

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ФЕРГАНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи  
УДК 621.362

**КАХХАРОВА НОДИРА ЗАХИДЖОНОВНА**

**«НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ»**

Магистерская диссертация на соискание академической степени магистра по  
направлению специальности 5А520205

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
“Электроэнергетика” МАХМУД БОЗОРОВИЧ НАБИЕВ

Фергана 2012 год

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	7
1.1. Общая характеристика работы .....	7
1.2. Литературный обзор .....	11
а) Из истории развития термоэлектрических генераторов .....	17
1.3. Расчёты термоэлементов.....	25
Основные термоэлектрические явления .....	25
а) Баланс мощности в ТЭЭЛ .....	28
б) ТЭЭЛ с переменным составом ветвей.....	29
в) Расчёт ТЭЭЛ.....	33
г) Импульсный термоэлектрогенератор (ИТЭГ) .....	37
1.4. Термоэлектрические агрегаты.....	38
а) Первые варианты термоэлектрогенераторов .....	39
б) Генераторы катодной защиты .....	43
Глава II. Исследование и изучение параметров источников тока на основе полупроводниковых термоэлементов в электроснабжении .....	47
II.1. Теоретическое исследование параметров и методика расчёта различных режимов ТЭГ постоянного тока .....	47
г) О предельной экономичности термоэлектрических батарей .....	54
II.2. Экспериментальные методы измерения параметров для ТЭГ, характеризующих свойства полупроводниковых термоэлементов.....	55
а) Предварительная оценка параметров материала с помощью зондового метода .....	55
б) Измерение удельного электрического сопротивления .....	56
в) Измерение термоэлектродвижущей силы .....	58
II.3. Методы измерения электрического сопротивления термоэлектродвижущей силы и коэффициента теплопроводности термоэлектрических материалов .....	59

Методика исследований .....	65
Проведение измерений .....	66
Порядок измерений и обработка результатов .....	66
II.4. Эффективность использования и конструирование термоэлементов в термобатареях и определение области применения .....	67
а) Источники теплоснабжения .....	73
Практические достижения и передовые термоэлектрические технологии для радиоизотопных термоэлектрических генераторов .....	74
Вопросы теплопередачи .....	75
Совершенствование структуры производства энергоресурсов.....	80
Ядерное топливо.....	84
Глава III Непосредственное преобразование энергии с использованием ядерных источников тепла .....	86
III.1. Предпосылки развития ядерной энергетики .....	86
III.2. Перспективы развития ядерной энергетики.....	88
III.3. Ядерная энергетика и общественное мнение .....	89
III.4. Пример SNAP-III-C .....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	98
Перспективы и возможности .....	99
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА: .....	101

# ВВЕДЕНИЕ

## 1.1. Общая характеристика работы

### **Актуальность темы.**

Теория энергетических применений полупроводниковых термобатарей и термоэлементов для генерации тока, разработанная академиком А.Ф.Иоффе в 1948-1949 гг., является реальной основой для создания и практического использования термоэлектрических устройств преобразования энергии.

Реализация технических аспектов этой проблемы привела к созданию малогабаритных устройств в малой энергетике.

В настоящее время исследования и разработки в области термоэлектричества развиваются в трех основных направлениях:

- исследования физико-энергетических параметров полупроводниковых элементов и ветвей р и n типа термоэлементов, перспективных для использования в электрогенерирующих устройствах низко-средне- и высокотемпературного диапазонов;

- исследование различных режимов работы одно- и многокаскадных ТЭГ широкого спектра технических применений;

- разработка широкого класса термоэлектрических ТЭГ с использованием в качестве источников тепла всех видов современного топлива от ядерного горючего до биогаза.

В последнее время термоэлектрический метод генерации тока все прочнее входит в число новых направлений малой энергетике. Становление термоэлектрической энергетике, происходящее в настоящее время, хотя по-видимому, и не будет таким революционным шагом, как возникновение фотоэлектрической энергетике или транзисторной техники, однако, безусловно производит качественные изменения в ряде областей науки и народного хозяйства.

В конце двадцатых годов академик А.Ф.Иоффе с сотрудниками приступил к обстоятельному изучению полупроводников в лабораториях Санкт-Петербургского физико-технического института РАН. В результате

был определён механизм электропроводности полупроводников, исследованы термоэлектрические свойства, гальвано-магнитные явления и другие вопросы полупроводниковой электроники. Результаты этих исследований показали на возможность создания термоэлектрических генераторов с коэффициентом полезного действия в 2,5–4%, а в дальнейшем, по мере разработки полупроводниковых термоэлементов, была показана возможность получения коэффициента полезного действия до 10–15%.

Телкес (США) изучила и использовала несколько сплавов на основе цинка, сурьмы, висмута, и в частности ZnSb (Sn, Ag, Bi) в паре с 91% Bi + 9% Sb (вес, %), и получила ТЭГ с коэффициентом полезного действия до 3,3% и более (при перепаде температур 400 °С).

Возможность использования ядерных реакторов для производства электроэнергии вызвало расширение работ в области прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, особенно эффективно начал развиваться термоэлектрический способ преобразования.

В США изотопный ТЭГ на полонии-210 мощностью 2,4 Вт впервые продемонстрирован в 1959 г. С того времени в США ведётся разработка и создание различных радиоизотопных ТЭГ. В последние годы начали разработку подобных генераторов и другие страны.

Бывший Союз на третьей Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964 г.) сделало сообщение о пуске первого в мире ядерного реактора на быстрых нейтронах с прямым получением электроэнергии при помощи полупроводниковых термоэлементов (установка «Ромашка» электрической мощностью 0,5 кВт). Установка была пущена в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова 14 августа 1964 г. и непрерывно проработала в течение 15 тыс.ч.

В США подобная термоэлектрическая установка СНАП-10А, мощностью также 0,5 кВт, с реактором на тепловых нейтронах и жидкометаллическим теплоносителем была запущена в космос 3 апреля 1965 г. и проработала 43 дня.

В эти же годы Энергетическим институтом им. Г.М. Кржижановского и Физико-техническим институтом АН Туркмении создана опытная солнечная водоподъёмная установка для пустынь СВ-1 с ТЭГ мощностью 0,3 кВт. Установка имеет параболический концентратор солнечной энергии и полупроводниковые термоэлементы.

Таким образом, в шестидесятые годы началось использование атомной энергии в установках с термоэлектрическими преобразователями. Начался новый этап в развитии термоэлектрической энергетики.

### **Цель и задачи исследования.**

Магистерская диссертация посвящена следующим вопросам, касающимся дальнейшего повышения эффективности ТЭГ и термоэлементов в электрогенерирующих системах, теоретические и экспериментальные исследования каскадных термоэлементов и проводимые в течение последующих 10-15 лет, показали хорошее согласие с основными теоретическими положениями, способствовали существенному повышению коэффициента полезного действия термоэлектрического метода генерации и расширению областей применения ТЭГ в качестве автономного источника тока в малой энергетике, таких как источников топлива от ядерного горючего до биогаза.

В их число входят:

1. Исследование и изучение параметров тока на основе полупроводниковых термоэлементов в электроснабжении;
2. Теоретическое исследование параметров и методика расчёта в различных режимах ТЭГ постоянного тока, расчёт КПД и мощности ТЭГ;
3. О предельной экономичности ТЭГ и совершенствование структуры производства энергоресурсов;
4. Экспериментальные методы измерения параметров для ТЭГ, характеризующих свойства полупроводниковых термоэлементов;
5. Эффективность использования и конструирование термоэлементов и термобатарей и применение в народном хозяйстве;

6. Непосредственное преобразование энергии с использованием ядерных источников тепла и развитие ядерной энергетики.

### **Научная новизна работы**

Впервые проведены широкие экспериментальные и теоретические исследования и изучение параметров тока на основе полупроводниковых термоэлементов в электроснабжении:

- о точности результатов;
- расчёт термобатареи, работающей в режиме максимального коэффициента полезного действия (КПД) и мощности;
- методы измерения параметров ТЭГ;
- результаты исследования образца;
- предпосылки развития ядерной энергетики.

Из анализа проведенной работы показаны реальные научно-технические перспективы, расширяющие области применения термоэлектрического метода преобразования энергии.

### **Практическая ценность**

1. Предложен широкий обзорный теоретический анализ исследования параметров и методика расчёта в различных режимах ТЭГ постоянного тока.
2. Предложены и практически реализованы конструкционные приёмы повышения эффективности ТЭГ в энергогенерирующих устройствах в энергосбережении.
3. Предложены предварительная оценка параметров материала с помощью зондового метода.
4. Предложены предпосылки развития ядерной энергетики.

### **Апробация работы.**

Основные материалы магистерской диссертации доложены на ежегодных научно-технических конференциях ФерПИ 2000-2012 гг., на научных семинарах кафедры «Электроэнергетика» ФерПИ и ФерГУ на кафедре «Физика».

### **Публикации**

1. Н.Каххорова, М.Б.Набиев и др.

«Инерт газ босими остида, термо электрик материалларни кургошин билан легирлаш усули» Фергана, 2011 г., Республиканская научная конференция, стр. 2

2. Н.Каххорова, М.Б. Набиев и др. «Энергия умумийсаният муаммоси», г.Фергана, 2012 г. «Илм-заковат сари» Республика илмий-техника анжумани, 4 бет

### **Структура и объем магистерской диссертации**

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения с выводами и списка использованной литературы, литературы с интернета. Всего \_\_\_\_\_ страниц печатного текста, \_\_\_\_\_ рисунков, \_\_\_\_\_ таблиц, выносимые на защиту.

### **1.2. Литературный обзор**

В последнее время термоэлектрический метод генерации тока все прочнее входит в число новых направлений малой энергетики. Становление термоэлектрической энергетики, происходящее в настоящее время, хотя по-видимому, и не будет таким революционным шагом, как возникновение фотоэлектрической энергетики или транзисторной техники, однако, безусловно производит качественные изменения в ряде областей науки и народного хозяйства.

Развитие теории термоэлектрического метода преобразования энергии шло параллельно с успехами в области развития экспериментальных и прикладных задач. Фундамент теории был заложен монографиями А.Ф. Иоффе «Энергетические применения термобатарей на основе полупроводников» и «Полупроводниковые термоэлементы». Дальнейшее развитие теории и эксперимента в области термоэлектрической генерации тока легли в основу монографий А.Ф. Иоффе и А.И. Бурштейна «Физические основы расчёта полупроводниковых термоэлектрических устройств». Ряд расчётно-теоретических вопросов отражён в монографиях Ю.Г. Манасяна «Термоэлектрические судовые устройства», Э.В. Осипова «Твёрдотельная

криогеника» и А.Л. Вайнера «Каскадные термоэлектрические источники холода».

Некоторые теоретические расчётные и экспериментальные данные, касающиеся метода термоэлектрической генерации тока, отражены в монографиях Е.К. Иординишвили «Термоэлектрические источники питания», Б.С. Позднякова и Е.А. Коптелова «Термоэлектрическая энергетика» и В.С. Охотина и А.С. Пушкарского «Термоэлектрические генераторы». Основные монографии (прежде всего, классические труды А.Ф. Иоффе) в области термоэлектричества и смежных областей физики твёрдого тела переведены и изданы за рубежом. Вместе с тем, следует отметить, что до самого последнего времени подавляющее большинство публикаций в области термоэлектрического метода преобразования энергии всесторонне рассматривали лишь стационарный режим работы электрогенерирующих устройств.

Развитие, которое в последние два десятилетия XX века получила термоэлектрическая энергетика, связано скорее не с успехами в разработке высокоэффективных полупроводниковых термоэлектрических материалов, основные из которых были синтезированы еще в 50-х годах, а с новыми важными прикладными проблемами, возникшими перед техникой и энергетикой за последний период. Усиление активной деятельности человека в труднодоступных районах планеты, в регионах, отдалённых от стационарных сетей электропитания и централизованных источников электроэнергии, настоятельно диктует необходимость в компактных, достаточно надёжных и экономичных источниках тока. Отсюда – всё возрастающий интерес, проявляемый к наземной фотоэнергетике. Однако при всей её привлекательности («вечный» источник световой энергии, экологическая чистота) широкое распространение этого вида прямого преобразования энергии всегда будет существенно сдерживать два органических недостатка:

- зависимость от времени суток и погоды;

- необходимость наличия значительных поверхностей солнечных батарей для получения ощутимого количества электроэнергии (известно, что при современном уровне коэффициента полезного действия электрическая мощность с квадратного метра поверхности солнечных батарей не превышает 80-90 Вт).

В этой ситуации термоэлектрические источники тока, особенно – сопряжённые с компактными и достаточно мощными источниками тепла, несмотря на их сравнительно малый коэффициент полезного действия, являются несомненными фаворитами в условиях Арктики и Антарктики, полевых условиях, в горах и на отдалённых морских побережьях, во всех местах, где несколько десятков (а зачастую, и единицы) ватт решают проблему радиосвязи, сигнализации, телекоммуникации.

В бывшем союзе первые успехи в практическом применении термоэлектродгенераторов (ТЭГ) прочно связаны с именем основоположника термоэлектрической энергетики академика А.Ф. Иоффе. По его инициативе еще в период Великой Отечественной войны было начато опытное производство термоэлектрических преобразователей для энергопитания радиостанций на основе Рb Те – константановых термоэлементов с водяным охлаждением холодных спаев («партизанский котелок»). В 1946-1955 гг. развитие этого направления привело к созданию нескольких модификаций термоэлектродгенераторов для сельской радиотелефонной связи и энергопитания батарейных радиоприёмников.

Позднее, в 60-х годах, когда стали видны большие перспективы применения радиоизотопных капсул как концентрированных и долгоживущих источников тепла появились первые модели радиоизотопных термоэлектродгенераторов на основе термоэлектрических материалов низко- и среднетемпературного диапазонов.

Такие термоэлектродгенераторы мощностью 10-15 Вт со сроком службы до 10 лет, надёжные и простые в эксплуатации, годами не требующие профилактического осмотра, в настоящее время прочно вошли в арсенал

автономных источников тока в Арктике, в частности на трассе Северного морского пути. В 60-х годах успешной оказалась также попытка создания реактора, сопряженного с термоэлектрическим преобразователем (система «Ромашка»). Особые перспективы просматриваются в настоящее время при использовании термоэлектродгенераторов (типа УГМ-200), обеспечивающих антикоррозионную защиту нефте- и газопроводов, связывающих месторождения Севера, Западной Сибири и Оренбуржья с центральными и западными районами страны.

Ряд перспективных применений ТЭГ известен и в зарубежной практике наших дней. Сюда можно отнести серию американских термоэлектродгенераторов SNAP – космического назначения (SNAP-19, SNAP-23 и др.), где, источником тепла является капсула с радиоизотопом. Эти автономные источники тока успешно использовались на поверхности Луны при реализации программы «Аполло», были апробированы при полётах американских космических кораблей к Марсу и успешно функционировали на его поверхности. В настоящее время они являются основными источниками энергии в американской программе «Большой тур» (полёты космических кораблей типа «Pioneer», «Voyager», «Viking» к дальним планетам солнечной системы). Ряд ТЭГ наземного назначения (французская фирма «Martin – Marietta», американская «3M-Co» и др.) активно использовались в качестве вспомогательных и основных автономных источников энергопитания. Широкое распространение получили также ТЭГ морского, и, в частности, подводного назначения (энергопитание глубоководных аппаратов, буев и др.).

Важным вкладом в теорию термоэлектрических источников тока в 60-х годах явились работы Зинера, рассмотревшего предельные возможности коэффициента полезного действия термоэлектрического метода генерации тока при работе термоэлементов в любых температурных интервалах. В этот же период в работах был рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся инженерных расчётов и оптимизации электрогенерирующих термобатарей,

работающих при большой разности температур спаев. Сюда относятся вопросы электрического рассогласования, в основе которых лежат температурные зависимости параметров ветвей термоэлементов, вопросы выбора оптимального тока многокаскадных электрогенерирующих элементов, энергетического вклада каскадов в общий баланс термоэлементов, их оптимальный и абсолютный коэффициент полезного действия и ряд других проблем. Предложенные формулы и поправочные коэффициенты получили широкое применение и стали основой расчёта реальных каскадных термобатарей.

Экспериментальные исследования каскадных термоэлементов, начатые в конце 50-х гг. и проводимые в течение последующих 10-15 лет, показали хорошее согласие с основными теоретическими положениями, способствовали существенному повышению коэффициента полезного действия термоэлектрического метода генерации и расширению областей применения ТЭГ.

При всем этом важно отметить, что с самого начала и во всех случаях теоретических рассуждений и экспериментальных исследований имело место естественное использование лишь стационарных (установившихся) режимов в преобразователях обоих типов. Понять такое развитие термоэлектрической энергетики нетрудно: в то время не стояло каких-либо задач, требующих кратковременного включения агрегатов, - как охлаждение, так и генерация тока требовались с такими же сроками службы и интервалами включения, так и при использовании традиционных машинных способов их получения. К тому же вообще отсутствовали какие-либо, даже качественные идеи, касающиеся нестационарных режимов в электрогенерирующих и охлаждающих термоэлементах.

В условиях современного широкого использования электрической энергии традиционные способы получения электричества с помощью паросилового цикла не могут в достаточной мере удовлетворить растущие потребности. Возникший в связи с этим интерес к методам прямого

преобразования тепловой энергии в электрическую привёл к изучению и разработке термоэлектрических и термоэмиссионных генераторов и других систем.

В магистерской работе на тему: «Научное исследование и изучение параметров источников тока на основе полупроводниковых термоэлементов в электроснабжении» рассматриваются термоэлектрические методы прямого получения электрического тока. В малой энергетике термоэлектрические генераторы обладают специфическими особенностями, делающими их незаменимыми во многих случаях. К таким особенностям относится отсутствие движущихся частей, что, в частности, допускает использование более высоких температур цикла. Нет также необходимости в применении высоких давлений жидкостей или газов в основной схеме, поскольку цикл осуществляется посредством явлений, происходящих в самом термоэлектрическом материале. Термоэлектрические генераторы можно использовать при больших и малых перепадах температур, а также при низких и высоких температурах, то есть термоэлектрический цикл универсален, он допускает использование практически любых источников тепла.

Расход термоэлектрических материалов может быть небольшим, так как коэффициент полезного действия термоэлемента теоретически не зависит от размеров, но связан со способами подвода тепла, с контактными сопротивлениями и другими конструктивными особенностями. Управление термоэлектрическим генератором может быть сведено только к регулированию подачи топлива, так как в принципиальной части схемы нет машин и механизмов. Это облегчает создание автоматически работающих электростанций.

Термоэлектрические явления были открыты в первой половине прошлого века. Однако они не получили тогда применения в энергетике из-за низкой тепловой экономичности.

В настоящее время применение полупроводников и слоистых термоэлементов может обеспечить использование тепла с коэффициентом полезного действия до 10-20 % и более.

Развитие атомной энергетики расширило сферы применения термоэлектрических генераторов. С конца пятидесятых годов стали разрабатываться и осуществляться термоэлектрические генераторы, использующие тепло распада радиоактивных изотопов и энергию деления урана в ядерных реакторах. Такие энергетические установки небольшой мощности нашли применение в космических аппаратах, работающих в отрыве от земных энергетических ресурсов, в морском деле (маяки, метеорологические станции) и в других областях техники. В 1964 г. в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова был пущен первый в мире ядерный реактор с термоэлектрическим генератором тока мощностью 500 Вт. В начале семидесятых годов обсуждаются атомные термоэлектрические установки мощностью в десятки, сотни и тысячи киловатт.

За последнее десятилетие опубликовано значительное количество работ, описывающих результаты научных исследований в области термоэлектрической энергетики, конструкции, методы расчётов ТЭГ, применяемые термоэлектрические генераторы и т.д.

#### **а) Из истории развития термоэлектрических генераторов**

История изучения термоэлектрических явлений насчитывает немногим более 200 лет. Первой научной работой в этой области можно считать исследования, выполненные петербургским академиком Ф.Эпинусом в 1762 г. Он продолжил работы, проводившиеся до него М.В.Ломоносовым и Г.Рихманом в области изучения электрических явлений. Термоэлектрические явления (пироэлектричество) были описаны им в обстоятельном труде «Мемуар, содержащий точное описание опытов с турмалином», изданном в 1762 г. В работе описаны явления, возникающие при нагревании турмалина, и, в частности, даётся описание пироэлектрического маятника. Пробковый шарик совершал движение в результате воздействия электрического

потенциала поверхностей нагретого турмалина. Шарик притягивался к одному из электродов, заряжался, отталкивался и притягивался к другому электроду и т.д. «Это попеременное притягивание и отталкивание продолжалось обыкновенно весьма долго и часто даже более часу», - отмечал Ф.Эпинус.

Указанные опыты – первые попытки прямого получения электричества посредством простого нагревания материалов. Приоритет в открытии термоэлектрических явлений принадлежит Ф.Эпинусу.

В 1822-1823 гг. немецкий физик Зеебек описал в «Известиях прусской академии наук» явление, которое он определил как появление свободного магнетизма, заключающееся в том, что в цепи, состоящей из нескольких спаянных между собою различных материалов, при нагревании и охлаждении соответствующих спаев появляется электрический ток. Зеебек на большом количестве различных материалов сопоставил воздействие на магнитную стрелку проводников, спаянные концы которых имели разные температуры, и составил обширный термоэлектрический ряд. Измеренные Зеебеком значения ТЭДС (термоэлектродвижущая сила) материалов в общем соответствуют современным данным.

Первые термоэлектрические батареи построили Эрстед и Фурье (1823 г.) Батарея Эрстеда и Фурье состояла из висмутовых и сурьмяных палочек, спаянных между собою. Один спай висмута с сурьмой нагревался до  $200^{\circ}\text{C}$  с помощью горелок, а другой охлаждался в результате погружения в лёд конца висмутовой пластинки. Так получилась батарея последовательно соединённых термоэлементов с чередующимися холодными и горячими спаями.

В 1834 г. часовщик Пельтье опубликовал статью о температурных аномалиях, наблюдаемых вблизи границы двух различных проводников при прохождении через них электрического тока.

Однако природа этих явлений была выяснена позднее в результате опытов, проведённых в 1838 г. академиком Российской академии наук

Э.Х.Ленцем. В углубление на стыке стержней из висмута и сурьмы Ленц поместил каплю воды, которая замерзала при прохождении тока в одном направлении и таяла при противоположном направлении. После этих опытов стало ясно, что при прохождении электрического тока на стыке двух разнородных проводников выделяется или поглощается тепло в зависимости от направления тока. Это явление, впервые обнаруженное Пельтье, получило название эффекта Пельтье.

В 1854 г. У.Томсон (лорд Кельвин) опубликовал предложенную им теорию термоэлектрических явлений, основанную на принципах термодинамики. Он показал связь явлений Зеебека и Пельтье и необходимость (тогда еще не открытую) поглощения или выделения тепла вдоль проводника с током, имеющего градиент температуры. Это термоэлектрическое явление было экспериментально продемонстрировано Леру в 1867 г. и известно теперь как эффект Томсона.

Профессор Киевского университета М.П. Авенариус исследовал зависимость ТЭДС от температуры и показал, что для многих термопар ТЭДС изменяется с температурой по параболическому закону. Многочисленные проверки выводов А.П. Авенариуса показали справедливость их для нормальных и высоких температур.

Позднее были уточнены некоторые константы и предложены диаграммы для определения ТЭДС, построенные в соответствии с формулами Авенариуса, исходя из того, что ТЭДС пары металлов равна разности ТЭДС пар, полученных при соединении каждого из металлов порознь с произвольным третьим материалом, при тех же температурах.

В конце семидесятых годов прошлого века Беккерель создал высокотемпературную термоэлектрическую батарею из сернистой меди (температура плавления более  $1000^{\circ}$  С) в паре с мельхиором, дававшую большую ТЭДС.

В 1886 г. Ле Шателье предложил тугоплавкий термоэлемент из платины с платинородием для измерения высоких температур. Различные

термопары для измерения температур в настоящее время широко применяются в промышленности и в науке.

В 1885 г. лорд Рэлей поставил задачу о термоэлектрическом генераторе и вычислил его коэффициент полезного действия, который оказался очень малым по сравнению с коэффициентом полезного действия существовавших паровых машин; поэтому тогда использование ТЭГ казалось неперспективным.

В 1893 г. русский астроном В.К. Цераский построил первый солнечный термоэлектрический генератор. Термоэлементы были изготовлены из сплава цинка с сурьмой (положительная ветвь) и нейзильбера (отрицательная ветвь). Генератор приводил в действие электрический звонок. Подробное сообщение об этом устройстве было опубликовано в «Русском астрономическом календаре».

В восьмидесятые и девяностые годы проблему термоэлектрических устройств изучали многие исследователи в России. Среди них П.И.Бахметьев, В.В. Кобельцын, Б.Л. Розинг, О.Д. Хвольсон и др. В те годы маломощные термоэлектрические генераторы применялись в небольшом количестве (главным образом в гальванотехнике).

К числу наиболее распространённых в Австрии и Германии батарей для гальванотехники относится ТЭГ, предложенный Ноэ. В этой батарее каждая из двух газовых горелок нагревала по двадцать ТЭЭЛ из мельхиора или нейзильбера (отрицательная ветвь) и сплава сурьмы и цинка (положительная ветвь). Тепло к горячим спаям подводилось с помощью медных стержней, нагреваемых газовым пламенем. Холодные спаи охлаждающим воздухом с помощью медных цилиндров.

В 1879 г. Кламон предложил более крупные термобатареи, в которых для нагревания спаев предусматривалось сжигание угля или кокса. Батарея состоит из 3000 ТЭЭЛ, собранных в 60 блоков, по 50 ТЭЭЛ в каждом. Для отрицательной ветви предусматривалось использование сплава из висмута и сурьмы в виде четырехгранных призм, которые соединялись железной

арматурой, служившей одновременно положительной ветвью ТЭЭЛ. Блок из 50 ТЭЭЛ изготовлялся заливанием сплава в специальную форму с вмонтированной железной арматурой. Эти блоки, расположенные вертикально, прижимались к чугунной трубе нагревателя. В качестве электрической изоляции использовалась слюда, охлаждался блок с помощью медных пластинок.

Помимо указанных выше ТЭГ, созданных Ноэ и Кламоном, известны термобатареи, построенные Маркусом, Фермером, Беккерелем и др. Однако они не нашли промышленного применения и использовались только в лабораториях.

В начале XX века наибольшую известность приобрели термобатареи Гюльхера и динафор (генератор тока) Хейля. Батарея Гюльхера состояла из термопар, укрепленных в два ряда на шиферной пластинке и соединённых последовательно. Каждая из них представляет собой трубку из никеля, являющуюся одновременно одной из ветвей термоэлемента и газовой горелкой, нагревающей горячий спай. К верхнему концу трубки, где горит газ, присоединяется вторая ветвь термопары из сплава цинка с сурьмой. ТЭЭЛ соединены широкими медными пластинками, которые одновременно служат рёбрами охлаждения. Полезная мощность этого ТЭГ составляла 6 Вт.

Другая модель ТЭГ (динафор Хейля), применявшаяся в Германии. Такие ТЭГ выпускались мощностью от 1 до 15 Вт.

В конце двадцатых годов академик А.Ф.Иоффе с сотрудниками приступил к обстоятельному изучению полупроводников в лабораториях Санкт-Петербургского физико-технического института РАН. В результате был определён механизм электропроводности полупроводников, исследованы термоэлектрические свойства, гальвано-магнитные явления и другие вопросы полупроводниковой электроники. Результаты этих исследований показали на возможность создания термоэлектрических генераторов с коэффициентом полезного действия в 2,5 – 4 %, а в дальнейшем, по мере разработки полупроводниковых термоэлементов, была

показана возможность получения коэффициента полезного действия до 10 - 15 %.

В этот период возрос интерес к автономным источникам электроэнергии в связи со значительным расширением радиосети и использованием радиоприёмников в районах, удалённых от электростанций. В частности, в 1928 г. в отечественной печати появилось сообщение П.О. Чечик о работе ТЭГ на железо-никелевых ТЭЭЛ, источником тепла для которого служила керосиновая осветительная лампа. В 1937 г. А.Г. Ивахненко описал конструкцию ТЭГ с осветительной лампой с ТЭЭЛ из железо-константана или медь-константана для питания цепей накала радиоприёмника. Эти ТЭГ с металлическими ТЭЭЛ имели низкий коэффициент полезного действия (намного меньше 1%).

В 1940-1941 гг. в физико-техническом институте РАН был создан первый в мире тип полупроводникового ТЭГ. В 1940 г Ю.П. Маслаковец сообщил о ТЭЭЛ из сернистого свинца с коэффициентом полезного действия порядка 3%, то есть приблизительно в десять раз большим, чем коэффициент полезного действия ТЭЭЛ с металлическими элементами. В то же время был создан и фотоэлемент на основе сернистого свинца с коэффициентом полезного действия до 3,7 %.

В 1943-1945 гг. под руководством А.Ф.Иоффе был разработан и пущен в серию первый полупроводниковый генератор ТГ-1. Генератор, приспособленный для работы в полевых условиях, изготавливался в виде котелка, который для нагрева горячих спаев ставился на костёр, а холодные спаи охлаждались кипящей водой. Генератор использовался как источник питания армейской радиостанции «Север».

В середине 40-х годов в бывшем союзе велись работы и по созданию ТЭГ для питания радиоприёмников в районах удалённых от источников электроэнергии. В первых моделях таких ТЭГ ТЭЭЛ изготавливались из сернистого свинца (отрицательная ветвь) и интерметаллического соединения

сурьмы и цинка (положительная ветвь). Ветви этого ТЭЭЛ соединялись электродом из сурьмы. Их коэффициент полезного действия достигал 3,5 %.

В армии США во время второй мировой войны также использовались ТЭГ мощностью 5 Вт (для питания радиоаппаратуры), работавшие на бензине. Однако они были с ТЭЭЛ из металлических сплавов с низким коэффициентом полезного действия – порядка 0,2 %.

Телкес (США) изучила и использовала несколько сплавов на основе цинка, сурьмы, висмута, и в частности ZnSb (Sn, Ag, Bi) в паре с 91 % Bi + 9% Sb (вес. %), и получила ТЭГ с коэффициентом полезного действия до 3,3% и более (при перепаде температур 400 °С).

В 1953 г. промышленность бывшего союза приступила к серийному выпуску термоэлектрогенератора ТГК-3 мощностью 3 Вт. На подмосковном заводе «Термоэлектрогенератор» было организовано крупносерийное производство усовершенствованных ТЭГ – для питания радиоприёмников в неэлектрифицированных районах. Усовершенствованный серийный ТЭГ типа ТЭГК-2-2 на полупроводниках мощностью несколько ватт получал тепло от круглофитильной керосиновой лампы и использовался для питания радиоприёмника «Минск» и др. Срок службы генератора несколько тысяч часов.

В 1956 – 1957 гг. вышли фундаментальные труды академика А.Ф.Иоффе и его учеников по теории и результатам экспериментальных работ в области полупроводников и полупроводниковых устройств, термоэлектрических явлений и термоэлектрических генераторов.

Б.Т. Коломийцем, Б.А. Остроумовым и др. были созданы слоистые ТЭЭЛ с неодинаковым составом ветвей из халькогенидов висмута, сурьмы, свинца и германия, и в интервале температур 50-700 °С был получен коэффициент полезного действия 13,5 %, что приблизительно в три раза выше, чем при использовании однородных ветвей.

Возможность использования ядерных реакторов для производства электроэнергии вызвало расширение работ в области прямого

преобразования тепловой энергии в электрическую, особенно эффективно начал развиваться термоэлектрический способ преобразования.

В 1959 – 1964 гг. были разработаны и испытаны ТЭГ на полонии-210 мощностью 5 Вт, ТЭГ «Бета-1» на цери-144, ТЭГ «Бета-2» на станции-90 и др. Этот период можно считать началом использования с бывшим союзом радиоизотопных термоэлектрических генераторов различного назначения.

В США изотопный ТЭГ на полонии-210 мощностью 2,4 Вт впервые продемонстрирован в 1959 г. С того времени в США ведётся разработка и создание различных радиоизотопных ТЭГ. В последние годы начали разработку подобных генераторов и другие страны.

Бывший Союз на третьей Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964 г.) сделало сообщение о пуске первого в мире ядерного реактора на быстрых нейтронах с прямым получением электроэнергии при помощи полупроводниковых термоэлементов (установка «Ромашка» электрической мощностью 0,5 кВт). Установка была пущена в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова 14 августа 1964 г. и непрерывно проработала в течение 15 тыс.ч.

В США подобная термоэлектрическая установка СНАП-10А, мощностью также 0,5 кВт, с реактором на тепловых нейтронах и жидкометаллическим теплоносителем была запущена в космос 3 апреля 1965 г. и проработала 43 дня.

В эти же годы Энергетическим институтом им. Г.М. Кржижановского и Физико-техническим институтом АН Туркмении создана опытная солнечная водоподъёмная установка для пустынь СВ-1 с ТЭГ мощностью 0,3 кВт. Установка имеет параболический концентратор солнечной энергии и полупроводниковые термоэлементы.

Таким образом, в шестидесятые годы началось использование атомной энергии в установках с термоэлектрическими преобразователями. Начался новый этап в развитии термоэлектрической энергетики.

### I.3. Расчёты термоэлементов

#### Основные термоэлектрические явления

К термоэлектрическим явлениям относится группа физических явлений, обусловленных существованием взаимосвязи между тепловыми и электрическими процессами в проводниках электричества.

В замкнутой цепи, состоящей из разнородных металлов, возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), если места контактов (спаев) поддерживать при различных температурах (эффект Зеебека).

В простейшем случае, когда электрическая цепь состоит из двух различных проводников, последнюю называют термоэлементом, или термопарой. ТЭДС ( $E$ ) зависит только от температур горячего ( $T_r$ ) и холодного ( $T_x$ ) спаев и природы материалов, составляющих термоэлемент. Для небольшого интервала температур ТЭДС можно с достаточной для практических целей точностью считать пропорциональной разности температур и некоторому коэффициенту  $\alpha$ , называемому коэффициентом ТЭДС:

$$E = \alpha (T_r - T_x)$$

Коэффициент ТЭДС имеет размерность (в/град) и зависит от свойств материалов ветвей термоэлемента и интервала рабочих температур, в некоторых случаях он меняет знак с изменением температуры.

Качественно явление Зеебека можно объяснить следующим образом. В различных проводниках энергия свободных электронов, участвующих в электрическом токе, различна и по-разному изменяется с изменением температуры. При наличии градиента температуры вдоль проводника электроны на горячем конце приобретают более высокие скорости и в результате появляется поток электронов от горячего конца к холодному; на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Накопление продолжается до тех пор, пока возникшее падение потенциала не создаёт встречный поток электронов, равный первичному потоку, вызванному различием тепловых

скоростей. Разность таких падений потенциалов в двух проводниках, образующих термоэлемент, обуславливает возникновение ТЭДС.

Параллельно с возникновением электрического тока при наличии разности температур в цепи разнородных проводников наблюдается обратное явление (эффект Пельтье): нагревание или охлаждение спаев разнородных проводников при прохождении через них электрического тока. При этом выделение или поглощение тепла зависит от направления тока.

Количество тепла Пельтье пропорционально силе тока  $I$  и коэффициенту Пельтье  $\pi$ , зависящему от свойств материалов, находящихся в контакте:

$$Q_{\pi} = \pi I$$

Коэффициент Пельтье  $\pi$  имеет размерность [в] и его произведение на ток в цепи определяет тепловую мощность, выделяемую или поглощаемую в местах контактов. Согласно теории, подтверждённой экспериментальными данными, между коэффициентом Пельтье и ТЭДС существует следующая связь:

$$\pi = \alpha T$$

Количество тепла Пельтье может быть также переделено по формуле

$$Q_{\pi} = \alpha I T$$

Явление Пельтье можно рассматривать как перенос тепла электрическим током от одного спая разнородных проводников к другому, который как бы увеличивает теплопроводность этих проводников. Явление Пельтье используется для получения низких температур, например, в холодильных машинах.

Подобное явление наблюдается в однородных неравномерно нагретых проводниках (эффект Томсона). Если вдоль проводника, по которому течёт ток, существует перепад температур, то в дополнение к теплу Джоуля в объёме проводника выделяется (или поглощается, в зависимости от направления тока) некоторое количество тепла  $Q_{\tau}$ , пропорциональное силе

тока, перепаду температур и коэффициенту Томсона  $\tau$ , зависящему от природы проводника:

$$Q_{\tau} = \tau (T_1 - T_2) I,$$

где  $\tau$  - коэффициент Томсона [в/град], зависит от температуры и материала и может быть как положительным, так и отрицательным. По теории Томсона коэффициент ТЭДС связан с  $\tau$  соотношением

$$d\alpha/dT = (\tau_1 - \tau_2)/T$$

которое неоднократно подтверждено экспериментально. При  $\tau_1 = \tau_2$ , то есть в однородном проводнике при наличии градиента температур, эффект Зеебека отсутствует.

Физический смысл явления Томсона заключается в следующем. Если в проводнике с током существует градиент температуры и направление тока соответствует движению электронов от горячего конца к холодному, то, переходя из более горячей области в более холодную, электроны передают избыточную энергию окружающим атомам, чем вызывают нагрев проводника (выделение тепла). Для более точного описания явления необходимо учесть тот факт, что в первом случае электроны тормозятся, а во втором – ускоряются полем ТЭДС. Это изменяет значение коэффициента Томсона, а в некоторых случаях приводит к перемене его знака.

В качестве примера рассмотрим простейший замкнутый термоэлемент, состоящий из двух различных материалов  $A_1$  и  $A_2$ , при температуре спаев  $T_2$  и  $T_x$ . ТЭДС в цепи равна сумме составляющих и характеризуется величиной  $E = IR$ , где  $R$  – электрическое сопротивление цепи. На практике часто бывает необходимость вводить в цепь участки из третьего материала  $A_3$  (например, в термогенераторах или термопарах). Включение в цепь любого материала не влияет на величину ТЭДС, если температуры концов этого материала одинаковы.

Для определения ТЭДС любой пары проводников достаточно знать значение термо-э.д.с. этих проводников относительно третьего проводника, принятого в качестве эталона. При соблюдении правила использования

третьего проводника (одинаковая температура концов) можно термоэлементы соединить в батарею, при этом ТЭДС батареи будет равна сумме термо-э.д.с. элементов.

### а) Баланс мощности в ТЭЭЛ

Основная характеристика термоэлектрического цикла – баланс мощности в ТЭЭЛ, используемой для генерирования электрического тока. Тепло поступает к горячим концам элементов через коммутационные пластины 1 и отводится от холодных концов через пластину 2 при температурах  $T_2$  и  $T_x$  соответственно. потери тепла в окружающее пространство с боковых поверхностей ТЭЭЛ малы и в первом приближении ими можно пренебречь. Количество тепла, расходуемого горячим спаем термоэлемента,  $Q_{\Gamma}$  складывается из следующих частей:

$Q_{\pi_{\Gamma}} = \pi_{1,2}(T_{\Gamma})I$  – тепло Пельтье, поглощаемое в горячем спае ( $I$  – ток);  $Q_K = K(T_{\Gamma} - T_x)$  – тепло, теряемое вследствие теплопроводности материала ТЭЭЛ ( $K$  – коэффициент теплопроводности);

$$(1/2) Q_{\tau} = (1/2) I \int_{T_x}^{T_{\Gamma}} (\tau_2 - \tau_1) dT$$

половина тепла Томсона, выделяющегося в обеих ветвях ТЭЭЛ (предполагаем, что половина его поступает к горячему спаю, остальное – к холодному);  $(1/2) Q_d = (1/2) I^2 r$  – половина тепла Джоуля, выделяющегося в термоэлементе при токе  $I$  и сопротивлении  $r$  (предполагаем, что вторая половина этого тепла отводится к горячим спаям ТЭЭЛ).

Количество тепла, поступающего к горячим спаям, определится из выражения

$$Q_{\tau} = W + Q_K + (1/2) Q_{\tau} - (1/2) Q_d = \pi_{1,2}(T_{\Gamma})I + K(T_{\Gamma} - T_x) + (1/2)I \int_{T_x}^{T_{\Gamma}} (\tau_2 - \tau_1) dT - (1/2)I^2 R$$

Аналогично количество тепла, отводимого от холодных спаев ТЭЭЛ, равно

$$Q_x = \pi_{1,2}(T_x)I + K(T_r - T_x) + (1/2)I^2r - (1/2)I_t \int_{T_x}^{T_r} (\tau_2 - \tau_1)dT$$

Очевидно, что баланс расхода мощности для рассматриваемого ТЭЭЛ определится как

$Q_2 - Q_x - W = 0$ , где  $W$  – полезная электрическая мощность, которая может быть определена из последующего соотношения:  $W = Q_2 - Q_x$ . Подставив сюда значения  $Q_2$  и  $Q_x$ , получим

$$W = I \left[ \pi_{1,2}(T_r) - \pi_{1,2}(T_x) + \int_{T_x}^{T_r} (\tau_2 - \tau_1)dT - I_r \right]$$

Из энергетического баланса обратимых процессов

$$E_{1,2}(T_r, T_x) = \pi_{1,2}(T_r) - \pi_{1,2}(T_x) + \int_{T_x}^{T_r} [\tau_2(T) - \tau_1(T)dT]$$

Внеся это значение в предыдущее уравнение, имеем  $W = I(E - I_r) = I E_n$ , где  $E_n$  – разность потенциалов на нагрузке.

Обычно используются более простые формулы для определения характеристик ТЭЭЛ, например, когда разность  $T_2 - T_x$  меньше, чем средняя температура термоэлектрического цикла  $(1/2)(T_2 + T_x)$ .

Поскольку теплообмен с источником тепла и холода происходит на концах ТЭЭЛ, можно рассматривать вместе тепло Пельтье и Томсона. Пусть  $Q_{\pi, \tau, r} = Q_{\pi, r} + (Q\tau/2)$  и  $Q_{\pi, \tau, x} = Q_{\pi, x} - (Q\tau/2)$ . Из предыдущего

$$\Delta = T_r [\alpha_{1,2}(T_r) - \alpha_{cd}] + T_x [\alpha_{1,2}(T_x) - \alpha_{cd}]$$

### б) ТЭЭЛ с переменным составом ветвей

Повышение эффективности любой тепловой машины может быть достигнуто путём увеличения верхней температуры и снижения нижней температуры цикла. Предельные значения верхней температуры определяются свойствами конструкционных материалов, конструктивными особенностями и температурой источника тепла. Все это справедливо также и для машин, работающих на термоэлектрическом цикле. Однако

термогенераторы могут работать в более широком диапазоне температур, чем паровые машины, поскольку у них отсутствуют вращающиеся части и дополнительные механические нагрузки. Это обстоятельство значительно ослабляет зависимость прочности материалов от высокой температуры.

Специфическим фактором, определяющим коэффициент полезного действия ТЭЭЛ, является добротность материалов. Получение высокой добротности во всем диапазоне рабочих температур термоэлектрического цикла очень важно для повышения коэффициента полезного действия.

Реальные термоэлектрические материалы имеют максимальную добротность  $Z$  лишь в относительно узком диапазоне температур. С этой целью ветви термоэлемента целесообразно изготавливать с переменным составом по длине или из нескольких однородных участков. Для низкотемпературного участка ветви концентрация примеси должна быть меньше, чем для высокотемпературного.

А.Т. Белевцев и др. предложили проводить подбор примесей и концентраций носителей по предельной растворимости примесей, обеспечивая изменение концентрации носителей в зависимости от температуры по закону  $T^3/2$ . Е.К. Иординишвили и Л.С. Стельбанс произвели расчёт ТЭЭЛ с переменным составом ветвей. В практике используются пока ТЭЭЛ не с равномерно изменяющимся составом материала, а содержание несколько соответственно подобранных участков ветви, каждый из которых содержит однородный материал.

Предположим, что ветвь термоэлемента состоит из трёх материалов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , каждый из которых имеет значение  $Z$ , изменяющееся с температурой. Легко видеть, что среднее значение  $Z$  для ветви из трёх таких материалов заметно выше, чем для ветви из какого-либо одного материала. ТЭЭЛ с ветвями из нескольких слоёв ТЭМ называют слоистыми ТЭЭЛ.

Другой конструктивный вариант реализации идеи переменного состава ветвей – использование каскадной батареи. Здесь температурный перепад разбит на две (или более) части и в каждой температурной зоне работает

ТЭЭЛ из материала, имеющего максимальную добротность в этой зоне. При этом каждый термоэлемент каскада должен быть электрически изолирован от элементов другого каскада, но иметь хороший тепловой контакт с соответствующей поверхностью другого элемента. Для этой цели каскады должны быть отделены друг от друга хорошим изолятором, например тонкими пластинками слюды или другого диэлектрика. Такой ТЭЭЛ можно считать эквивалентным каскадной системе из двух батарей ТЭЭЛ  $A$  и  $B$ , из которых одна ( $A$ ) высокотемпературная. При этом все тепло, сбрасываемое высокотемпературным элементом, поступает на горячий спай низкотемпературного ТЭЭЛ через слой электрической изоляции  $I$ . Для предварительных оценок можно полагать, что отсутствует термическое сопротивление между элементами  $A$  и  $B$ . Элемент  $A$  работает при разности температур  $T_e - T_c$ , а элемент  $B$  – при  $T_c - T_x$ . Предполагаем, что паразитные потери тепла отсутствуют, тогда полезная электрическая мощность равна сумме полезных мощностей, развиваемых элементами  $A$  и  $B$ , при затрате единицы тепла, то есть в первом приближении коэффициент полезного действия слоистого ТЭЭЛ может быть определён как  $\eta_{AB} = \eta_A + \eta_B$ .

Например, если для высокотемпературной пары  $A$  из сплава кремний – германия  $\eta_A = 0,06$ , а для низкотемпературной пары из сплава теллуристого свинца  $\eta_B = 0,08$ , то для каскадного ТЭЭЛ в первом приближении  $\eta_{AB} = 0,08 + 0,06 = 0,14$ , то есть 14%. В этой оценке коэффициент полезного действия слоистого ТЭЭЛ предполагалось, что к высокотемпературному и низкотемпературному слоям подводятся одинаковые количества тепла. Очевидно, что к элементу  $B$  всегда подводится меньшее количества тепла на величину, равную количеству электроэнергии, выработанной в элементе  $A$ , то есть  $Q_c = Q_r (1 - \eta_A)$ . Если учесть это обстоятельство, то количество электроэнергии, вырабатываемой элементом  $B$ , составит  $Q_r (1 - \eta_A) \eta_B$ , а общий коэффициент полезного действия

$$\eta_{AB} = 0,08 + 0,06 - 0,08 * 0,06 = 0,135 = 13,5\%$$

При использовании слоистых ТЭЭЛ различие механических характеристик материалов слоёв и промежуточного коммутационного сплава может привести к растрескиванию ветвей ТЭЭЛ и, таким образом, к повышению его внутреннего сопротивления к другим дефектам. Часто возникает необходимость применять ветви различных длин и сечений, что усложняет конструкцию устройства.

Следует заметить, что само по себе каскадирование ТЭЭЛ, как показал А.И. Бурштейн, не может повлиять на увеличение коэффициента полезного действия ТЭЭЛ. За счёт уменьшения степени необратимости процесса (при уменьшении перепада температуры на одном ТЭЭЛ в случае большого количества каскадов) коэффициент полезного действия может быть увеличен на 5-10% при рабочей разности температур 300-600<sup>0</sup>С. Учитывая, что практически можно применить лишь 2-3 каскада, а также принимая во внимание используемый перепад температур между каскадами, можно заключить, что само по себе каскадирование вряд ли целесообразно.

Однако каскадирование может быть использовано для повышения среднего значения добротности в 2-3 раза. При этом коэффициент полезного действия может быть существенно увеличен.

Е.К. Иорданишвили и Л.С. Стельбанс рассчитали и испытали простые и слоистые ТЭЭЛ с ветвями из различных материалов. Один ТЭЭЛ, работающий в интервале температур 450-600<sup>0</sup>С, имел  $\alpha_p = 140 \text{ мкВ/град}$ ,  $\sigma_p = 2200 \text{ (Ом*см)}^{-1}$ ,  $\alpha_{п} = 1100 \text{ (Ом*см)}^{-1}$  и  $\eta_{т} = 5,3\%$ . Собранный из этих элементов слоистый ТЭЭЛ при работе в интервале 300-600<sup>0</sup>С имел  $\eta_{т} = 7,8\%$ . После дополнительного увеличения перепада температур между слоями был получен коэффициент полезного действия 8,1%, что соответствует добротности  $1,53 \cdot 10^{-3} \text{ (град)}^{-1}$ .

Высокие результаты получены Л.А. Коломойцем и др. на слоистом ТЭЭЛ с ветвями из халькогенидов Bi, Sb, Pb и Ge. При работе в интервале температур 50-700<sup>0</sup>С получен коэффициент полезного действия 13,5%. В другом случае Е.К. Иорданишвили и др. изучал ТЭЭЛ на основе кремний-

германия в интервале температур 150-1100<sup>0</sup>С и получил коэффициент полезного действия 8,5%.

Применение слоистых ТЭЭЛ открывает перспективы значительного повышения коэффициента полезного действия ТЭГ. Так, Е.К. Иорданишвили указал на возможность получения коэффициента полезного действия ТЭЭЛ, близкого к 20%, при использовании слоёв из тройных сплавов типа PbTe, сплавов GeSi и других, в интервале температур 30-1000<sup>0</sup>С. Другие авторы также считают возможным доведение в будущем коэффициента полезного действия ТЭГ до 20% при помощи слоистых ТЭЭЛ из Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, ZnCdSb и GeSi.

### **в) Расчёт ТЭЭЛ**

При расчёте простого (однослойного) ТЭЭЛ, а тем более многослойного, должны быть учтены изменения характеристик ТЭМ с температурой. При определении коэффициента полезного действия ТЭЭЛ необходимо учитывать тепло Пельтье, Томсона и Джоуля, а также согласование электрических характеристик по длине ветвей. Для расчёта ТЭЭЛ необходимо знать температурные зависимости  $\alpha$ ,  $\rho$  для каждого ТЭМ, входящего в ТЭЭЛ.

Если распределение температуры вдоль ветвей ТЭЭЛ нелинейно и электропроводность зависит от температуры, то применение осреднённых значений электросопротивления и теплопроводности, как указал Е.К. Иорданишвили, может привести к заметным отклонениям от истинных значений. Только значения ТЭДС будут всегда правильными, поскольку ТЭДС – функция разности температур спаев. В таких случаях среднеинтегральные значения  $\rho$  нужно определять одновременным интегрированием их произведения с учётом имеющейся температурной зависимости, рассматривая ветвь ТЭЭЛ как ряд последовательно соединённых тепловых и омических сопротивлений. Например, для ТЭЭЛ с  $\rho$ -ветвью из PbTe, имеющей в интервале температур от 300 до 800<sup>0</sup>К резко выраженную зависимость  $\rho$  от температуры, оказалось, что реальная величина  $Z$  на 27% больше вычисленной на базе среднеинтегральных

значений  $\alpha$ ,  $\rho$ . При меньшем температурном интервале или в случае более слабой температурной зависимости  $\rho$  (например у сплавов на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) этот эффект выражен слабее. На конечных стадиях расчётов ТЭЭЛ и при анализе результатов экспериментальных работ следует учитывать возможное влияние этого эффекта.

Другим существенным эффектом, который часто не учитывается в предварительных расчётах ТЭЭЛ, является тепло Томсона. Результаты исследований показали, что тепло Томсона особенно важно учитывать при высоких температурах горячих спаев ТЭЭЛ.

С ростом температуры горячего спаив уменьшается коэффициент полезного действия ТЭЭЛ, причем для исследованных образцов это снижение коэффициента полезного действия достигает 10-15% при  $T_r$  около  $500^\circ\text{C}$ .

Существенное практическое значение имеет рассогласование электрических характеристик ТЭЭЛ, рассмотренное в работе Е.К. Иорданишвили. Наблюдались случаи понижения (вместо повышения) коэффициента полезного действия ТЭЭЛ при увеличении рабочего интервала температур, например, на термопаре  $\text{ZnSb}$  – константан, для некоторых ТЭЭЛ с тройными сплавами.

Явление объясняется тем, что электрическое сопротивление некоторых ТЭМ имеет сильную температурную зависимость: при увеличении температуры ТЭМ выбранная величина тока  $I = E/(R + r)$  может сильно отличаться от оптимального значения. В среднем ток может даже оставаться оптимальным для ТЭЭЛ, но в горячих и холодных частях ветви сильно отличаться от оптимального. Подобное явление имеет место, например, в батарее последовательно включенных аккумуляторов с различными внутренними сопротивлениями. В силу такого рассогласования режимов работы часть электрической мощности, которая ранее отдавалась на нагрузку, превращается в избыточное тепло Джоуля, снижая общий коэффициент полезного действия ТЭЭЛ. Рассогласование может усилиться

вследствие температурной зависимости теплопроводности, когда увеличение теплопроводности горячих участков ветви ведет к увеличению длины участка ветви с повышенной температурой, на котором возрастает электросопротивление.

Еще больше рассогласование проявляется в слоистых ТЭЭЛ, где оно зависит от числа слоёв и связано с различиями в характеристиках ТЭМ. Как правило, в слоистых ТЭЭЛ ни один слой не работает в оптимальном режиме. В среднем, вследствие рассогласования, в слоистых ТЭЭЛ коэффициент полезного действия снижается на 7-10%.

В обычном однослойном ТЭЭЛ на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$  (n-ветвь) и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$  (p-ветвь) в интервале температур от 50 до  $300^\circ\text{C}$  внутреннее рассогласование одного материала ведёт к снижению коэффициента полезного действия ( $\eta/\eta_{\text{макс}} = 0,975$ ). Для одного из трёхслойных ТЭЭЛ, рассогласование определено коэффициентом  $\eta/\eta_{\text{макс}} = 0,946$ , то есть коэффициент полезного действия составляет 14,1% вместо 15%.

В ТЭЭЛ на основе SiGe в интервале температур от 330 до  $870^\circ\text{C}$  ввиду слабой зависимости  $\rho$  от температуры внутреннее рассогласование составляет около 0,99. Однако при увеличении температуры до  $1050-1150^\circ\text{C}$  рассогласование заметно увеличивается, достигая значений 0,93-0,95. Наличие дополнительного омического сопротивления в контактах горячих и холодных спаев ТЭЭЛ уменьшает полезную мощность и коэффициент полезного действия ТЭГ, поскольку часть энергии дополнительно выделяется на контактах в виде тепла Джоуля. Поэтому для получения оптимального коэффициента полезного действия сопротивление полезной нагрузки следует увеличить на омическое сопротивление контактов  $r_k$ .

Однако с ростом сопротивления полезной нагрузки оптимальный коэффициент полезного действия медленно падает. При расчётах общего сопротивления цепи контактные сопротивления следует включать в сопротивление ветвей ТЭЭЛ.

Термоэлектрические характеристики некоторых ТЭМ имеют сложную температурную зависимость и не могут быть выражены в монотонных функциях для всего рабочего интервала температур. В таких случаях указанные коэффициенты обычно определяют по среднеарифметическим величинам  $\alpha$ ,  $\rho$ ,..., полученные путем разбиения соответствующих экспериментальных кривых на температурные участки от 10 до 30<sup>0</sup>С каждый.

В работе приводится расчёт коэффициента полезного действия идеального электрически согласованного ТЭГ с учётом эффектов Пельтье и Томсона для случая бесконечного числа слоёв ТЭМ в ТЭЭЛ. Для учёта электрического рассогласования элементов ветви ТЭЭЛ следует вводить коэффициент  $\eta/\eta_{\text{макс}}$ , учитывающий отношение коэффициента полезного действия рассогласованного и согласованного ТЭЭЛ.

В работе Е.К. Иорданишвили приведены практические рекомендации по точному расчёту указанными выше методами коэффициент полезного действия слоистого ТЭЭЛ с учётом температурной зависимости параметров, входящих в  $Z$ , электрического рассогласования и неравномерного распределения теплоты Джоуля и Пельтье в местах спаев и теплоты Томсона в объеме ветвей. Экспериментальные методы определения добротности  $Z$  готового ТЭЭЛ имеют большое практическое значение.

Один из таких методов был предложен И.С. Лискером. Метод основан на измерении теплопроводности образца ТЭЭЛ, подвергнутого воздействию теплового потока при нулевом потоке и токе короткого замыкания. Величина  $Z$  определяется из отношения разности полученных значений теплопроводности к теплопроводности при нулевом токе.

Метод измерения добротности  $Z$  в готовых конструкциях ТЭЭЛ и целых ТЭГ по нагрузочным характеристикам ТЭЭЛ при постоянном тепловом потоке. Метод основан на том, что при протекании электрического тока через ТЭЭЛ часть подведенного теплового потока передается от горячего спая к холодному за счет эффекта Пельтье, пропорционального току. При постоянной величине теплового потока с увеличением тока (то

есть с уменьшением нагрузочного сопротивления) уменьшается доля теплового потока, передаваемого за счет теплопроводности. С увеличением тока нагрузки перепад температур на ТЭЭЛ уменьшается от  $\Delta t_{x,x}$  (х.х. – холостой ход) при  $I = 0$  и  $m = \infty$  до  $\Delta t_{к,з}$  (к.з. – короткое замыкание) при  $I = I_{к.з.}$  и  $m = 0$ . В этом случае тепловой баланс ТЭЭЛ можно записать  $Q_{\Gamma} = Q_{к} + Q_{\pi} - 0,5 Q_{дж}$ , где  $Q_{\Gamma}$  – тепловой поток, подведенный к горячему спаю;  $Q_{к}$  – тепловой поток, идущий по ветвям;  $Q_{дж}$  – тепло Джоуля;  $Q_{\pi}$  – тепло Пельтье, поглощаемое в горячем спае.

Как следует из приведенного выше уравнения, в режиме холостого хода при  $m = \infty$  плотности потоков равны

$$q_{1x,x} = q_{2x,x} = (\dots\dots\dots_{\text{ср.х.х}}/\delta) \Delta t_{x,x},$$

где  $\dots\dots\dots_{\text{ср}}$  – среднее значение коэффициента теплопроводности ТЭЭЛ,  $Vm/(m \cdot \text{град})$ ;  $\delta$  – высота ветвей ТЭЭЛ, м.

Если к ТЭЭЛ подводится одинаковый тепловой поток, то есть  $q_{1x,x} = q_{1к,з}$ , то

$$1 + Z_{к,з} T_{\text{ср.к,з}} = (\Delta t_{x,x}/\Delta t_{к,з})(\dots\dots\dots_{\text{ср.х.х}}/\dots\dots\dots_{\text{ср.к,з}})$$

При малых  $\Delta t$  можно считать, что  $\dots\dots\dots_{\text{ср.х.х}} = \dots\dots\dots_{\text{ср.к,з}}$  и тогда

$$Z_{к,з} = (1/T_{\text{ср.к,з}})[(\Delta t_{x,x}/\Delta t_{к,з}) - 1]$$

Таким образом, оказывается возможным определить добротность ТЭЭЛ по разности температур спаев при холостом ходе и в режиме короткого замыкания. Важно лишь обеспечить постоянство теплового потока. Погрешность результата зависит от точности определения параметров и прецизионности приборов. При хороших приборах погрешность может быть порядка 10%.

### г) Импульсный термоэлектрогенератор (ИТЭГ)

В обычном режиме работы ТЭГ не преобразованная в электроэнергию теплота (обычно 90-95% общего теплового потока) должна быть рассеяна с холодного спае активными методами теплосброса (оребрение, обдув, системы хладоагентов). Однако такой режим характерен для

установившегося теплового процесса, когда распределение тепла в ветвях ТЭГ линейно (с точностью до эффектов второго порядка, включая джоулевый разогрев). Иная картина будет наблюдаться в период выхода ТЭГ в стационарный тепловой и энергетический режимы. В этот период теплота, не превращенная в электроэнергию, будет расходоваться на тепловое возбуждение кристаллической решетки ветвей термоэлементов до тех пор, пока тепловая волна не дойдет до холодных спаев, «насытив» теплоемкость материала ветвей и создав в ветвях стационарное распределение температур.

Таким образом, ИТЭГ является частным случаем ТЭГ, когда действие источника тепла имеет кратковременный (импульсный) характер. Как следствие этого, температурное поле ИТЭГ также является нестационарным.

Еще раз особо отметим основополагающие для всего последующего изложение обстоятельство: принципиальным для ИТЭГ является то, что не нуждается в теплоотводе с холодных спаев. Сам ТЭ при этом является аккумулятором всего отработанного тепла. Физически это означает, что перенос тепла теплопроводностью на холодных спаях, то есть их подогрев, отсутствует. Температура холодных спаев при этом равна начальной температуре.

#### **I.4. Термоэлектрические агрегаты**

Современные термоэлектрические агрегаты представляют собой обычно автономные системы, состоящие из собственно термоэлектрогенератора (источник тепла, блоки термобатарей, систем, обеспечивающих теплосъем и теплопередачу), а также из необходимого комплекса автоматики и вспомогательных агрегатов (насосы теплоносителя, вентиляторы, балластные нагрузки и др.).

Как правило, современные ТЭГ дают на выходе постоянную э.д.с., которую в случае необходимости можно преобразовать в переменную и повысить выходное напряжение. В этом случае в термоэлектрический агрегат входит также соответствующий вибропреобразователь. Ранние конструкции ТЭГ, естественно, отличались как меньшей эффективностью

термоэлектрических материалов (малые величины коэффициента полезного действия), так и более примитивными теплотехническими и электротехническими решениями.

Часть из этих конструкций представляет уже исторический интерес, однако рассмотрение их (хотя бы краткое) позволит не только яснее представить путь, пройденный советской и зарубежной термоэнергетикой, но и проследить основные тенденции и направления развития этой новой области техники.

### **а) Первые варианты термоэлектрогенераторов**

Первой промышленной конструкцией ТЭГ на основе полупроводниковых термоэлементов можно считать ныне ставший почти легендарным «партизанский котелок» (ТГ-1, 1942 г.). Основным назначением этого ТЭГ являлось обеспечение электропитанием переносных раций, использовавшихся для связи партизанских отрядов в годы Великой Отечественной войны. Несмотря на сравнительно малое распространение эта конструкция ознаменовала собой начало малой термоэнергетики. Следует также отметить весьма остроумное инженерное решение сброса отработанного тепла – испарение кипящей воды – решение, которое, несмотря на всю его простоту и привлекательность к сожалению, почти не получило дальнейшего воплощения.

Первые послевоенные годы ознаменовались созданием малогабаритных ТЭГ с источником тепла в виде осветительной керосиновой лампы (ТГК-2а, ТГК-3). Термоэлектрогенератор ТГУ-2 и ТГК-10 (1953 г.) также, как и ТГК, имели термобатареи на основе ZnSb (р-ветвь и константана (n-ветвь)). Более мощный источник тепла (корогаз) позволил получать от подобных агрегатов электроэнергию до 15 Вт, которая использовалась для питания межколхозной радиостанции типа «Урожай» (рис. I.1).

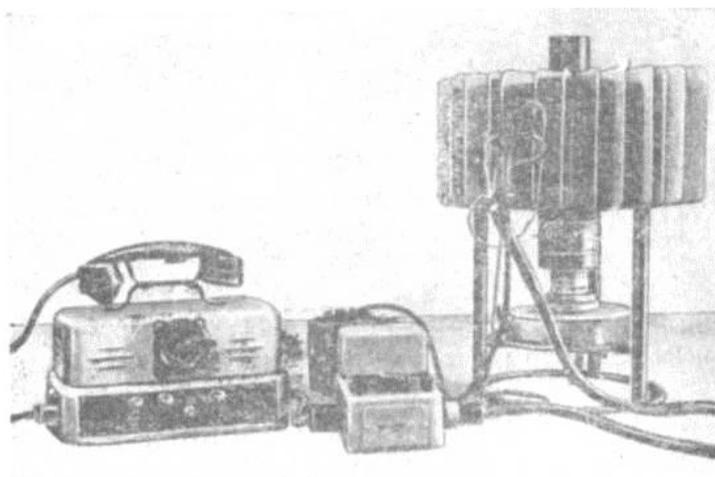


Рис I.1 ТГУ-2 и питаемая им радиостанция «Урожай»

Агрегаты типа ТГК и ТГУ положили начало ряду советских и зарубежных конструкций, использующих в качестве тепла жидкое топливо и газ (ТГК-18, ТГК-36, ТГГ-16, «Филипс» и др.). Дальнейшее развитие работ в этом направлении привело к созданию еще нескольких крупных ТЭГ мощностью 100-500 Вт. Эти агрегаты представляли собой печи, использующие уголь или дрова, с термобатареями, вмонтированными в стенки, и внешним оребрением типа, примененного ранее в ТГК.

С конца 50-х годов на основе союзных работ в ряде стран (США, Англия, ФРГ) начались конструкторские разработки, а затем и промышленный выпуск мелких серий ТЭГ наземного использования с источниками тепла в виде газовых и жидкотопливных горелок. Особенно широкий размах приобрели работы ряда фирм США (Minnesota Mining, Martin, Westinghouse Electric, General Thermoelectric), получивших крупные государственные заказы.

В 1962-1964 гг. в США проведена разработка и испытаны серии ТЭГ типа 3М (модель 520, электрическая мощность 47 Вт, фирма Minnesota Mining).

Основным назначением агрегатов было обеспечено питания радиоустановок и освещение в служебных железнодорожных вагонах. Топливом в горелке служил пропан в трех баллонах, снабженных

редуктором. Газ снижался в форсунке при давлении 0,7 атм. Агрегат обеспечивал (через статический преобразователь постоянного тока) питание 12-В транзисторной батареи ёмкостью 175 а-ч. Два последовательно соединенных ТЭГ этого типа обеспечивали осветительную сеть мощностью 125 Вт. Испытания показали достаточно высокую экономичность ТЭГ. Другие варианты ТЭГ типа 3М имеют мощность 7,8; 13,3; и 23,5 Вт.

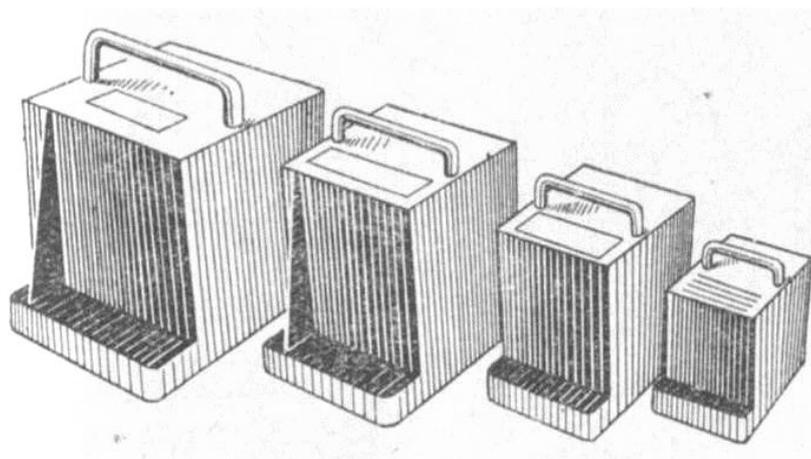


Рис I.2. Серия коммерческих термогенераторов на пропановом топливе (15, 8, 4, 2 Вт) в США

ТЭГ, работающий на газолине или пропане с коэффициентом полезного действия 1,4% и электрической мощностью 267 Вт, разработан в США фирмой Westinghouse Electric. В качестве термоэлектрического материала используется PbTe. ТЭГ обеспечивает удельную мощность 20 Вт/кг. Характерен довольно низкий коэффициент полезного действия горелки (39%). Для охлаждения холодных спаев используется принудительный конвективный теплообмен.

Близкая по данным модель другого ТЭГ (3М-фирма Martin) обеспечивает электрическую мощность 260 Вт в интервале температур 450-130<sup>0</sup>С (также на основе PbTe).

Термоэлектрический агрегат, подобный советскому ТГК, создан в ФРГ фирмой Grunding. Агрегат, источником тепла в котором служит бензиновый примус, генерирует 3 Вт электрической мощности, используемой для

питания малогабаритной радиоаппаратуры. Расход топлива ТЭГ составляет 0,6 л на 6 час работы, конструкция отличается довольно малым весом (1,6 кг).

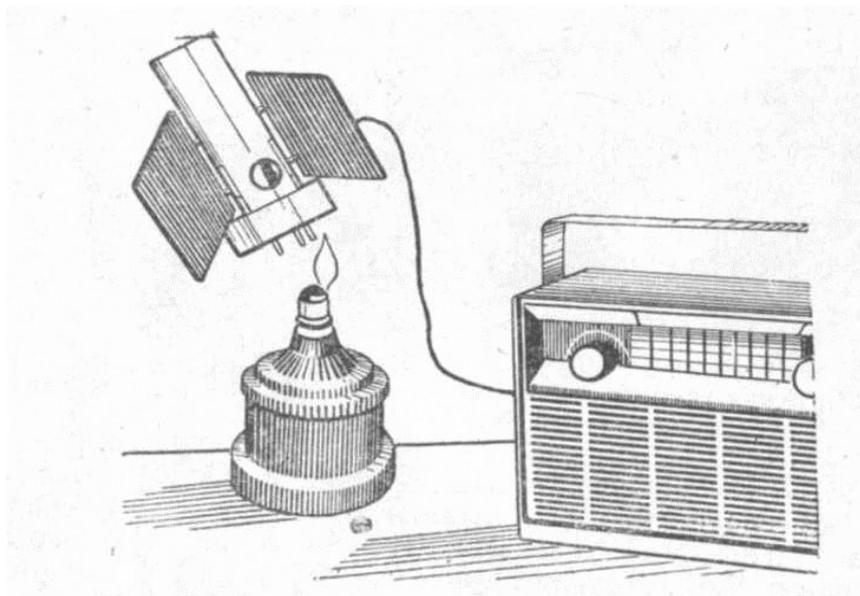


Рис 1.3. Термогенератор с бензиновой горелкой «Ацтек» для питания радиоприемников

Ряд конструкций переносных ТЭГ на жидком топливе и газе создан и создается в США. В качестве одного из примеров можно отметить 500-Вт ТЭГ с коэффициентом полезного действия, достигающим 5% при  $T_r=500^{\circ}\text{C}$  (на основе PbTe). Конструкция отличается довольно значительной удельной мощностью – 22 Вт/кг. Подобные ТЭГ имеют, конечно, явные преимущества перед аккумуляторами или сухими батареями, особенно в полевых условиях. Масштаб энергообеспечения ТЭГом, дающим мощность 200-500 Вт, может быть весьма велик, особенно если учесть весьма малое потребление энергии современной транзисторной радиотехникой.

Большие перспективы имеют ТЭГ на жидком топливе или газе, обеспечивающие питание автономных радиорелейных станций, расположенных в труднодоступных районах. Одной из моделей этого типа является ТЭГ на пропановом топливе (США) мощностью до 6 Вт, работающий в буферном режиме с щелочной 12-В аккумуляторной батареей.

Подключение к батарее производится через транзисторный преобразователь, повышающий напряжение до 12,1 В при токе 0,23 А. Емкость баллона с пропаном – 190 л. Топливо подается в горелку обычного типа через 2 вентиля. Начальное давление в баллоне 1,75 кг/см<sup>2</sup>, конечное 0,14 кг/см<sup>2</sup>. Агрегат располагается в одном из отсеков герметизированного корпуса станции, батарея аккумуляторов находится вместе с аппаратурой в другом отсеке. Температура в генераторном отсеке составляет обычно +32<sup>0</sup>С.

### **б) Генераторы катодной защиты**

Значительное внимание уделяется в последние годы защите магистральных газо- и нефтепроводов от коррозии. Для этой цели применяется так называемый метод катодной защиты, суть которого состоит в том, что на металлические трубы подается небольшой отрицательный (относительно земли) потенциал, препятствующий реакции окисления железа. Широкое распространение этого метода в последнее время стало возможным в результате разработки и создания нескольких серий ТЭГ катодной защиты. Преимущества ТЭГ этого типа, особенно в условиях, когда вдоль трассы нет линии электропередачи, очевидны. Основной вопрос – топливо для ТЭГ – в данном случае отпадает (особенно вдоль газопроводов).

Одним из вариантов ТЭГ широкого профиля, предназначенных для радиорелейных линий и нефтепроводов, является советская модель ТЭГ-50 (1964 г.). При общей мощности 50 Вт этот ТЭГ дает напряжение 8 В при токе 6 А. Горелка инфракрасного нагрева, работающая на природном газе, обеспечивает температуру горячих спаев термобатарей 350-400<sup>0</sup>С. Съем тепла с холодных спаев осуществляется естественной конвекцией, что придает модели значительную универсальность по сравнению, например, с американской моделью.

Несколько моделей ТЭГ-50 успешно эксплуатировались в одном из районов Украины, а в настоящее время серийно выпускаются промышленностью. Модель ТЭГ-50 может обеспечить защиту 40 км газопровода в районе средней увлажненности.

Более мощной моделью этого типа является генератор катодной защиты ТЭГ-300 так же, как и ТЭГ-50, - генератор многоцелевого назначения и может обслуживать значительные участки радиорелейных линий и газопроводов. По своей мощности он является в настоящее время крупнейшим в мире в этом классе генераторов.

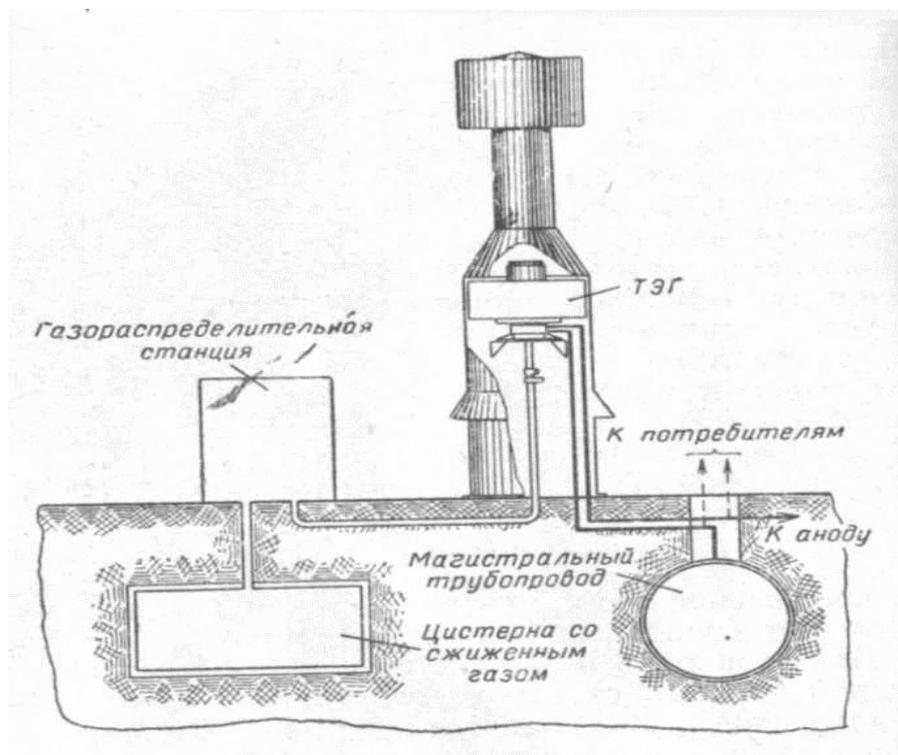


Рис I.4. Схема действия ТЭГ катодной защиты

Материалом для термобатарей в обеих моделях служат сплавы ZnSb (р-ветвь) и константан (п-ветвь), обеспечивающие в интервале рабочих температур ТЭГ (400-130<sup>0</sup>С) коэффициент полезного действия 2%. Общий коэффициент полезного действия агрегата (с учетом коэффициента полезного действия горелки) около 1%. Обе модели совершенно автономны. Узлы каждой из них прошли многотысячные ресурсные испытания. Топливом для горелок служит природный газ либо подаваемый с редуцированием из баллонов, либо отводимый специальным приспособлением прямо от магистрали газопровода. Расход топлива 0,8 м<sup>3</sup>/ч. Агрегат ТЭГ-300 состоит из 4 модулей по 75 Вт, которые могут быть включены как параллельно, так и последовательно. Батарея каждого модуля состоит из 384 термоэлементов. ТЭГ в зависимости от схемы подключения

модулей может обеспечить выходное напряжение от 4 до 24 В с соответствующим изменением рабочего тока.

Применение ТЭГ катодной защиты приносит огромный экономический эффект, увеличивая срок службы нефте-и газопроводов и резко уменьшая расход рабочего времени на обслуживание магистрали. Советский Союз, имеющий самые длинные в мире трассы нефте- и газопроводов, расположенные зачастую в труднодоступных областях (пустыни Средней Азии, заболоченные районы Сибири), безусловно заинтересован в широком развитии сети ТЭГ катодной защиты. С особой остротой встанет эта проблема с введением в строй магистралей, связывающих недавно открытые гигантские месторождения между низовьями Оби и Енисея с индустриальными районами Центра и Урала.

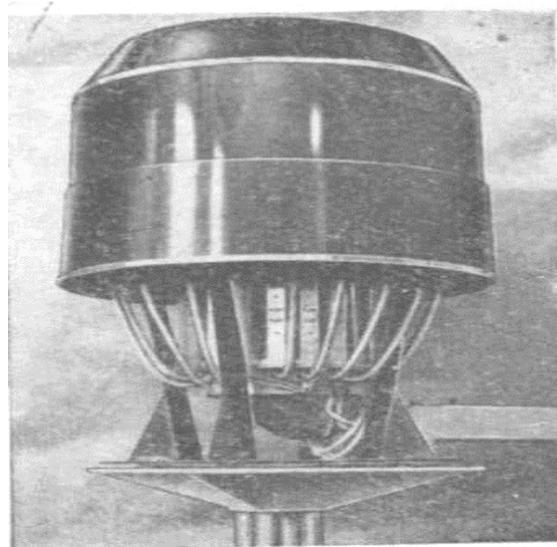


Рис I.4.5. Головка советского термогенератора катодной защиты ТЭГ-50

В настоящее время рядом зарубежных фирм начат выпуск агрегатов этого типа. Две английские модели ТЭГ катодной защиты мощностью в 100 и 200 Вт, выпущенные в 1964-1966 гг, работают на пропане, бутане или природном газе. Агрегаты рассчитаны на обслуживание газо-и нефтепроводов в условиях как жаркого, так и арктического климата. В них предусмотрена соответствующая защита против песчаных бурь и переохлаждения. ТЭГ фирмы Petbow (Англия) имеет мощность 188 Вт (12 В

при токе 15,6 А). Такая модель успешно эксплуатируется на нефтепроводе в Ливии, обеспечивая катодной защитой участок трассы в 64 км. В США на трассе нефтепровода в штате Техас эксплуатируется модель ТЭГ катодной защиты, работающая на газолоне.

## Глава II. Исследование и изучение параметров источников тока на основе полупроводниковых термоэлементов в электроснабжении

### II.1. Теоретическое исследование параметров и методика расчёта различных режимов ТЭГ постоянного тока

**Постановка задачи.** Простейшим термоэлектрическим генератором является стационарно работающая термопара, замкнутая на внешнее сопротивление  $R_e$ . Процесс работы такой термопары заключается в следующем: горячий спай термопары имеет заданную температуру  $T_1$ , а холодный  $T_0$ , ветви термопары, как и раньше, считаются адиабатически изолированными, и теплообмен происходит только на спаях, причем на горячем спае ежесекундно поглощается тепло  $Q_1$ , а на холодном выделяется  $Q_0$  ( $Q_1 > Q_0$ ). В этих условиях в цепи действует термоэлектродвижущая сила  $E = \alpha \Delta T$  которая поддерживает в ней ток  $I$ . Согласно закону сохранения энергии

$$Q_1 - Q_0 = N \quad (1)$$

где  $N$  – мощность электрического тока, расходуемая на внешнем сопротивлении:

$$N = I^2 R_e = I \alpha \Delta T - I^2 R \quad (2)$$

Здесь  $R$  – омическое сопротивление термопары.

Коэффициент полезного действия установки определяется выражением

$$\eta = \frac{N}{Q_1} = \frac{I \alpha \Delta T - I^2 R}{Q_1} \quad (3)$$

Отсюда следует

$$Q_1 = I (T_1) I + \left( \frac{k'}{d'} + \frac{k''}{d''} \right) \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R + \frac{1}{2} I (\tau'' - \tau') \Delta T \quad (4)$$

Где  $R$  – омическое сопротивление пары  $R = p' d' + p'' d''$

Введя величину

$$e^* = \alpha_1 + \frac{1}{2} (\tau'' - \tau') \frac{\Delta T}{T_1} \quad (5)$$

Легко убедиться в том, что из закона сохранения энергии для собственно термоэлектрического процесса

$$\alpha_1 T_1 - \alpha_0 T_0 + (\tau'' - \tau') \Delta T = \bar{\alpha} \Delta T \quad (6)$$

Вытекает следующее соотношение:

$$e^* - \alpha = \frac{T_0}{T_1} (e - \alpha) \quad (7)$$

Поэтому имеет место допущение

$$e^* = \bar{\alpha} \quad (8)$$

Предполагая справедливость (8) и используя (5), получим из (4)

$$Q_1 = \bar{\alpha} T_1 I + \left( \frac{\bar{k}'}{d'} + \frac{\bar{k}''}{d''} \right) \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R \quad (9)$$

Исключая  $Q_1$  из (1) и (9) и используя (2), находим

$$Q_0 = \bar{\alpha} T_0 I + \left( \frac{\bar{k}'}{d'} + \frac{\bar{k}''}{d''} \right) \Delta T + \frac{1}{2} I^2 R \quad (10)$$

Подставляя (9) в (10), имеем

$$\eta = \frac{\bar{\alpha} \Delta T I - I^2 R}{\bar{\alpha} T_1 I + \left( \frac{\bar{k}'}{d'} + \frac{\bar{k}''}{d''} \right) \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R} \quad (11)$$

Формулы (2) и (14) дают общие выражения для  $N$  и  $\dot{\eta}$ , справедливые при любом выборе  $d$ ,  $d$  и  $I$ . Особый интерес, однако, представляют те случаи, в которых достигается либо наибольший коэффициент полезного действия (максимум  $\dot{\eta}$ ), либо максимум отдачи энергии во внешнюю цепь (максимум  $N$ ).

**Получение наибольшего коэффициента полезного действия.** Исследуем функцию  $\eta(d', d'', I)$  на максимум. Применяя метод, неоднократно использовавшийся ранее, запишем условия экстремума в виде

$$\frac{\partial \eta}{\partial d'} + \lambda \bar{\rho}' = 0 \quad (12a)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial d''} + \lambda \bar{\rho}'' = 0 \quad (12б)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial I} = 0 \quad (12в)$$

Исключая  $\lambda$  из (12а) и (12б) и выполняя дифференцирование с учетом (11), находим обычное условие экстремума

$$\eta = \frac{\bar{\alpha}\Delta TIR - (IR)^2}{\bar{\alpha}\Delta TIR + \beta^2\Delta T - \frac{1}{2}(IR)^2} \quad (13)$$

Выполнив дифференцирование в (12в), получим

$$\eta_{\max} = \frac{\bar{\alpha}\Delta T - 2q}{\bar{\alpha}T_1 - q} \quad (14)$$

Здесь  $q$  - значение  $IR$  в точке экстремума, а  $\eta_{\max}$  - максимальный коэффициент полезного действия. Очевидно, что  $\eta_{\max}$  может совпасть с  $\eta$ , найденным из формулы (13), если положить в этой последней  $IR=q$ . Приравнявая при этом условия (13) и (14) и решая квадратное уравнение относительно  $q$ , находим

$$IR = q = \frac{\bar{\alpha}\Delta T}{M + 1} \quad (15)$$

Это равенство определяет экстремальную величину силк тока. Напряжение, подаваемое на внешнюю цепь, определяется обьей формулой:

$$V = \bar{\alpha}\Delta T - IR \quad (16)$$

Как следует из (15), в рассматриваемом режиме работы оно равно

$$V = \frac{\bar{\alpha}\Delta TM}{M + 1} \quad (17)$$

**Получение наибольшей мощности.** Из формулы (2) видно, что максимум  $N(T)$  достигается при выполнении условия

$$IR = \frac{\bar{\alpha}\Delta T}{2} \quad (18)$$

Эта формула определяет экстремальное значение силы тока.

Используя ее, находим из (16) величину напряжения, подаваемого на внешнюю цепь:

$$V = \frac{\bar{\alpha}\Delta T}{2} \quad (19)$$

Условие (18) является достаточным для достижения максимальной мощности, величина которой находится из (2) с учетом (18):

$$N_{\max} = \frac{\bar{\alpha}^2 (\Delta T)^2}{R} \quad (20)$$

Поскольку при фиксированном  $R$  мощность не зависит от связи между  $d'$  и  $d''$ , целесообразно выбрать ее таким образом, чтобы коэффициент полезного действия процесса имел возможно большее значение. Подставляя в (13), получим

$$\eta N = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{1}{1 + \frac{T_1 + T_0}{T_1} \frac{4 + a}{2a}} \quad (21)$$

Такой коэффициент полезного действия имеет термопара, работающая в режиме максимальной отдачи мощности.

Как и ранее, в рассмотренном случае коэффициент полезного действия и мощность возрастают с увеличением интервала температур. При этом  $\eta N$  зависит только от  $a$  и мощность тока обратно пропорциональна сопротивлению термопары.

Величина теплового потока на спаях термоэлемента находится из формулы (9) и (10) после преобразования (18):

$$Q_1 = \frac{1}{R} \frac{\bar{\alpha}^2}{2a} (T_1 - T_0) [T_1(1 + 0,75a) + T_0(1 + 0,25a)] \quad (22)$$

$$Q_0 = \frac{1}{R_2} \frac{\bar{\alpha}^2}{2a} (T_1 - T_0) [T_0(1 + 0,75a) + T_1(1 + 0,25a)] \quad (23)$$

**а) О точности результатов.** Оценим теперь точность полученных результатов. Отказ от допущений (8) приводит к тому, что в знаменателе формулы (11) уточняется величина первого и последнего членов.

Что касается условия, которым определяется величина силы тока, то уточнение результатов в различных режимах по-разному сказывается на нем. В режиме максимальной отдачи мощности это условие вообще не претерпевает никаких изменений и сохраняет свой прежний вид (18) или (19). В случае же максимальной экономичности процесса соответствующие выкладки приводят к условию, формально совпадающему с (15), или, что то же, с (17).

Однако и в других случаях учет температурной зависимости  $k(T)$  не меняет порядка величины  $e^* - \bar{\alpha}$ , точно так же как это имело место в случае охлаждения при расчете  $e - \bar{\alpha}$ . Поэтому для определения  $e^*$  можно пользоваться формулой (5)

$$e^* - \bar{\alpha} = \frac{B}{t} \left[ \frac{t+1}{2} - \frac{t}{t-1} \ln t \right] \quad (24)$$

Дальнейшее упрощение этой формулы в данном случае невозможно, так как разложение  $\ln t$  при  $t \geq 2$  незаконно.

В режиме же максимального коэффициента полезного действия экстремальное значение силы тока, или, что то же, напряжения на внешней цепи, рассчитывается с некоторой ошибкой. Эта ошибка приводит к отклонению расчетного режима работы от экстремального, а следовательно, к понижению коэффициента полезного действия.

Оценим теперь ошибку теоретического расчета коэффициента полезного действия. Соответствующие вычисления показывают, что относительная ошибка теоретического расчета в режиме максимума коэффициента полезного действия равна

$$\delta\eta_{\max} = -\frac{(t+1)(M-1)}{2(tM+1)M} \delta\alpha - \frac{t(M-1)}{tM+1} \frac{e^* - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \quad (25)$$

а в режиме максимума мощности

$$\delta\eta_N = -\frac{1}{1 + \frac{1+t}{t} \frac{4+a}{2a}} \left[ \frac{e^* - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} + \frac{t+1}{2t} \delta\alpha \right] \quad (26)$$

Такие формулы были впервые приведены в книге А.Ф.Иоффе «Полупроводниковые термоэлементы».

**б) Расчет термобатареи, работающей в режиме максимального коэффициента полезного действия.** Рассмотрим теперь термобатарею, состоящую из  $m$  элементов. Конструкция такого термогенератора ничем не отличается от конструкции батареи охлаждения – отопления.

$$N_{\eta} = G_{\eta} \frac{S}{l} T_0 \frac{(t-1)^2}{t+1} \quad (27)$$

Учитывая это, находим из (27)

$$N_{\eta} = \frac{G_{\eta} P}{D l^2} T_0 \frac{(t-1)^2}{(t+1)} \quad (28)$$

Эта формула связывает между собой вес батареи, мощность, отдаваемую ею во внешнюю цепь, и длину элементов  $l$ . Из нее следует, что всякое удлинение элементов, вызванное потребностями теплоотвода, неизбежно связано с квадратичным увеличением веса (при заданной мощности) или соответствующим уменьшением мощности (при заданном весе).

Как и раньше, выбор  $l$  лимитируется предельно достижимыми плотностями потока тепла на горячих и холодных спаях, которые в рассматриваемом случае имеют вид

$$q_1 = \frac{G_{\eta} T_0}{l} \frac{t-1}{t+1} \frac{tM+1}{M-1} \quad (29)$$

$$q_0 = \frac{G_{\eta} T_0}{l} \frac{t-1}{t+1} \frac{M+1}{M-1} \quad (30)$$

Деля формулу (29) на (30), получаем

$$\frac{q_1}{q_0} = \frac{tM+1}{M+1} = \frac{1}{\lambda} \frac{T_1 - T_e}{T_i - T_0} \quad (31)$$

**Расчет термобатареи, работающей в режиме максимальной мощности.** Рассчитаем теперь термобатарею таким образом, чтобы мощность, развиваемая ею, была максимальна.

$$N_{\max} = G_N \frac{ms}{l} T_0 \frac{(t-1)^2}{(t+1)} \quad (32)$$

преобразуя (32), находим

$$N_{\max} = \frac{G_{\eta} P}{D l^2} T_0 \frac{(t-1)^2}{(t+1)} \quad (33)$$

Плотность потока тепла на спаях

$$\frac{q_1}{q_0} = \frac{t(1+0,75a) + (1+0,25a)}{(1+0,75a) + t(1+0,25a)} = \frac{1}{\lambda} \frac{T_1 - T_e}{T_i - T_0} \quad (34)$$

**в) Методика расчета.** Принципиальная схема расчета термобатареи, работающей в режиме максимума мощности, та же, что и в режиме

максимального коэффициента полезного действия. Число последовательно соединенных элементов должно в этом случае определяться по формуле

$$m_p = 2 \frac{V}{\alpha \Delta T} \quad (35)$$

**Характеристика экстремальных режимов.** Чтобы произвести сравнительную оценку экстремальных режимов, полезно рассмотреть следующую задачу. Пусть два генератора работают в одном и том же температурном интервале  $(T_0, T_1)$ , питая ток одинаковую внешнюю цепь. Напряжение, подаваемое на эту цепь, а также мощность расходуемая в ней, должны при этом считаться заданными. Пусть, далее, один из этих генераторов работает в режиме максимального коэффициента полезного действия, а другой – в режиме максимальной мощности. Полученные выше результаты дают возможность сравнить эти два генератора с точки зрения их экономичности, а также удобства использования и изготовления.

Прежде всего, очевидно, что второй генератор будет давать меньший коэффициент полезного действия, чем первый.

$$\frac{\eta_N}{\eta_{\max}} = \frac{\sqrt{1+a} + 1}{2\xi} \quad (36)$$

где

$$\xi = \frac{t(1+0,75a) + (1+0,25a)}{t\sqrt{1+a} + 1} \quad (37)$$

Величина  $\xi$  чрезвычайно слабо зависит от температуры.

Возвращаясь теперь к сравнительной оценке различных параметров рассматриваемых термобатарей, укажем, что в приводимых ниже формулах индексом  $\eta$  отмечены величины, относящиеся к батарее, работающей в режиме максимального коэффициента полезного действия, а величины, относящиеся к батарее, развивающей максимальную мощность, отмечены индексом N.

Для общей площади спаев нетрудно получить формулу

$$\frac{S_N}{S_n} = \frac{2}{M+1} \xi \quad (38)$$

Для числа последовательно соединенных элементов

$$\frac{m_N}{m_n} = \frac{2M}{M+1} \quad (39)$$

Возможна, однако, и иная постановка задачи. Допустим, что у нас имеется готовая термобатарея. Ее, очевидно, можно использовать как в одном, так и в другом режиме работы. Представляет интерес оценить величину выигрыша в мощности при переходе от режима максимального коэффициента полезного действия к режиму максимальной отдачи энергии.

$$\frac{N_{\max}}{\eta_N} = \frac{(M+1)^2}{4M} \quad (40)$$

Таким образом, переход к режиму максимальной отдачи электроэнергии позволяет увеличить мощность генератора на 1,5-3% при соответствующем уменьшении коэффициента полезного действия на 1,5-2,5%. Это увеличение мощности настолько ничтожно, что вряд ли практически необходимо добиваться его осуществления.

#### **г) О предельной экономичности термоэлектрических батарей**

Выше мы показали, что использование сложных схем охлаждения и отопления позволяет в ряде случаев значительно повысить экономичность соответствующих процессов. Поэтому представляет интерес оценить, какой эффект может дать применение аналогичных конструкций батарей в качестве термоэлектрических генераторов.

Рассмотрим с этой целью каскадную термобатарею с точки зрения получения наибольшего коэффициента полезного действия. Используя тот же метод, что и раньше, легко показать, что каждая термопара батареи должна работать в режиме максимального коэффициента полезного действия. Коэффициент полезного действия всей батареи ... связан с соответствующими коэффициентами отдельных каскадов соотношением

$$(1)$$

где  $n$  – число каскадов.

## **II.2. Экспериментальные методы измерения параметров для ТЭГ, характеризующих свойства полупроводниковых термоэлементов**

Измерение параметров термоэлементов, характеризующих свойства полупроводников, может оказаться сложным и дорогостоящим. Поэтому обычно используются методы, позволяющие быстро произвести простую проверку однородности и типа проводимости, а также измерение удельного электрического сопротивления. В том случае, когда с помощью этих методов обнаружится, что материал является однородным  $n$ - или  $p$ -типа, тогда из слитка вырезаются образцы в форме параллелепипеда, которые и подвергаются тщательным исследованиям при комнатной температуре. После проведения измерений при комнатной температуре на определенном числе однородных образцов некоторое число образцов отбирается для более подробных исследований. Один из методов, позволяющих получить наиболее полную информацию, заключается в исследовании изменения свойств полупроводника с температурой.

### **а) Предварительная оценка параметров материала с помощью зондового метода**

Термоэлектрический зонд представляет собой превосходный инструмент для определения знака носителей заряда и в известной мере для оценки степени однородности материала. Схема измерения при помощи зондов представлена на рис. II.1.



Рис. II.1. Определение знака носителей зарядов посредством термоэлектрических зондов

Зонд 1 присоединяется к образцу и через гальванометр к зонду 2, который нагревается с помощью иглы для выжигания по дереву (или любого другого источника тепла). Если образец является полупроводником n-типа, то электронам вблизи горячего зонда сообщается дополнительная тепловая энергия. Вследствие этого скорость, с которой электроны покидают область вблизи нагретого участка, будет большей, чем скорость электронов, входящих в нагретую зону. В результате происходит перенос электронов к более холодным участкам образца. Это приводит к тому, что зонд 1 оказывается заряженным отрицательным зарядом, а зонд 2 – положительным. Направление тока, проходящего через гальванометр, указывает полярность горячего зонда. Для образца из полупроводника p-типа применимо обратное рассуждение. Таким образом, тип проводимости полупроводника может быть определен по направлению тока, проходящего через гальванометр. Перемещая горячий зонд по поверхности полупроводника, можно судить о степени его однородности, наблюдая за величиной отклонения стрелки гальванометра.

### б) Измерение удельного электрического сопротивления

Основное уравнение, которое используется при экспериментальном определении удельного электрического сопротивления, имеет вид

$$I = \frac{A}{\rho} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta X}, \quad \text{откуда} \quad \rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{\Delta X}$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление;

$\frac{\Delta V}{\Delta X}$  - градиент потенциала вдоль образца;

$A$  – площадь поперечного сечения образца;

$I$  – ток, проходящий через образец.

Основная схема для измерения удельного сопротивления показана на рис.П.2.

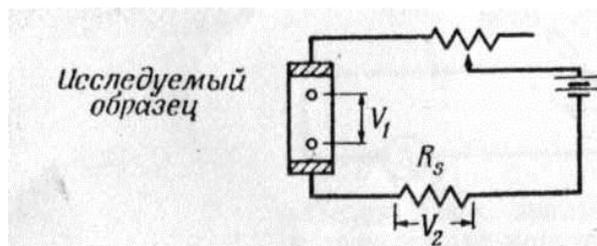


Рис.П.2. Основная схема для измерения удельного электрического сопротивления

Разность потенциалов ( $V_1$ ) между двумя электродами сравнивается с разностью потенциалов ( $V_2$ ) на концах стандартного сопротивления ( $R_s$ ). Выражение для образца, имеющего форму параллелепипеда, может быть представлено в следующем виде:

$$\rho = R_s \frac{V_1 b t}{V_2 l},$$

где  $b$  – ширина образца,

$t$  – толщина образца,

$l$  – расстояние между электродами.

Напряжение измеряется обычным прецизионным потенциометром постоянного тока. Использование нулевого или потенциометрического метода для определения удельного электрического сопротивления позволяет избежать погрешностей за счёт контактного сопротивления. Таким образом, точность измерений удельного сопротивления зависит от точности измерения величин  $t$  и  $l$ , а также от степени однородности образца. На точность определения удельного электрического сопротивления могут

оказывать влияние раковины и дефекты в материале, границы между зернами и особенно потенциальные барьеры, подобные тем, которые возникают в p – n-переходах.

### в) Измерение термоэлектродвижущей силы

Напряжение  $V$ , возникающее между двумя спаями двух разнородных материалов и приходящееся на единицу разности температур между спаями, называется термоэлектродвижущей силой  $S$  одного материала относительно другого и представляет собой функцию средней температуры обоих спаев. Таким образом,

$$S = \frac{V}{\Delta T}$$

Если термопара, присоединённая к образцу, представляет собой медно-константановую пару, то термо-э.д.с. цепи медь-образец-медь и цепи константан – образец – константан позволяют определить термо-э.д.с. образца из следующих уравнений:

$$S_{i \text{ áðàçöà}} = \pm \left| \frac{V_{i \text{ áðàçöà} - i \text{ áüü}}}{\Delta T} \right| + S_{i \text{ áüè}} ,$$

$$S_{i \text{ áðàçöà}} = \pm \left| \frac{V_{i \text{ áðàçöà} - \text{éí í ñò àí ò àí}}}{\Delta T} \right| \pm S_{\text{éí í ñò àí ò àí}} ,$$

где  $S_{i \text{ áðàçöà}}$  - термо-э.д.с. образца,

$V_{i \text{ áðàçöà} - i \text{ áüü}}$  - термо-э.д.с. цепи медь – образец – медь,

$V_{i \text{ áðàçöà} - \text{éí í ñò àí ò àí}}$  - термо-э.д.с. цепи константан – образец – константан,

$S_{i \text{ áüè}}$  - термо-э.д.с. меди,

$\Delta T$  - разность температур двух термопар, присоединенных к образцу,

$S_{\text{éí í ñò àí ò àí}}$  - термо-э.д.с. константана.

### II.3. Методы измерения электрического сопротивления термоэлектродвижущей силы и коэффициента теплопроводности термоэлектрических материалов

Наиболее употребительны метод сравнения и метод, заключающийся в подогреве одного конца образца с заданной скоростью и измерений разности температур между концами при помощи термопар. В последнем случае коэффициент теплопроводности определяется по формуле

$$k_T = \frac{PL}{\Delta TA},$$

где  $k_T$  – коэффициент теплопроводности,

$P$  – подводимая мощность (обычно электрическая),

$\Delta T$  – градиент температуры в образце,

$L$  – расстояние между термопарами,

$A$  – площадь поперечного сечения.

При этом, конечно, должны быть приняты меры, исключающие потери или приток тепла.



Рис. II.3. Основная экспериментальная схема для измерения коэффициента теплопроводности

В обоих этих методах исключение посторонних тепловых потерь, особенно в случае материалов с малой теплопроводностью, представляет существенные трудности. Для того чтобы получить более высокую точность при измерениях теплопроводности, разработан новый метод, который, однако, может быть использован только для исследования термоэлектрических материалов, то есть материалов со значительной термоэлектрической добротностью  $\frac{S_2}{\rho k_T}$ . Ниже приводится описание этого метода.

Основная экспериментальная схема весьма проста и показана на рис.П.3.

Цепь состоит из бруска в форме параллелепипеда или цилиндра из термоэлектрического материала с проволочными токовыми электродами, припаянными к торцам (в этих исследованиях в качестве материала для электродов использовалась медь). Вначале вдоль образца отсутствует градиент температуры; но как только по образцу будет пропущен ток, на обоих спаях под действием эффекта Пельтье начнет выделяться или поглощаться тепло. В результате этого один конец образца охлаждается, а другой нагревается. Ток, проходящий по образцу с градиентом температуры, приводит к выделению тепла за счёт эффекта Томсона. Однако, как это показал Анжелло, на каждом конце образца выделяется одинаковое количество тепла Томсона, поэтому этим теплом можно пренебречь. Количество тепла, выделенного или поглощенного на одном из спаев в результате эффекта Пельтье, определяется соотношением

$$\frac{\Delta Q_p}{\Delta t} = SIT_0$$

где  $\frac{\Delta Q_p}{\Delta t}$  - тепловая мощность, обусловленная эффектом Пельтье и поглощаемая или выделяемая на одном из спаев,

$I$  – ток через образец,

$S$  – термо-э.д.с. образца,

$T_0$  – средняя температура образца.

Так как градиенты температур образца малы, а абсолютное значение температуры велико, то значение  $T_0$  с хорошим приближением может быть принято равным температуре холодного спая.

Джоулево тепло, выделяющееся в проводах и образце, определяется соотношением

$$\frac{\Delta Q_j}{\Delta t} = I^2 R,$$

где  $\frac{\Delta Q_j}{\Delta t}$  - выделяемая мощность (тепло Джоуля),

$R$  – сопротивление подводящих проводов или образца.

Для хорошего термоэлектрического материала мощность джоулевого нагрева образца и подводящих проводов может быть на несколько порядков меньше мощности нагрева, обусловленного эффектом Пельтье. Кроме того, джоулев нагрев не зависит от направления тока. Поэтому явлениями, вызванными джоулевым нагревом, в данном случае можно пренебречь.

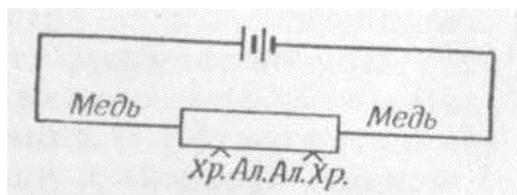


Рис. П.4. Схема измерения коэффициента теплопроводности

При наступлении теплового равновесия в отсутствии внешних потерь или притока тепла поток тепла от одного конца образца к другому за счёт явления обычной теплопроводности. Таким образом,

$$SIT_0 = k_T \frac{\Delta T}{L}$$

Так как термо-э.д.с. образца на один градус равна отношению продольной термо-э.д.с.  $V_s$  к градиенту температуры (вдоль образца), уравнение, определяющее коэффициент теплопроводности, может быть записано в следующем виде:

$$k_T = \frac{LIT_0 S}{\Delta T} = \frac{LIT_0 S^2}{AV_s},$$

где  $V_s$  – продольная термо-э.д.с. в образце, обусловленная эффектом Зеебека.

Такими методами был исследован образец 5 В из твердого раствора  $Bi_2Te_3$ . Его удельное сопротивление, термо-э.д.с. и удельная теплопроводность оказались равными соответственно  $1,9 \times 10^{-3}$  Ом·см,  $+236$  мкВ/К и  $2,0 \times 10^{-2}$  Вт/см·К. Данные, полученные при исследовании образца 5 В, для двух величин тока приведены в таблице. Таблица дает представление

об экспериментальных данных для двух различных по величине токов. Величина  $Z$ , приведенная в таблице, характеризует термоэлектрическую добротность  $\frac{S^2}{k_{Tp}}$  и определяется из соотношения  $\frac{V_s}{V_p T}$

### Результаты исследования образца 5 В из $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

$I, \text{mA}$	$S, \text{мкВ/К}$	$k_T, \text{Вт/смК}$	$\rho, \text{Ом см}$	$K$	$Z$
5,38	+235	1,97 $\times 10^{-2}$	1,9 x $10^{-3}$	0,53	1,47 $\times 10^{-3}$
9,70	+237	2,00 $\times 10^{-2}$	1,9 x $10^{-3}$	0,53	1,47 $\times 10^{-3}$

### Термо-э.д.с.

Величина коэффициента термо-э.д.с.  $\alpha$  является важнейшей характеристикой полупроводника, определяющей его «термоэлектрическую добротность», то есть пригодность к использованию в качестве термоэлемента. Это важнейшее применение полупроводников определяется величиной коэффициента Пельтье  $\Pi$ , который оказывается непосредственно связанный с  $\alpha$  и температурой

$$\Pi = \alpha T$$

Абсолютная величина тепла, поглощаемого на одном и выделяемого на другом контакте при данном  $\Pi$ , определяется пропускаемым в цепи током. Однако при увеличении тока резко возрастают потери на джоулево тепло (пропорциональные  $J^2$ ), и поэтому разность температур на контактах растет только до некоторого предела, а затем падает. Это ....., которое можно получить на концах данного полупроводника, оказывается связанным с «термоэлектрической добротностью»  $z$  материала соотношением

.....

где само  $z$  определяется коэффициентом термо-э.д.с., электропроводностью..... и теплопроводностью ....материала

.....

Величиной  $z$  определяются и другие практически важные термоэлектрические характеристики материала. С температурной зависимостью  $\alpha$  оказываются связанными и коэффициенты Томсона.

**Электропроводность.** Электропроводность полупроводника определяется концентрациями и подвижностями электронов и дырок. Представим пропорциональную ей величину ..... в виде

.....

где .....- электронная и дырочная составляющие электропроводности.

Формула характеризует относительную роль .....: будучи их суммой, ... при изменении температуры меняется от чисто электронной (.....) или чисто дырочной (.....) в примесной области до смешанной (.....) в собственной области проводимости.

**Коэффициент термо-э.д.с.** В общем случае, при температурах контактов полупроводника  $T_1$  и  $T_2$ , возникающую термоэлектрическую разность потенциалов между ними можно представить как

.....

Здесь  $A$  – константа, зависящая от типа кристаллической решетки полупроводника и характера рассеяния носителей заряда, ..... – расстояния равновесного уровня Ферми от краев зон.

Это выражение отражает связь термо-э.д.с. с избытком средней тепловой энергии носителей в более нагретых частях полупроводника (.....) относительно энергии их на «холодном» конце, характеризуемой соответствующим положением уровня Ферми. Знак минус между членами, определяющими вклад электронов и дырок, понятен: совместная диффузия тех и других от горячего конца к холодному уменьшает суммарный заряд диффундирующих частиц, а следовательно, и возникающее в результате «термоэлектрическое» поле. При равенстве концентраций и подвижностей диффундирующих электронов и дырок термо-э.д.с. должна быть равна нулю.

Выразив .....и взяв производную по  $T$ , получим

.....

В области примесной проводимости, когда ..... или..., выражение для... упрощается. В полупроводнике  $n$ -типа

.....

В полупроводнике  $p$ -типа

.....

Таким образом, в области явно выраженной примесной проводимости коэффициент термо-э.д.с. определяется концентрацией основных носителей заряда и температурой и не зависит от подвижности. Знак же.... обратен знаку основных носителей: более горячий конец кристалла заряжается положительно в электронном и отрицательно – в дырочном полупроводнике.

В собственной области..... Обозначив отношение подвижности....., получим

.....

В большинстве полупроводниковых материалов....., то есть .....Поэтому знак ...в собственной области такой же, как в примесном полупроводнике.....Сама же величина ... в материалах с ....., близким к единице, очень сильно от него зависит.

**Сопоставление температурного хода электропроводности и коэффициента термо-э.д.с. в германии.** В настоящей работе исследуется температурная зависимость коэффициента термо-э.д.с. и электропроводности германия. «Термоэлектрическая добротность» этого материала не потимальна, но благодаря возможности получения его с малым содержанием примесей и высококачественными структурными параметрами, в нем наблюдаются большие коэффициенты термо-э.д.с. Кроме того, ширина запрещенной зоны германия позволяет в сравнительно небольшом интервале температур достаточно надежно определять параметры и примесной, и собственной проводимости и, таким образом, провести интересующие нас сопоставления температурного хода...и....

В качестве примера рассмотрим T-зависимости..... и... в германии.

.....

.....

.....

### **Методика исследований**

Электрическая схема и установка. Образец германия размерами 1,5x4x25 мм<sup>3</sup> зажимается в держателях.

При этом на торцы образца в качестве токовых контактов напаяно олово, в которое в свою очередь впаяны «горячие» спаи дифференциальных термопар медь-константан. На один из держателей намотана маленькая печь для создания градиента температур вдоль образца. Для изменения общей температуры образца на него одевается цилиндрическая печь, позволяющая вести нагрев до температуры К 2000.

«Холодные» спаи термопар помещены в сосуд Дюара, содержащий масло, температура которого измеряется термометром (она обычно близка к комнатной). Дифференциальная термо-э.д.с. термопар измеряется между медными концами, выведенными к специальному переключателю. Медные концы обоих термопар, отходящие непосредственно от образца, служат для измерения его термо-э.д.с. и для пропускания тока через образец при измерении его электропроводности.

Падение напряжения на фиксированном участке измеряется с помощью дополнительных контактов, напаянных на боковой поверхности образца. Расстояние между этими контактами значительно меньше длины образца ( $l=5$  мм), чтобы уменьшить влияние разности температур на измеряемые значения. Все элементы измерительной схемы и схем питания печей собраны в специальном блоке, напряжения подведены к переключателю, выведенному на переднюю панель блока и позволяющему последовательно подключать их к измерительному прибору – ППТ и методом компенсации определять с высокой точностью.

В блоке собраны также схемы питания основной и дополнительной печей, на переднюю панель выведены регулирующие ручки автотрансформаторов, меняющих токи через них, и амперметры, измеряющие эти токи. Провода к клеммам «Х» потенциометра выведены с задней стороны блока; там же выведен шланг с проводами, подключающими схему к сети. Ставя переключатель в положения, можно измерить э.д.с. термопар и по приложенному градуировочному графику определить температуры концов образца. Ключ К замыкает электрическую цепь, состоящую из батареи Б, магазина сопротивлений и миллиамперметра, для измерения электропроводности образца. Он вмонтирован в общий переключатель и замыкается в положении последнего. Одновременно соответствующее напряжение подается на потенциометр. Для изменения полярности подаваемого на потенциометр напряжения служит расположенный на передней панели блока переключатель «+, -».

### **Проведение измерений**

**Определение температур концов образца.** Так как в данной работе холодные спаи имеют температуру  $t_0$ , отличную от нуля, то необходимо вводить поправку на эту температуру. Для этого ко всем значениям температур, находимым по измеренным..... нужно просто прибавить температуру холодных спаев  $t_0$  (так как графики линейны в широкой области температур). Разность температур может определяться и без этой поправки, однако она должна вноситься при определении средней температуры образца.....

### **Порядок измерений и обработка результатов**

1. На держатель с образцом одевается основная печь. Включается дополнительная печь, и ток через нее подбирается таким, чтобы разность температур не превышала 2-30. После установления стационарного состояния (проверка ведется по показаниям термопары у нагреваемого конца образца) замеряются .....

2. Включается ток через основную печь, с помощью которой с интервалами 20-300 температура повышается до 2000С. Благодаря неравномерности нагрева основной печью разность температур концов образца может меняться. Тогда нужно изменить ток дополнительной печи так, чтобы разность температур осталась прежней.

Все измерения проводятся только при установившейся температуре! Это требование нужно особенно тщательно соблюдать при измерении....., так как при малых...ладе небольшие ошибки в определении T1 и T2 могут внести весьма значительные ошибки в разность температур, а следовательно, и в  $\alpha$ .


#### **II.4. Эффективность использования и конструирование термоэлементов в термобатареях и определение области применения**

Рассмотрение термоэлектрических свойств основных материалов показывает, что они обладают коэффициентами термоэлектродвижущей силы в 300 – 500 *мкВ/град* на термоэлемент (р- и n-ветви).

Учитывая, что большинство современных ТЭГ работает при разности температур спаев, не превышающей 300-600<sup>0</sup>, можно получить от одного электрогенерирующего термоэлемента напряжение 0,15-0,30 В. При этом оптимальные условия выделения электрической мощности достигаются при сопротивлении нагрузки, сравнимом с  $r$  термоэлемента (то есть обычно порядка нескольких миллиом). Оба эти обстоятельства требуют для получения значительных напряжений (в согласовании с реальными нагрузками) последовательного соединения термоэлементов в термобатареи. В большинстве современных ТЭГ термобатарея представляет собой плоскую конструкцию, состоящую из нескольких десятков термоэлементов. Такая термобатарея является самостоятельным блоком, позволяющим получить электроэнергию мощностью несколько ватт (или десятков ватт в зависимости

от типа). Вместе с тем такая термобатарея является «кирпичиком», из которых параллельным или последовательным соединением можно получить термоэлектрический агрегат любой (в принципе) мощности. Поскольку коэффициент полезного действия батареи не связан с формой и габаритами термоэлементов, они могут быть самыми разнообразными в зависимости от конструктивных условий и особенностей эксплуатации.

В настоящее время наиболее распространёнными являются полуэлементы (ветви термоэлементов) в виде параллелепипедов с различным соотношением площади сечения и высоты. Однако и такие сравнительно сложные в технологическом отношении типы, как кольцевые, трапецевидные, шестигранные и другие термоэлементы начинают находить все большее применение.

Термоэлектрические батареи обладают рядом специфических преимуществ перед другими источниками электропитания (турбины, динамомашины, аккумуляторы и др.); рассмотрим несколько подробнее эти преимущества.

1. Ток в цепи термоэлемента обратно пропорционален его сопротивлению, в то время как э.д.с. пары зависит только от  $T_r - T_x$  и  $(\alpha_n + \alpha_p)$ . Таким образом, уменьшая сопротивление термоэлемента (например, его высоту при неизменной площади), можно достичь больших удельных мощностей. Практическим пределом на этом пути являются трудности, связанные со съемом тепла в условиях большого теплового потока, а также возрастающая вредная роль контактных сопротивлений.

Вопрос создания сильноточных термоэлементов весьма важен, так как при сокращении длины ветвей мощность растет обратно пропорционально квадрату веса термоэлемента, что весьма существенно для ряда конструкций ТЭГ.

2. термобатареи нечувствительны к короткому замыканию, которое, например, выводит из строя аккумуляторы. Это является следствием того, что материал термоэлемента находится при довольно высокой температуре и

дополнительный нагрев джоулевым теплом безопасен, а также того, что само джоулево тепло невелико из-за малого внутреннего сопротивления термоэлемента.

Ток короткого замыкания что примерно в 2 – 2,3 раза выше оптимального тока. Если в режиме  $I_0$  джоулево тепло составляет 5-8% от общего теплового потока через термоэлемент, то при  $I = I_k$  эта доля повышается до 10-15%, что не меняет существенно тепловой поток.

3. ТЭГ имеют практически неограниченный срок хранения при полной готовности к использованию в любое время.

4. Значительное число термоэлектрических материалов способно работать без специальной защиты как в условиях больших давлений, так и в вакууме. Это обстоятельство имеет огромное значение при создании «подводных» и «космических» вариантов ТЭГ.

5. Полная бесшумность работы ТЭГ, что дает им в ряде случаев решающее преимущество перед машинными источниками постоянного напряжения.

Вместе с тем на пути создания и использования термобатарей существует ряд серьезных технологических и инженерных трудностей, на важнейших из которых необходимо остановиться.

Коммутация. Коммутация (термин, под которым понимается соединение р- и n-ветвей термоэлементов между собой токоведущими металлическими пластинами без переходных сопротивлений) в настоящее время представляет наиболее трудноразрешимую технологическую задачу и серьезно тормозит ряд направлений развития термоэлектрической энергетики.

Малые величины  $r$  термоэлементов (обычно несколько миллиом) накладывают довольно жесткие условия на контактные сопротивления ( $10^{-5}$  –  $10^{-4}$  Ом), что требует, по сути дела, создания металлических контактов, подобных паяным. Одним из наиболее распространенных способов коммутации является залуживание под флюсом поверхности

полупроводникового материала сплавом, обладающим хорошей адгезией по отношению к полупроводнику. Иногда предварительно поверхность полупроводника подвергается дополнительной обработке (шопирование, электролитические покрытия, вжигание и т.п.). Коммутация такого типа применяется, как правило, для термоэлектрических материалов низко- и частично среднетемпературного диапазонов.

При изготовлении термоэлектрических материалов методом порошковой металлургии иногда на торцы полуэлементов напрессовываются металлические прослойки, к которым уже легко припаиваются (привариваются) токоведущие пластины.

Другим, часто применяемым для высокотемпературных материалов, методом коммутации является диффузионное сращивание. В этом случае выбирается материал коммутационной пластины, образующий стойкое соединение с термоэлектрическим материалом при температуре выше рабочей температуры горячих спаев термобатареи.

Во всех перечисленных случаях коммутации при последующей работе термобатарей неизбежно возникают механические напряжения, связанные с различной температурной зависимостью коэффициентов линейного (и объемного) расширения коммутирующих и коммутируемых материалов. Поскольку далеко не всегда к термоэлектрическим материалам удается подобрать соответствующие металлы, иногда приходится идти путем создания промежуточных слоев с плавным переходом по коэффициентам линейного расширения  $\alpha$ .

Третьим типом коммутации термоэлементов является жидкий или полужидкий вариант соединения ветвей. Вообще говоря, жидкая (смачивающая) коммутация имеет ряд положительных моментов: она практически имеет ряд положительных моментов: она практически полностью снимает напряжения на контактах вследствие различия коэффициентов линейного расширения, позволяет производить в случае необходимости быструю перекомпоновку или замену термоэлементов в

термобатарее, в ряде случаев позволяет проводить операцию по коммутированию без нагрева термоэлементов. Вместе с тем жидкая коммутация накладывает серьезные требования на конструкцию ТЭГ, в особенности в отношении виброустойчивости.

Хорошие результаты при коммутации этим методом получаются при использовании электрического сплава In-Ga (83% от Ga) с температурой плавления +16,40С. Этот сплав обладает хорошей адгезией по отношению к большинству современных термоэлектрических материалов, а также малой упругостью паров. Сплав дает контактное соединение порядка  $5-6 \cdot 10^{-5}$  Ом. Однако использование его при температурах выше 300<sup>0</sup>С затруднено вследствие резкого ухудшения адгезионных свойств. В случае лабораторных исследований или в конструкциях ТЭГ, рассчитанных на малый ресурс (срок службы), сплав InGa может быть использован и при более высоких температурах.

Другим вариантом, который можно отнести к полужидкой коммутации, является использование затвердевающих сплавов галлия с медью, никелем и некоторыми другими металлами. При размешивании Ga с чистыми (без оксидной пленки) порошками меди, никеля, молибдена образуется взвесь, в которой при комнатной температуре происходит реакция растворения металлов в Ga с образованием достаточно тугоплавких сплавов, выпадающих в твердую фазу.

Сплавы Ni – Ga и Cu – Ga, «намазываемые» на предварительно обслуженные галлием термоэлектрические материалы, также обеспечивают хороший контакт до 500-600<sup>0</sup>С при работе в вакууме.

Наиболее трудной является задача создания устойчивой высокотемпературной коммутации для температур выше 600-700<sup>0</sup>С.

Определенного внимания заслуживает и метод прижимной коммутации. В нескольких конструкциях ТЭГ прижимные контакты (при работе ТЭГ в вакууме) использовались на PbTe, обеспечивая устойчивую работу термобатарей при температурах до 600<sup>0</sup>С. При этом, однако,

переходные сопротивления доходили до 20%. Вместе с тем вопрос о возможности осуществления прижимной коммутации для материалов, не боящихся высокого вакуума, по-видимому, представляет интерес и ждет своей дальнейшей экспериментальной и инженерной проработки.

Летучесть. проблема летучести, особенно в области высоких температур, также является одной из серьезных и часто неприятных проблем, ограничивающих практическое применение термобатарей.

Следует отметить, что возгонка самого термоэлектрического материала опасна прежде всего созданием дополнительных замыкающих перемычек. Если это не происходит, то возгонка термоэлектрического материала, в принципе, может продолжаться до тех пор, пока это не отразится на геометрических размерах термоэлементов.

Возгоняющееся вещество осаждается, как правило, на холодных спаях и конструктивных элементах батареи.

Случаи повышенной летучести легирующих компонентов опасны изменением термоэлектрических характеристик материалов. Процесс возгонки примесей из термоэлементов, как правило, значительно инерционнее возгонки самих материалов даже при относительно низких температурах плавления примесей и больших коэффициентах диффузии. Тем не менее, все чаще возникающие требования обеспечить ресурс ТЭГ в десятки тысяч часов должны привести к развитию исследований процессов возгонки примесей. Отмечено, в частности, что даже такие примеси, как бор и галлий, с весьма низкой упругостью паров имеют тенденцию возгоняться из SiGe p-типа при использовании этого материала в области температур 700-9000С в течение 6-8 тысяч часов. В еще большей степени это относится к SiGe n-типа, легированному фосфором.

Одним из кардинальных способов защиты от сублимации является применение защитных обмазок и покрытий. Имеется ряд патентов (США, Япония) на покрытие термоэлектрических материалов среднетемпературного диапазона керамическими составами. Естественно, что при этом должна быть

обеспечена вакуумная плотность покрытия в сочетании с подбором коэффициентов линейного расширения.

Другим методом, применимым в случае, когда большой упругостью паров обладает одна из ветвей термоэлемента, может являться такая компоновка, когда другая ветвь служит одновременно защитным покрытием. К настоящему времени, однако, такая идея не нашла еще своего воплощения в какой-либо конструкции.

К проблеме покрытия примыкает также проблема электрической изоляции ветвей друг от друга и спаев термобатарей от соответствующих нагревателей (контуров) и радиаторов. В области температур до 400-5000С материалом изоляции может служить слюда хорошего качества (телевизионная) толщиной 20-40 мкм. Этот вариант с успехом применялся как для экспериментальных целей, так и в ряде ранних конструкций ТЭГ. В области еще более низких температур (до 150-2000С) очень удобны в качестве матрицы термобатарей некоторые марки эпоксидных смол и лаков.

Наибольшие трудности возникают в области температур выше 500-6000С. Хотя в настоящее время синтезированы многие типы высокотемпературных пластмасс и сложных соединений, в частности, на основе кремний-органики, пока нет серьезных попыток использования их в ТЭГ. Неплохо зарекомендовали себя тонкие пластины из окиси бериллия (в качестве изолирующих теплопереходов на горячих спаях). Есть указания на успешное применение в качестве матриц термобатарей стеклопластика и некоторых соединений на его основе. И, наконец, практически все материалы, используемые в качестве противосублимационных покрытий, могут служить (при условии достаточной механической прочности) внутренней изоляцией (матрицей) термобатарей.

#### **а) Источники теплоснабжения**

Источники теплоснабжения являются одной из важнейших частей любой конструкции ТЭГ. Тремя основными типами генерации тепла в ТЭГ являются ядерные реакции (реакторы, радиоизотопы), химические реакции

горения и Солнце. Такие источники, как отработанное в других циклах тепло или тепло человеческого тела в конечном счете могут быть также сведены к одному из перечисленных основных типов. Наиболее распространенными в настоящее время источниками тепла в ТЭГ являются различные модификации горелок (печей).

Такие горелки (печи) используют практически все имеющиеся в распоряжении человека продукты горения: дрова, уголь, природные газы (бутан, пропан и др.), нефтепродукты, кислородно-водородную смесь и т.п.

При этом существенную роль играет полнота сгорания продуктов, определяющая коэффициент полезного действия горелки. В ряде конструкций горелок для увеличения коэффициента полезного действия применяются различные приемы интенсифицирующие горение: предварительное распыление жидких горючих материалов, ультразвуковая вибрация стенок, обеспечивающая интенсивное растекание смесей, специальная форма камер сгорания и др.

Предложен ряд инженерных решений, предусматривающих предварительный подогрев продуктов горения (жидкостей или газов) воздухом, нагретым при отборе тепла от холодных спаев. Такие конструктивные решения могут существенно повысить коэффициент полезного действия горелок, а следовательно, и мощность ТЭГ. Широко используются также обычные горелки от керосиновых ламп и угольно-дровянных печей до газовых горелок, питаемых от баллонов жидкого газа или непосредственно газом.

### **Практические достижения и передовые термоэлектрические технологии для радиоизотопных термоэлектрических генераторов**

Среди разных технологий статического преобразования энергии для радиоизотопных энергосистем для применения в космосе наибольший интерес проявился к термоэлектрическому преобразованию энергии. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ) генерируют электроэнергию за счёт преобразования тепла, выделенного из ядерного

распада радиоактивных изотопов (в основном плутоний-238) в электричество с использованием термоэлектрического преобразователя. РИТЭГ успешно применялись для запуска многочисленных космических полетов, включая полеты на луну по программе «Аполлон», посадочные модули «Викинг» для полета на Марс, космические аппараты «Пионер-10» и «Пионер-11», а также «Вояджер», «Одиссей», «Галилео», «Кассини» и «Новые горизонты» для исследования внешних планет. Эти генераторы демонстрировали свою надежность на протяжении долгого периода времени (десятилетиями). Они компактные, выносливые, стойкие к радиационному излучению, масштабируемые, бесшумные, не вибрируют и не вращаются во время работы.

Практические достижения РТГ будут проанализированы и рассмотрены. Программа НАСА по технологическому улучшению радиоизотопных систем энергии рассматривает разработку более эффективных термоэлектрических технологий, которые могут улучшить характеристики в 2 или 4 раза во всех практических достижениях РИТЭГ, что ограничиваются 7,5% или меньше КПД уровня устройств и удельной мощностью на системной основе от 2,8 до 5 Вт/кг. За последние несколько лет были разработаны несколько усовершенствованных высокотемпературных термоэлектрических материалов, включая La<sub>3</sub>-x Te<sub>4</sub> n-типа, Yb<sub>14</sub>MnSb<sub>11</sub> p-типа, наполненные скутэрудиты n- и p-типа для интеграции в усовершенствованные аппараты генерирования энергии в лаборатории реактивного движения с целью интеграции. Современные ключевые достижения разработок по материалам и компонентам будут предоставлены и рассмотрены.

### **Вопросы теплопередачи**

Основные виды теплопередачи – теплопроводностью, излучением и конвекцией, естественно, полностью сохраняются и в условиях ТЭГ. Первый из перечисленных механизмов передачи тепла используется практически во всех случаях передачи тепла от источника к термобатарейкам. Наиболее

простая схема теплопередачи предусматривает плоскопараллельность поверхностей источника и батарей и наличие электроизолирующих прокладок, обеспечивающих вместе с тем хороший тепловой контакт. Этот способ теплопередачи далеко не всегда удобен по конструктивным соображениям. В ряде случаев (особенно для ТЭГ с реактором) такая компоновка ведет к большим тепловым потерям. Поэтому в настоящее время прямой тип теплопередачи продолжает доминировать в ТЭГ с горелками, в то время как у реакторных вариантов ТЭГ начинают преобладать одно- или двухконтурные варианты теплопередачи (рис. П.5) с теплоносителями.

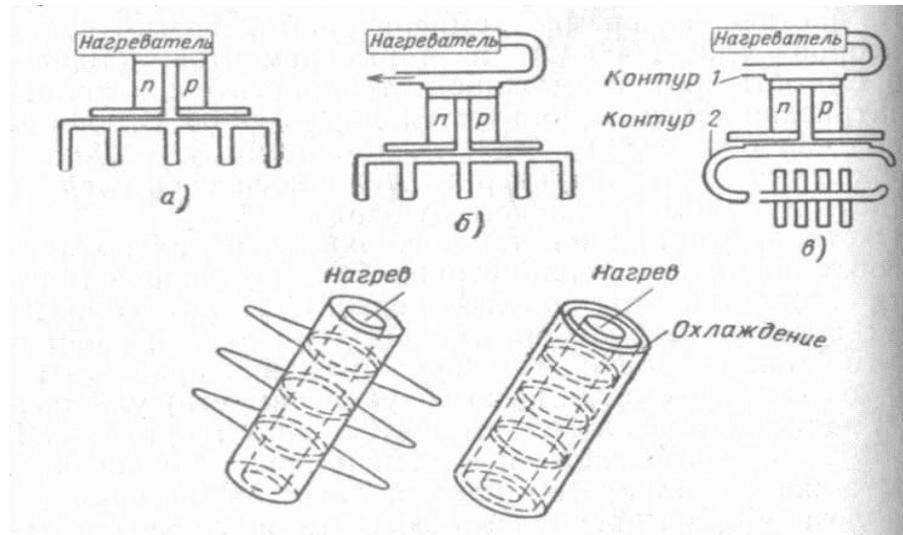


Рис. П.5 Различные типы теплопередачи

«Горячий» контур как уже указывалось, позволяет обеспечить интенсивный вынос тепла из реактора, что снижает температуру ТВЭЛов и одновременно позволяет расширить температурный интервал работы ТЭГ. В этом случае блок термобатарей может быть конструктивно и не связан с источником тепла, а вынесен в более удобное, менее радиационно опасное место. При этом, однако, возникают дополнительные трудности, связанные с термической изоляцией теплоносителя.

В случае двухконтурного варианта контур с теплоносителем располагается также между холодными спаями термобатарей и

радиатором сброса тепла. Это может существенно облегчить дальнейший сброс тепла. Это может существенно облегчить дальнейший сброс тепла излучением или конвекцией. Второй контур, как правило, не требует тепловой изоляции – его поверхность является как бы дополнительным радиатором сброса тепла.

Сброс отработанного тепла, особенно в условиях космического пространства, представляет, пожалуй, наиболее трудно решаемую инженерно-техническую задачу. Неумолимый закон Стефана – Больцмана (количество излучаемой тепловой энергии пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела) требует высоких температур радиатора или огромного увеличения его поверхности. С другой стороны, как уже указывалось, эффективность термоэлектрических материалов, а также термодинамический коэффициент полезного действия наиболее высокие значения имеют именно в низкотемпературной области. Эти две взаимоисключающие тенденции разработчикам приходится примирять в каждой конструкции ТЭГ, рассчитанной на сброс отработанного тепла излучением.

Для реальных конструкций условия теплоизлучения отличаются от идеализированных. Американские исследования теплового режима ТЭГ типа SNAP-10A показали, например, что реальный процесс теплоизлучения пропорционален не четвертой, а пятой степени температуры радиатора.

В США разрабатываются три системы сопряжения ТЭГ с ядерным реактором, предусматривающие разные способы теплопередачи:

1. Tiger. В этой системе предусматривается расположение ТЭГ по внешнему обводу реактора с последующим сбросом тепла радиацией (то есть схема наподобие советского реактора-преобразователя «Ромашка»).

2. SWIFT. Это весьма перспективная, но сложная в инженерно-конструкторском отношении система, в которой термоэлементы располагаются непосредственно на тепловыделяющих элементах в активной

зоне реактора, а с холодных спаев тепло выносится за пределы реактора контуром теплоносителя.

3. Horse. В этой системе теплопередача от реактора на горячие спаи термобатарей осуществляется контуром теплоносителя (аналогичную схему представляет собой термоэлектрический энергоагрегат SNAP-A). Однако такая схема теплопередачи затрудняет получение высоких температур на горячих спаях термобатарей.

Всесторонние стендовые испытания подобных систем, безусловно, дают в руки инженеров, конструкторов и теплотехников важный материал для конструирования термоэлектрических агрегатов широкого профиля.

При отсутствии контура теплоносителя попытка существенно снизить температуру радиатора увеличением его площади почти бесполезна из-за того, что одновременно приходится увеличивать толщину теплособирающей плиты для передачи тепла на удаленные ребра. Это настолько увеличивает вес конструкции, что зачастую просто делает ее бесперспективной.

Таким образом, дорога в космос лежит для ТЭГ практически только через область средних и высоких температур холодных спаев (по-видимому, от  $400^{\circ}\text{C}$ - $600^{\circ}\text{C}$ ). Однако в несколько более отдаленном будущем с освоением планет и астероидов в распоряжении конструкторов появятся практически неограниченные поверхности с температурой  $50\text{-}150^{\circ}\text{K}$ , наличие которых может вызвать пересмотр всей концепции теплосброса излучением.

Значительно более благоприятные условия теплосброса существуют у большого класса морских вариантов ТЭГ. Наличие проточной воды с температурой, не превышающей  $34\text{-}37^{\circ}\text{C}$ , а в ряде случаев опускающейся до  $2\text{-}5^{\circ}\text{C}$ , позволяет уверенно проектировать термобатареи для ТЭГ с температурой холодных спаев  $40\text{-}50^{\circ}\text{C}$ , то есть конструировать их на основе наиболее эффективных тройных сплавов (халькогенидов висмута и сурьмы). Некоторую проблему представляет, правда, осаждение солей морской воды на трубах теплосброса ТЭГ. Поэтому в ряде конструкций необходимо создание контура пресной воды, омываемого забортной водой. Проблема засорения

солями таким образом снимается за счет небольшого увеличения температуры холодных спаев термобатарей.

В термоэлектрогенераторах, работающих в наземных условиях, сброс тепла обычно осуществляется в атмосферу с помощью оребрения. Иногда небольшую часть электрической мощности такого ТЭГ выгодно использовать для питания вентилятора, увеличивающего конвекцию воздуха вокруг оребрения. В ТЭГ катодной защиты, обслуживающих газопроводы, работа такого вентилятора может быть обеспечена струей газа, ответвляющейся от основной трубы и снова входящей в нее.

Впрочем, в этих вариантах ТЭГ дополнительный расход сжигаемого газа обычно не играет никакой экономической роли, так что электропитание мотора может оказаться конструктивно более простым. Недостатком конвективного способа сброса тепла является зависимость от метеорологических условий и, прежде всего, от температуры окружающего воздуха, амплитуда которой гораздо больше, чем у воды.

В заключение можно отметить проводившиеся за рубежом опыты по применению жидкого воздуха и азота для съема с холодных спаев небольших термобатарей. При этом, естественно, ТЭГ имеет значительные величины коэффициента полезного действия как вследствие повышенной рабочей разности температур, так и из-за большого термодинамического коэффициента полезного действия. Хотя разработчики и указывают на перспективность таких вариантов, однако вряд ли они найдут широкое применение даже поблизости от криогенных агрегатов.

Использование ТЭГ в разных средах (воздух, нейтральный газ, вода, глубокий вакуум), естественно, отражается не только на теплопередаче, но и на условиях работы самих термобатарей. Наиболее подходящей средой для большинства современных термоэлектрических и коммутационных материалов является атмосфера нейтрального газа (аргон, криптон). При этом повышенное (2-5 атм) давление газа является желательным, так как

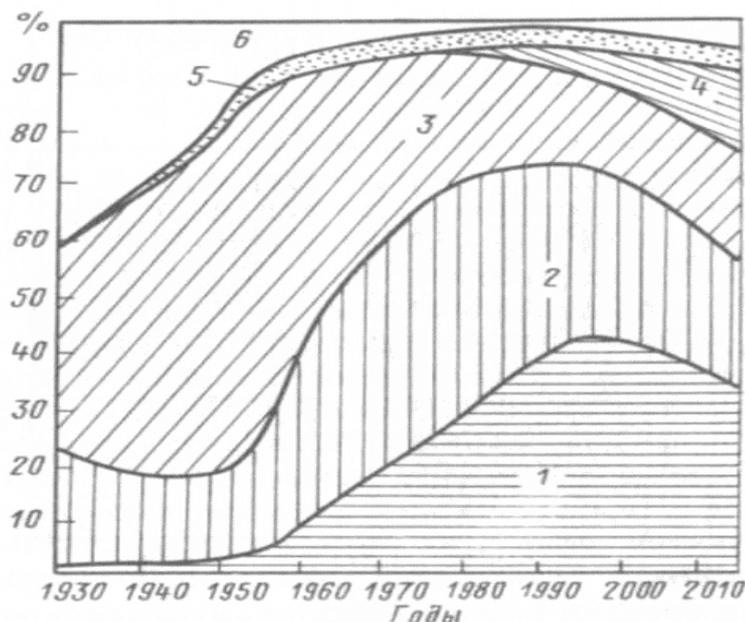
уменьшает возможность сублимации термоэлектрических материалов и в особенности обеднения их легирующими добавками.

С другой стороны, если вещества и примеси в них практически не сулимируют, то условия глубокого вакуума могут быть благоприятны для батарей. В этом случае в ряде космических вариантов ТЭГ можно будет обойтись без специальной герметизации самих батарей. Что же касается влияния корпускулярного излучения Солнца, а также ультрафиолетовой части спектра, поглощаемой обычно атмосферой, на характеристики термобатарей в условиях космического пространства, то эти вопросы принадлежат к числу наиболее слабо исследованных. Тем не менее, вряд ли эти факторы способны резко изменить параметры материалов, особенно при небольших ресурсах ТЭГ. Термоэлектрические материалы являются веществами с сильно деформированной кристаллической решеткой и довольно малыми подвижностями. Вследствие этого образование различного рода нарушений (радиационных, световых), опасное для бездефектных кремниевых фотоэлементов, вряд ли сможет существенно изменить термоэлектрические параметры твердых растворов.

Действие воздуха и влаги на термоэлементы представляет основную опасность для металлических (токоведущих) частей термобатарей; сами термоэлектрические материалы, как правило, почти не корродируют. Вопросы, связанные с влиянием морской воды на термобатареи, также практически не освещались в литературе, однако можно предположить здесь ряд трудностей, обусловленных электролизом и отложением солей.

### **Совершенствование структуры производства энергоресурсов**

В перспективе предусмотрены два этапа совершенствования производственной структуры ТЭК (рис. III.1.)

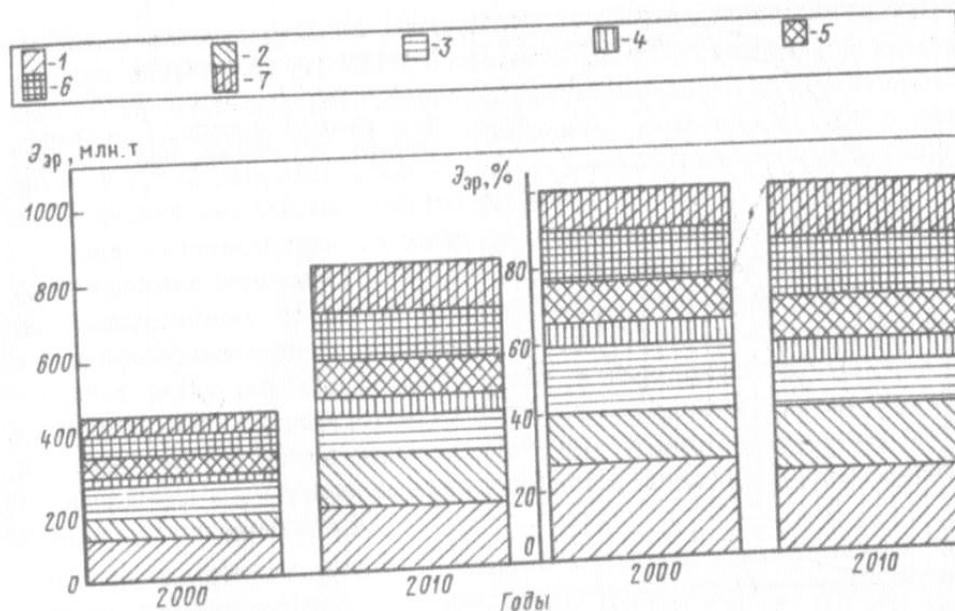


**Рис III.1. Структура производства первичных энергоресурсов:**

1 – газ; 2- нефть; 3 – уголь; 4 – ядерная энергия; 5 – гидроэнергия; 6 – прочие виды энергии

На первом этапе, который длился до 2000 г., устойчивое энергоснабжение народного хозяйства обеспечивало в основном на базе углеводородного топлива при небольшом росте уровней добычи нефти и конденсата, но с сохранением достигнутых в 80-х годах высоких приростов добычи нефти и конденсата, но с сохранением достигнутых в 80-х годах высоких приростов добычи и транспортировки в европейские регионы природного газа, главным образом тюменского.

Результаты исследований показали, что, несмотря на наличие в стране крупных ресурсов органического топлива и еще не освоенных гидроэнергетических ресурсов органического топлива и еще не освоенных гидроэнергетических ресурсов, непременным условием обеспечения устойчивого и эффективного энергоснабжения народного хозяйства и населения страны является дальнейшее развитие ядерной энергетики, без которого невозможно решать энергетические проблемы.



**Рис III.2. Экономия энергоресурсов Ээр (в пересчете на условное топливо) в отраслях при реализации энергосберегающих мероприятий в народном хозяйстве:**

1 – внедрение конструкционных материалов; 2 – машиностроение; 3 – топливно-энергетический комплекс; 4 – сельское хозяйство; 5 – транспорт; 6 – коммунально-бытовой сектор; 7 – прочие отрасли

Сложившиеся на современном этапе условия развития ядерной энергетики предопределили необходимость существенного снижения против прежних оценок производства электроэнергии на АЭС. Это в основном связано с отставанием строительства и удорожанием АЭС, выводом из энергоблоков с реакторами типа РБМК. При этом резко снижаются ожидаемые уровни производства теплоты на ядерном топливе.

Одной из первостепенных задач развития ядерной энергетики является повышение безопасности АЭС. Целесообразно определенное развитие централизованного атомного теплоснабжения, повышение безопасности АЭС. Целесообразно определенное развитие централизованного атомного теплоснабжения, повышение эффективности использования ядерного топлива, разработка высокотемпературных ядерных реакторов для использования в технологических процессах, совершенствование реактора на быстрых нейтронах, решение научных и инженерных проблем термоядерной

энергетики. Необходимы действенные меры по улучшению инвестиционной политики в ядерной энергетике и удешевлению АЭС.

Народнохозяйственная эффективность новой концепции развития энергетики обусловлена следующими факторами.

Повышение электро- и механовооруженности труда наряду с ростом фондовооруженности является важнейшим условием роста производительности труда. Вклад энергетики в рост производительности труда в ближайшие 20-25 лет оценен примерно в 30%.

Новая концепция позволяет обеспечить высокоэффективное развитие энергетического комплекса одновременно с решением важных социальных задач. Она соответствует требованиям ускорения социально-экономического развития, гарантируя удовлетворение потребностей страны в энергоресурсах и обеспечивая требуемый рост производительности труда путем увеличения его электровооруженности. Реализация этой концепции развития энергетики требует:

повышения цен на энергетические ресурсы до уровня действующих народнохозяйственных затрат (в 2,5 раза относительно действующих цен) при коренном совершенствовании хозяйственного механизма в сферах производства и особенно потребления энергоресурсов;

полного обеспечения энергетического комплекса оборудованием, отвечающим мировому уровню по основным технико-экономическим показателям;

реконструкции строительной базы в отраслях ТЭК с выходом на нормативные сроки сооружений объектов при безусловном выполнении показателей качества и сметной стоимости;

кратной интенсификации и научно-технического прогресса в производстве и потреблении топлива и энергии.

Названные условия реализации новой концепции развития энергетики, как и осуществление всей стратегии ускорения экономического развития,

неразрывно связаны с перестройкой и коренным повышением эффективности хозяйственного механизма в народном хозяйстве.

### Ядерное топливо

Получение электроэнергии с использованием ядерных реакций приобретает все большее распространение; например, в США прогноз роста АЭС очень перспективный.

Часто не отдают себе отчета в том, что топливо, используемое в ядерных реакторах, так же как уголь, нефть и газ, является природным ресурсом, который может быстро истощиться, если использовать его необдуманно.

Существует ряд факторов, позволяющих предположить, что при дополнительных затратах добычу урана можно увеличить. Большие надежды также возлагают на реакторы на быстрых нейтронах, в которых из уранового топлива получают плутоний. Кроме того, до настоящего времени недостаточно широко использовался торий в высокотемпературных охлаждаемых газом реакторах. Торий может также применяться для получения урана в реакторах, охлаждаемых газом и расплавом солей.

В отличие от других видов топлива запасы урана классифицируются в зависимости от стоимости его добычи. Принято считать материал, добываемый по стоимости менее 20 долл/кг  $U_3O_8$  в виде концентрата, как руду. Другие категории цен, применяемых для классификации залежей, - это 20-30 и 30-60 долл/кг  $U_3O_8$ . Оценка залежей тория дается в пересчете на  $ThO_2$ , в виде концентрата по цене 20 долл/кг.

Ниже приведены оценочные данные по запасам урана стоимостью менее 20 долл/кг:

	Запасы, т $\times 10^3$	Подсчитанные дополнительные ресурсы, т $\times 10^3$
--	-------------------------	--

Австралия	71	78,5
Канада	185	190
Франция	36,6	24,3
Габон	20	5
Нигерия	40	20
Южная Африка	202	8
США	259	538
Другие страны	53	52
<b>Итого</b>	<b>866,6</b>	<b>916</b>

Из этих данных видно, что Канада, Южная Африка и США обладают наибольшими залежами дешевой урановой руды. В Южной Африке дешевую урановую руду получают только в виде побочного продукта при добыче золота. Для того чтобы иметь возможность вычислить соотношение между запасами и их использованием, необходимо иметь данные по добыче урана в настоящее время. 1959 год был годом максимального производства урана, которое в целом составило 34 тыс.т., а в 1972 г. оно составило около 20 тыс.т. Общая добыча урана к 1980 г. для перечисленных выше стран составляла 60 тыс. т./год.

## **Глава III Непосредственное преобразование энергии с использованием ядерных источников тепла**

### **III.1. Предпосылки развития ядерной энергетики**

В июне 1954 г. в бывшем Союзе в г.Обнинске была пущена первая в мире опытно-промышленная атомная электростанция (АЭС) мощностью 5 тыс.кВт. В 1956 г. была пущена первая АЭС в Великобритании, а в 1957 г. – в США. С введением в строй этих АЭС начала развиваться новая отрасль энергетики – ядерная, или, как ее часто называют, атомная энергетика. К началу 1990 г. суммарная мощность АЭС во всем мире достигла примерно 316 млн. кВт. Сегодня в 26 странах мира действует более 430 ядерных энергетических реакторов, производящих около 17%, а в Западной Европе – около 30% всей вырабатываемой электроэнергии. В США эта доля составляет 19,1, в Японии – 27,8, в ФРГ – 34,3, а во Франции – 74,6%. По темпам развития (до 10% в год) эта отрасль энергетики не знает себе равных по сравнению с любыми другими традиционными энергетическими технологиями.

Таким образом, за 35 лет развития ядерная энергетика заняла существенное место в энергопроизводстве практически всех промышленно развитых стран мира. В чем причина такого сравнительно быстрого развития принципиально нового типа энергоисточников в одной из самых капиталоемких и инерционных отраслей промышленности? Причин здесь несколько.

Во-первых, к середине 50-х годов были достигнуты большие успехи в разработке и промышленном внедрении ядерных реакторов для военных целей (промышленные реакторы для производства плутония, энергетические реакторы для атомных подводных лодок). Опыт эксплуатации этих реакторов и ядерных энергетических установок продемонстрировал их работоспособность, надежность и простоту обслуживания, т.е. те качества, которые необходимы для использования энергоисточников для энергетических целей.

Во-вторых, интенсивное послевоенное развитие передовых в промышленном отношении стран Европы и Америки, а также Японии значительно увеличило энергопотребности, в том числе потребности в электроэнергии. В то же время уже в те годы было достаточно очевидно, что ресурсы органического топлива на планете не беспредельны. Поэтому возможность использования нового типа энергоустановок, потребляющих принципиально другое топливо (уран), запасы которого достаточно велики, не могло не привлечь пристального внимания не только ученых, но и правительств развитых стран к этой проблеме и стимулировало финансирование развития ядерно-энергетической отрасли промышленности.

В-третьих, в основных промышленных регионах мира производство электроэнергии на АЭС оказалось, по крайней мере, не дороже, чем производство электроэнергии на угольных тепловых электростанциях, и заметно дешевле, чем на нефтяных (мазутных) и газовых электростанциях, т.е. атомные электростанции продемонстрировали свою конкурентоспособность с самых первых шагов их развития. Это обстоятельство стало особенно важным в начале 70-х годов, когда разразился так называемый «энергетический кризис» и цены на нефть на мировом рынке повысились в несколько раз. В результате темпы роста мощности ядерной энергетики в мире в эти годы значительно увеличились.

Наконец, немаловажное значение в привлечении внимания специалистов к ядерной энергетике связано с ее относительной экологической чистотой при нормальных условиях работы. Действительно, если сжигание органических топлив на тепловых электростанциях приводит к выбросу в окружающую среду токсичных веществ (оксидов азота, серы и углерода и ряда токсичных углеводородов), золы и пыли и сопровождается потреблением огромного количества кислорода (до 8 млн. т/год для ТЭС мощностью 1 млн. кВт), то на АЭС таких веществ просто не образуется, а кислород вообще не расходуется. Даже уровень радиоактивности, генерируемый АЭС, в 20 раз ниже, чем вокруг угольных ТЭС, и этот

дополнительный уровень примерно в 3000 раз меньше естественного радиоактивного фона.

Развитие ядерной энергетики вряд ли можно остановить, как невозможно остановить технический прогресс человечества. Она неизбежно будет развиваться до тех пор, пока не появятся новые, более совершенные и эффективные энергоисточники.

Соответствующие выводы из чернобыльской аварии делаются во всем мире. Они приводят к необходимости создания нового поколения атомных электростанций и других предприятий атомной промышленности, обладающих достаточным уровнем безопасности, технически и экономически более эффективных, чем современные. Только такая социально приемлемая ядерная энергетика нового поколения сможет обеспечить основные энергопотребности человечества в XXI в.

### **III.2. Перспективы развития ядерной энергетики**

Авария на Чернобыльской АЭС заставила серьезно пересмотреть все эти планы. Анализ причин аварии показал, что концепция безопасности АЭС нуждается в серьезном переосмыслении.

Существовавшая в прежние годы концепция безопасности строилась на сочетании предусмотренных в проектах защитных систем безопасности с регламентными требованиями эксплуатации атомной электростанции. В принципе выполнение таких регламентных требований (или, вернее нарушение их) обеспечивало необходимый уровень безопасности АЭС. Однако то, что произошло на Чернобыльской АЭС (так же, как и в 1979 г. на АЭС Три Майл Айленд в США), показало, что действия человека в определенных обстоятельствах могут оказаться непредсказуемыми и необходимо разрабатывать такие системы, чтобы ошибочные действия операторов не могли привести к выбросу радиоактивности за пределы энергоблока и тем самым к радиоактивному заражению окружающей среды.

Новое понимание проблем безопасности атомных электростанций и пересмотр требований к их размещению, а также резкая оппозиция

общественности ряда регионов страны к строительству на их территории АЭС привели к отказу от сооружения ранее намеченных АЭС суммарной мощностью 45 млн. кВт, в том числе к прекращению строительства ряда уже строящихся станций. В частности, приостановлено строительство энергоблоков на Южно-Уральской и Татарской АЭС, законсервировано строительство объектов Курской и Смоленской АЭС, остановлена Армянская АЭС.

В 2010-2020 гг. возможен интенсивный рост ядерных энергетических мощностей на базе АЭС с энергоблоками новых поколений, обладающих уровнем безопасности, приемлемым с социальной точки зрения и обеспечивающим устойчивое развитие ядерной энергетики.

### **III.3. Ядерная энергетика и общественное мнение**

Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия, приведшие к радиоактивному заражению части территорий Украины, Белоруссии, ряда областей РФ, массовая эвакуация населения из 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС (около 130 тыс.чел.) всколыхнули общественное мнение страны и вызвали у некоторых групп населения, особенно в районах расположения и строительства атомных станций, резко отрицательное отношение к ядерной энергетике. Это отношение еще более усугубилось недостаточной и противоречивой информацией об уровне радиации на зараженных территориях и возможных биологических последствиях повышенной радиации. В результате в стране появилось мощное общественное движение против развития ядерной энергетике. Оно носит в значительной степени эмоциональный характер и питается во многом недостаточно аргументированными или некомпетентными суждениями, но нельзя не признать, что существуют и объективные причины для беспокойства.

Это беспокойство связано прежде всего с общим уровнем технологии и технологической дисциплины в отечественной промышленности, без кардинального улучшения которых нельзя рассчитывать на безопасность

крупных и энергоемких промышленных производств, в том числе и предприятий ядерного топливного цикла, как бы совершенны ни были их проекты и какие бы средства безопасности ни были в них предусмотрены. Поэтому вопрос о безопасности промышленных производств и ядерной энергетики, в частности, связан в первую очередь с принципами организации экономики страны, которая могла бы сама стимулировать повышение качества и технологического совершенства выпускаемой продукции. Убедительным подтверждением этому служит опыт Японии, высокий уровень технологии которой и общепризнанное высокое качество выпускаемой в этой стране продукции позволили обеспечить и наиболее высокий уровень безопасности ядерной энергетики. Отказы оборудования и внеплановые остановки ядерных энергоблоков на Японских АЭС происходят значительно реже, чем на любых АЭС, действующих в мире.

Конечно, высокое качество и надежность оборудования, высокий уровень безопасности, заложенный в проектных решениях, и безусловная технологическая дисциплина эксплуатации – это основа обеспечения социальной приемлемости ядерной энергетики. Но опыт промышленно развитых стран, имеющих ядерную энергетику, показывает, что этого недостаточно. С учетом потенциальной опасности ядерно-энергетических объектов и в связи с тем, что население зачастую отождествляет ее с опасностью ядерного оружия, необходимо давать широкую разъяснительную информацию об ядерной энергетике. В странах, активно развивающих ядерную энергетику, к работе с общественностью привлекаются государственные компании, годовые затраты которых на эти цели составляют десятки миллионов долларов. Грамотная разъяснительная работа и меры экономического и социального стимулирования населения, проживающего в районах расположения АЭС, привели к тому, что общественное мнение во Франции, ФРГ, Японии, Канаде и США не только не противодействует развитию ядерной энергетики, но считает, что атомные

электростанции будут занимать ведущее положение среди источников электроэнергии в ближайшие 10-летия.

### III.4. Пример SNAP-III-C

**Пример 1:** SNAP-III-C с термоэлектронным преобразователем.

Данная разработка выполнена фирмой «Термо электрон инжиниринг корпорейшн» по договору с Комиссией по атомной энергии. Цель работы состояла в проверке принципа действия устройства, предназначенного для использования в космических целях.

В связи с тем что для эмиссии электронов требуется высокая температура, в данном преобразователе в качестве источника тепла использован радиоактивный изотоп  $Ce144$  в виде окисла. Разработка специального источника тепла еще не закончена, и поэтому его конструкция не приводится.

После тщательного теоретического и экспериментального исследования способов крепления катодов наилучшими были признаны сапфировые держатели, так как они обеспечивают необходимую жесткость крепления, малые и не зависящие от теплового расширения расстояния анод – катод, незначительные потери тепла на теплопроводность и хорошую электрическую изоляцию.

Образец термоэлектронного преобразователя был разработан фирмой «Термо электрон инжиниринг корпорейшн» по договору с фирмой «Мартин». Образец обладает следующими показателями:

Температура катода, К.....	1400
Температура анода, $^{\circ}K$ .....	800
Температура внешней оболочки, $^{\circ}K$ .....	700
Площадь эмитирующей поверхности, $cm^2$ .....	6,4
Входная тепловая мощность (от изотопов), Вт.....	60
Электрическая выходная мощность, Вт.....	3,54
К.п.д., %.....	5,88

Напряжение на выходе, В.....	0,655
Ток на выходе, А.....	5,42
Потери тепла на излучение, Вт.....	32,9
Потери тепла на теплопроводность, Вт.....	8,36
Потери, обусловленные охлаждением при эмиссии электронов, Вт....	15,2

Чертеж образца в сборе представлен на рис. III.3.

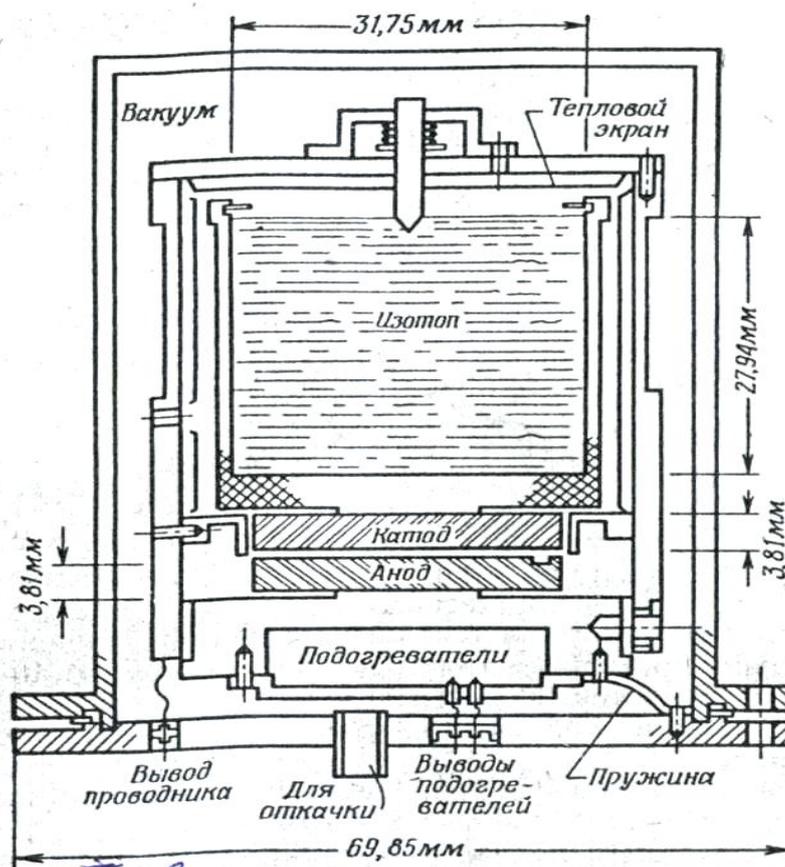


Рис. III.3. Конструкция одного из образцов термоэлектронного преобразователя

Расстояние катод-анод должно быть меньше 0,01 мм. При наличии радиоактивных изотопов с более высокой плотностью энерговыделения и при условии, что они смогут работать при более высоких температурах, к.п.д. и электрическая мощность могут быть увеличены.

Анод и катод могут изготавливаться из пористого вольфрама.

Тепловые экраны устанавливаются непосредственно у анода (на керамике для электрической изоляции) и у катода. Контейнер с изотопами частично поддерживается тепловыми экранами. Анод соединяется с внешней оболочкой тонкими металлическими лентами. В этом случае тепло, теряемое катодом за счёт излучения и теплопроводности, передаётся к аноду и отводится за счёт теплопроводности к внешней оболочке. Изменяя размеры металлических лент, можно регулировать температуру внешней оболочки вплоть до 800 °К.

Катоды активируются по отдельности, и преобразователь собирается в атмосфере инертного газа. Анод снабжён подогревателем, предназначенным для повторной активации, обеспечивающей малую величину работы выхода анода.

**Пример 2.** Термовыделяющий элемент реактора с электрическим преобразователем.

Преимуществами гетерогенного ядерного реактора для непосредственного преобразования энергии являются простота и компактность. Непосредственная генерация электроэнергии в тепловыделяющем элементе исключает необходимость применения парового цикла и тем самым приводит к существенному сокращению размеров устройства. Это особенно ценно в реакторах, предназначенных для силовых установок или электролитической очистки, где низкое выходное напряжение, получаемое от преобразователя, может использоваться непосредственно. Кроме того, давление в первичной системе может быть уменьшено, в результате чего снижаются капитальные затраты на ее изготовление.

Термоэлектрические тепловыделяющие элементы могут использоваться в любом типе реактора, в котором теплоноситель не является хорошим электрическим проводником. Этот тепловыделяющий элемент может быть легко приспособлен для использования в реакторах с водяным или газовым охлаждением или в реакторах с органическим замедлителем. Электрическая схема, состоящая из ряда обычных термопар, соединенных

последовательно, применима также к термоэлементам, показанным на рис. III.4. Если термоэлементы соединяются в батарею с соблюдением полярности, можно использовать материалы только n- или p-типов.

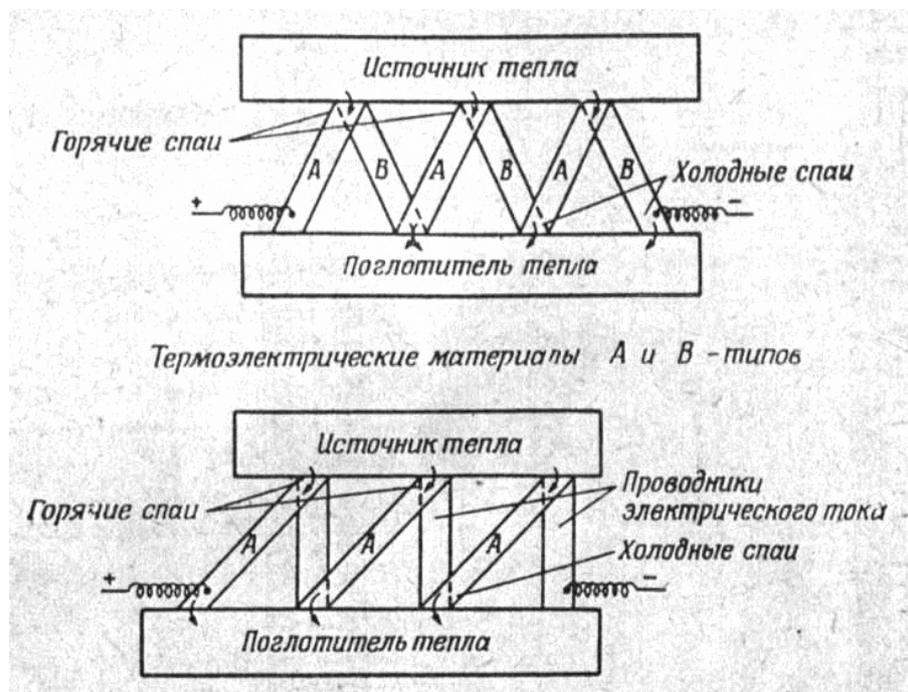


Рис. III.4. Термоэлектрический генератор

Имеется ряд вариантов конструкции тепловыделяющих элементов, которые позволяют получить требуемые тепловые и электрические схемы, но все они являются модификацией двух основных вариантов, показанных на рис. III.5. и III.6. Следует помнить, что простота конструкции является очень важным фактором с точки зрения условий производства. При разработке программы использования реакторов было уделено особое внимание вопросам, связанным с выбросом наиболее выгоднейших форм и размеров термоэлементов, вопросам обеспеченности материалами и перспективности различных материалов. Факторами, оказывающими наиболее сильное влияние на форму и размеры термоэлементов, являются: температурные ограничения, теплопроводность и производственные соображения.

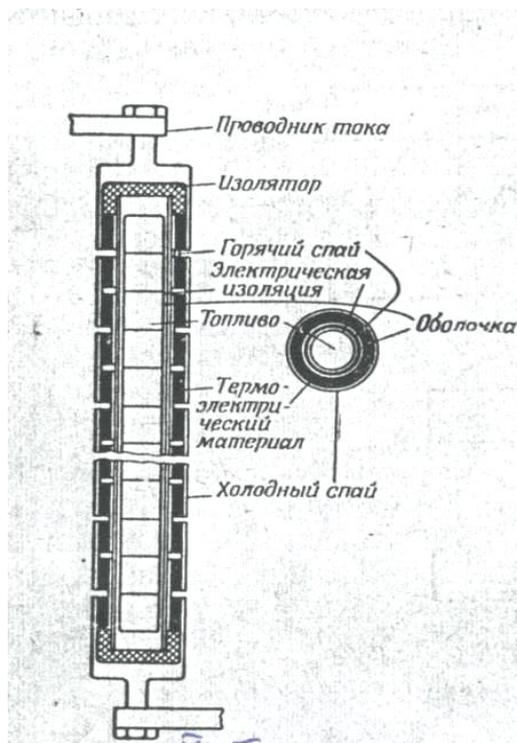


Рис. III.5.

Термоэлектрическая батарея с последовательным соединением элементов

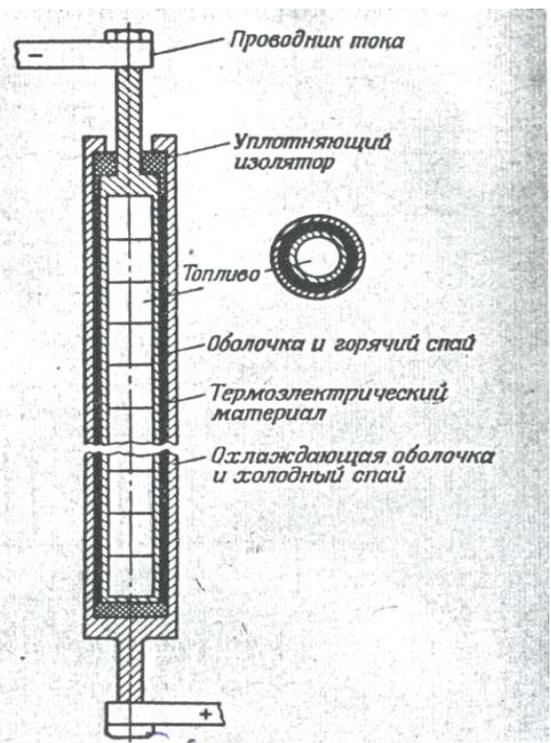


Рис. III.6. Отдельный термоэлемент

Выбор типа реактора для термоэлектрических преобразователей зависит прежде всего от температурных характеристик соответствующих термоэлектрических материалов, то есть от диапазона температур, в котором данные материалы обладают достаточно высокой эффективностью и химической устойчивостью. Характеристики большинства термоэлектрических материалов до сих пор не определены, поэтому параметры реакторов также остаются неопределенными. По-видимому, хорошие возможности обеспечат реакторы, в которых в качестве теплоносителя используется вода, органические вещества или газы. Если термоэлектрический материал должен использоваться в диапазоне низких или средних температур, следует, вероятно, использовать реактор с водяным или органическим теплоносителем. Если выбранный термоэлектрический материал обладает достаточной эффективностью только при относительно высоких температурах, его можно использовать в реакторе с водяным или

органическим материалом, обладающим оптимальными характеристиками при более низких температурах. В этом случае материалы должны располагаться один над другим, причем материал, обладающий большой эффективностью при более высоких температурах, должен располагаться ближе к топливу, а второй – ближе к теплоносителю.

Был предложен ряд конструкций тепловыделяющих элементов, однако в качестве основной была выбрана конструкция, представленная на рис. III.6., отличающаяся простотой и удобством в производстве. Она состоит из топливной секции  $UO_2$ , окруженной металлической оболочкой, слоем термоэлектрического материала и еще одним слоем металла.

Требуемую толщину термоэлектрического материала можно определить, если задана температура и удельная плотность энерговыделения. Это было выполнено для случая, который может рассматриваться как типичный. В качестве наиболее подходящей основы для сравнения с существующими коммерческими реакторами был выбран элемент стержневого типа. В настоящее время с точки зрения возможности изготовления предпочтительной является конструкция элементов в форме пластин.

Разумная величина максимальной температуры для существующих материалов со смешанной валентностью составляет, по-видимому,  $1000^{\circ}C$ . Если термоэлектрический материал располагается вокруг тепловыделяющего стержня реактора типа «Янки» (диаметр шарика  $UO_2 = 7,5$  мм, температура в центре  $2480^{\circ}C$ , толщина оболочки 0,43 мм) и максимальная температура термоэлектрического материала составляет  $1000^{\circ}C$ , то, как было показано, для получения температуры воды  $1210^{\circ}C$  требуется толщина термоэлектрического материала 0,51 мм.

Изменение температуры вдоль радиуса данного тепловыделяющего элемента показано на рис. III.7. Здесь предполагается, что коэффициент термоэлектрического материала обратно пропорционален абсолютной температуре.

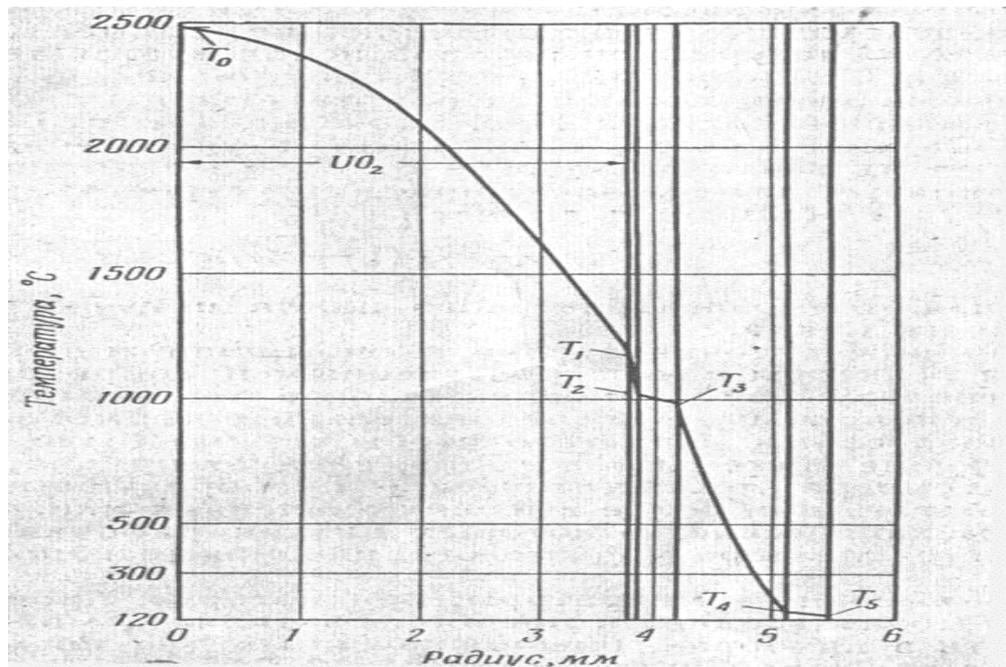


Рис. III.7. Изменение температуры в радиальном направлении в термоэлементе стержневого типа

Таким образом, приведенные выше данные показывают, что толщина термоэлектрического материала должны быть в пределах от 0,25 до 1 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены и проанализированы возможности использования термоэлектрических генераторов, таких как электрогенерирующие термоэлементы в электроснабжении на их основе в устройствах. Показана возможность в случае качественной оптимизации свойства термоэлектрических материалов в малой энергетике, достижения предельно высоких (18-19%) значений КПД многокаскадных устройств, превышающих значения КПД солнечных батарей. Указанные установки могут быть реализованы при осуществлении перспективных космических программ в условиях поверхностей астероидов или на борту космических кораблей дальнего полёта.

2. Доказано, что термоэлектрические источники тока, особенно сопряженные с компактными и достаточно мощными источниками тепла, несмотря на их сравнительно малый коэффициент полезного действия, являются несомненными фаворитами в условиях Арктики и Антарктики, полевых условиях, в горах и на отдалённых морских побережьях, во всех местах где несколько десятков (а зачастую единицу) ватт решают проблему радиосвязи, сигнализации, телекоммуникации.

3. Проанализированы и предложен ряд вариантов конструкции тепловыделяющих элементов, которые позволяют получить требуемые тепловые и электрические схемы, конструкции основных вариантов является очень важным фактором с точки зрения условий производства.

При разработке программы использования реакторов было уделено особое внимание вопросам, связанным с выбросом наивыгоднейших форм и размеров термоэлементов, вопросам обеспеченности материалами и перспективности различных материалов.

К началу 1990 г. суммарная мощность АЭС во всем мире достигла примерно 316 кВт. Сегодня в 26 странах мира действует более 430 ядерных энергетических реакторов, производящих около 17%, а в Западной Европе –

около 30% всей вырабатываемой электроэнергии. В США эта доля составляет 19,1, в Японии – 27,8, в ФРГ – 34,3, а во Франции – 74,6%.

По темпам развития (до 10%) в год эта отрасль энергетики не знает себе равных по сравнению с любыми другими традиционными энергетическими технологиями.

### **Перспективы и возможности**

Магистерская диссертация посвящена следующим вопросам, касающимся дальнейшего повышения эффективности ТЭГ и термоэлементов в электрогенерирующих системах, теоретические и экспериментальные исследования каскадных термоэлементов и проводимые в течение последующих 10-15 лет, показали хорошее согласие с основными теоретическими положениями, способствовали существенному повышению коэффициента полезного действия термоэлектрического метода генерации и расширению областей применения ТЭГ в качестве автономного источника тока в малой энергетике, таких как источников топлива от ядерного горючего до биогаза.

В их число входят:

1. Исследование и изучение параметров тока на основе полупроводниковых термоэлементов в электроснабжении;
2. Теоретическое исследование параметров и методика расчёта в различных режимах ТЭГ постоянного тока, расчёт КПД и мощности ТЭГ;
3. О предельной экономичности ТЭГ и совершенствование структуры производства энергоресурсов;
4. Экспериментальные методы измерения параметров для ТЭГ, характеризующих свойства полупроводниковых термоэлементов;
5. Эффективность использования и конструирование термоэлементов и термобатарей и применение в народном хозяйстве;
6. Непосредственное преобразование энергии с использованием ядерных источников тепла и развитие ядерной энергетики.

В дальнейшем можно развивать широкий обзорный теоретический анализ исследования параметров и методику расчёта в различных режимах ТЭГ постоянного тока.

Возможно практическое реализованное и конструкционные приёмы повышения эффективности ТЭГ в энергогенерирующих устройствах в энергосбережении.

## **ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:**