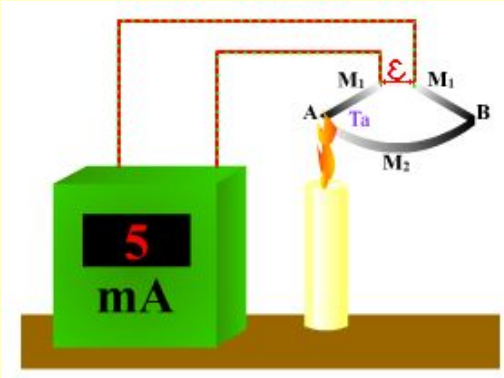
2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

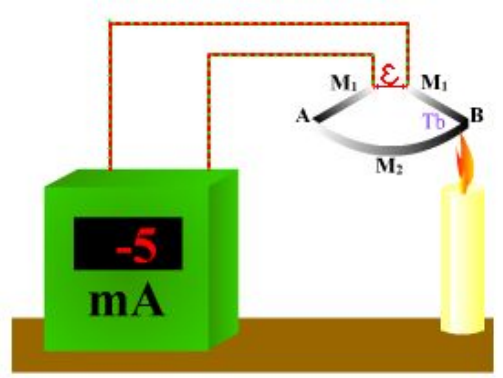
2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Эффект Зеебека

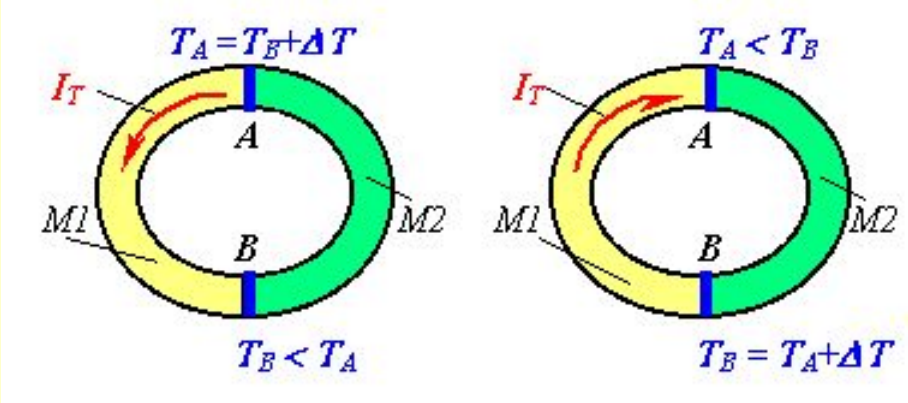
Эффект Зеебека - возникновение ЭДС (термоЭДС) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми находятся при разных температурах. Открыт в 1821 году немецким физиком Томасом Иоганном Зеебеком (Seebeck).



Эффект Зеебека состоит в том, что в электрической цепи, составленной из разных проводников (*M1* и *M2*), возникает термоЭДС, если места контактов (*A, B*) поддерживаются при разных температурах. Если цепь замкнута, то в ней течет электрический ток (*термоток* I_T), причем изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления термотока.



Цепь, составленная из двух различных проводников (*M1*, *M2*), называется термоэлементом (или термопарой), а ее ветви - термоэлектродами.



ТермоЭДС

Величина термоЭДС ε_T зависит от абсолютных значений температур спаев T_A , T_B, разности этих температур ΔT и от природы материалов, составляющих термоэлемент. ТермоЭДС контура определяется формулой:

$$d\varepsilon_T = \alpha_{12} dT$$

Здесь α_{12} - коэффициент термоЭДС металла 1 по отношению к металлу 2, который является характеристикой обоих металлов термопары. На практике это создает определенные неудобства. Поэтому условились величину α измерять по отношению к одному и тому же металлу, за который удобно принять свинец, т.к. для образца из свинца не возникает никакой разности потенциалов между его нагретым и холодным концами. Значения коэффициентов термоЭДС металлов *M1* и *M2* по отношению к свинцу обозначают соответственно α_1 и α_2 и называют абсолютными коэффициентами термоЭДС. Тогда $\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$.

ТермоЭДС (1)

В нагретом спае ток течет от металла с меньшим значением α к металлу, у которого α больше. Например, для термопары железо (*M1*) - константан (*M2*) абсолютные коэффициенты термоЭДС равны: $\alpha_1 = +15.0$ *мкВ/К* и $\alpha_2 = -38.0$ *мкВ/К* $\Rightarrow$ ток в горячем спае направлен от *M2* к *M1*.

Коэффициент термоЭДС определяется физическими характеристиками проводников термоэлемента: концентрацией, энергетическим спектром и механизмами рассеяния носителей заряда; а также интервалом температур. В некоторых случаях при изменении температуры происходит даже изменение знака α.

ТермоЭДС обусловлена тремя причинами:

1) температурной зависимостью уровня Ферми;

2) диффузией носителей заряда от горячего конца к холодному;

3) процессом увлечения электронов фононами.

ТермоЭДС (2)

1. Температурная зависимость уровня Ферми:

Различная зависимость от температуры контактной разности потенциалов
Контактная разность потенциалов вызвана отличием энергий Ферми у контактирующих различных проводников. При создании контакта уровни Ферми становятся одинаковыми, и возникает контактная разность потенциалов U, равная $U=(F1-F2)/e$, где $F1,2$ — энергия Ферми, e — заряд электрона.
На контакте тем самым существует электрическое поле, локализованное в тонком приконтактном слое. Если составить замкнутую цепь из двух металлов, то U возникает на обоих контактах. Электрическое поле будет направлено одинаковым образом в обоих контактах — от большего F к меньшему. Это значит, что если совершить обход по замкнутому контуру, то в одном контакте обход будет происходить по полю, а в другом — против поля. Циркуляция вектора $\boldsymbol{E}$ тем самым будет равна нулю.
Если температура одного из контактов изменится на dT, то, поскольку энергия Ферми зависит от температуры, U также изменится. Но если изменилась внутренняя контактная разность потенциалов, то изменилось электрическое поле в одном из контактов, и поэтому циркуляция вектора $\mathbf{E}$ будет отлична от нуля, то есть появляется ЭДС в замкнутой цепи.
Данная ЭДС называется *контактной термоэдс*.

ТермоЭДС (3)

2. Диффузия носителей заряда от горячего конца к холодному:
Если вдоль проводника существует градиент температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; в полупроводниках в дополнение к этому концентрация электронов проводимости растет с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.
ЭДС, возникновение которой описывается данным механизмом, называется *объёмной ЭДС*.

ТермоЭДС (4)

3. Процесс увлечения электронов фононами:

Если в твёрдом теле существует градиент температуры, то число фононов, движущихся от горячего конца к холодному, будет больше, чем в обратном направлении. В результате столкновений с электронами фононы могут увлекать за собой последние и на холодном конце образца будет накапливаться отрицательный заряд (на горячем — положительный) до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не уравновесит эффект увлечения.

Эта разность потенциалов и представляет собой 3-ю составляющую термоэдс, которая при низких температурах может быть в десятки и сотни раз больше рассмотренных выше. В магнетиках наблюдается дополнительная составляющая термоэдс, обусловленная эффектом увлечения электронов магнонами.

Значения коэффициента термоЭДС

Абсолютные значения всех термоэлектрических коэффициентов растут с уменьшением концентрации носителей. В металлах концентрации свободных электронов очень велики и не зависят от температуры; электронный газ находится в вырожденном состоянии и поэтому уровень Ферми, энергия и скорости электронов также слабо зависят от температуры. Поэтому термоЭДС большинства металлов очень мала (порядка нескольких мкВ/К): Pb – 0.0, Sn – -0.2, Ag – +2.7, Cu – +3.2, Pt – -4.4 мкВ/К.

Для полупроводников α в ~100 раз больше: для составов типа SnTe – до 80, для SnPbGeTe – до 250, для BiSbPb – до 270 мкВ/К. Для некоторых полупроводников в особых температурных условиях оно может превышать 1000 мкВ/К.

Проблема ограничения КПД

Особенностью существующих термопар является большое внутреннее сопротивление термопары как источника ЭДС, вызванные большой длиной и малым поперечным сечением ветвей термопары:

$$r = \rho_1 l_1/s_1 + \rho_2 l_2/s_2$$

где ρ_1 и ρ_2; l_1 и l_2; s_1 и s_2 – удельное сопротивление, длина и площадь поперечного сечения ветвей термопары. Это же является причиной и большого термического сопротивления для теплового потока через ветви термопары, часть энергии которого и преобразуется в электричество. Такая особенность приводит к тому, что КПД современных термоэлементов не превышает 1% для металлических и 5-7% для полупроводниковых термопар при значительных перепадах температур, и не позволяет получить большие мощности термоэлектрических преобразователей.Для улучшения системы надо оптимизировать соотношения ρ, l и s.

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Тонкопленочная термопарная поверхность

(Патент RU №2131156 от 1999 г.)

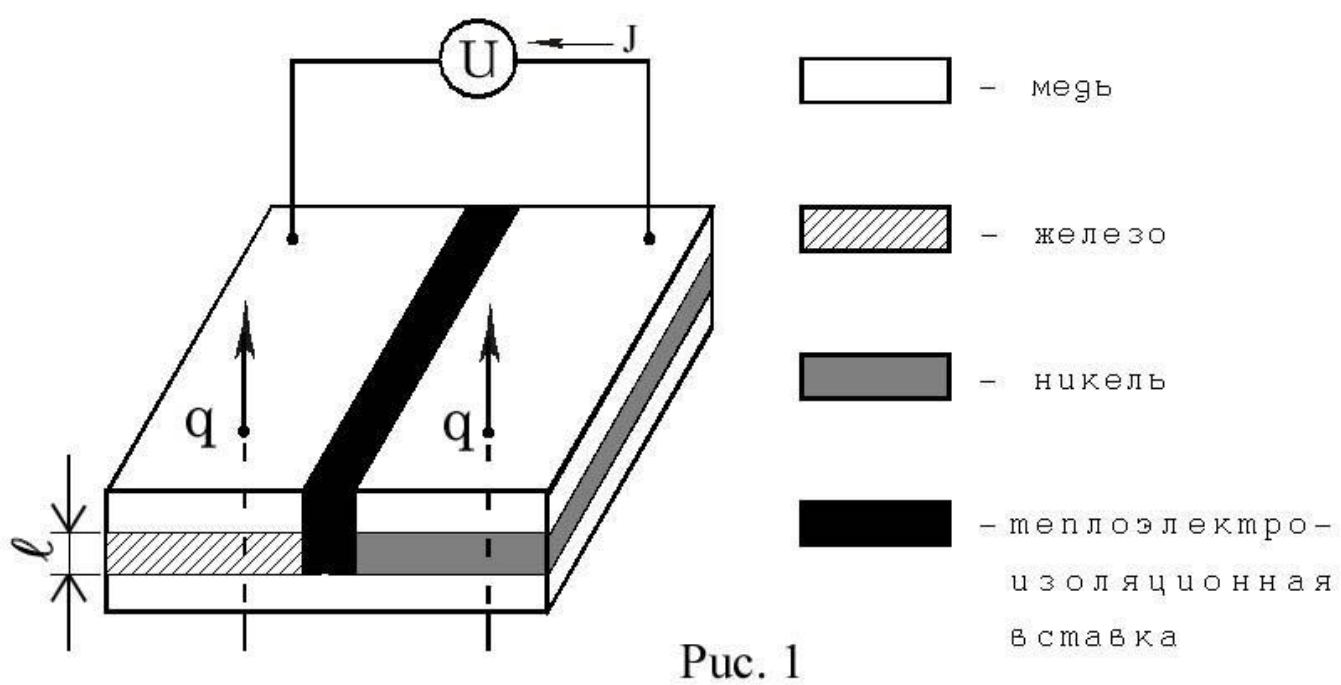


Рис. 1

Рассмотрим для примера термопару железо-никель на медной подложке (спае) (Рис. 1). Здесь q – тепловой поток, вызываемый разностью температур T_1 и T_2 между горячим и холодным телами. Длина ветвей l термопары уменьшена до 0.01-1мкм Соединим термопары в последовательные электроцепи, и получим термопарную поверхность, у которой ветви термопар превращаются в тонкие пленки, получаемые напылением или электролизом.

Многослойная тонкопленочная термопара

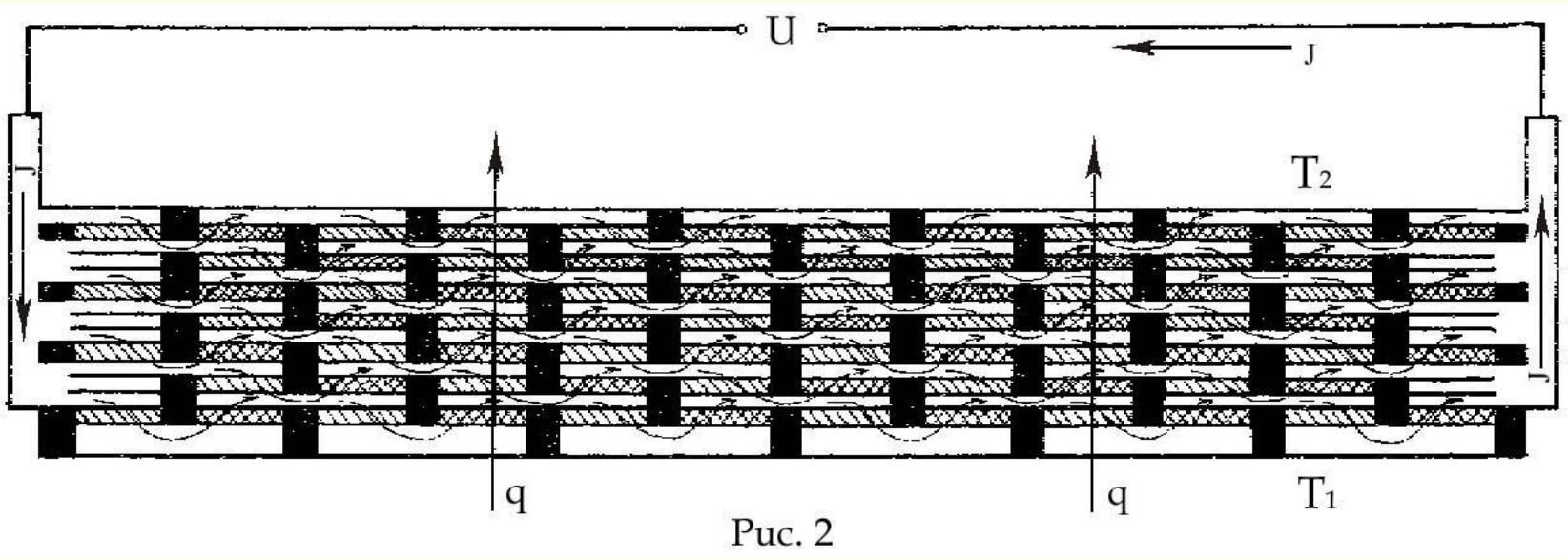


Рис. 2

Внутреннее сопротивление такой термопарной поверхности как источника ЭДС будет на много порядков меньше, чем у других термопар. А через большие, ничем не ограниченные поверхности таких термопар можно даже при малых перепадах температур пропускать большие тепловые потоки.

Для придания прочности такую термопарную поверхность изготавливают многослойной методом последовательного напыления слоев.

Результаты расчетов

Теоретические выкладки показывают, что КПД для такой системы:

$$\eta = C \cdot \Delta T \cdot s/l \text{ , где } C = \alpha^2 k / 2(\rho_1 + \rho_2) = const$$

Здесь k – коэффициент теплопередачи, α – удельная термоЭДС.

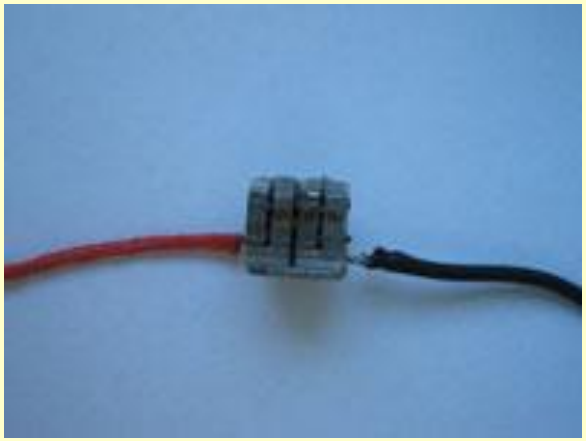
Таким образом, КПД прямо пропорционально зависит от разности температур, от площади сечения, и обратно пропорционально – от длины ветвей. Уменьшая длину ветвей термопары до длин ~ длины свободного пробега электрона (100 Å), достигаем КПД порядка нескольких процентов уже при малых перепадах температур. Благодаря уменьшению длины ветвей термопары до длин свободного пробега электрона удается практически освободиться от рассеяния направленной энергии электронов на ионных остовах решетки, то есть снизить Джоулево тепло, являющееся следствием диссипации направленной электрической энергии.

Такой термоэлектрический преобразователь позволит получать значительные мощности уже при самых незначительных перепадах температур, всегда присутствующих в окружающей среде. Например, предлагается развертывание термопарных парусов в пустынях.

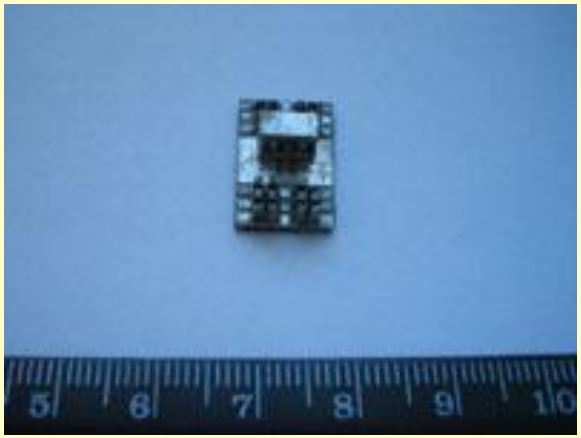
Изготовление полупроводникового термоэлектрического модуля

1. Монокристаллы Bi

2. Заготовки полупроводниковых термоэлектрических элементов (BiSb)



3. Термоэлектрический модуль из 4 термоэлементов



4. Термоэлектрический модуль, установленный на приборе

Применение термоэлектрических преобразователей

С 60-х годов XX века наблюдается бурное развитие термоэлектрического приборостроения, хотя первые термоэлектрические генераторы появились в СССР еще в 20-е годы. В них использовался биметаллический стержень, один конец которого помещался в огонь, а другой – в холод. В Великую Отечественную войну они использовались для питания автономных радиостанций.

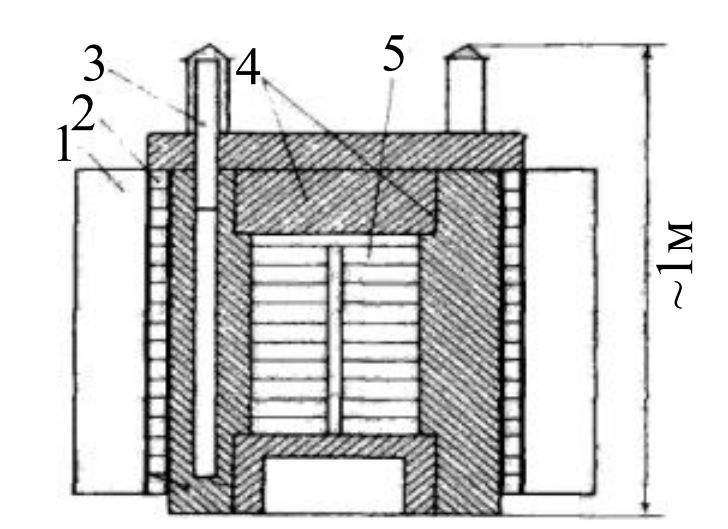
Основное современное направление использования термоэлементов – это электропитание автоматов, использующихся для исследования дальнего космоса, автономных устройств сейсмической разведки в удаленных районах и на морском дне, устройств обслуживания нефте- и газопроводов.

В списке первых пяти фирм, лидирующих по объемам производства термоэлектрических преобразователей в мире, три российские, базирующиеся в Москве и Санкт-Петербурге. Но их продукция дорогая, так как в России слабо развито производство сырья для изготовления полупроводников. А значительное давление на рынок начинает оказывать Китай, использующий дешевое сырье и трудовые ресурсы.

ТЭГ на ядерном топливе

Из-за их высокой стоимости термоэлектрические генераторы (ТЭГ) пока не применяются в стационарной энергетике. Область их использования – малые автономные источники энергии. Для космических установок разработаны ТЭГ с ядерным реактором в качестве источника теплоты.

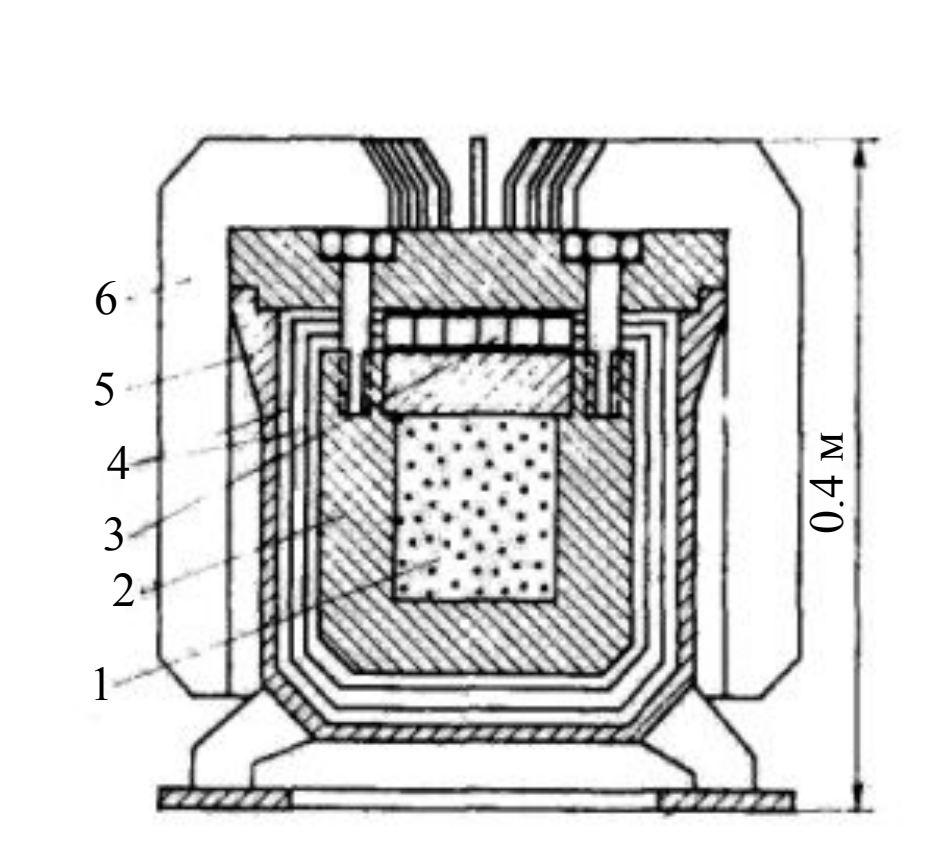
Термоэлектрическая установка «Ромашка» была разработана в Институте Атомной Энергии им. И.В.Курчатова в 1964 году. Она оборудована термоэлектродами из германий-кремниевого сплава и имеет мощность в *800 Вт*. Ее КПД составляет *2%* при загрузке 49 кг ^{235}**U** с 90% обогащением. Активная зона этого реактора на быстрых нейтронах окружена термоэлементами из SiGe, которые охлаждаются излучением. В реакторе отсутствует теплоноситель, что позволяет исключить движущиеся узлы и обеспечить высокую надежность установки.



1 – радиатор, 2 – термоэлемент, 3 – регулирующий стержень, 4 – отражатель нейтронов, 5 – ТВЭЛ

Радиоизотопный ТЭГ

Для питания электронных устройств небольшой мощности применяют радиоизотопные ТЭГ, использующие энергию α- и β-частиц, рождающихся за счет распада радиоактивного вещества (например, ^{90}**Sr**). Торможение этих частиц в веществе теплового блока сопровождается выделением тепла. Радиоизотопный ТЭГ «Бета-3» мощностью *12 Вт* выдает напряжение *12 В* и имеет КПД *4-5%*. Его масса равна 400 кг, а срок службы достигает 10 лет.



1 – радиоизотопный блок;
2 – тепловой блок; 3 – термоэлементы;
4 – экраны термоизоляции; 5 – корпус;
6 - радиатор

Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь на основе редкоземельных полупроводников SmS

При исследовании высокотемпературных электрических свойств редкоземельных полупроводников было обнаружено новое физическое явление, заключающееся в возникновении спонтанной генерации электрического напряжения образцом из SmS (моносульфид самария) при его равномерном нагреве.

В основе эффекта лежит коллективный процесс изменения валентности ионов редкоземельного металла (самария), сопровождающийся скачкообразным увеличением количества свободных электронов. Был изготовлен и испытан макет термоэлемента, осуществляющего преобразование в температурном интервале 150 – 450 °С. Экспериментальный коэффициент полезного действия макета преобразователя энергии оказался равным ~47% при Т=150 ºС и ~ 30% при Т=450 ºС (в 3-4 раза больше стандартных!!!).

Генерируемое электрическое напряжение составило около 0,5 В. Вес макетного образца термоэлемента составлял всего 10 г.

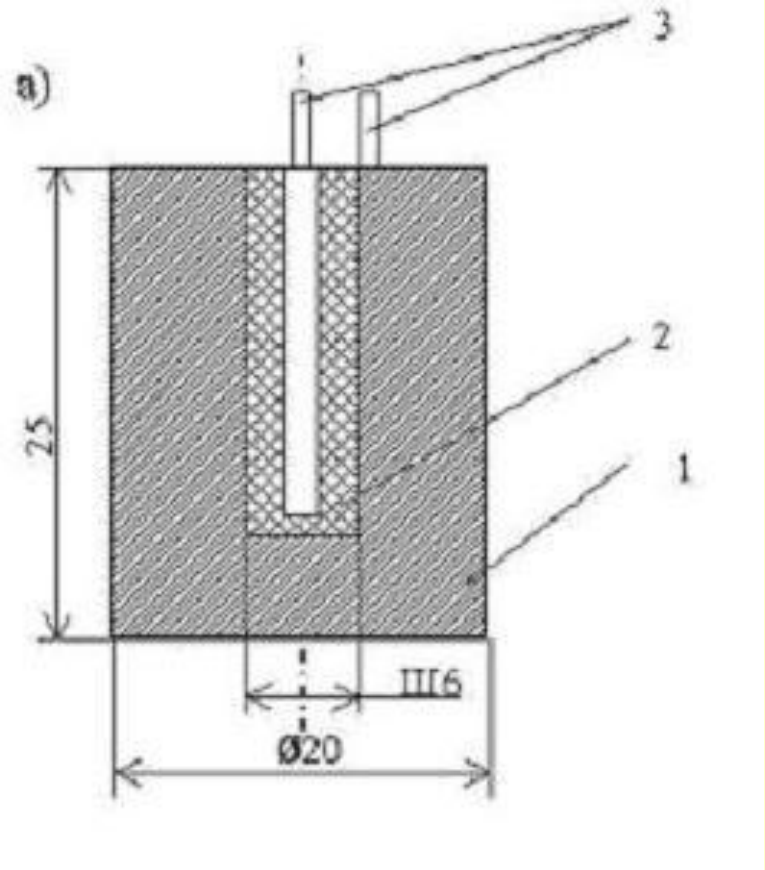
Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь на основе редкоземельных полупроводников SmS (1)

Следует отметить, что теория и практика классического термоэлектрического преобразования энергии уже в основном исчерпали себя и в последние десятилетия существенного прогресса здесь не наблюдается. Пределы совершенствования нового принципа пока не ясны, но и уже достигнутые результаты являются достаточными для начала разработки коммерческого генератора. Такие генераторы будут предназначены для всех тех областей, где сейчас применяются термоэлектрические генераторы, то есть для “малой энергетики”

Они будут обладать такими уникальными качествами как полная автономность, высокая надёжность, простота эксплуатации, долговечность, малогабаритность, высокие энерговесовые характеристики. В предлагаемых преобразователях отсутствуют движущие части и необходимость создания больших градиентов температуры, что упрощает технологию их изготовления и удешевляет производство по сравнению как с термоэлектрическими, так и с другими энергоисточниками.

Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь на основе редкоземельных полупроводников SmS (2)

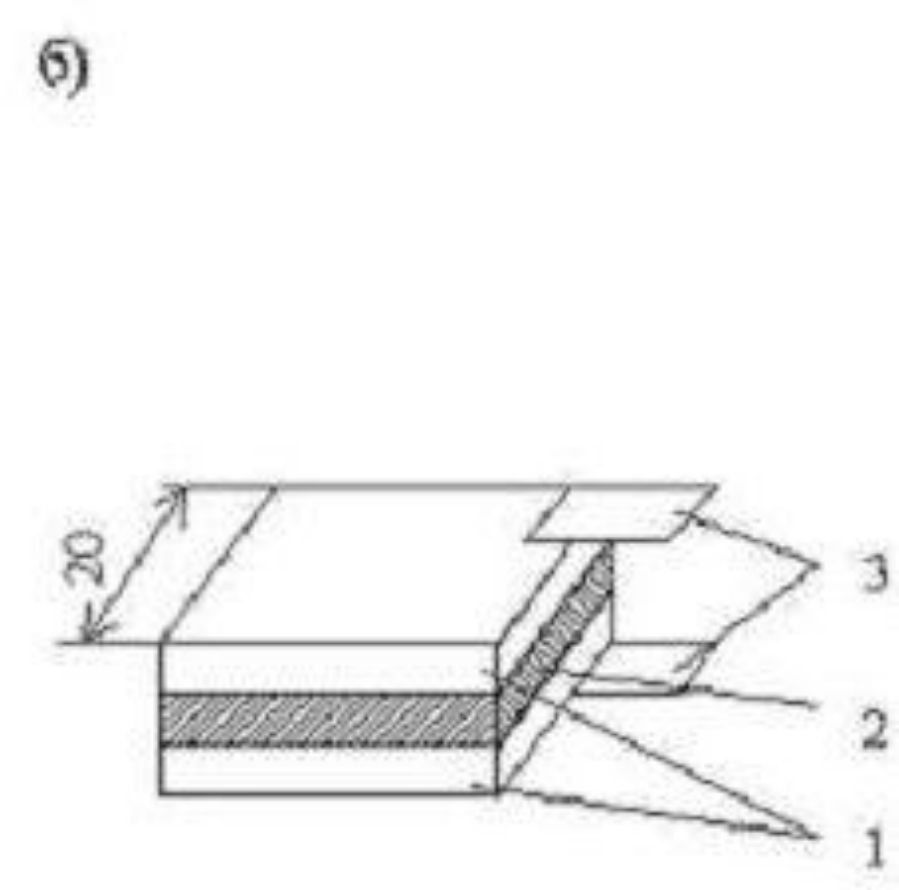
Возможны конструкции термоэлемента в двух вариантах: радиальном *(см. рис.)* и плоском *(см. следующий слайд)*. Радиальный вариант более функционален, а плоский – более технологичен.



Термоэлемент состоит из:

- массивного металлического корпуса (теплонакопителя) 1, служащего для передачи тепла теплоносителя преобразующему элементу, поддержания преобразующего элемента в рабочем тепловом режиме во время скачков его температуры, сопровождающих процесс генерации, а также для защиты преобразующего элемента от внешних воздействий
- преобразующего элемента 2 из монокристаллического либо поликристаллического SmS, легированного донорными примесями
- металлических электродов 3

Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь на основе редкоземельных полупроводников SmS (3)



Основные параметры термоэлементов:

Рабочие температуры *+130 ÷500 °C*

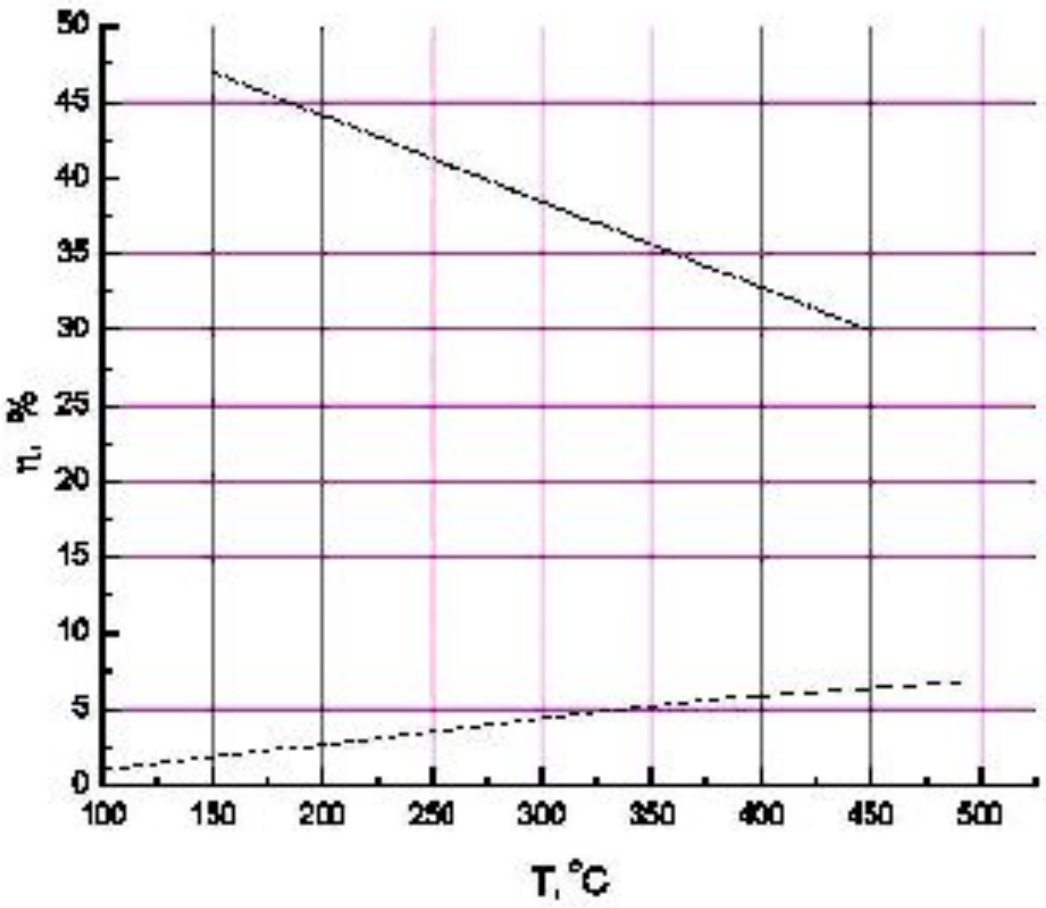
Средний КПД в рабочем интервале температур ~ *40%*

Генерируемое напряжение постоянное, *0,5 ÷ 1,5 В*

Внутреннее электросопротивление *0,1 - 1 Ом*

Вес - около *10 г*

Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь на основе редкоземельных полупроводников SmS (4)



Температурная зависимость коэффициента полезного действия предлагаемого образца – верхняя кривая. Для сравнения приведена аналогичная зависимость для одного из лучших существующих термоэлементов – нижняя кривая (T – температура горячего спая)

Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь на основе редкоземельных полупроводников SmS (5)

Характеристика	Предлагаемый термоэлемент	Существующий термоэлемент
Необходимость создания градиента температуры	нет	есть
КПД преобразователя, %	30-45	1,5-7
Рабочий интервал температур, °С	130-500	до 800
Напряжение, генерируемое единичным преобразователем, В	0,5-1,5	до 0,1
Вес батареи, генерирующей 12 В, кг	0,25	3,0
Внутреннее сопротивление, Ом	0,1- 0,5	0,2-2

Перспективы термоэлектрических преобразователей

Основные плюсы термоэлектрических преобразователей – ***автономность***, ***надежность***, ***простота эксплуатации***, ***долговечность***, ***малые габариты***; в них отсутствуют движущиеся части $\Rightarrow$ ***износостойкость***. У них высокие энерговесовые характеристики.

Для ТЭГ экономически было показано, что когда их КПД достигнет *15%* (сейчас он *<10%*), то они будут способны конкурировать с другими источниками энергии.

Разрабатываются солнечные ТЭГ, ТЭГ на тепле органического топлива (разлагающиеся навоз, солома и т.д.). Перспективным представляется использование ТЭГ для утилизации потерь тепловой энергии (двигатели внутреннего сгорания, сжигание мусора, ядерные отходы и др.).

ТЭГ могут найти (<u>и находят</u>!) применение в объектах аэрокосмической, судостроительной, нефтяной промышленности, и других областях, где необходимо наличие автономных источников электроэнергии.

Высокоэффективный термоэлектрический преобразователь
на основе редкоземельных полупроводников SmS – очень перспективен!

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

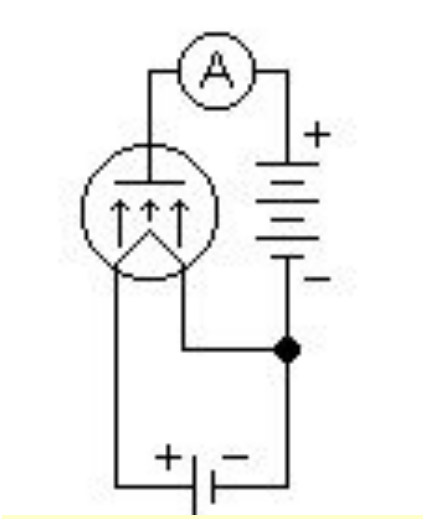
2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Термоэмиссия

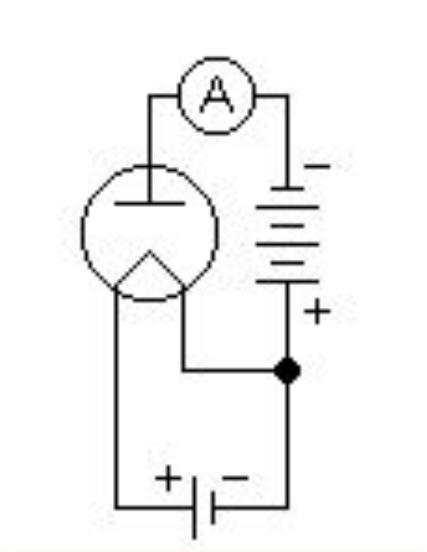
Термоэмиссия (также известно под названием «эффект Эдисона») – явление эмиссии электронов с поверхности металла или оксида металла, которая начинается, когда энергия теплового движения электронов превосходит силы, удерживающие электроны на поверхности. Эффект усиливается с ростом температуры поверхности.

$$j = AT^2 \exp\left[-e\phi(T)/kT\right].$$

Явление обнаружено в 1873 году Ф.Гутри, переоткрыто в 1880 году Т.А.Эдисоном – по обнаружению тока, протекающего между нагретым элементом и положительно заряженным электродом. Оба ученых сочли эффект неприменимым. В 1904 Д. А.Флеминг использовал это явление для создания лампового диода.



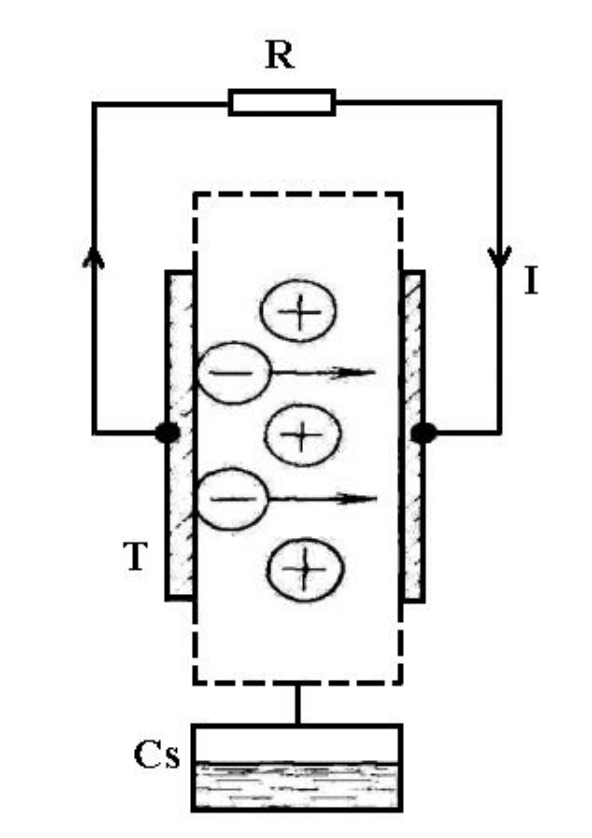
Поток электронов



Нет тока

Принцип действия термоэмиссионного преобразователя энергии

Если сблизить в вакууме две металлические поверхности с разными температурами, то, за счет разности их токов эмиссии, через зазор и внешнюю нагрузку *R* потечет результирующий ток *I*. Тепловая энергия, подведенная к горячему электроду (Т), частично преобразуется в электроэнергию. Оставшаяся часть тепловой энергии может отводиться от холодного электрода. С целью компенсации пространственного заряда, создаваемого электронами, в зазор вводятся ионы цезия.



Основные параметры термоэмиссионного преобразователя энергии

Максимальная плотность тока, генерируемого ТЭП, ограничена эмиссионной способностью эмиттера и может достигать нескольких десятков *А* на *см*^{2} поверхности. Для получения оптимальных величин *работы выхода* эмиттера (2,5—2,8 *эВ*) и коллектора (1,0—1,7 *эВ*) и для компенсации объёмного заряда электронов, образующегося вблизи электродов, в зазор между ними обычно вводят легко ионизируемые пары Cs. Положительные ионы цезия образуются при столкновении атомов Cs с быстрыми и тепловыми электронами как на горячем катоде (*поверхностная ионизация*), так и в межэлектродном объёме (вследствие либо однократного соударения атомов Cs с быстрыми и тепловыми электронами, либо ступенчатой ионизации, при которой в результате 1-го соударения с электроном атом Cs переходит в возбуждённое состояние, а при последующих — ионизируется). При используемых в современных ТЭП температурах электродов (1700—2000 К на катоде и 800—1100 К на аноде) их удельная мощность (в расчёте на 1 *см*^{2} поверхности катода) достигает десятков ватт, а КПД может превышать *20%*

1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

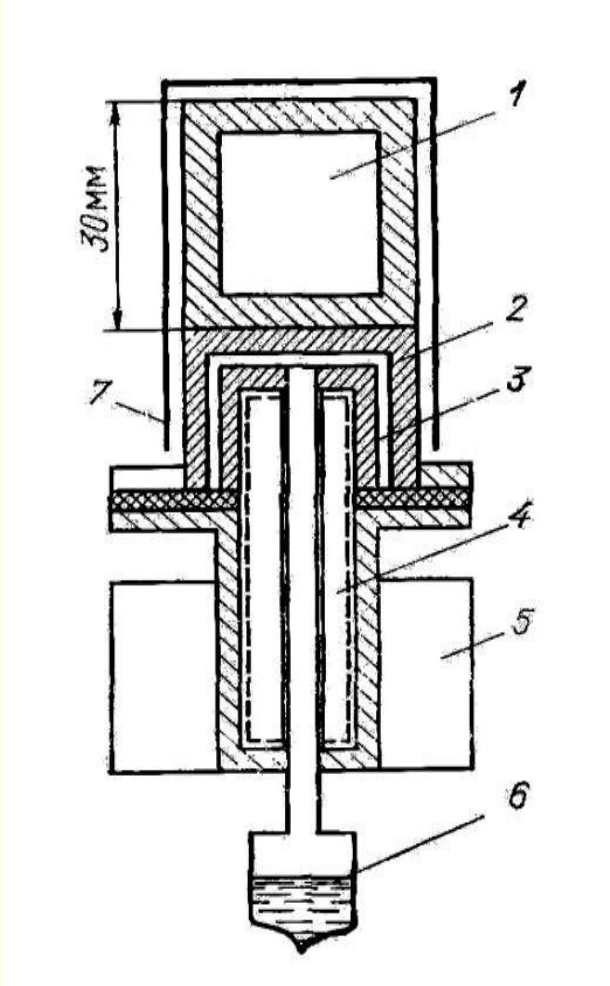
2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Радиоизотопный ТЭП

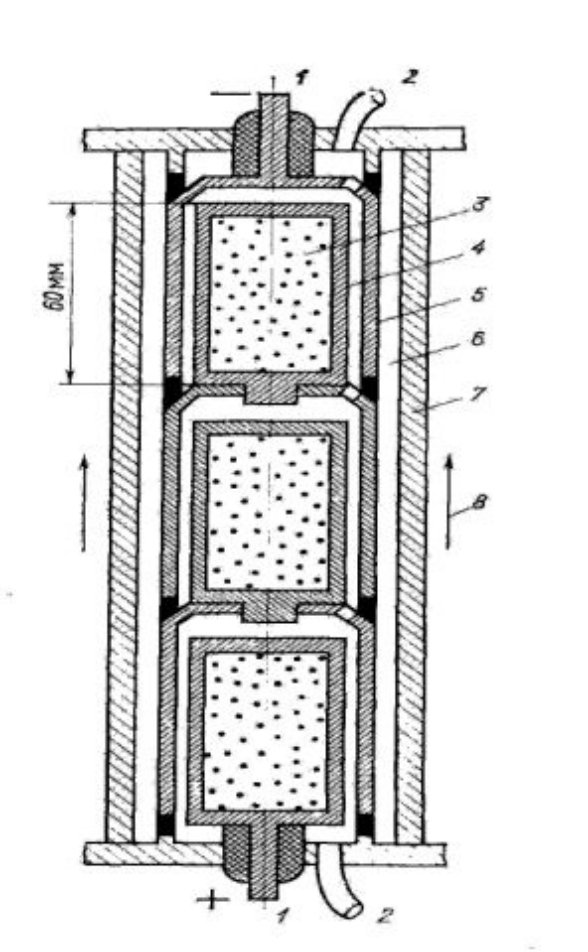
В качестве источников тепла в ТЭП успешно используются энергия ядерных реакций. На рисунке справа показана конструкция изотопного ТЭП для космических установок. Источником тепла служит α – активный изотоп ^{227}**Ac** актиния, имеющий плотность тепловыделения *17 Вт/г*. Для получения мощности в *25 Вт* при КПД *10%* генератору требуется около *20 г* окиси актиния $\mathbf{Ac_2O_3}$.



*1 – капсула с ^{227}**Ac**; 2 – катод; 3 –анод; 4 – тепловая труба; 5 –холодильник-радиатор; 6 – резервуар с **Cs**; 7 – тепловой экран.*

ТЭП на ^{235}U

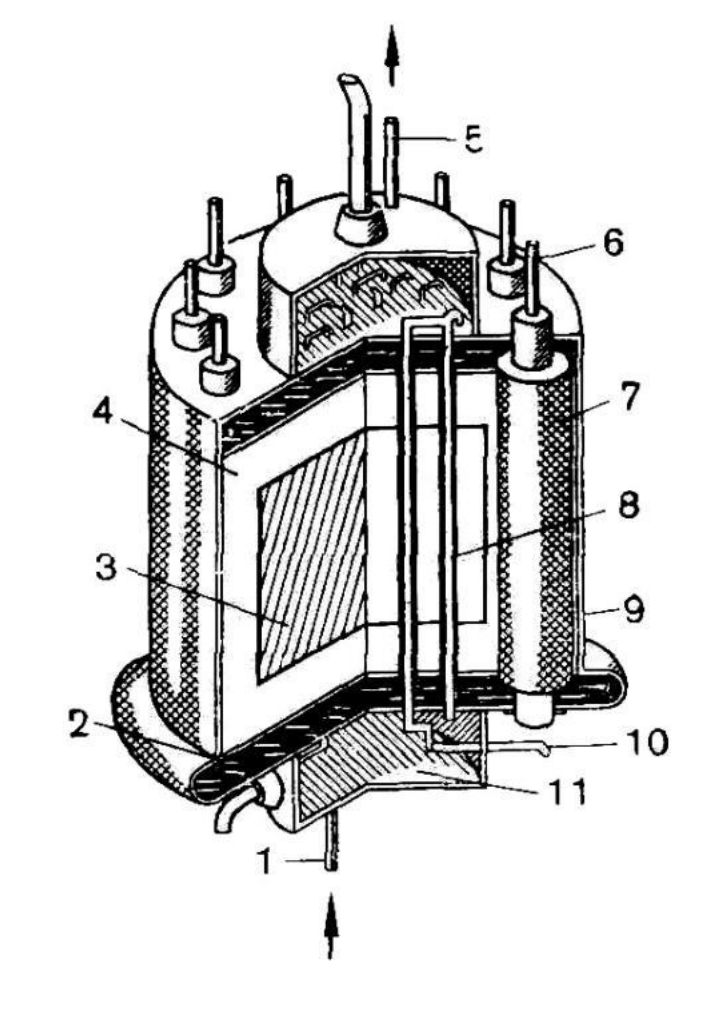
В космических аппаратах широко используются ТЭП на ^{235}**U**. На рисунке справа представлена схема ТЭП, использующая непосредственное превращение тепловой энергии, выделяющейся в результате деления ядер. Катод в виде цилиндрического стержня из твердого раствора карбидов циркония и урана с обогащением по ^{235}**U** помещен в вакуумный баллон с парами цезия. Стенки баллона служат анодом и охлаждаются силиконовым маслом.



1 – токовые выводы, 2 – трубка снабжения Cs, 3 – ядерное топливо, 4 – катод, 5 – анод, 6 – изолятор анода, 7 – защита, 8 – поток теплоносителя

Термоэмиссионная космическая ядерная установка «Топаз»

Термоэмиссионный преобразователь с ядерным реактором «Топаз» развивает электрическую мощность до *10 кВт*. Реактор на тепловых нейтронах содержит 79 ТЭП, совмещенных с тепловыделяющими элементами.

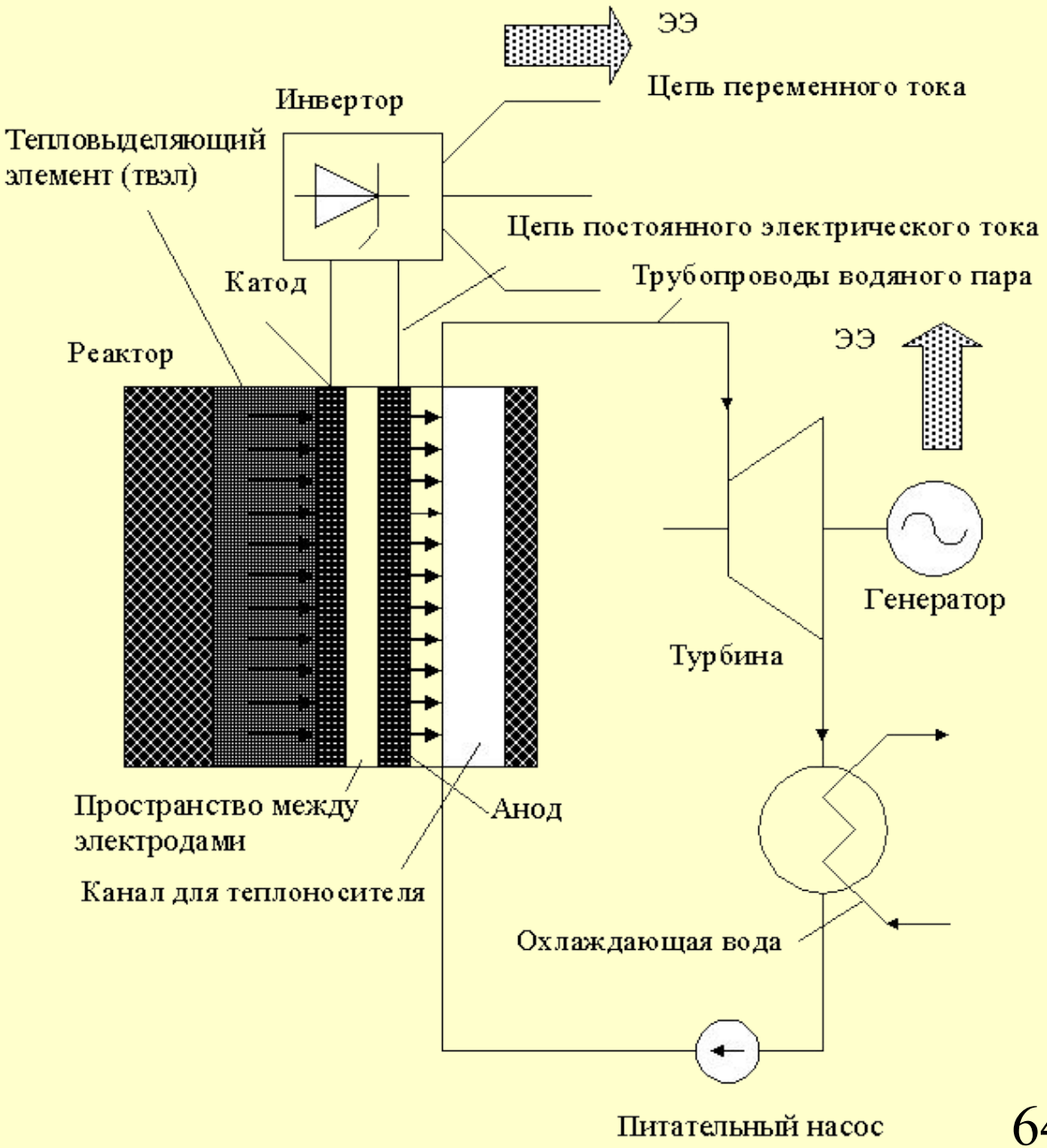


1 – вход Cs; 2 – теплоноситель (Na - K); 3 – замедлитель (ZrH_4); 4 – отражатель (Be); 5 – выход Cs; 6 – коммутационная камера; 7 – цилиндр возвратной линии; 8 – канал выработки электроэнергии; 9 – реакторный бак; 10 – токосъем; 11 – коммутационная камера.

Утилизация тепла парогенератора

По мере улучшения характеристик ТЭП появляется возможность их использования в качестве надстройки к обычным паросиловым электростанциям. При этом теплота, получаемая от сжигания топлива, подводится вначале к горячему электроду (катоду) ТЭП. Теплота, отводимая от холодного электрода (анода), используется в обычном паросиловом цикле. При этом КПД такой комбинированной установки повышается. В стенки реактора (или котла на ТЭС) монтируется батарея ТЭП. Катод работает при температуре 1500 К, а анод охлаждается и отдает тепло при температуре 800 К. Анод охлаждается паром, который затем используется в паровой турбине для производства электроэнергии (см. схему на следующем слайде). КПД паротурбинной установки ТЭС при подключении термоэмиссионного преобразователя может быть повышен до *49%*. На АЭС величина КПД превышает эти значения.

Утилизация тепла парогенератора (схема)



1. МГД-преобразователи энергии

1.1. МГД преобразователи (генераторы) энергии.

1.2. Схемы МГД генераторов. Основные физические процессы в МГД генераторах.

1.3. Классификация МГД-генераторов

1.4. Установка У-25.

1.5. Проблемы и перспективы МГД преобразователей

2. Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи энергии

2.1 Мотивация

2.2. Теория термоэлектрического преобразования

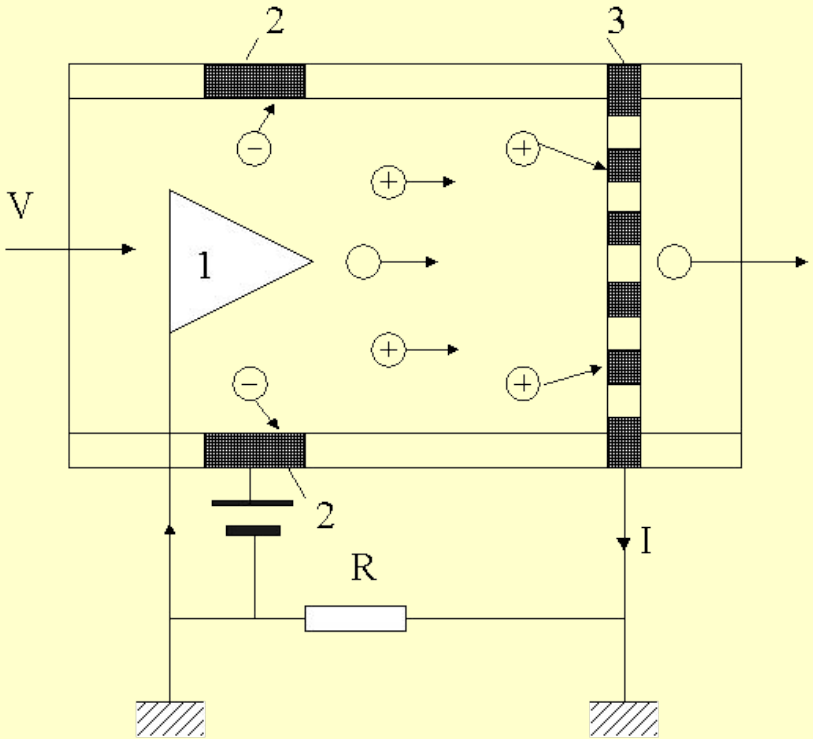
2.3. Примеры термоэлектрических генераторов

2.4. Термоэмиссионное преобразование энергии

2.5. Примеры термоэмиссионных преобразователей

2.6. Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом

Термоэмиссионная установка с плазменным нагревом



В электрогидродинамических генераторах газ под высоким давлением через расширяющееся сопло попадает в зону ионизации. Ионизация осуществляется коронным разрядом, возникающим между игольчатым (1) и окружающим его кольцевым электродами (2) при наличии сильного электрического поля. Образующиеся ионы увлекаются потоком газа и собираются на электроде-коллекторе (3), представляющем собой набор металлических трубок или сеток. Здесь происходит рекомбинация ионов с электронами, поступающими из внешней цепи. Эти электроны и совершают работу в нагрузке R.

Электрогидродинамический процесс характеризуется низкой степенью ионизации, малыми токами (10^{-5} …10^{-4} А), низкой температурой газа (300… 2000 К) и высоким напряжением (50 … 500 кВ). Для достижения наибольшей эффективности необходимо использовать рабочие тела с минимальной подвижностью заряженных частиц. Это достигается введением в поток газа мелких твердых частиц (пыль, зола, размельченный глинозем).

В ЭГД канале между областями генерации и рекомбинации возникает сильное осевое электрическое поле. При перемещении ионов против тормозящего электрического поля кинетическая энергия газового потока преобразуется в электрическую.