

ЛЕКЦИЯ 8. ВВЕДЕНИЕ В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО. ИСТОРИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Одной из наиболее важных проблем, стоящих сегодня перед обществом, является энергетическое обеспечение человечества, и для решения данной проблемы необходимо учитывать как имеющийся спрос, так и предложение. Исследования в области предложения сосредоточены на производстве и распределении энергии, ее различных источниках. В области спроса исследования сосредоточены на эффективности доставки и потребления, на вопросах энергоэффективности и энергосбережения.

Благодаря наличию дешевой энергии, главным образом из ископаемых источников (уголь, нефть, газ), человечество за последние несколько столетий пережило индустриализацию. Спрос на энергию продолжает расти по мере дальнейшего развития промышленно-развитых стран, при этом до сих пор более 85% производимой энергии получают из таких источников как нефть, газ, уголь. Конечно, существуют вопросы, связанные с истощением полезных ископаемых. Однако открываются новые месторождения, меняются технологии их разработки. Одним из важнейших вопросов в настоящее время является вопрос энергоэффективности систем и их влияние на окружающую среду (рис. 1).

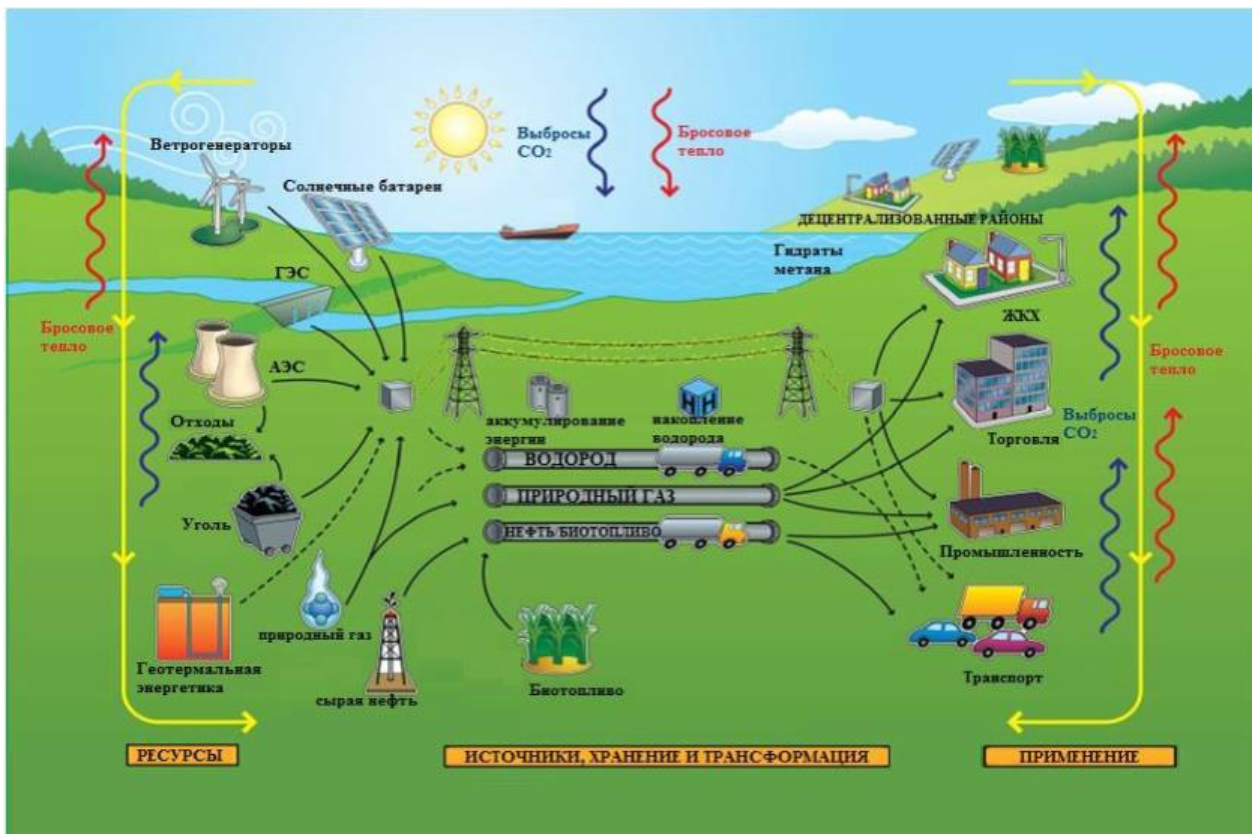


Рисунок 1. Энергетический ландшафт

С момента появления парового двигателя в системах производства электроэнергии практически ничего не изменилось. Во всех используемых системах по-прежнему не прямое преобразование энергии: сначала получаем тепло – с помощью тепла получаем механическую работу – и с помощью нее получаем электричество.

Исключением является фотовольтаика – раздел науки на стыке физики, фотохимии и электрохимии, изучающий процесс возникновения электрического тока в различных материалах под действием падающего на них света (например, солнечные электростанции работают на фотоэлектронных батареях).

Также примером прямого преобразования энергии является термоэлектрический эффект, заключающийся в получении электрического потенциала с помощью разности температур.

Что же такое термоэлектричество и почему оно важно?

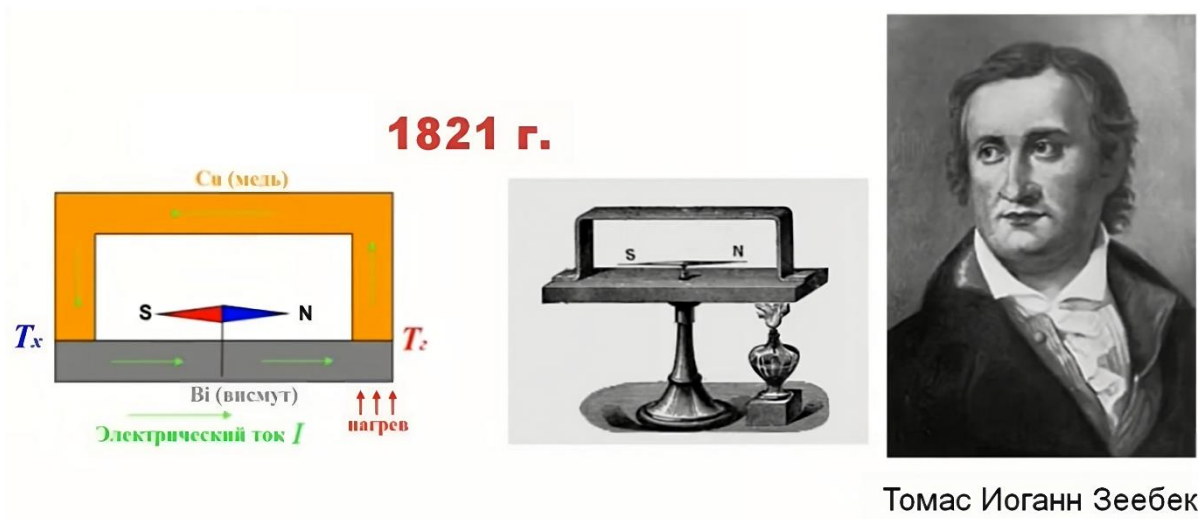
В существующих в настоящее время системах порядка 2/3 энергии теряется в виде бросового тепла. Одним из вариантов повышения энергоэффективности общей системы является использование термоэлектрических генераторов, которые позволяют все бросовое тепло или какую-то его часть преобразовать в электроэнергию. На рис. 2 представлены области, где есть потери в виде бросового тепла и где возможно применение термоэлектрических устройств для повышения энергоэффективности общей системы.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО



Рисунок 2. Области, в которых возможно применение термоэлектрических устройств для повышения энергоэффективности

Рассмотрим термоэлектрические эффекты. В 1821 г. Томас Иоганн Зеебек обнаружил, что если соединить два разнородных металла, то при нагреве одного из спаек происходит отклонение магнитной стрелки, помещенной в контур данных проводников (рис. 3).



1821 г.

Рисунок 3. Эффект Зеебека

Так впервые наблюдалось прямое преобразование тепла в электроэнергию. Зеебек свой эффект толковал иначе. Он думал, что разность температур в местах соприкосновения металлов является источником освобождающего магнетизма, причиной магнитных действий. Открытый им эффект он назвал эффектом термомагнетизма и считал, что он объясняет возникновение магнетизма планеты Земля (связывал возникновение магнитного поля с разностью температур между полюсами и экватором).

В 1821 г. на заседании Берлинской Академии Наук Зеебек представил доклад об открытом им эффекте. В том же году датский физик Ханс Кристиан Эрстед посетил лабораторию Зеебека. Вернувшись в Париж, он повторил его опыты и создал первую термоэлектрическую батарею, которая состояла из висмутовых и сурьмяных палочек. Один спай нагревался горелкой, другой - помещался в лед; в результате получилась батарея из последовательно соединенных термоэлементов, чередующихся горячими и холодными спаями. В цепи, подключенной к термобатарее, возникал электрический ток.

В то же время подобную батарею создал Жан-Батист Фурье. В 1823 г. на заседании французской Академии Наук Эрстед сделал доклад, который начал такими словами: «Я имею честь продемонстрировать Ассамблее

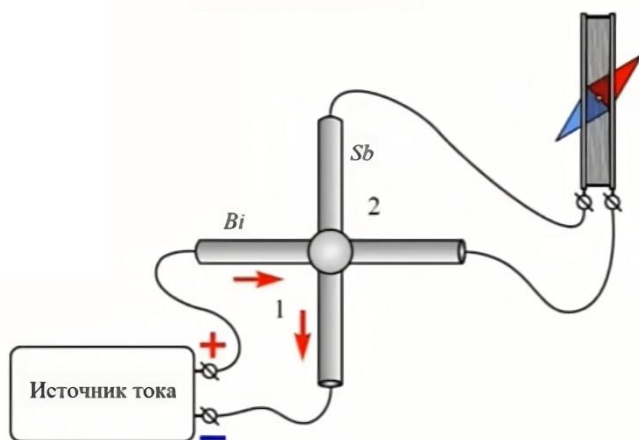
замечательные опыты, благодаря которым Зеебек доказал, что можно получить электрический ток в цепи, сформированной исключительно из твердых проводников, нарушая только равновесие температуры».

Эрстед показал, что явление, обнаруженное Зеебеком, заключается в возникновении электрического тока в замкнутом контуре из неоднородных проводящих материалов, когда места контакта имеют разную температуру. Отсюда последовало предложенное Эрстедом другое, более точное название – эффект термоэлектричества, оно и закрепилось в физике.

Термоэлектрический эффект – это выделение или поглощение тепла на границе двух разнородных проводников, через которые протекает электрический ток.

Данный эффект в 1834 г. изучал Жан Шарль Пельтье, который был физиком-любителем. Суть обнаруженного им эффекта сводилась к тому, что в зависимости от направления тока, пропускаемого через проводники, наблюдался дополнительный нагрев или охлаждение контакта. В апреле 1834 г. Пельтье опубликовал свое открытие, однако его работа не привлекла большого внимания научной общественности. Интерес мог вызвать эффект охлаждения спая (к тому времени уже был известен Эффект Джоуля и потому нагрев контакта ни у кого не вызывал удивления), однако из-за того, что Пельтье не был участником научного сообщества, доверия к нему не было. В качестве доказательства, Пельтье придумал простой и изящный эксперимент, который впоследствии был назван “термокрестом Пельтье” (рис. 4).

1834 г.



Жан Шарль Пельтье

Рисунок 4. “Термокрест Пельтье”

Два бруска из висмута и сурьмы, спаянных посередине, образовывали две термопары. Первая термопара соединилась с источником тока, вторая – с гальванометром - так были образованы два независимых электрических контура. Эксперимент состоял в следующем: в начале опыта цепь с гальванометром была разомкнута и ток пропускаялся только по первому контуру, вызывая тепловой эффект в спаяе висмут-сурьма. При отключении источника тока и замыкание второго контура, гальванометр регистрировал появление кратковременного вторичного тока, направление которого соответствовало нагреву или охлаждению области спая. Однако этот эксперимент тоже не убедил научное сообщество.

Стоит отметить, что Пельтье, как и Зеебек, не понимал истинного смысла сделанного открытия. Пелетье считал, что закон Джоуля-Ленца выполняется только при сильных токах, а при слабых токах, таких, которые создаются термоэлементом, сказываются уже индивидуальные свойства материала.

В 1838 г. Петербургский академик Эмилий Христианович Ленц провел опыт, который наглядно подтвердил эффект Пельтье. Он использовал электрическую цепь, которая содержала стержень из спаренных стержней висмута и сурьмы. На месте спая было углубление, в которое Ленц поместил каплю воды, температура этой капли измерялась термометром. Стержень был приведен в контакт с водой, в которой плавал тающий лёд, таким образом поддерживалась нулевая температура стержня (рис. 5).

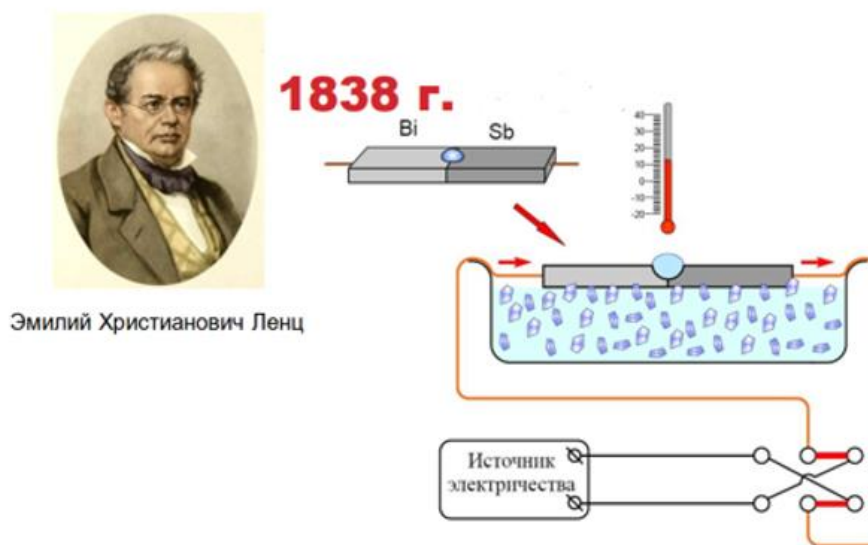


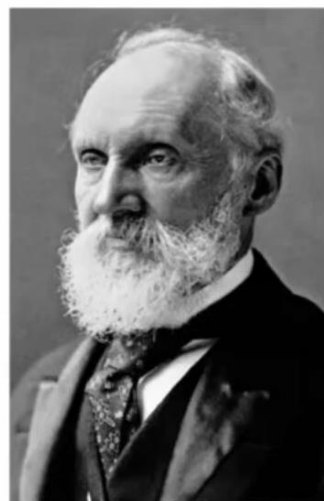
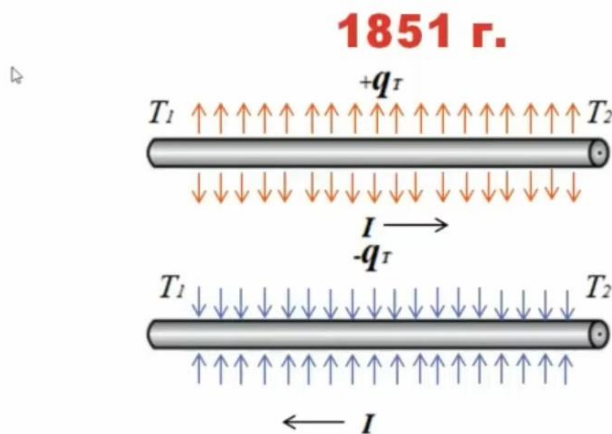
Рисунок 5. Подтверждение эффекта Пельтье с помощью опыта Ленца

Концы стержня были соединены с источником электричества, который использовали для изменения направления тока. При протекании тока силой в 100 Ампер от висмута к сурьме капля воды замерзала, а термометр регистрировал температуру $-4,5^{\circ}\text{C}$. При изменении направления тока, капля оттаивала. Так стало ясно, что на стыке двух разнородных проводников при прохождении электрического тока в зависимости от его направления выделяется или поглощается теплота.

С появлением в начале 1850-х годов термодинамики, а именно первого и второго начал термодинамики, возник интерес ко всем видам превращения энергии, в том числе, к превращению тепловой и электрической энергии в эффектах Зеебека и Пельтье. В 1851 г. Томсон привел, в соответствии с обоими началами термодинамики, теорию термоэлектрических явлений. Он установил

связь между эффектами Зеебека и Пельтье, сформулировал первое и второе фундаментальное соотношение термоэлектричества, которые связали эти эффекты, и показал, что должен существовать третий термоэлектрический эффект, который впоследствии получил его имя. Это был первый случай научного обоснованного открытия в термоэлектричестве в отличие от эффектов Зеебека и Пельтье, которые были открыты случайно.

Эффект заключается в том, что в объеме однородного неравномерно нагретого проводника с постоянным током, кроме теплоты Джоуля-Ленца, в зависимости от направления тока выделяется или поглощается дополнительная теплота Томсона (рис. 6).



Уильям Томсон,
лорд Кельвин

Рисунок 6. Эффект Томсона

В 1853 г. Томсону удалось экспериментально подтвердить свой эффект. Для этого он использовал образцы в виде стержней из металлических полос, которые проходили через три ящика с водой (рис.7).

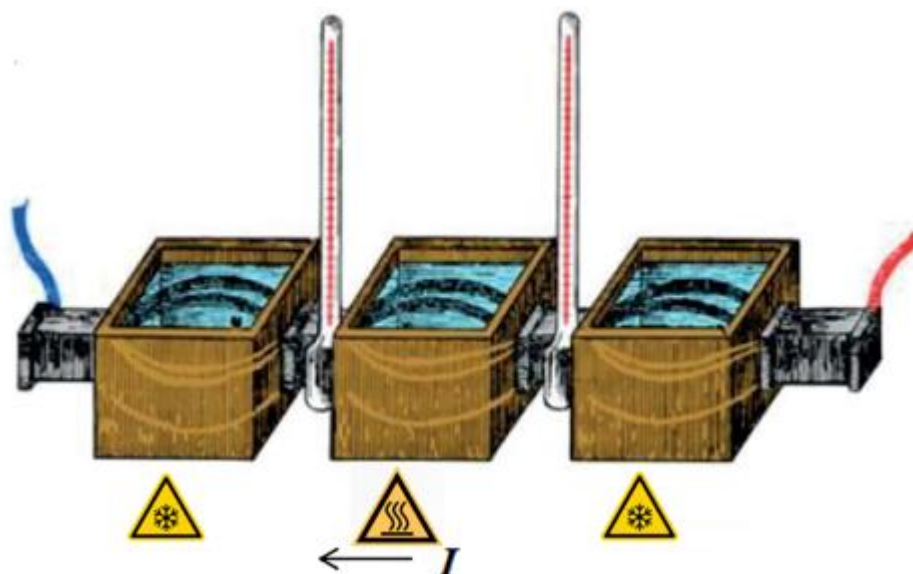


Рисунок 7. Экспериментальное доказательство эффекта Томсона

Центральный ящик содержал горячую воду, крайние - холодную. Температура между ящиками регистрировалась термометрами. В отсутствие в системе электрического тока показания термометров были равны, а при пропускании тока через образцы, термометр фиксировал изменения температуры в зависимости от направления тока. Томсон показал, что выделенное количество теплоты за единицу времени пропорционально перепаду температур и силе тока, и зависит от материала проводника. Параметр материала, определяющий данную зависимость, в последствии назвали коэффициентом Томсона.

Описанные эффекты используются в термоэлектрических устройствах:

- эффект Зеебека в приборах преобразования тепловой энергии в электрическую – термоэлектрических генераторах;
- эффект Пельтье используется в приборах термоэлектрического охлаждения или нагрева – термоэлектрических охлаждающих модулях или термоэлектрических тепловых насосах;
- эффект Томсона сам по себе не имеет технического применения, однако коэффициент Томсона учитывают в расчетах.

На протяжении долгого времени многие ученые-изобретатели собирали различные термоэлектрические батареи, но широкого применения они не получали из-за своего низкого коэффициента полезного действия.

В 1885 г. Джон Уильям Стретт, третий барон Рэлей, впервые сформулировал и попытался решить задачу об эффективности термогенераторов. Рэлей частично решил эту задачу, в частности, выявил зависимость КПД от электропроводности и термоЭДС материала, но сильного влияния на развитие термоэлектричества его работа не оказала.

Немецкий физик Эдмунд Альтенкирх использовал модель постоянных свойств для определения максимальной эффективности термоэлектрического генератора. Альтенкирх установил требование к материалу – высокий коэффициент Зеебека, высокая электропроводность и низкая теплопроводность. Созданная им теория позволила определить достигаемую разность температур, КПД генератора. Однако, поскольку в то время единственным известными проводниками были металлы, было показано, что максимальная достигаемая разность температур не превышала 1-2 °С для термоэлектрического охлаждения, а в то время уже была развита холодильная техника, и такой градиент температур никого не интересовал; КПД термоэлектрических металлических цепей составлял долю процента, в то время как создаваемые тогда электростанции имели КПД в десятки раз больше. Поэтому термоэлектричество ушло на задворки физики.

Изменение произошло с появлением работ советского физика Иоффе. Он был первым ученым, который предложил использовать полупроводниковые материалы для термоэлектрического преобразования. Он ввел коэффициент термоэлектрической эффективности материала Z , который связывал параметры материала (формула 1).

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (1)$$

Где z – термоэлектрическая эффективность;

α – коэффициент Зеебека;

σ – электропроводность;

κ – теплопроводность.

Также можно использовать безразмерную термоэлектрическую добротность ZT , добавив в уравнение температуру (формула 2).

$$zT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa_{\text{эл}} + \kappa_{\text{реш}}} T, \quad (2)$$

Иоффе показал, что самый оптимальный класс материалов – это полупроводники. В диэлектриках эффективен каждый свободный электрон, однако их количество незначительно – концентрация носителей заряда там низкая, порядка 10^{15} см^{-3} , поэтому произведение условной эффективности каждого носителя будет мало, эффект будет незначительным. В металлах ситуация обратная – количество носителей большое, но энергетические возможности каждого носителя заряда малы, их произведение тоже мало. Иоффе показал, что именно средний класс материалов может дать наилучший результат.

Также в работах Иоффе и его коллектива было введено понятие оптимальной концентрации носителей заряда, при которой материал обладает максимальной термоэлектрической добротностью (рис. 8). Она составляет порядка 10^{19} - 10^{20} см^{-3} .

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА

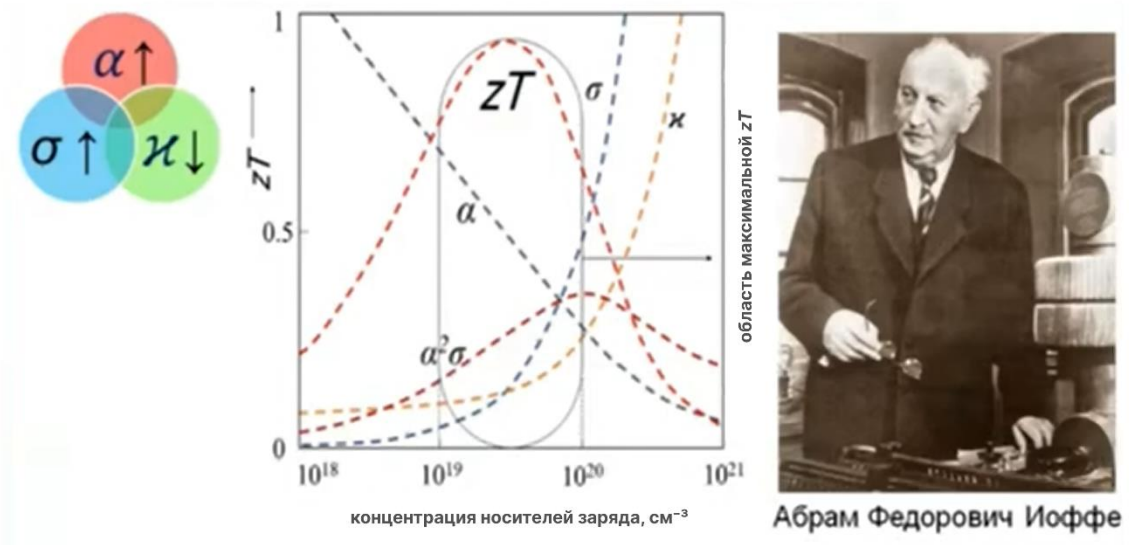


Рисунок 8. Поиск оптимальной концентрации носителей заряда

Рассмотрим термоэлектрический модуль. Любой термоэлектрический модуль состоит из термоэлементов, которые электрически соединены последовательно, термически - параллельно (рис. 9).

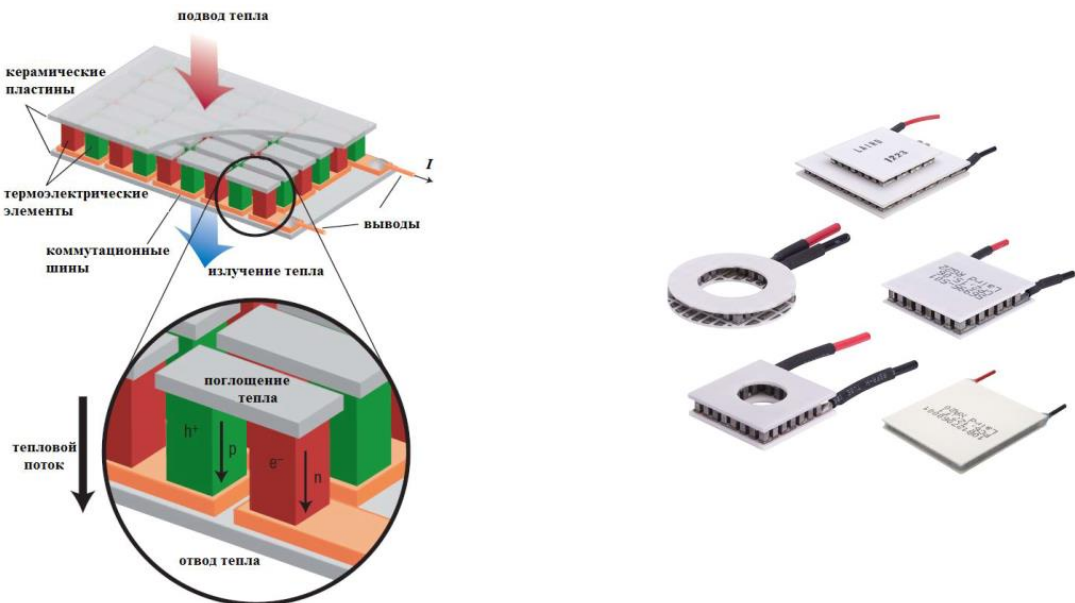


Рисунок 9. Термоэлектрический модуль

Модуль может использоваться как для охлаждения, так и для выработки электроэнергии. Термоэлемент в свою очередь состоит из двух ветвей р и n-типа, соединенных между собой проводящими шинами, которые служат контактами для теплообмена с керамическими пластинами. Модули могут быть различной конфигурации.

Поговорим о работе в режиме генерации энергии. Например, есть термоэлемент, с одной стороны осуществляется подвод тепла, с другой – отвод (рис. 10).

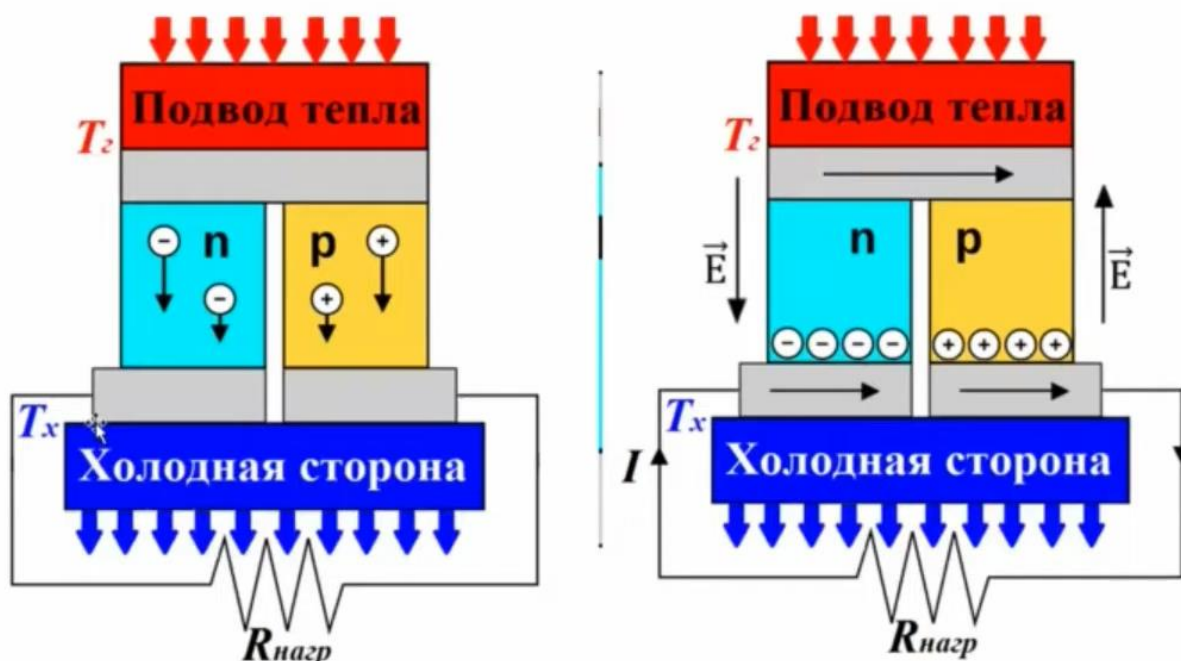


Рисунок 10. Схема работы термоэлемента

Получается, что на концах ветвей есть разность температур, и существует градиент температуры вдоль образца. В результате носители тока, находящиеся в более нагретых областях, обладают большей скоростью и энергией, чем те, которые находятся в менее нагретых областях, и в проводнике от горячего конца к холодному начинается перемещение зарядов. Если носителями заряда являются электроны, то холодный конец вследствие их избытка заряжается отрицательно, а горячий конец - положительно. В случае носителей заряда р-типа, холодный образец заряжается положительно, горячий – отрицательно.

Таким образом, при установлении равновесия, на холодной стороне концентрация носителей заряда будет больше, чем на горячей - под действием градиента температур формируется градиент концентрации носителей заряда.

Процесс накопления заряда продолжится до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток носителей заряда в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие. То есть возникнет электрическое поле, направленное по градиенту температуры в случае материалов n-типа, и в обратном направлении, в случае материалов p-типа. Если замкнуть цепь, то по ней будет бежать электрический ток.

При работе термоэлемента в режиме термоэлектрического охладителя, причиной выделения или поглощения тепла Пельтье будет являться различие средних энергий электронов в разных проводниках, даже если оба проводника имеют одну температуру. При контакте металлов величина эффекта Пельтье пренебрежительно мала по сравнению с омическим нагревом и явлениями, обусловленными высокой теплопроводностью. Явно этот эффект наблюдается на контактах «металл-полупроводник» и «полупроводник-полупроводник», поэтому в термоэлементах ветви n и p-типа соединяют металлическими перемычками (шинами).

Для понимания эффекта охлаждения Пельтье через движение электронов рассмотрим схемы на рисунке 11. Наверху слева – электрон, покидая металлическую перемычку, чтобы перейти в зону проводимости n-полупроводника, поглощает тепло из перемычки; внизу слева – тепло, забранное электроном из металлической перемычки, выделяется в левом контакте при переходе в него электрона из зоны проводимости полупроводника. Наверху справа – электрон движется вверх по валентной зоне полупроводника, поглощая при этом энергию с тем, чтобы заполнить собой пустое состояние вблизи поверхности металлической перемычки; внизу справа – электрон при переходе из металлического контакта в полупроводник выделяет тепло, понижая свою энергию, чтобы заполнить пустое состояние в валентной зоне полупроводника.

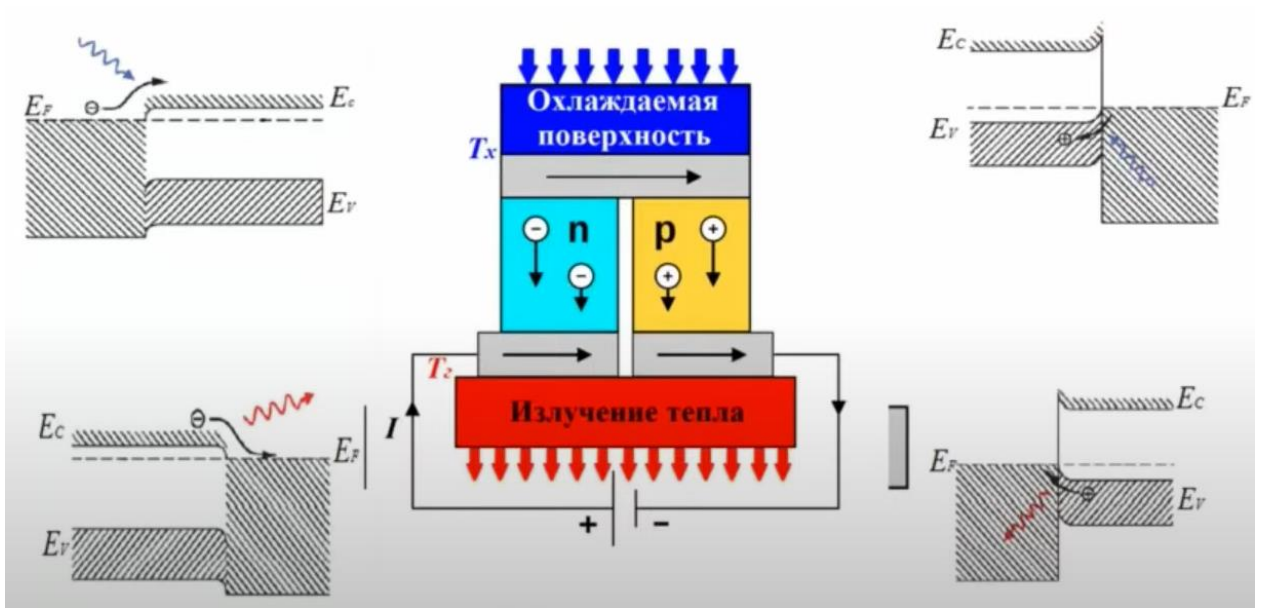


Рисунок 11. Схема работы термоэлектрического охладителя (ТЭО)

На рисунке 12 показано схема движение электрона и выделение/поглощение энергии при работе термоэлектрического охладителя.

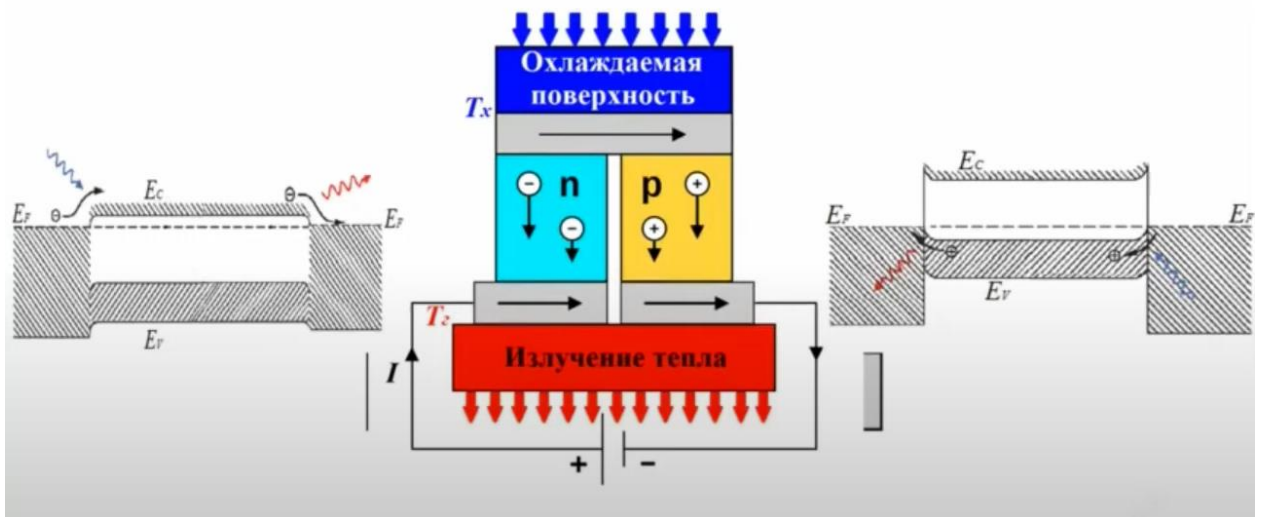
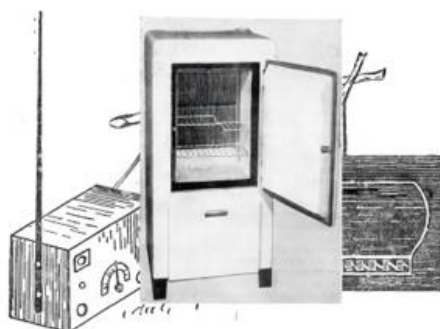


Рисунок 12. Схема движения электрона и выделение/поглощение энергии при работе термоэлектрического охладителя

Первым термоэлектрическим устройством (рис. 13), получившим широкое применение, является партизанский котелок ТГ-1 (1943 г.).

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА



ТГ-1 Термоэлектрический холодильник
"Партизанский котелок"
1943 г.



ТГК-3
1953 г.

Рисунок 13. Первые термоэлектрические устройства

Когда началась Великая Отечественная война, физики Ленинградского физико-технического института, которым руководил Иоффе, разработали специально для партизан и диверсионных групп термоэлектродгенератор ТГ1 - партизанский котелок. Работой по его созданию руководил Юрий Маслаковцев. Прибор представлял собой котелок, который наполнялся водой и устанавливался на костер. В качестве ветвей термоэлемента (они располагались в дне котелка) использовался сернистый свинец - одна ветвь содержала избыток серы, другая - избыток свинца, так получался р/п-тип. Разница температур между пламенем костра и водой доходила до 300°C. Этого было достаточно для выделения тока, с помощью которого осуществлялась зарядка батареи переносной радиостанции. Термоэлемент данного устройства имел КПД порядка 3%

После войны широкое применение получил генератор ТГК-3 (1953 г.). Источником тепла и одновременно света в нем служила обычная керосиновая лампа. Генератор использовался для питания сельских батарейных радиоприемников (до этого для питания таких приемников применялись батареи с гальваническим элементом, однако такие батареи имели ряд недостатков, например, саморазряд).

Иоффе не только ввел формулу термоэлектрической добротности, характеризующей материал, но и вывел формулы, показывающие максимальную эффективность термоэлектрического генератора. Он показал, что они связаны с параметрами материалов, используемых в устройстве, а также зависят от температуры горячей и холодной стороны устройства (рисунок 14).

$$\eta = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}}{T_{\Gamma}} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + T_{\text{X}}/T_{\Gamma}} \quad \varepsilon = \frac{T_{\text{X}}}{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}} \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - T_{\Gamma}/T_{\text{X}}}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + 1}$$

коэффициент полезного действия ТЭГ коэффициент преобразования ТЭО

$Z = \text{термоэлектрическая эффективность элемента}$ $\bar{T} = \frac{T_{\text{X}} + T_{\Gamma}}{2}$

$$Z = \frac{(|\alpha_n| + |\alpha_p|)^2}{\left(\sqrt{\kappa_n/\sigma_n} + \sqrt{\kappa_p/\sigma_p}\right)^2} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left(\sqrt{\kappa_n\rho_n} + \sqrt{\kappa_p\rho_p}\right)^2}$$

Рисунок 14. Формулы Иоффе

Для получения максимального КПД термогенератора необходим материал с высоким коэффициентом Зеебека, высокой электропроводностью и низкой теплопроводностью, однако эти три фактора взаимосвязаны, и сложно получить материал, обладающий одновременно оптимальными значениями каждого из них.

Так, например, с ростом коэффициента Зеебека почти всегда уменьшается электропроводность. С увеличением концентрации носителей заряда наблюдается уменьшение коэффициента Зеебека. В то же время, теплопроводность состоит из электронного и решеточного вклада, и если электронный будет зависеть от электропроводности (соответственно от концентрации носителей заряда), решеточная теплопроводность определяется

теплоемкостью и средней длиной свободного пробега фононов в материале. Так, низкой теплопроводностью обладают, например, материалы, похожие на стекла, однако у них низкая электропроводность. Все это говорит о том, что получить хороший термоэлектрический материал сложно.

На рисунке 15 показана зависимость максимальной эффективности преобразования энергии от показателя добротности материала и от разницы температур между ними.

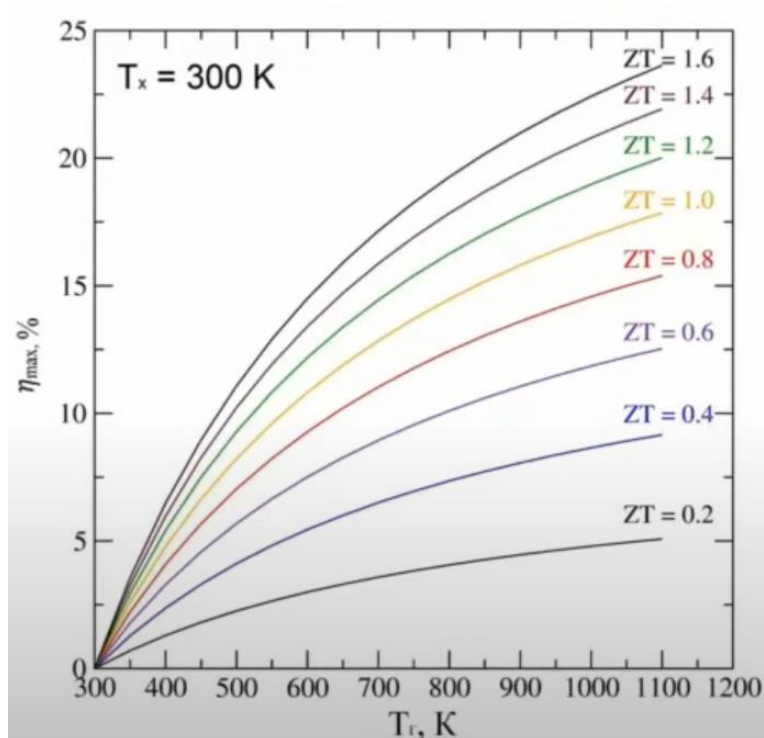


Рисунок 15. Зависимость максимальной эффективности преобразования энергии от показателя добротности материала и от разницы температур между ними

Отметим, что отсутствуют материалы, являющиеся хорошими термоэлектриками в широком диапазоне температур. Все термоэлектрические материалы можно разделить на три класса: низкотемпературные, работающие до 300°C ; среднетемпературные, работающие до 600°C и высокотемпературные, работающие до $1000\text{-}1200^{\circ}\text{C}$.

У традиционных термоэлектрических материалов (рис. 16) термоэлектрическая добротность равна примерно 1. Получается, что у

низкотемпературного материала КПД не более 5%, у среднетемпературного материала КПД не более 7%.

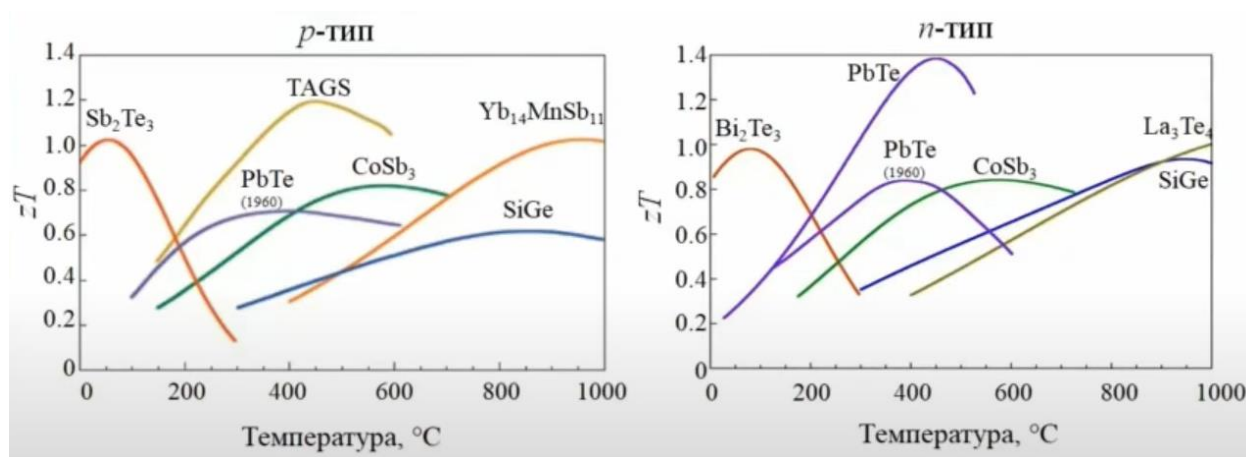


Рисунок 16. Традиционные термоэлектрические материалы

Несмотря на то, что пик интереса к термоэлектричеству был достигнут в 1950-ые гг., в настоящее время также применяются термоэлектрические устройства. Например, используются термоэлектрические охладители (в частности, микроохладители – модули, которые имеющие размеры 1x1 см и меньше) для термостабилизации в оптоэлектронных устройствах. Они успешно конкурирует с другими методами терморегулирования благодаря своим миниатюрным размерам, способности быстро и эффективно провести термостабилизацию, возможности работать и на нагрев, и на охлаждение, надежности, длительному сроку эксплуатации (рис.17).

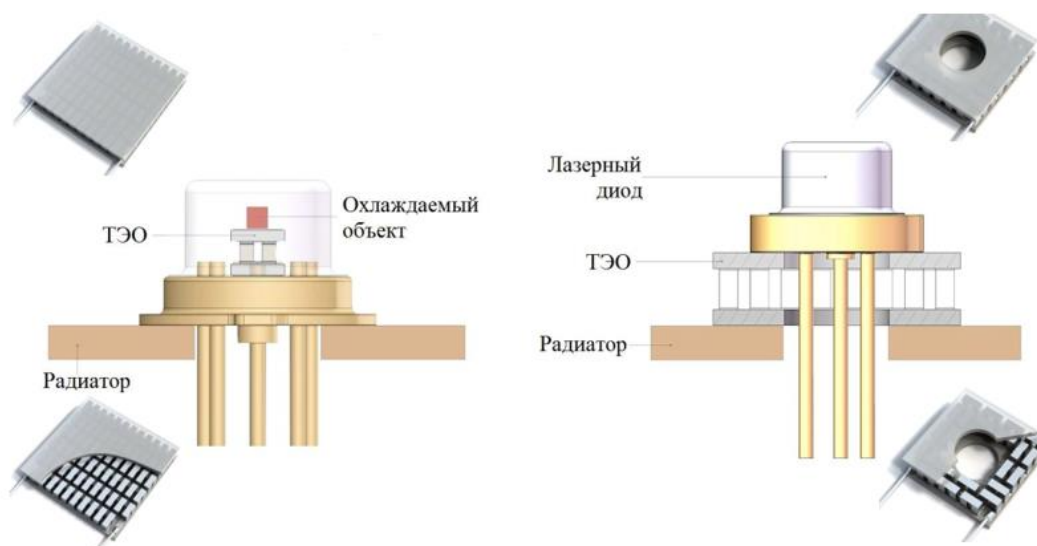


Рисунок 17. Пример использования термоэлектрических охладителей в технике

Всем известны автомобильные холодильники или пикник-боксы, которым достаточно питание от системы автомобиля для охлаждения продуктов. Работа многих из них также основана на термоэлектрических охладителях (рис.18).

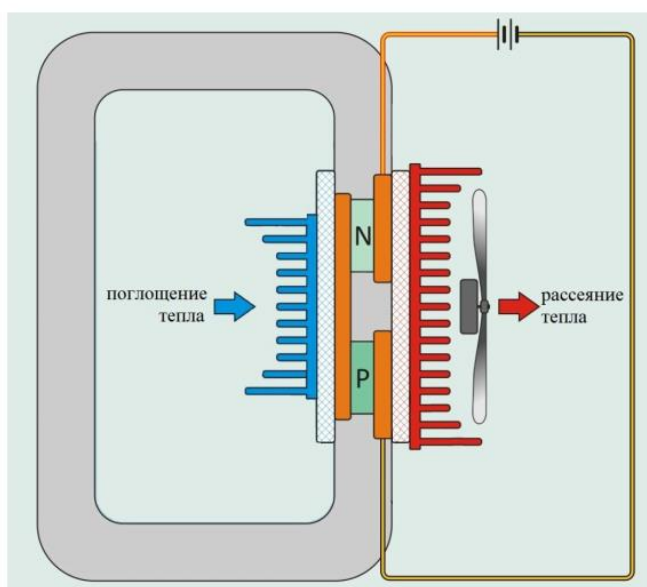


Рисунок 18. Пример использования термоэлектрических охладителей в быту

Термоэлектрические генераторы имеют широкое применение в нефтегазовой отрасли (рис. 19).

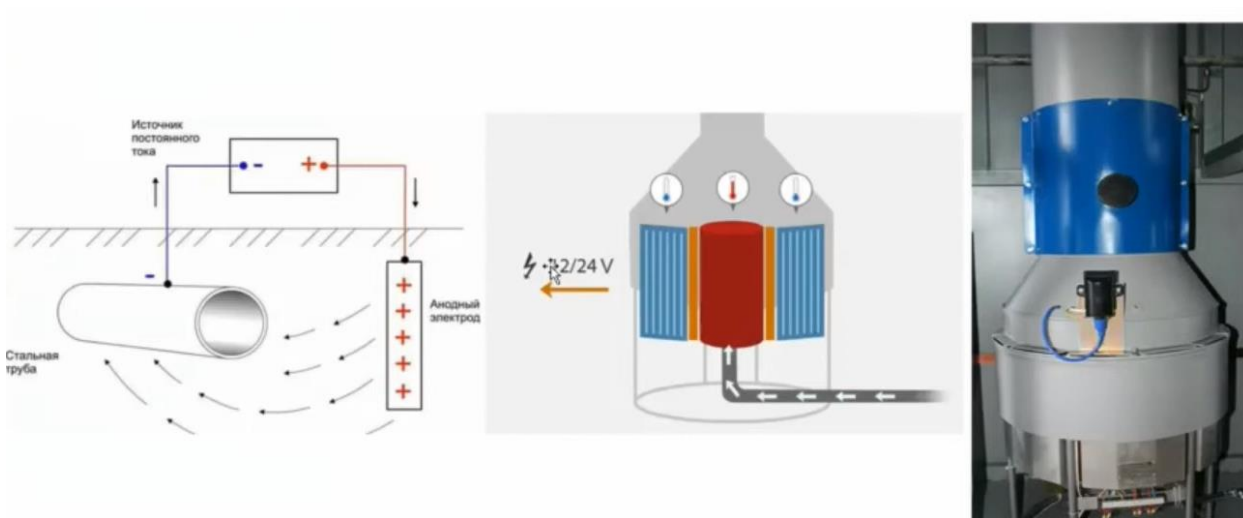


Рисунок 19. Термоэлектрические генераторы для нефтегазовой отрасли

Они используются для катодной защиты трубопроводов, активно используемых для транспортировки нефти и газа. Обычно трубопроводы металлические, они подвержены образованию ржавчины. Чтобы избежать этого, на трубопроводах ставят системы катодной защиты, заключающейся в том, что на изделие подается внешний электрический ток от отрицательного полюса, и, за счет этого, обеспечивается поляризация катодных участков, поднимается значение потенциала до анодных. Так, с помощью поляризации от внешних источников, защищают конструкции, находящиеся в почве и воде. Роль внешнего источника электрического тока, в данном случае, выполняют станции катодной защиты – это станции автономных источников (рис. 20) питания, которые работают на термоэлектрических генераторах.



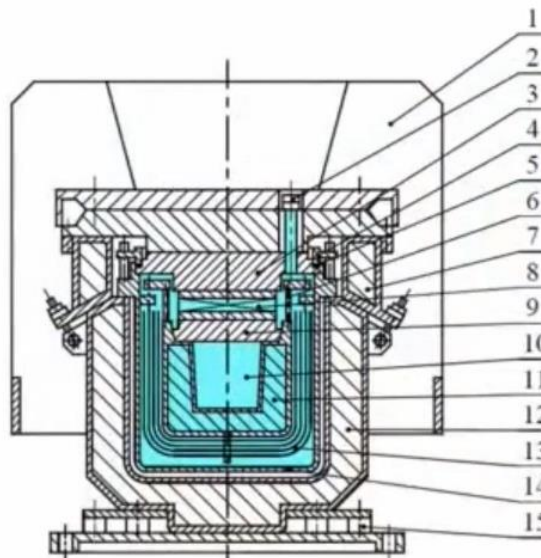
Рисунок 20. Станции катодной защиты нефтегазовой отрасли

Следующее прибор, который мы рассмотрим, это радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ) (рис. 21).



Фото РИТЭГ типа Бета-М

- 1 — радиатор;
- 2 — электровывод;
- 3 — крышка;
- 4 — фланец;
- 5 — прокладка;



Конструктивная схема РИТЭГ Бета-М

- 6 — опора источника;
- 7 — радиационная защита;
- 8 — блок термоэлектрический;
- 9 — крышка;
- 10 — радиоизотопный источник тепла;
- 11 — блок защиты;
- 12 — радиационная защита;
- 13 — экраны;
- 14 — корпус;
- 15 — основание.

Рисунок 21. РИТЭГ

В нем, в качестве источника тепла, использовался радионуклид – тепловая энергия появлялась при естественном распаде радиоактивных изотопов. Например, для РИТЭГов (рис. 22) типа Бета-М использовался Стронций-90. Они применялись в радиомаяках, метеостанциях, в оборудовании, которое было устанавливалось в местности, где по техническим или экономическим причинам не было возможности воспользоваться другими источниками энергии.



Рисунок 22. РИТЭГ на местности

В СССР активно использовались в качестве источников питания для навигационных систем, установленных на побережье Северного Ледовитого океана.

РИТЭГи являются основными источниками электропитания на космических аппаратах, выполняющих полеты, в ходе которых использование солнечных батарей неэффективно или невозможно (рис.23). Также их используют для питания луноходов, марсоходов и т.д.

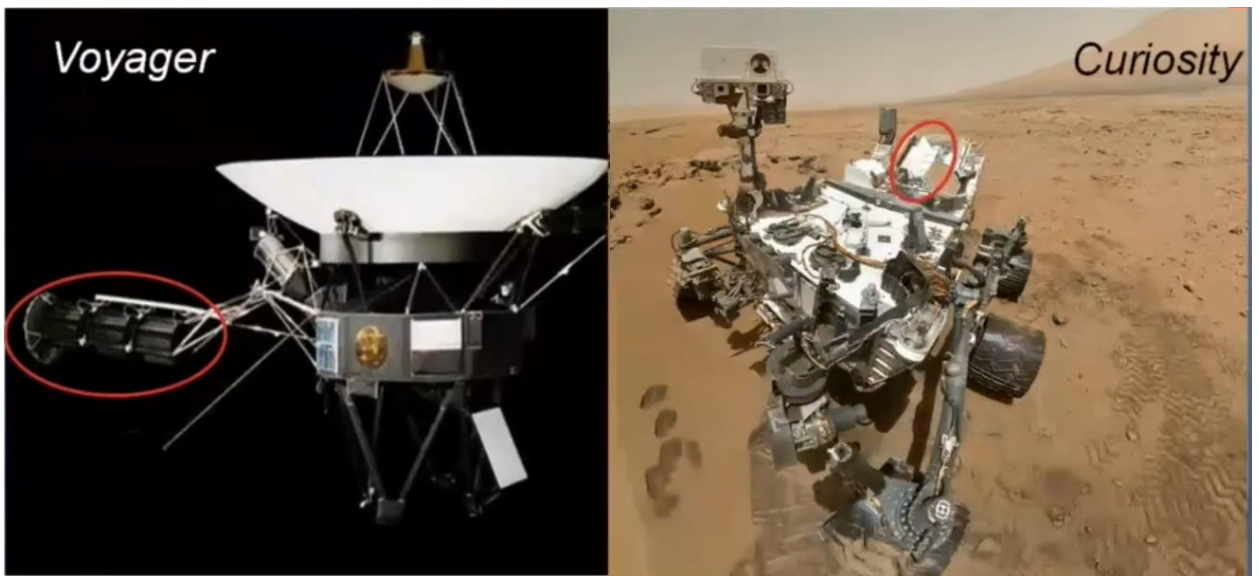


Рисунок 23. РИТЭГи в космических аппаратах

В настоящее время, основная задача – это поиск и разработка химически и термически стабильных материалов с высокой термоэлектрической добротностью. По-прежнему актуальны работы, связанные с оптимизацией концентрации носителей заряда, снижением решеточного вклада в теплопроводность, наноструктурированием материалов. Продолжается поиск новых материалов (рис. 24), содержащих дешевые, распространенные элементы с низкой токсичностью.

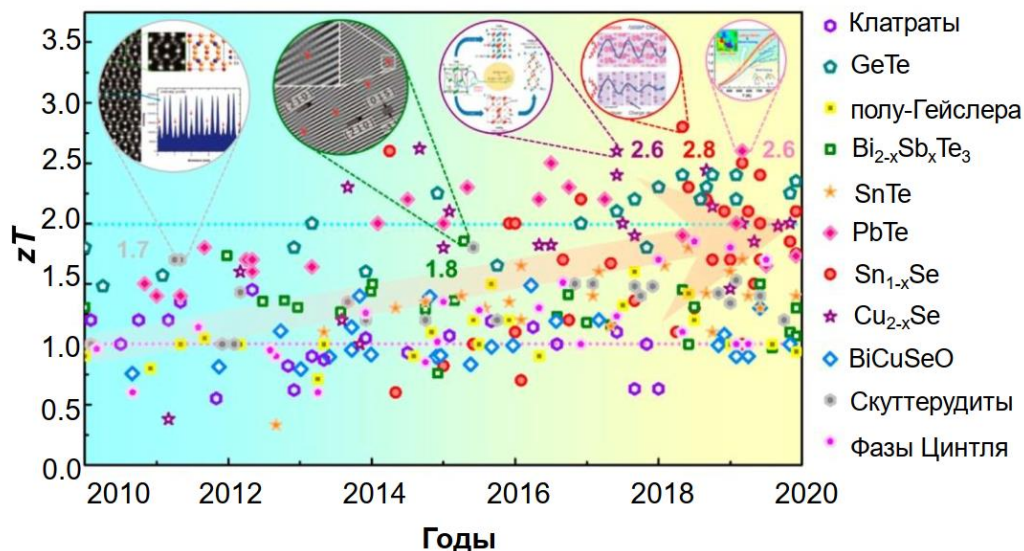


Рисунок 24. Данные работ по различным классам термоэлектрических материалов

Одна из главных задач – найти материалы, которые будут хорошими с точки зрения термоэлектрических свойств, недорогими и несложными в получении и разработать производительные способы их получения.