

В. Г. Злобин

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ
И ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2025**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики

В. Г. Злобин

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ
И ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2025

УДК 621.362

ББК 22.333

3680

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики
Высшей школы технологий и энергетики Санкт-Петербургского государственного
университета промышленных технологий и дизайна

E. Н. Громова;

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной энергетики Санкт-
Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова

I. В. Иванова

Злобин, В. Г.

3680 Термоэлектрические генераторы и термоэмиссионные преобразователи:
учебное пособие / В. Г. Злобин. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. — 161 с.
ISBN 978-5-91646-456-6

Учебное пособие соответствует программе и учебному плану дисциплины «Термоэлектрические генераторы и термоэмиссионные преобразователи» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» профиля подготовки «Эко-энергетика».

Материал, изложенный в учебном пособии, может быть полезен при изучении дисциплины «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» обучающимся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» профилей «Теплоэнергетика и теплотехника», «Цифровые энергосистемы и комплексы» и «Энергетика теплотехнологий».

В учебном пособии представлены физические основы термоэлектричества, эффекты преобразования тепла в электрическую энергию, приведена теория расчета эффективности, основные направления в создании, материалы и технологии изготовления ТЭГ, особенности конструкции разработок ТЭГ, расчеты КПД и холодопроизводительности. Представлены общие сведения о современных термоэмиссионных преобразователях, особенности ТЭП, устройство и разработки современных установок. Большое внимание уделено вопросам использования преобразователей тепла в электрическую энергию в энергетике. Рассмотрены вопросы применения осмоса в промышленной энергетике.

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров всех форм обучения.

Материалы, изложенные в учебном пособии, могут быть использованы в курсовом проектировании и при выполнении выпускных квалификационных работ и магистерских диссертаций. Пособие может быть полезно инженерам-теплоэнергетикам, персоналу предприятий по проектированию и эксплуатации энергетических установок для промышленных предприятий.

УДК 621.362

ББК 22.333

ISBN 978-5-91646-456-6

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

© Злобин В. Г., 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ. ВИДЫ, НАЗНАЧЕНИЕ	7
1.1. Физические основы термоэлектричества	9
1.1.1. Эффект <i>Зеебека</i>	11
1.1.2. Эффект <i>Пельтье</i>	19
1.1.3. Эффект <i>Томсона</i>	21
1.1.4. КПД термоэлектрического элемента	23
1.2. Основные направления в создании термоэлектрических материалов	26
1.3. Основные технологии изготовления термоэлектрических материалов.....	30
1.4. Схемы термоэлектрогенераторов	32
1.5. Разработки термоэлектрических генераторов.....	34
1.5.1. Термоэлектрические генераторы на органическом топливе.....	35
1.5.2. Термоэлектрические генераторы с фотоэлементами (солнечными батареями).....	39
1.5.3. Электростанция ТЭГ с применением паротурбогенераторов.....	42
1.5.4. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы.....	43
1.6. Термоэлектрические явления в растворах электролитов	47
1.6.1. Термодиффузионные и термоэлектрические явления в жидкых электролитах	47
1.6.2. Термоэлектрокинетические явления в жидких электролитах.....	48
1.6.3. Термоэлектрические явления в коллоидных системах.....	50
1.7. Расчет термоэлектрического генератора	52
1.8. Термоэлектрические холодильники и тепловые насосы	57
1.8.1. Термоэлектрические методы получения холода	57
1.8.2. Основные расчетные соотношения для охлаждающего термоэлемента	64
1.8.3. Режимы работы охлаждающих термоэлементов.....	66
1.8.4. Расчёт термоэлектрических охлаждающих устройств	68
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 1.....	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К РАЗДЕЛУ 1.....	73
РАЗДЕЛ 2. ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	75
2.1. Термоэлектронная эмиссия	75
2.2. Принцип действия вакуумного термоэмиссионного преобразователя	77
2.3. Теория идеального диода	80
2.4. Идеальный ТЭП. Поверхностная ионизация	82
2.5. Чистые эмиттеры.....	85
2.6. Адсорбирующие эмиттеры.....	87
2.7. Режимы работы термоэмиссионного преобразователя.....	90
2.8. Разработка узлов термоэмиссионного преобразователя.....	92
2.9. Схемы подключения ТЭП	93
2.10. Методика расчета термоэмиссионного преобразователя	96

2.11. КПД термоэмиссионного преобразователя.....	101
2.12. Энергетические установки малой мощности с термоэмиссионными преобразователями.....	104
2.12.1. Термоэмиссионный преобразователь солнечной энергии	104
2.12.2. Термоэмиссионные ЭУ на природном топливе.....	107
2.12.3. Тепловые трубы	110
2.12.4. Использование ТЭП для надстройки блоков тепловых и атомных электростанций.....	116
2.12.5. Ядерные ЭУ электрической мощностью 5–10 МВт	121
2.12.6. Реакторы с термоэмиссионными преобразователями.....	127
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 2.....	137
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К РАЗДЕЛУ 2.....	138
РАЗДЕЛ 3. ОСМОТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.....	140
3.1. Физико-химические процессы на осмотической станции.....	141
3.2. История применения осмоса в электроэнергетике	148
3.3. Преимущества и недостатки осмотической электростанции	151
3.4. Перспективы использования ОЭС в России	154
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 3.....	156
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К РАЗДЕЛУ 3.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ	159

ВВЕДЕНИЕ

Важность физического явления, называемого *термоэлектричеством*, необоснованно занижена в силу ускоренного развития альтернативных способов получения электрической энергии. Однако в последние годы термоэлектрические генераторы всё чаще применяются в качестве основных или дублирующих источников электроэнергии. Отсутствие движущихся частей обеспечивает уникально высокий уровень надёжности (до 25 лет эксплуатации) при минимальном обслуживании. Несмотря на очевидные преимущества, термоэлектричество обеспечивает преобразование тепловой энергии в электрическую с КПД не выше 8 %. Это не представляет собой ограничение, если основным назначением тепловой энергии является обогрев (суммарный КПД в этом случае равен 100 %), или используется тепловая энергия, отводимая от различных механических и электрических устройств (например, двигателей). В этом случае КПД генератора добавляется к КПД устройства.

Физическая природа термоэлектрического эффекта состоит в том, что средняя энергия свободных электронов различна в разных проводниках и по-разному растет с увеличением температуры. В проводниках, имеющих продольный перепад температур, возникает направленный поток электронов от горячего спая к холодному. При этом у холодного спая образуется избыток отрицательных зарядов, у горячего – избыток положительных. Поток электронов будет более интенсивным в тех проводниках, у которых концентрация электронов больше. Если использовать проводники с разной концентрацией электронов и поддерживать разную температуру спаев, на концах термоэлемента появится термо-Э.д.с.

Важнейшим преимуществом термоэлектрических генераторов является то, что они вырабатывают постоянный ток с напряжением от единиц вольт и мощностью от милливатт до сотен ватт, который требуется подавляющему большинству современных электронных устройств. Такому диапазону идеально соответствуют автономные источники питания на основе термоэлектрического эффекта. Сегодня термоэлектрическая генерация занимает нишу уникальных приложений, для которых применение стандартных источников электрической энергии затруднительно или невозможно.

Как известно [25–27], одним из методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую энергию является метод *термоэмиссионного преобразования энергии*. Основное предназначение термоэмиссионных устройств преобразования энергии (ТС — *Thermionic Converter*) состоит в получении электрической энергии для использования в космосе, под водой, а также в различных удаленных районах. Отметим также, что по своему принципу действия ТС удачно сочетаются с атомным реактором. Масса и размеры такой малогабаритной атомной электростанции позволяют использовать ТС на космических аппаратах для питания бортовых приборов и электрических двигателей.

Известны различные режимы функционирования ТС [25–27], среди которых такие режимы, как вакуумный, квазивакуумный и диффузионный, в настоящее время достаточно хорошо изучены.

Механизм процессов, протекающих в так называемом дуговом режиме, остается пока до конца не выясненным. Основными техническими характеристиками ТС являются плотность мощности генерируемого тока (ω) и коэффициент полезного действия (η).

Другими не менее важными эксплуатационными характеристиками ТС являются стабильность его параметров, а также продолжительность непрерывной работы ТС.

Однако даже в простейшем плоском случае газовый разряд сопровождается рядом интересных явлений. Так, при зажигании дугового разряда возникают неустойчивости, приводящие к развитию турбулентности, которая исчезает в развитой дуге. В некоторых случаях вместо хаотических турбулентных пульсаций появляются спонтанные колебания тока разряда определенной частоты (автоколебательный режим). Далее, несмотря на видимую идентичность условий вдоль электродов, гашение дуги происходит не одновременно во всем межэлектродном пространстве, а лишь на части поверхности электрода. В результате плазма становится существенно неоднородной в поперечном направлении, даже если в начальном состоянии она была полностью однородной. При определенных условиях между электродами возникают сгустки плазмы, отделенные резкой границей от остального пространства, в котором её плотность может оказаться на порядок ниже.

Несомненный интерес представляет также исследование приэлектродных областей, где плазма находится в контакте с электродом. В этих областях возникают сильные электрические поля, которые могут привести к существенному изменению эмиссионных способностей электродов и к появлению неравновесных возмущений, влияющих на характер многих физических процессов: ионизацию, прохождения тока и т. д.

Наиболее существенным недостатком существующих плазменных ТС является долговременная нестабильность технических характеристик ТС, которая обусловлена изменениями во времени микрогеометрии малых межэлектродных зазоров вследствие термического испарения вещества электродов при высоких рабочих температурах.

Кроме того, в процессе функционирования ТС может происходить короткое замыкание между электродами, которое, по-видимому, связано с ростом микрокристаллов (вискеров) по эпитаксиальному механизму.

В учебном пособии рассматривается традиционный подход к построению ТС, который, как известно, основан на идее компенсации поля пространственного заряда электронов эмиссии ионами плазмы. Так же рассматриваются вопросы разработки физических и корпускулярно-оптических принципов построения вакуумных эмиссионных устройств преобразования тепловой энергии в электрическую энергию нового типа, которые были бы лишены недостатков существующих плазменных ТС.

РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ. ВИДЫ, НАЗНАЧЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей развития автономных источников питания является разработка простых и дешевых способов получения экологически чистой возобновляемой энергии. Современному обществу необходимы малогабаритные генераторы малой мощности, обладающие повышенным коэффициентом полезного действия (КПД) и не оказывающие негативного воздействия на человека и окружающую среду (рисунок 1.1).

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ), работающие по принципу преобразования тепла в электрическую энергию, полностью отвечают этим требованиям. ТЭГ обладают свойствами, позволяющими использовать их во многих областях техники. Наиболее актуальным применением таких генераторов является питание маломощных систем связи и систем мониторинга состояния объектов, генерирующих большое количество тепловой энергии. Учитывая установку в труднодоступных для обслуживания и ремонта местах, основные предпочтения отдаются автономным источникам электроэнергии, которые не требуют обслуживания и имеют достаточно большой срок службы.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

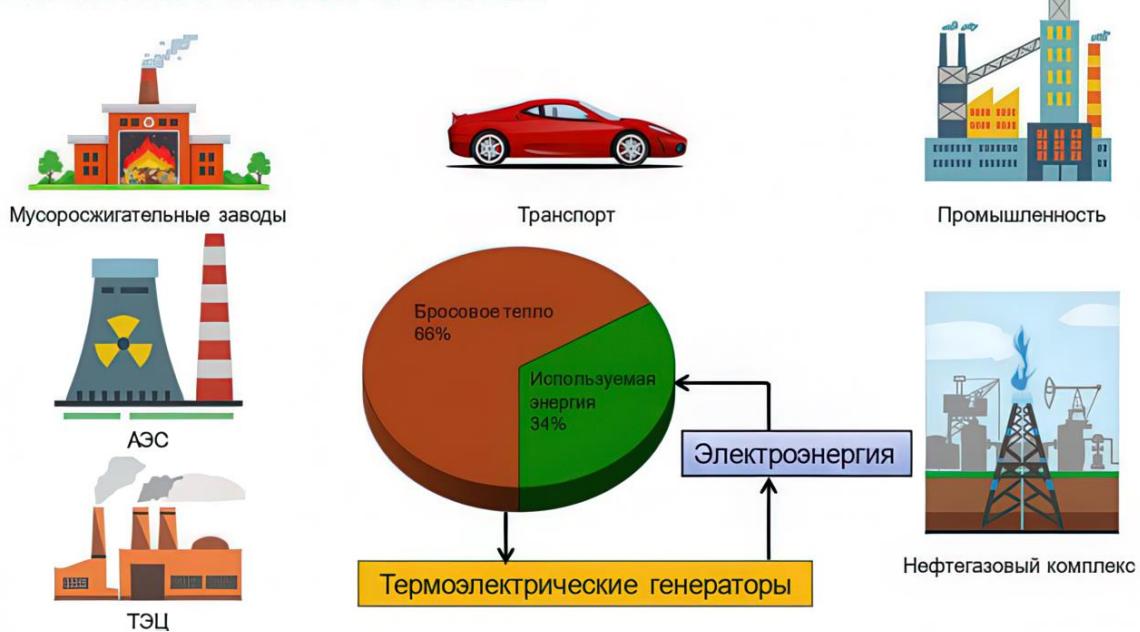


Рисунок 1.1 – Области, в которых возможно применение термоэлектрических устройств для повышения энергоэффективности

Термоэлектрические генераторы являются автономными источниками питания и благодаря этому могут применяться в качестве аварийных, основных и дополнительных элементов питания систем мониторинга и средств связи с потребляемой мощностью до 100 МВт. Анализ коммерческих и экспериментальных ТЭГ показывает сложность в их изготовлении и высокую себестоимость. Исследования в этой области активно проводятся как в России,

так и за рубежом. Широко известными работами в данной области являются труды зарубежных и российских авторов, таких как *A. Ф. Иоффе, И. Ю. Шелехов, С. В. Новиков, М. И. Фёдоров, Л. Э. Гуревич, М. Телке, Л. И. Анатычук, D. Champier, H. T. Nguyen, V. T. Nguyen, M. J. Kim, G. J. Snyder, K. Рикке, П. Друде*.

Принцип действия тепловых преобразователей основан на применении тепловых процессов, таких как нагрев, охлаждение, теплообмен, в которых входной величиной является температура. Температура взаимосвязана с внутренней энергией тел, а отсюда – с физическими свойствами тел.

Тепловые преобразователи применяются в виде преобразователей температуры, тепловых потоков, скорости потока, расхода, химических составов, давлений газа, влажности и так далее.

Рассмотрим некоторые виды преобразователей тепловой энергии, такие как термоэлектрические генераторы и термоэмиссионные преобразователи.

1.1. Физические основы термоэлектричества

Высокая надёжность и простота устройства термоэлектрических генераторов делают их применение предпочтительным в тех случаях, когда возможность работы без обслуживания более важна, чем его КПД. Поэтому термоэлектрические генераторы применяются:

1. В энергетических модулях космических кораблей, находящихся на удаленных от Солнца орбитах, где фотоэлектрические преобразователи уже неэффективны.
2. В надстроечных циклах стационарных электростанций (потенциально).
3. Как генераторы для нефтедобывающих станций (включая морские платформы).
4. Как источники электрической мощности для вентиляторов в системах обогрева жилых помещений при повреждении или аварии основного источника электрической энергии.
5. Как источники электроэнергии в автомобиле, которые позволяют утилизировать избыточное тепло двигателя.
6. Как источники электроэнергии, необходимой для открытия клапанов в топочных газонагревательных системах. После зажигания растопочного факела термоэлектрические генераторы начинают вырабатывать электроэнергию, которая подается на механизм открытия главного клапана подачи газа.

Тепло, необходимое для работы термоэлектрических генераторов, может быть получено от различных источников. Можно использовать тепло, образующееся в результате сжигания топлива, протекания ядерных реакций; тепло, содержащееся в выхлопных газах автомобилей, и др.

Энергия распада радионуклидов может утилизироваться в системах энергообеспечения космических кораблей (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Радионуклиды, используемые в радиоизотопных термоэлектрических генераторах

Элемент	Период полураспада, годы	Удельная тепловая мощность кВт/кг	Удельная стоимость установки, долл./Вт
Цезий – 144	0,781	25	15
Кюрий – 242	0,445	120	495
Плутоний – 238	86,8	0.55	3000
Полоний – 210	0,378	141	570
Стронций – 90	28,0	0,93	250

Термоэлектричество – собирательное название раздела физики и техники, в котором исследуются термоэлектрические эффекты, разрабатываются термоэлектрические устройства для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, а также для термоэлектрического охлаждения.

Ранние наблюдения данных явлений, а также их феноменологическое описание датируется первой половиной XIX века (Зеебек, Пельтье), однако полная их классификация и микроскопическая теория были построены лишь к

середине XX века. И до настоящего времени проводятся фундаментальные исследования по созданию новых теорий и подходов к описанию термоэлектрических эффектов, предсказываются и обнаруживаются новые явления этого класса.

Экспериментальные и теоретические исследования в физике термоэлектричества и физике полупроводников стали основой для создания современных термоэлектрических преобразователей, широко применяемых для охлаждения устройств бытовой и промышленной электроники. Особый интерес в условиях надвигающихся энергетических и экологических кризисов представляют термоэлектрические генераторы энергии, которые характеризуются прямым (безмашинным) принципом действия, а также имеют значительную величину КПД. *Термоэлектрогенератор (ТЭГ)* – это оборудование, предназначенное для получения электрической энергии из тепловой. В основе работы термоэлектрогенераторов лежат три термодинамически обратимых термоэлектрических эффекта: *Зеебека, Пельтье и Томсона*.

Большинство классических термоэлектрических эффектов были впервые обнаружены и исследованы в твердотельных, в первую очередь кристаллических полупроводниковых системах. В то же время, созданные для их описания теории применимы для конденсированных сред в целом, в том числе для плазмы, для водных растворов электролитов. Использование последних в качестве объекта исследования позволило предсказать и обнаружить новый класс термоэлектрических эффектов. При этом требования к экспериментальной установке для их изучения являются не столь жесткими, как для твердотельной электроники (дорогостоящая криогеника, низкие давления, импульсные поля и т. д.).

Контактные явления. В 1797 г. итальянский ученый *Алессандро Вольта* открыл явление возникновения разности потенциалов между двумя различными соприкасающимися металлами. Величина и знак контактной разности при фиксированной температуре зависит от взаимного расположения металлов в ряду: *Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd*.

В этой последовательности с увеличением номера уменьшается потенциал. Контактная разность потенциалов возникает из-за различия величины энергии *Ферми* μ металлов. Указанное отличие приводит к различию концентрации носителей зарядов (электронов проводимости). В случае приведения металлов в соприкосновение начнется процесс диффузии. Уход электронов из металла с большей концентрацией носителей n_1 приведет к возникновению в нем положительного заряда, другой металл, имевший концентрацию n_2 , зарядится отрицательно.

Уровень *Ферми* в первом металле понизится, во втором – повысится. Возникающая на границе в состоянии равновесия разность потенциалов уравновешивает процесс диффузии. Химические потенциалы сравниваются:

$$\mu_1 + e \cdot \varphi_{i1} = \mu_2 + e \cdot \varphi_{i2}, \quad (1.1)$$

следовательно, контактная разность определяется формулой (1.2):

$$\varphi_{i2} - \varphi_{i1} = \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{e}. \quad (1.2)$$

Полученная в приближении свободных электронов оценка контактной разности потенциалов по порядку величины совпадает с экспериментальными значениями.

Несмотря на простой принцип работы термоэлектрических генераторов, существует множество способов их построения, такие как: применение различных материалов в качестве полупроводниковых элементов [1], оптимизация геометрических и физических параметров [2, 3, 4] под всевозможные условия эксплуатации [5], интеграция с фотоэлектрическими преобразователями.

1.1.1. Эффект Зеебека

Все термоэлектрические генераторы работают по принципу преобразования тепла в электрическую энергию. Данный эффект зовется *эффектом Зеебека*, в честь Томаса Иоганна Зеебека, который в 1821 году обнаружил, что при нагревании спая из разнородных материалов в замкнутой электрической цепи течёт ток.

Зеебек предположил, что земной магнетизм объясняется разницей температур между экватором и полюсами. Вот почему принцип действия термоэлектрического генератора был объяснён магнитной поляризацией. Зеебек исследовал большое количество образцов, некоторые из которых были полупроводниками, и выстроил материалы в ряд по их способности отклонять магнитную стрелку. Эти данные используются (в уточнённом виде) и по сей день для конструирования термоэлектрических генераторов.

Эффект Зеебека заключается в следующем: если спай разомкнутой цепи из двух разнородных проводников поддерживаются при различных температурах T_1 и T_2 , то на концах цепи возникает термоэлектродвижущая сила $E_{\text{ТЭДС}}$ (рисунок 1.2) [6]:

$$E_{\text{ТЭДС}} = \alpha_{AB} \cdot \Delta T, \quad (1.3)$$

где $\Delta T = T_1 - T_2$; α_{AB} – коэффициент Зеебека одной ветви.

Термо-э.д.с. $E_{\text{ТЭДС}}$, возникающая в термопаре, зависит не только от разности температур горячего и холодного спаев термопары, но обычно и от абсолютного значения этих температур. Термоэлектродвижущая сила $E_{\text{ТЭДС}}$ пропорциональна разности температур горячего и холодного спаев (формула 1.3). В этой формуле α_{AB} – коэффициент Зеебека или относительный коэффициент ТЭДС, зависящий от свойств материалов термоэлектродов и температуры: T_1 – температура горячей части спая; T_2 – температура холодной части спая. Величину α_{AB} принято измерять по отношению к одному и тому же металлу – свинцу, т. е. для термопары, в которой одна из ветвей свинцовая, а другая изготовлена из исследуемого материала.

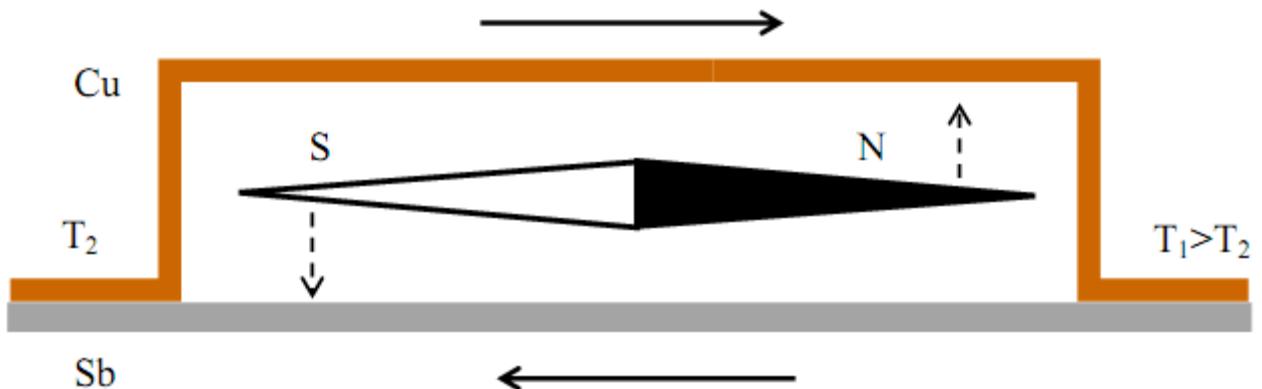


Рисунок 1.2 – Схема эффекта Зеебека

Для произвольной пары металлов коэффициент термоэлектрической силы находим как разность коэффициентов каждого из металлов α_2 по отношению к свинцу α_1 :

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2. \quad (1.4)$$

Коэффициент Зеебека измеряется в мкВ/К и составляет единицы мкВ/К. Сильное влияние температуры на концентрацию носителей в полупроводниках приводит к значениям α_{AB} в 1000 мкВ/К и выше.

Зеебеком было обнаружено, что при нагревании спая различных материалов в замкнутой цепи происходит протекание тока с КПД, примерно 2–3 %. Но полученные результаты первого термогенератора составляли конкуренцию паровым машинам того времени. Зеебек проводил эксперименты, используя пластиинки сурьмы и висмуты, измерения производил с использованием гальванометра. Принцип действия термогенератора основывался на магнитной поляризации. Исследование большого количества образцов, в которые также входили полупроводники, привело к созданию списка построения материалов по способности отклонять магнитную стрелку. При нагреве материалов, плотно соединенных между собой, магнитная стрелка отклонялась дальше. На данный момент для создания термогенераторов используется тот же список, но с более уточненными данными и материалами.

Металл, к которому идет ток от спая с более высокой температурой, принято называть положительным. Например, в паре сурьма-медь в этом качестве выступает сурьма, медь будем называть отрицательным металлом в данной термопаре. Проводя исследования для различных пар металлов, Зеебек получил термоэлектрический ряд.

Данные, полученные на основании многочисленных измерений $E_{\text{тэдс}}$, различных термопар, удобно представить в виде таблицы, в которой приводятся значения $E_{\text{тэдс}}$, развиваемой различными материалами в комбинации с каким-нибудь одним и тем же материалом (см. таблицу 1.2). Коэффициенты термо-Э.Д.С. для некоторых металлов приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.2 – Термо-э.д.с. различных термопар*)

$t_r, ^\circ\text{C}$	$E_{\text{ТЭДС}} \text{ при } t_x = 0^\circ\text{C, мВ}$					
	Платина-хромель	Платина-алюмель	Платина-медь	Платина-железо	Платина-константан	Платина-манганин
0	0	0	0	0	0	0
100	+2,81	-1,29	+0,76	+1,89	-3,51	+0,61
200	+5,96	-2,17	+1,83	+3,54	-7,45	+1,55
300	+9,32	-2,89	+3,15	+4,85	-11,71	+2,77
400	+12,75	-3,64	+4,68	+5,88	-16,19	+4,25
500	+16,21	-4,43	+6,41	+6,79	-20,79	+5,95
600	+19,62	-5,28	+8,34	+7,80	-25,47	+7,84
700	+22,96	-6,18	+10,49	+9,12	-30,18	-
800	+26,23	-7,08	+12,84	+10,86	-34,86	-
900	+29,41	-7,95	+15,41	+12,84	-39,45	-
1000	+32,52	-8,79	+18,20	+14,30	-43,92	-

Примечание: *) В качестве общего для всех термопар данной таблицы материала, называемого нормальным электродом, принято брать химически чистую платину. В таблице 1.2, составленной именно таким образом, приведены значения термо-э.д.с. некоторых металлов и сплавов, применяемых в электротехнике, в комбинации с чистой платиной при температуре холодного спая t_x , равной нулю, и различных температурах горячего спая t_r .

Чтобы определить термо-э.д.с. термопары, составленную из каких-нибудь двух приведенных в таблице 1.2 материалов, при некоторой заданной температуре их горячего спая и температуре холодного спая, равной нулю, следует взять разность термо-э.д.с., указанных в таблице для этих материалов, развиваемых ими при заданной температуре горячего спая в комбинации с нормальным электродом.

Так, например, можно найти, что при температуре горячего спая $t_r = 300^\circ\text{C}$ и холодного спая $t_x = 0^\circ\text{C}$ термопара меди-манганин даст $3,15 - 2,77 = 0,38 \text{ мВ}$, а термопара манганин-константан при тех же температурах даст $2,77 - (-11,71) = 14,48 \text{ мВ}$.

Если требуется определить, какую термо-э.д.с. даст термопара, холодный конец которой имеет температуру, отличную от нуля, то следует найти, какие термо-э.д.с. она даст при температуре холодного спая, равной нулю, и температурам ее горячего и холодного спаев, и взять разность между полученными значениями. Так, например, термопара манганин-константан при температуре горячего спая 300°C и холодного 100°C даст:

$$14,48 - [0,61 - (-3,51)] = 10,36 \text{ мВ.}$$

Другим, более наглядным способом изображения тех же данных о термо-э.д.с., развиваемых различными термопарами, является построение так называемых кривых «термоэлектрической способности» различных материалов.

На рисунке 1.3 приведены такие кривые, построенные для ряда материалов на основании данных, приводимых многими авторами [7].

Таблица 1.3 – Коэффициенты термо-э.д.с. для некоторых металлов

Металл	$\alpha, \text{мкВ/К}$
Платина	-4,4
Олово	-0,2
Свинец	0,0
Серебро	+2,7
Медь	+3,2
Сурьма	+4,3

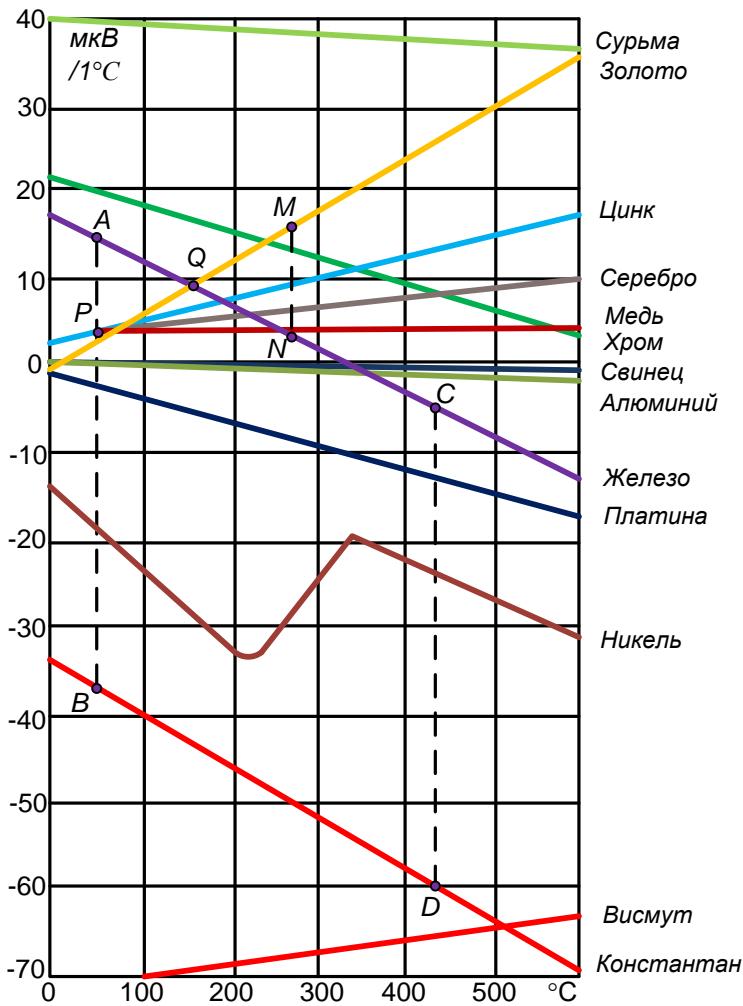


Рисунок 1.3 – Кривые термоэлектрической способности различных материалов **)

Примечание: **) Кривые эти, практически представляющие собой наклонные прямые, строятся так, что термо-Э.д.с., развиваемая термопарой, составленной из каких-нибудь двух материалов, определяется как площадь, заключенная между отрезками кривых термоэлектрической способности этих материалов и перпендикулярами, восстановленными к оси температур в точках, соответствующих температурам горячего и холодного спаев термопары. Пользуясь графиком рисунка 1.2, можно найти, например, что термо-Э.д.с. термопары железо-константан при температуре нагретого спая $t_g = 450$ °C и холодного

$t_x = 50$ °C равна площади ABCD:

$$E_{\text{ТЭДС}} = \text{пл. } ABCD = \frac{AB+CD}{2} (450 - 50) = 55 \cdot 400 = 22\,000 \text{ мкВ, или } 22 \text{ мВ.}$$

Для большинства термопар в широком диапазоне температур функция $f(T)$ линейна и ЭДС термопары выражается формулой (1.3). Для некоторых термопар зависимость $f(T)$ более сложная – квадратичная, и термо-Э.д.с. принимает вид:

$$E_{\text{ТЭДС}} = [\alpha(T)_1 - T_2] \cdot \left[1 + \frac{\beta}{\alpha}(T)_1 + T_2 \right]. \quad (1.5)$$

При этом ЭДС при определенных соотношениях температур спаев может становиться равной нулю и менять знак.

Кривые термоэлектрической способности некоторых материалов пересекаются между собой. Если они пересекаются (см. рисунок 1.3) при температуре, лежащей между температурами горячего и холодного спаев термопары, составленной из данных материалов, то термо-Э.Д.С., развивающаяся термопарой, будет равна разности площадей, заключенных между этими кривыми до точки их пересечения и после неё. Например, Э.Д.С термопары золото-железо при температурах 275 и 50 °C равна разности площадей APQ и MNQ , так что при увеличении температуры горячего спая выше 160 °C термо-Э.Д.С. этой пары будет уменьшаться. Такое явление наблюдается у целого ряда термопар.

На рисунке 1.4 представлены кривые изменения термо-Э.Д.С. трех термопар в зависимости от изменения температуры их горячего спая при температуре холодного спая, равной 0 °C [7]. Из графика видно, что у термопары медь-железо Э.Д.С. при температуре 540 °C меняет знак. Это явление называется *инверсией*.

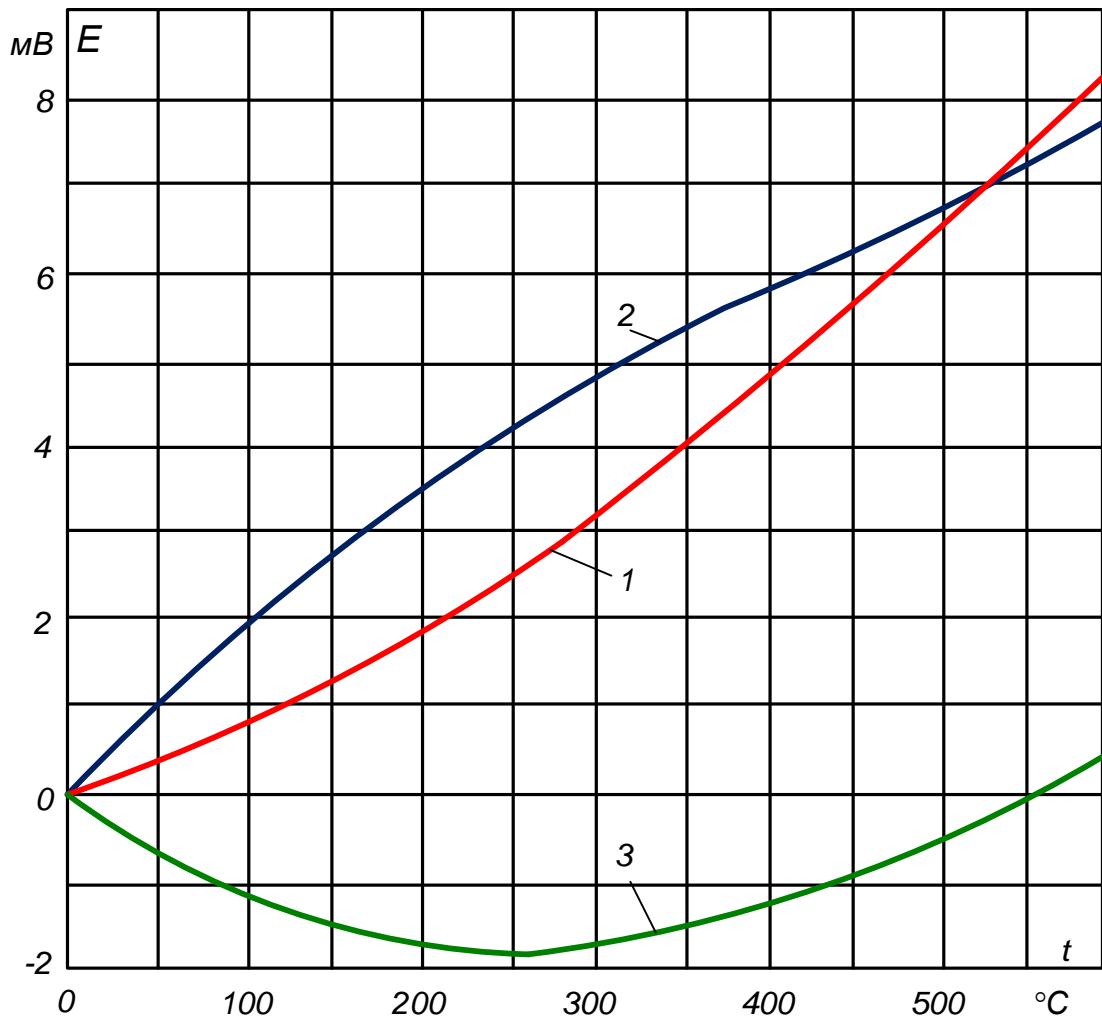


Рисунок 1.4 – Кривые изменения термо-Э.Д.С. в зависимости от температуры горячего спая при температуре холодного спая 0 °C для различных термопар:

1 – платина-медь; 2 – платина-железо; 3 – медь-железо

Кроме эффекта Зеебека к термоэлектрическим явлениям относятся два других обратимых эффекта: *Пельтье* и *Томпсона*. Эти эффекты связаны с взаимным превращением тепловой энергии в энергию электрического тока, с переносом тепла и электричества.

Известно, что потоки тепла и электрический ток представляют собой необратимые процессы, в то время как эффекты Зеебека, Пельтье и Томпсона принадлежат к интересному и трудному для изучения классу физически обратимых явлений, в числе которых встречаются и необратимые процессы. Теория таких явлений не может быть строго изложена с помощью обычной термодинамической теории стационарных состояний. Это возможно только с помощью термодинамической теории необратимых процессов, что позволяет рассматривать одновременно изменения энтропии, вызванные необратимыми и обратимыми потоками энергии.

Но всё-таки первый теоретический анализ был выполнен на основах классической термодинамики в предположении, что термоэлектрические явления не связаны органически с процессом теплопроводности и с выделением тепла при прохождении тока.

В данном разделе рассматриваются термоэлектрические явления и определяются коэффициенты уравнений для изотропной среды с позиций классической термодинамики и статических закономерностей в термоэлектричестве.

Термодинамическими явлениями принято называть эффекты возникновения в проводящих средах электродвижущих сил и электрических токов под воздействием тепловых потоков и эффекта возникновения теплот, дополнительных к джоулевой теплоте¹, при протекании электрического тока.

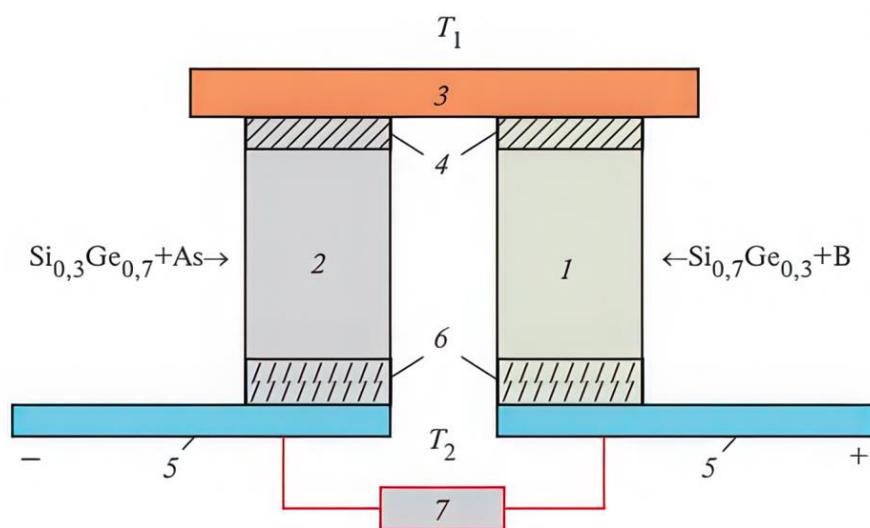


Рисунок 1.5 – Схема термоэлектрического элемента

¹Джоулева теплота – это тепло, которое выделяется в проводнике в процессе протекания сквозь него электрического тока. Согласно закону Джоуля-Ленца, величина теплоты, выделяющаяся за определённое время на определённом участке цепи, определяется как произведение силы тока, возведённой в квадрат, и сопротивления участка цепи. Джоулев нагрев используется во многих устройствах и промышленных процессах.

Если места контактов материалов с различным типом проводимости (*n*- и *p*-типа) поддерживаются при разных температурах и к термоэлектрическому генератору (ТЭГ) подключена внешняя нагрузка, то по такой цепи протекает ток, а на нагрузке *J* будет выделяться полезная мощность. Единичным элементом ТЭГ является пара термоэлементов (ТЭ) (рисунок 1.5) [8]. ТЭГ состоит из соединенных электрически последовательно и термически параллельно пар термоэлементов, расположенных между двумя керамическими пластинами. Термоэлементы соединяются металлическими контактными площадками (рисунок 1.6).

Термоэлектрический элемент состоит из: 1-*p* – ветвь термоэлемента, 2-*n* – ветвь термоэлемента, 3 – соединительная шина горячего спая, 4 – коммутационный припой, 5 – контактные шины, 6 – коммутационный припой холодного спая, 7 – внешняя нагрузка, *T*₁ – источник тепла, *T*₂ – охладитель. Для получения необходимых значений силы тока и напряжения полупроводниковые термоэлементы составляют из необходимого количества, соединенных параллельно или последовательно, такая конструкция называется *батареей*.



Рисунок 1.6 – Термоэлектрический генераторный модуль в разрезе

Возникновение термоэлектрического тока объяснимо на примере полупроводников, носителями заряда в которых могут быть двух типов (вариант с электронным механизмом переноса заряда в металлических проводниках представляется частным, более простым случаем).

Нагреем один конец однородного стержня, изготовленного из электронного полупроводника (рисунок 1.7 *a*). Концентрация электронов здесь увеличится, электроны начнут диффундировать в сторону холодного конца.

Горячий конец зарядится положительно по отношению к холодному. Возникшее электрическое поле *E* будет препятствовать процессу диффузии, таким образом установится стационарное состояние. Сложившийся градиент концентраций внутри полупроводника можно приписать действию сторонних сил со стороны поля *E*_{стор}, уравновешивающему поле *E*: *E*_{стор} = *E*.

На рисунке 1.7 б показан дырочный проводник, в котором диффузия основных носителей приводит к противоположной конфигурации полей.

Если принимать в рассмотрение одновременно носители двух типов, то диффузионные процессы будут давать взаимно противоположный вклад и даже полностью компенсировать друг друга, что имеет место в свинце.

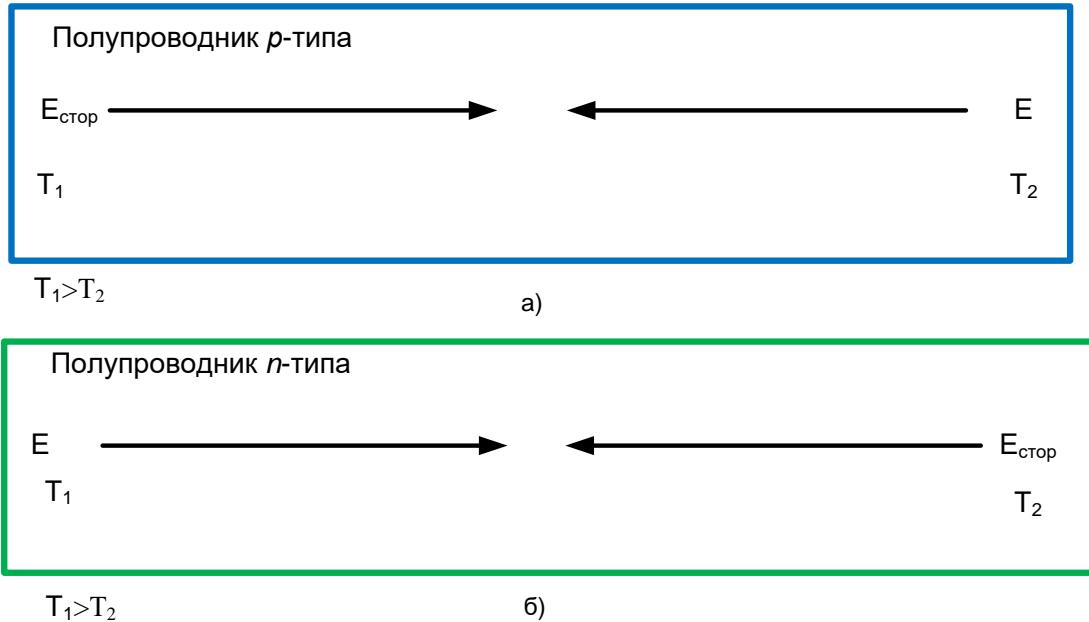


Рисунок 1.7 – Возникновение термодиффузии в полупроводниках различного типа

Для повышения значения термо-Э.д.с. отдельные термоэлементы соединяют в батареи. Все чётные спаи имеют одну температуру, нечётные – другую, таким образом, ЭДС складываются. Базовая конструкция термоэлектрического генератора представлена на рисунке 1.8.

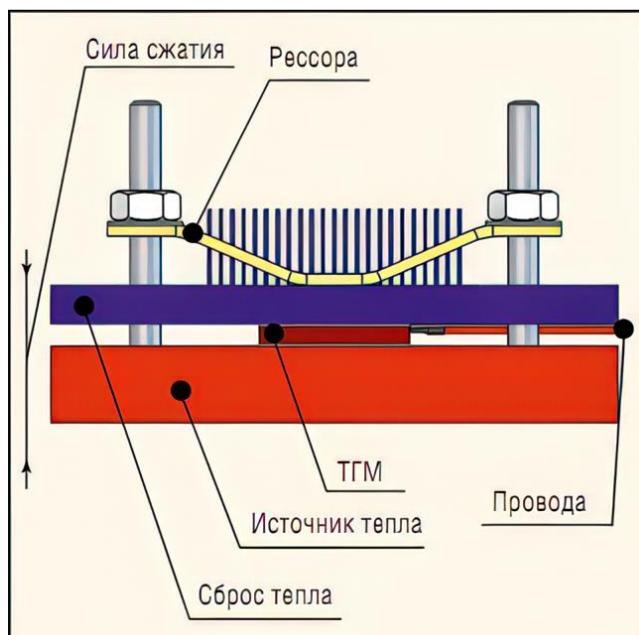


Рисунок 1.8 – Базовая конструкция термоэлектрического генератора

Количество термоэлементов в изготавливаемых промышленным образом полупроводниковых термоэлектрических преобразователях превышает 100 штук, при этом достигается КПД в 15 % и более.

Для измерений с помощью термопар применяют две методики:

- стабилизации температуры холодного спая;
- и так называемую «технику компенсации холодного спая».

Первая предполагает терmostатирование одного из двух спаев (рисунок 1.9, а), например, посредством погружения в тающий лед ($T_0 = 273 K$).

Вторая методика проще с точки зрения технической реализации, так как требует лишь фиксации температуры T_0 измерителем (рисунок 1.9 б). Однако, затем необходимо вычесть термо-Э.д.с. холодного спая из измеренного сигнала.

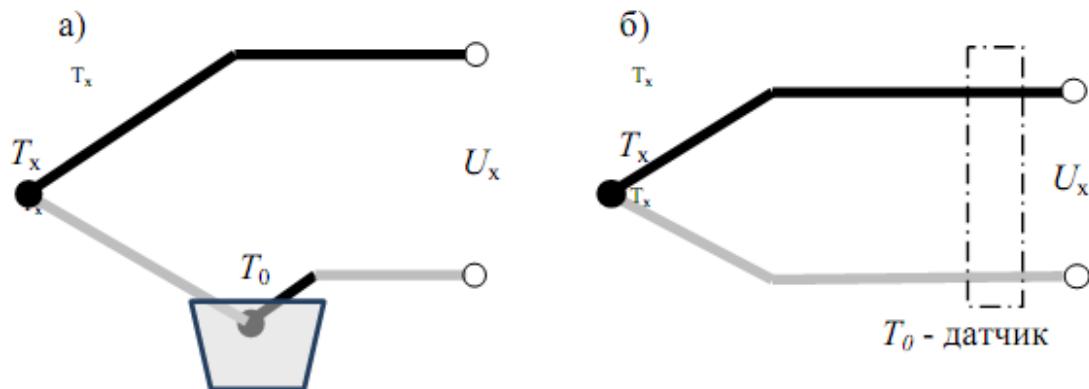


Рисунок 1.9 – Методы подключения измерительных термопар

Величины $E_{T\text{ЭДС}}$ и α_{AB} считаются положительными, если электрический ток протекает у горячего спая от A к B . Опытные данные показывают, что для любой пары однородных проводников, подчиняющихся закону Ома, термо-Э.д.с. зависит только от природы проводников и температуры спаев и не зависит от распределения температуры между этими спаями. Так,

$$E_{T_0T} = E_{T_0T_1} + E_{T_1T}. \quad (1.6)$$

Таким образом, эффект Зеебека, обусловленный перераспределением носителей зарядов вследствие наличия температурного градиента, проявляется в том, что в электрической цепи, составленной из двух разнородных проводников (термоэлектродов 1 и 2), и если точки их спаев поддерживаются при разных температурах, тогда и возникает термо-Э.д.с.

1.1.2. Эффект Пельтье

Процесс выделения или поглощения тепла в контактах разнородных проводников при протекании через них изменяющихся по направлению токов впервые про наблюдал в 1834 г. Жан Пельтье, французский часовщик. Физическую природу явления определил в 1838 г. Эмилий Ленц, российский физик.

Для демонстрации явления применялся так называемый крест *Пельтье*, представляющий две полоски из сурьмы и висмута (рисунок 1.10). К одной паре концов подключался источник ЭДС, к другой гальванометр. Пропускание электрического тока в одном случае (от сурьмы к висмуту) нагревало спай.

Подключение гальванометра позволяло фиксировать термоэлектрический ток в направлении от висмута к сурьме (см. рисунок 1.10). Изменение полярности подключения источника меняло направление тока и приводило к охлаждению спая. В этом случае гальванометр фиксировал полярность тока от сурьмы к висмуту.

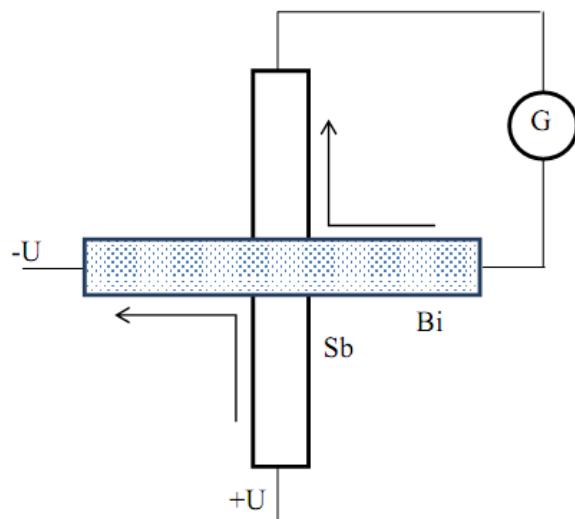


Рисунок 1.10 – Демонстрация эффекта *Пельтье*

В 1838 г. петербургский академик Эмилий Христианович Ленц представил более наглядную конфигурацию опыта. В углубление на контакте он помещал каплю воды, которая замерзала при одном направлении тока (полярности напряжения батареи) и плавилась при изменении направления тока.

Дальнейшие экспериментальные исследования показали прямую пропорциональность между теплотой *Пельтье* и величиной прошедшего через спай заряда.

Таким образом, эффект *Пельтье*, обусловленный различным распределением носителей зарядов по энергиям в проводниках 1 и 2 при одинаковой температуре, заключается в том, что при прохождении электрического тока I через спай 1 и 2 в этом спае выделяется или поглощается теплота $Q_{\text{п}}$, пропорциональная току и зависящая от типа контактирующих проводников:

Количество поглощаемой или выделяемой теплоты зависит от типа проводников и пропорционально протекающему току при одинаковой их температуре:

$$Q_{\text{п}} = \pm \Pi_{AB} \cdot I \cdot t, \quad (1.7)$$

где Q_n – количество теплоты; Π_{AB} – коэффициент пропорциональности (*Пельтье*), зависящий от свойств контактирующих проводников и их температуры; I – величина тока; t – время прохождения тока.

Следует отметить, что теплота *Пельтье* аддитивна джоулевой теплоте, которая неизбежно выделяется при протекании тока через проводники с конечным сопротивлением.

Причину возникновения эффекта можно объяснить на примере контакта между электронным и дырочным полупроводниками. Если выбрано направление поля, которое создает ток от p -области к n -области, то движение основных носителей в полупроводниках будет встречным. Электроны из зоны проводимости n -области попадают в валентную зону p -области. Рекомбинация электрона с дыркой происходит с выделением энергии. Если поменять направление электрического поля, то основные носители зарядов в областях будут расходиться. Для восполнения числа дырок необходимо генерировать новые. Этот процесс в p -области происходит при переходе электронов из валентной зоны в зону проводимости, что, в свою очередь, требует энергии. Соответственно происходит поглощение теплоты.

Термоэлектрические охладители, работающие на данном эффекте, находят широкое применение в компактных устройствах электроники. Основным преимуществом таких устройств является отсутствие подвижных частей, т. е. преобразование энергии осуществляется прямым, безмашинным способом.

1.1.3. Эффект Томсона

Эффект Томсона, в отличие от эффектов *Пельтье* и *Зеебека*, был прежде предсказан, лишь затем, после серии экспериментальных попыток, был продемонстрирован в 1956 году. Исходя из термодинамических соображений, Томсон заявил, что в однородном проводнике, если он нагрет неравномерно, при протекании тока происходит дополнительное выделение или поглощение тепла, помимо выделения тепла согласно закону Джоуля–Ленца.

Схема опыта, подтверждающего это явление, а также позволяющая количественно исследовать эффект, предложена Франсуа Леру и представлена на рисунке 1.11.

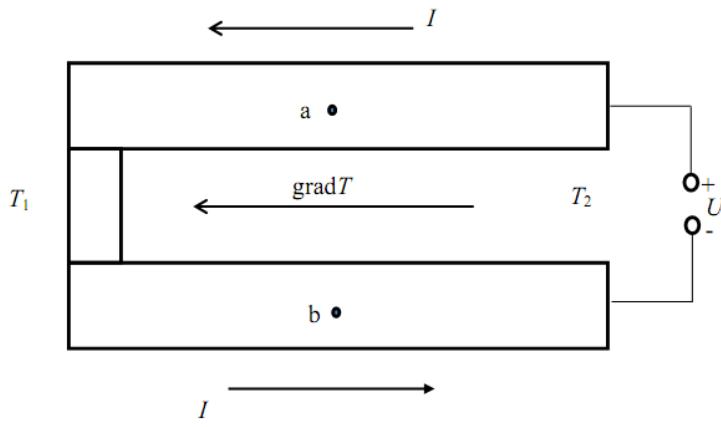


Рисунок 1.11 – Схема для наблюдения эффекта Томсона

Концы двух одинаковых стержней термостатируются, при этом температура $T_1 > T_2$. Внешнее напряжение имеет такую полярность, что в одном стержне (верхнем) электрический ток и градиент температуры совпадают по направлению, в другом они противоположно направлены. С помощью дифференциальной термопары фиксируется разность температур в точках a и b . В отсутствии тока температуры, безусловно, равны.

Включение электрического тока приводит к возникновению разности температур точек. Изменение полярности напряжения изменяет направление токов в стержнях, при этом знак разности ΔT_{ab} принимал противоположное значение.

Связь величины теплоты Томсона с величиной тока линейная и сравнима с джоулевой теплотой.

Таким образом, *эффект Томсона*, обусловленный зависящим от температуры распределением носителей заряда по энергиям в проводнике с током, проявляется в том, что при прохождении электрического тока I через проводник, вдоль которого существует градиент температуры dT/dx , в нем выделяется или поглощается теплота, пропорциональная току и градиенту температуры:

$$dQ_\tau = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dx, \quad (1.8)$$

где dQ_τ – количество теплоты, выделяемое в единицу времени на длине проводника dx , при условии, что градиент температуры на этом участке равен dT/dx , а ток I ; τ – коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом Томсона*: он зависит от свойств проводника (материала стержня) и от температуры. За положительный эффект $\tau > 0$ принимается в случае, когда при совпадении направлений тока и градиента температуры выделяется тепло. Это имеет место для сурьмы, железа, платины. Поглощение тепла в подобной конфигурации принято называть отрицательным эффектом, что характерно для висмута, цинка. Следует отметить, что абсолютная величина этого коэффициента для металлов весьма мала, порядка 10^{-5} В/К , что усложняет наблюдение эффекта. В то же время, точные расчеты термоэлектрических устройств обязательно учитывают его наличие. Значение КПД будет зависеть от вклада эффекта в процесс передачи тепловой энергии. Заметим также, что сам по себе эффект Томсона не имеет технического применения.

Рассмотрение термодинамических процессов дает следующее объяснение явлению Томсона.

Пусть в проводнике имеется градиент температуры и ток, направленный в сторону её возрастания. Следовательно, электроны из области высоких температур переходят в область низких температур. Их энергия уменьшается, таким образом, они передают её кристаллической решётке, нагревая последнюю. Это позволяет сравнить эффект Томсона с эффектом Пельтье для однородных проводников, неоднородность в которых сформирована градиентом температур.

Томсон, обобщая термодинамический подход, получил два фундаментальных соотношения, связывающих между собой коэффициенты Зеебека, Пельтье и Томсона. Эти соотношения называются *соотношениями Томсона*:

$$\alpha_{AB} = \tau_B - \tau_A + \frac{\alpha \cdot \Pi_{AB}}{\alpha \cdot T}; \quad \Pi_{AB} = \alpha_{AB} \cdot T. \quad (1.9)$$

1.1.4. КПД термоэлектрического элемента

Простейшей моделью термоэлектрического элемента является цепь, состоящая из двух различных однородных проводящих материалов, спаи которых находятся при различных температурах T_1 или (T_H) и T_2 или (T_C). Такую способность термопары генерировать напряжение при имеющей место разности температур на её концах можно использовать для создания тепловой машины, которая преобразует тепловую энергию непосредственно в электрическую. Эффективность такого преобразователя, как и любой тепловой машины, ограничена эффективностью цикла Карно и поэтому может быть представлена в форме:

$$\eta = (T_1 - T_2) \cdot \eta^*/T_1, \quad (1.10)$$

где η^* – зависит от геометрических параметров устройства, свойств материалов и от согласования генератора с нагрузкой.

Использование идеи термоэлектрического преобразования для производства электроэнергии стало возможным благодаря исследованиям отечественных ученых под руководством академика А. Ф. Иоффе, который в 1929 г. предложил применять в термоэлементах вместо металлических проводников полупроводниковые материалы, обладающие высокой термоэлектродвижущей силой – в 40–50 раз большей, чем в металлах (рисунок 1.12).

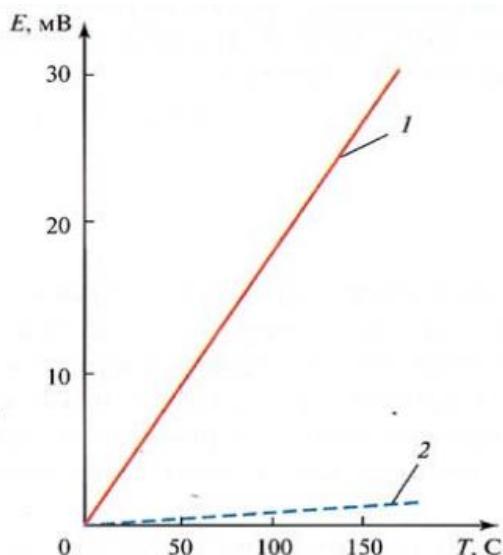


Рисунок 1.12 – Сравнительные значения термо-Э.д.с. в полупроводниковых материалах и в металлах в зависимости от разности температур горячего и холодного спаев: 1 – типичные полупроводники; 2 – типичные металлы

Для металлов коэффициент добротности Z , введенный А. Ф. Иоффе, очень мал и составляет 10^{-8} – 10^{-7} 1/К. Поэтому их используют только в измерительной технике (термопары).

Для некоторых полупроводников коэффициент добротности достигает $Z = 0,001$, 1/К, что позволяет получить КПД 10–15%.

При некоторых допущениях и с учетом основных источников необратимости процессов (передача теплоты теплопроводностью по термоэлектродам и *джоулем* тепловыделение в термоэлектродах) выражение для КПД *реального ТЭГ* можно представить в виде:

$$\eta_{\text{ТЭГ}} = \frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{\lambda_0 R_\Gamma}{\alpha^2} \cdot \frac{m+1}{T_1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot \frac{1}{m+1}}, \quad (1.11)$$

где $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$; $m = R_h/R_\Gamma$ – коэффициент нагрузки; R_h – сопротивление нагрузки; R_Γ – внутреннее сопротивление термоэлектрического элемента; λ_0 – удельная теплопроводность термоэлемента².

КПД термоэлемента определяется комплексом физических свойств материалов термоэлектродов. Комплекс называется *коэффициентом добротности* или термоэлектрическим показателем качества. Зависимость добротности стандартного термоэлектрического генераторного модуля (ТГМ) от средней рабочей температуры представлен на рисунке 1.13. Оптимальный коэффициент добротности термоэлектрического элемента:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\Lambda \cdot R} = \frac{\alpha^2}{(\sqrt{\lambda_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2})^2}, \quad (1.12)$$

где Λ – теплопроводность; λ – удельная теплопроводность; R – электрическое сопротивление; ρ – удельное электрическое сопротивление.

Коэффициент полезного действия при максимальной электрической мощности во внешней сети достигается при $m = \sqrt{1 + \frac{(T_1 + T_2)}{2} \cdot Z} = 1$:

$$\eta_1 = \eta_{\text{карно}} \cdot \frac{1}{\frac{4}{ZT_1} + 2 - \frac{1}{2} \cdot \eta_{\text{карно}}} = \eta_{\text{карно}} \cdot \eta^*, \quad (1.13)$$

где $\eta_{\text{карно}}$ – КПД цикла Карно.

Максимальный КПД

$$\eta_{\text{макс}} = \eta_{\text{карно}} \cdot \frac{m-1}{m+T_2/T_1}. \quad (1.14)$$

²Теплопроводность – это способность материальных тел проводить тепловую энергию от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела. Передача тепла происходит за счёт хаотического движения частиц тела (атомов, молекул, электронов и т. п.). Такой процесс может происходить в твёрдых, жидких и газообразных веществах. Тепло может передаваться либо при движении носителей, либо при колебании кристаллической решётки. Теплопроводность «ответственна» за ухудшение коэффициента преобразования термопары.

Суммируя все вышесказанное, можно прийти к заключению, что существуют три различных способа оптимизации эффективности термопары:

- 1) выбор материалов, обеспечивающих высокое значение добротности Z ;
- 2) выбор геометрических параметров, соответствующих минимальному значению произведения LR ;

3) выбор соответствующего сопротивления нагрузки по отношению к внутреннему сопротивлению устройства, т. е. выбор оптимального значения m .

Из уравнения (1.14) следует, что при $Z \rightarrow \infty$:

$$\eta^* = \frac{1}{1 + \frac{1}{2m} \left(1 + \frac{T_2}{T_1} \right)}. \quad (1.15)$$

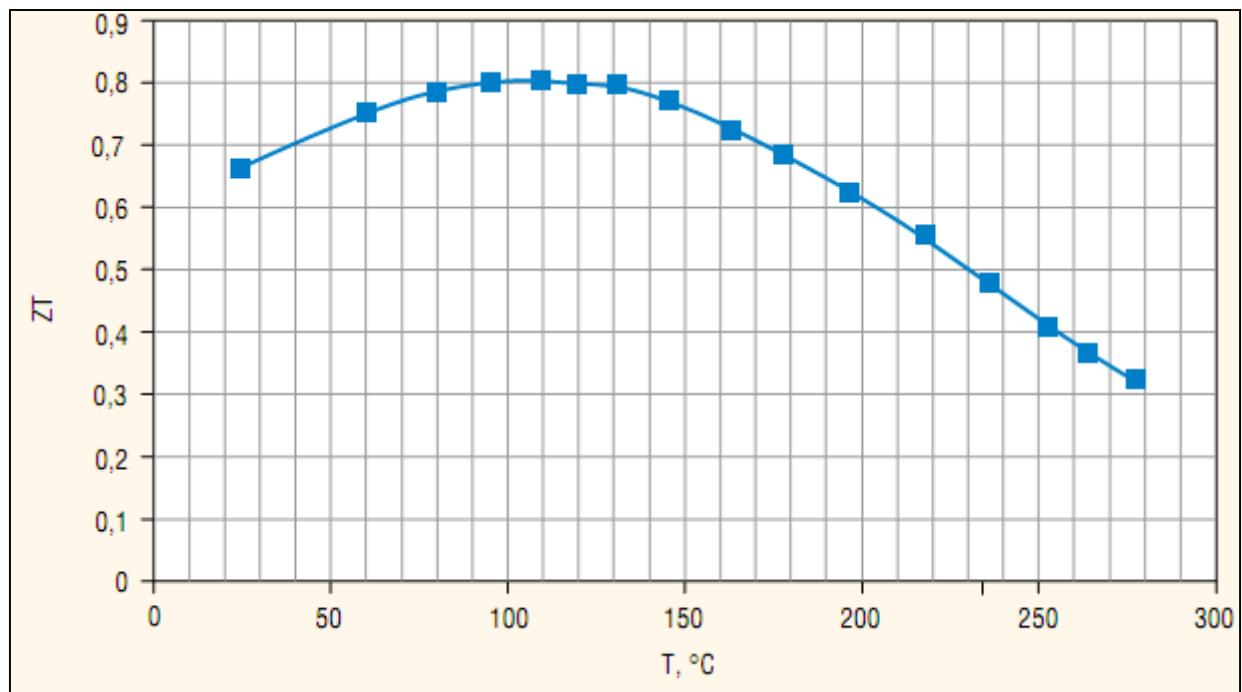


Рисунок 1.13 – Зависимость добротности стандартного ТГМ от средней рабочей температуры

Максимальное значение η^* будет иметь место при $m = \infty$. Это означает, что сопротивление нагрузки должно быть бесконечно больше сопротивления самой термопары. Другими словами, сопротивление термопары должно быть равно нулю, чего можно добиться, только если в качестве материалов для термопары использовать сверхпроводники. К сожалению, сверхпроводники имеют практический нулевой коэффициент Зеебека. Следовательно, даже теоретически нельзя получить эффективность $\eta^* = 1$. Даже с помощью новейших разработок в области материалов трудно добиться значения добротности Z больше $0,004 \text{ K}^{-1}$. Этим обстоятельством объясняется, почему эффективность термопар существенно меньше, чем термомеханических двигателей.

На рисунке 1.14 представлена зависимость η^* от T_1 (или T_H) (при T_2 (или T_C) = 300 K) для двух различных значений добротности Z .

В каждом из представленных случаев t имеет оптимальное значение. Из этих графиков следует, что эффективность термопар, изготовленных по современным технологиям, может составлять (теоретически) около 30 % КПД цикла *Карно*.

Современные тепловые электростанции имеют КПД на уровне 40 %. Если температура пара на входе в турбину равна 81 К, а температура на выходе – 311 К, то КПД цикла *Карно* составит 61,7 %.

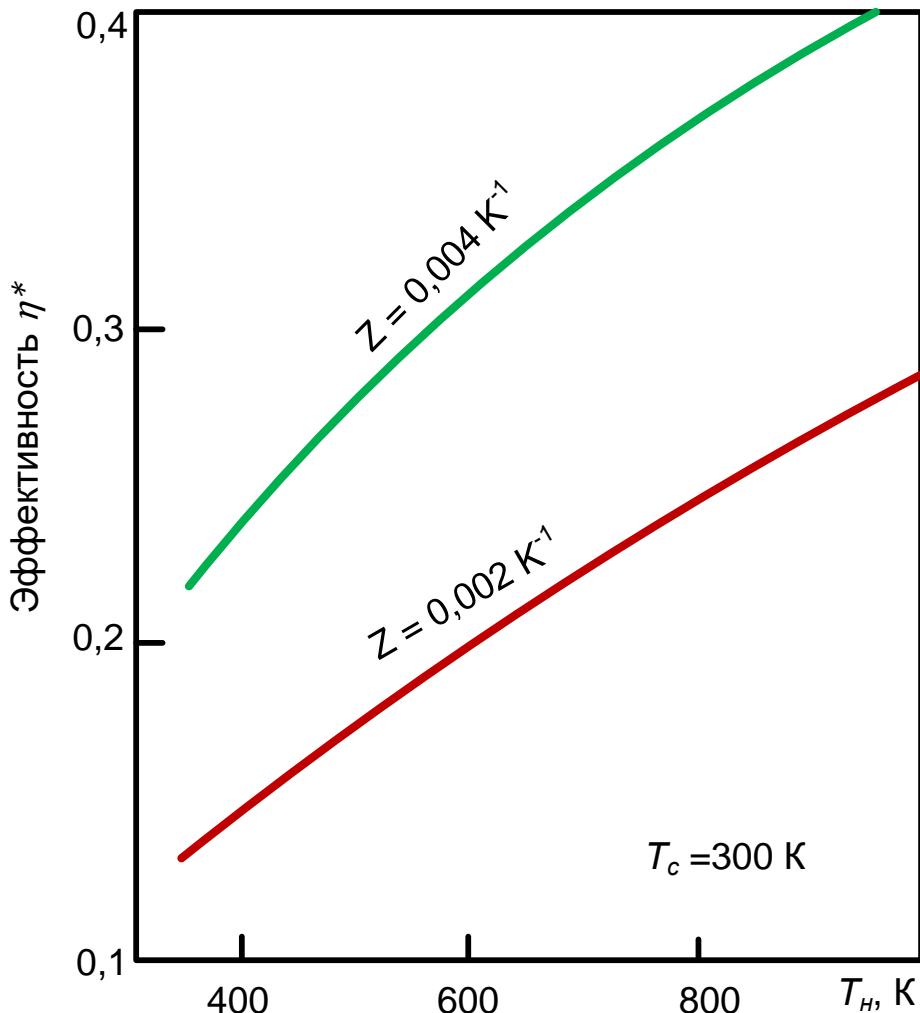


Рисунок 1.14 – Эффективность термопары в зависимости от температуры

Это означает, что реализуется 64 % эффективности цикла *Карно*, что более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель в термоэлектрических генераторах.

1.2. Основные направления в создании термоэлектрических материалов

Развитие прогресса термоэлектрических преобразователей взаимосвязано с повышением их технико-экономических показателей и уменьшением стоимости. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы проводились для нахождения более эффективных термоэлектрических материалов на недорогих и распространенных компонентах; для разработки и

внедрения современных технологических методов создания термоэлементов; для автоматизации процесса конструирования; для производства и контроля преобразователей и т.д.

На эффективность работы ТЭГ влияют значения α , λ , ρ , входящие в коэффициент добротности. Эти величины связаны друг с другом через концентрацию носителей зарядов и транспортные свойства.

Электропроводность σ и электронная часть теплопроводности λ_e связаны между собой по закону Видемана-Франца:

$$\frac{\lambda_e}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{K}{e} \right)^2 T = L \cdot T, \quad (1.16)$$

где $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; $L = 2,45 \cdot 10^{-8}$ Вт/(Ом·К²) – число Лоренца.

В связи с этой зависимостью и малостью коэффициента термо-э.д.с. Z и η металлических ТЭГ низки и практически не могут быть улучшены независимо от применения любого сочетания металлических пар. В течение последних 10–15 лет увеличение добротности практически не удалось. Значительно лучшими термоэлектрическими свойствами обладают полупроводниковые материалы, которые и используются сегодня для создания ТЭГ (рисунок 1.15).

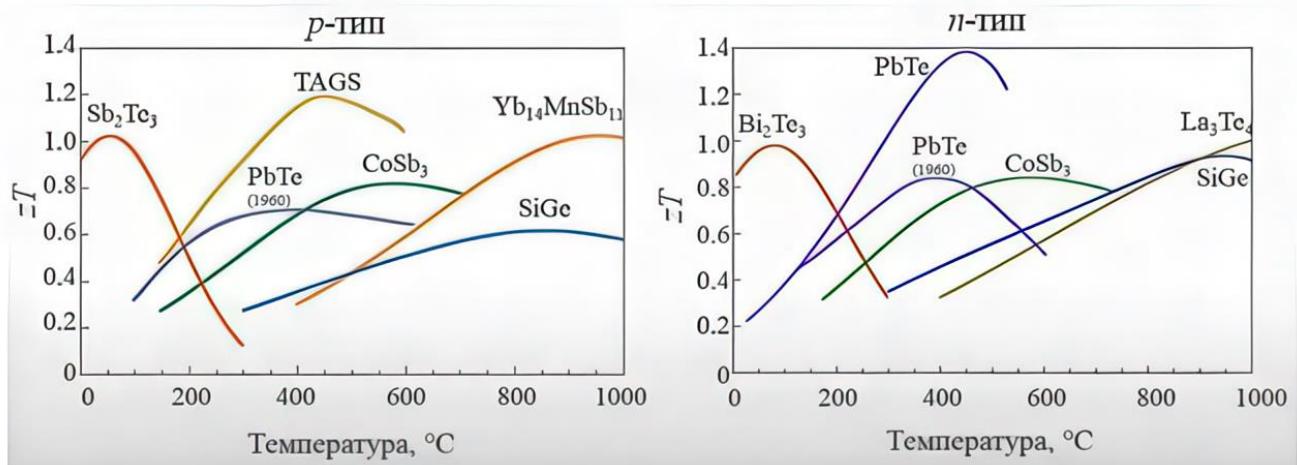


Рисунок 1.15 – Традиционные термоэлектрические материалы

На данный момент созданы для применения термоэлектрические материалы, имеющие очень высокие значения добротности в определенных интервалах температур. Исследование материалов ведется в направлении увеличения термоэлектрической добротности применяемых термоэлектрических материалов и нахождения новых эффективных композиций. Есть классические способы увеличения эффективности образованием сложных твердых растворов необходимого легирования, но также и технологические и другие варианты воздействия на материал: пластическая деформация, пленки, нитевидные и слоистые структуры, металлокерамика и т. д.

Термоэлектрические материалы, являясь основой всех ТЭГ, делятся на три группы по интервалу рабочих температур:

- *низкотемпературные* – 0–300 °C – халькогениды висмута и сурьмы $Bi_2(Te, Se)_3$ (*n*-тип) и $(Sb, Bi)_2Te_3$ (*p*-тип);
- *среднетемпературные* – 300–600 °C – теллурид свинца $PbTe$ (*n*- и *p*-тип), теллурид германия $GeTe$ (*p*-тип) и теллурид олова $SnTe$ (*p*-тип);
- *высокотемпературные* – 600°C и выше – сплавы кремния с германием $SiGe$ (*n*- и *p*-тип).

В таблице 1.4. приведены более распространенные применяемые материалы и их характеристики.

Таблица 1.4 – Характеристики применяемых генераторных материалов

Материал	Тип проводимости	$T, ^\circ C$ плавления	$\Delta T, ^\circ C$	Средняя добротность	Необходимая защита	
					от окисления	от сублимации
$Bi_2(Se, Te)_3$ – халькогенид висмута и сурьмы	<i>n</i>	600	100-300	1,2	+	-
$(Sb, Bi)_2Te_3$ – халькогенид висмута и сурьмы	<i>p</i>	620	100-300	1,2	+	-
$GeTe$ – теллурид германия	<i>p</i>	700	250-550	1,6	+	+
$SnTe$ – теллурид олова	<i>p</i>	780	300-600	0,7	+	+
$PbTe$ – теллурид свинца	<i>n</i>	920	100-550	1,2	+	-
$PbTe$ – теллурид свинца	<i>p</i>	920	100-550	1,4	+	-
$SiGe$ – сплав кремния и германия	<i>n</i>	1300	100-900	0,6	-	-
$SiGe$ – сплав кремния и германия	<i>p</i>	1220	100-900	0,4	-	-

Также имеются двухкомпонентные материалы, которые делятся по составу на жидкие полупроводниковые системы и расплавы солей (таблица 1.5), при анализе которых появляется доказательство отсутствия функциональных зависимостей между этими системами. Более широкий интерес отдается жидкой полупроводниковой системе: $AlSb$, $JnSb$, $PbSe$, PbS , Bi_2Te_3 , Bi_2Se_2 , Sb_2Te_2 , Mg_2Si , Mg_2Sn , Mg_2Pb . А также некоторые расплавы солей: AgF , $AgBr$, AgJ , $AgCl$, $LiCl$, $NaCl$, KCl , $CdCh$, $PbCb$, $ZnCa$, $CuBr$, CuJ , которые обладают редкими термоэлектрическими свойствами.

Таблица 1.5 – Деление по составу двухкомпонентных материалов

1	Халькогениды	
	Группы – I	$Cu, Ag, Au;$
	Группы – II	$Zn, Cd, Hg;$
	Группы – III	$B, Al, Ga, Jn, Tl;$
	Группы – IV	P, As, Sb, BL
2	Фосфиды	$Zn - P, Cd - P.$
3	Арсениды	$Zn - As, Cd - As.$
4	Антимониды	$Zn - Sb, Cd - Sb.$

Многие страны исследуют повышение характеристик известных низко- и среднетемпературных материалов. Создание новых классов высокотемпературных материалов, также с применением высших силицидов переходных металлов: высших силицидов марганца, силицида кобальта и дисилицида железа.

Высокотемпературные материалы стоят до десяти раз меньше, чем применяемые низко- и среднетемпературные материалы, такие как висмут, теллур, сурьма и т. д. Материалы высших силицидов марганца не имеют редких и токсичных компонентов, работают как на воздухе, так и в вакууме без применения защиты с максимальной температурой 1000°C, обладают высокой износостойкостью. Имеют сверхвысокую радиационную стойкость, есть возможность долгое время работать в активной зоне ядерного реактора.

Большой шаг к повышению характеристик возможен с применением наноструктур, которые позволяют изменять свойства материалов. Наноразмерные структуры проявляют и доминируют квантовые эффекты, которые определяют не проявление дефектов в монокристалле, большую часть энергонасыщенности, проявление химических реакций, процессов сорбции, спекания. Это придает структуре механические, электрические, теплофизические, магнитные свойства, позволяющие создание изделий с рабочими характеристиками, которые невозможны с применением стандартных состояний материалов. Данные работы по различным классам термоэлектрических материалов приведены на рисунке 1.16.

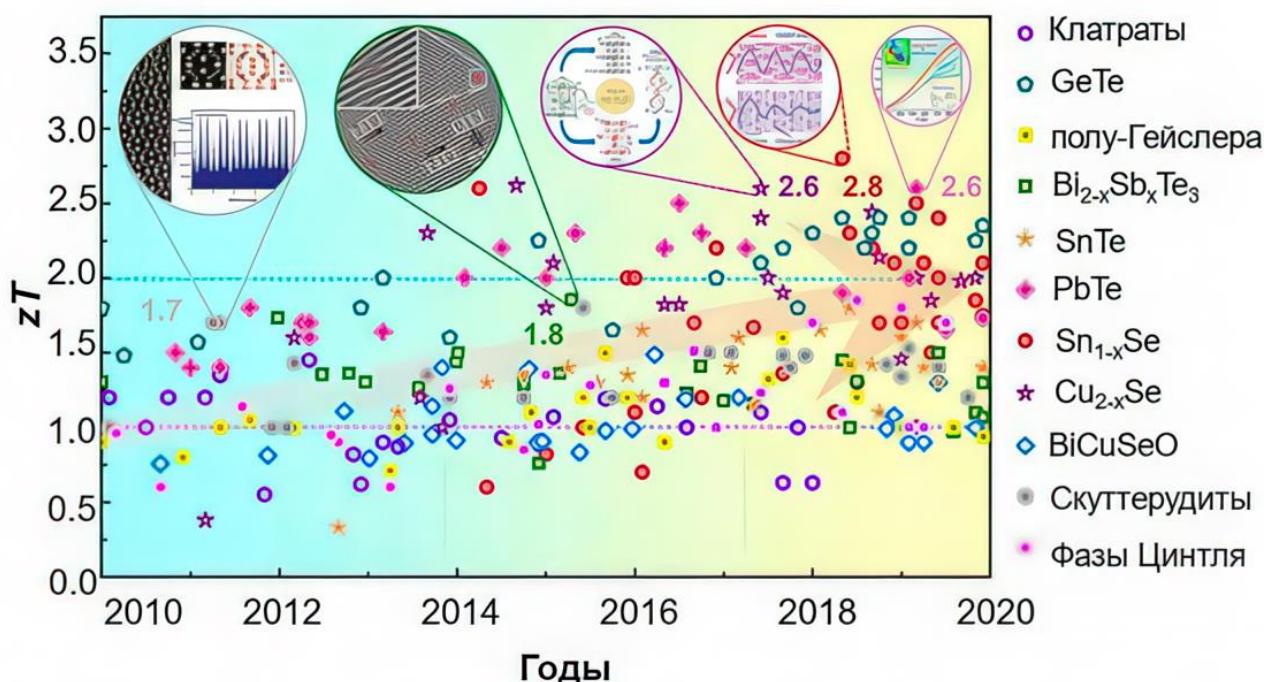


Рисунок 1.16 – Данные работы по различным классам термоэлектрических материалов

Главной целью является нахождение и создание более эффективных материалов, схем соединения и изоляции термоэлементов. Тепловые и электрические потери определяют низкий КПД – около 10 %. Следовательно, при разработке новых устройств имеется список требований с минимальными тепловыми и электрическими потерями с большой надежностью и самой высокой ресурсной стабильностью характеристик.

1.3. Основные технологии изготовления термоэлектрических материалов

Процесс производства термоэлектрических материалов имеет огромное воздействие на их свойства. В производстве полупроводниковых материалов, исходя из разработанных технологий на данный момент, используются самые современные методы воздействия на их свойства: температурой; давлением; магнитными полями; электрическими полями и так далее. Эти методы дают возможность для изменения свойств термоэлектрических материалов, произведенных горячим прессованием порошков, экструзией, напылением и др.

Рассмотрим некоторые методы изготовления материалов.

1) *Метод Бриджмена* (рисунок 1.17) или *направленная кристаллизация Чохральского* (рисунок 1.18) и *зонной плавкой*. Bi_2Te_3 и сплавы на его основе характеризуются сильной анизотропией роста: изменение скорости роста в направлении, перпендикулярном плоскостям спайности, в разы меньше, чем вдоль плоскостей. Термоэлементы изготавливаются прессованием, экструзией и методом непрерывного литья. Термоэлектрические пленки образуются вакуумным напылением.

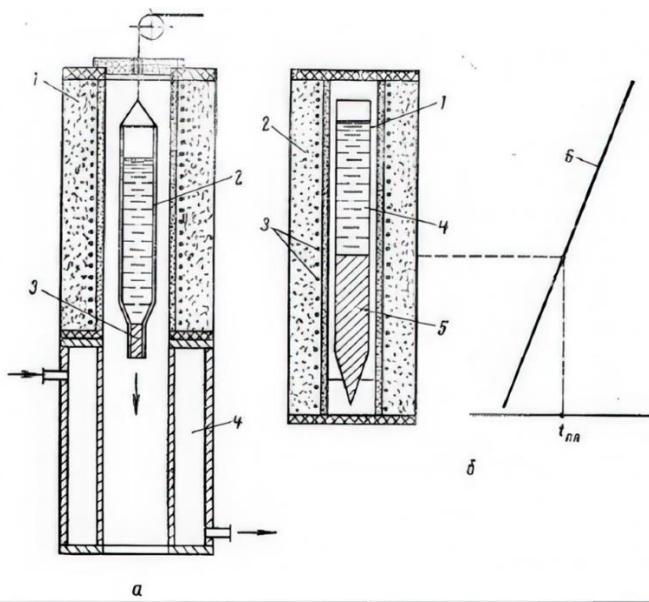


Рисунок 1.17 – Выращивание монокристалла по методу Бриджмена:

- a* – при использовании затравочного кристалла; 1 – нагревательная секция;
- 2 – контейнер; 3 – затравочный кристалл; 4 – охлаждающая секция; 6 – при медленном понижении подаваемой на печь мощности: 1 – контейнер; 2 – печь;
- 3 – нагревательная спираль; 4 – расплав; 5 – монокристалл; 6 – распределение температуры по длине печи

Максимальная термоэлектрическая добротность при очень низких температурах достигается легированием, которое при пониженных температурах имеет малые концентрации примесей и малую электропроводность. Выращивание монокристаллов с предотвращением концентрационного переохлаждения, которое приводит к уменьшению добротности, есть необходимость применения больших градиентов температуры до 250 К/см и малых скоростей роста – 0,07 мм/мин.

Висмут и сплавы Bi-Sb. Монокристаллы висмута проще всего выращивать методом зонной перекристаллизации, *Бриджмена, Чохральского*. Висмут с сурьмой даёт непрерывный ряд твердых растворов. Монокристаллы сплавов висмут-сурьма имеют рост с учётом технологических особенностей, которые обуславливаются огромной разностью между линиями ликвидуса и солидуса.

При таких условиях расплав у фронта кристаллизации имеет возможность перехода в переохлажденное состояние, это в свою очередь дает образование мозаичной структуры. Переохлаждение можно предотвратить большим градиентом температуры и малой скоростью роста кристалла. Распространены градиенты около 20 К/см и скорости не выше 0,3 мм/ч. Чертой ряда носителей тока в висмуте является близкое расположение валентных зон и зон проводимости, еще необходимо упомянуть огромное изменение параметров спектра, которое достигается воздействием давления, магнитного поля, примесей, с изменением температуры и состава сплавов. Управление параметрами спектра носителей тока даёт организовывать оптимизацию свойств материалов с дальнейшим достижением максимальной термоэлектрической добротности.

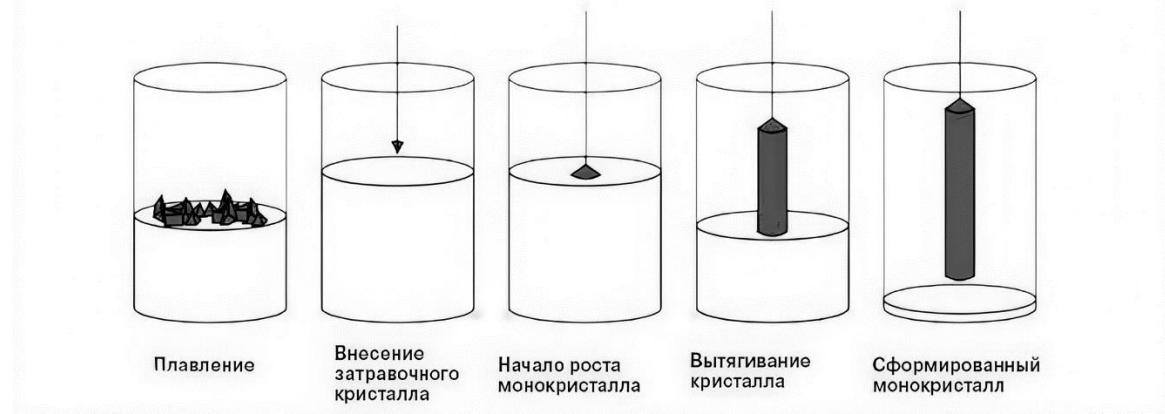


Рисунок 1.18 – Метод выращивания кристаллов Чохральского

2) Методы Бриджмена, Чохральского, зонной плавки и из газовой фазы.

Стехиометрический состав *PbTe* достигается при избытке свинца примерно 0,4 %, а также созданием избыточного давления паров летучего компонента. При производстве термоэлементов применяется горячее прессование с температурой 200–600°C и давлением 4–8 тс/см³ продолжительностью несколько минут. Ширина запрещенной зоны 0,36 эВ, с изменением температуры практически не изменяется. Теплопроводность при температуре 250–550°C достигалась фононами, электронами и биполярной диффузией. Производятся *PbTe* из галогенов: хлора, брома, йода или примесей

свинца, платины, марганца, никеля, галлия, ниобия, германия, тантала, урана, сурьмы, меди, цинка, алюминия. Легирование до необходимой концентраций дает возможность достижения высоких значений добротности.

3) *Карбид кремния SiC*. Найдено огромное количество кристаллических форм карбида кремния. Полиморфизм *SiC* имеет характер большого количества схожих кристаллических структур, именуемых политипами. Это вариации химического соединения, которые одинаковы в двух измерениях, но имеют различия в третьем. Следовательно, можно представить *SiC* в виде слоев, сложенных в стопку в определённой последовательности. Карбид кремния – полупроводник, с типом проводимости, зависящей от примесей. Проводимость n-типа достигается легированием азотом или фосфором, а p-тип алюминием, бором, галлием или бериллием. Металлическая проводимость достигается сильным легированием бором, алюминием и азотом. Сверхпроводимость найдена в политипах *3C-SiC:Al*, *3C-SiC:B* и *6H-SiC:B* при температуре 1,5 К. На данный момент карбид кремния – один из типичных материалов для производства нагревательных элементов, имеющих возможность работать при температурах до 800°C на воздухе и до 1400°C в нейтральной или восстановительной среде, что в разы выше, чем у многих металлических нагревателей. Нагревательные элементы из карбида кремния имеют применение при плавлении цветных металлов и стекла, при термической обработке металлов, *флоат-стекла*, при производстве керамики, электронных компонентов и так далее.

1.4. Схемы термоэлектрогенераторов

Полупроводниковые материалы при использовании имеют высокую физико-химическую активность. При коммутации металлической шины и ответвлений термоэлементов происходит взаимная диффузия материалов, это приводит к отравлению и оксидированию полупроводниковых материалов. Существует огромное количество коммутационных материалов и методов коммутации.

На эффективность ТЭГ существенное влияние оказывают также термические сопротивления на горячей и холодной поверхностях.

Термоэлементам при работе в диапазоне температур необходимо иметь переменную концентрацию носителей тока по длине. Эти термоэлементы создаются из отдельных частей – каскадов с необходимой концентрацией носителей тока, соответствующей средней температуре (рисунок 1.19). При применении каскадов из различных материалов каждый материал располагают в самом выгодном для него температурном диапазоне. Исполнение возможно двумя вариантами – *каскадированием* (рисунок 1.20) или *сегментированием* (рисунок 1.21).

Главные достоинства ТЭГ: бесшумность в связи с отсутствием движущихся элементов; полная автономность; высокая надежность; простота эксплуатации; большой ресурс работы; широкое применение в различных областях техники.

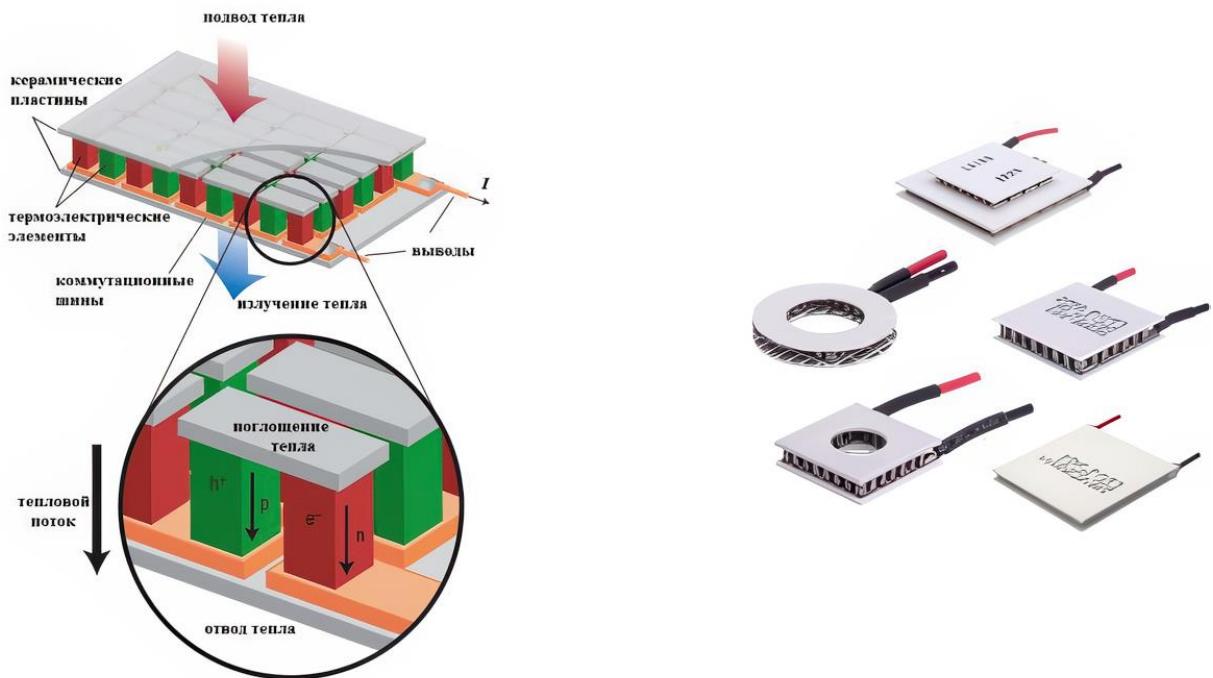


Рисунок 1.19 – Термоэлектрический модуль

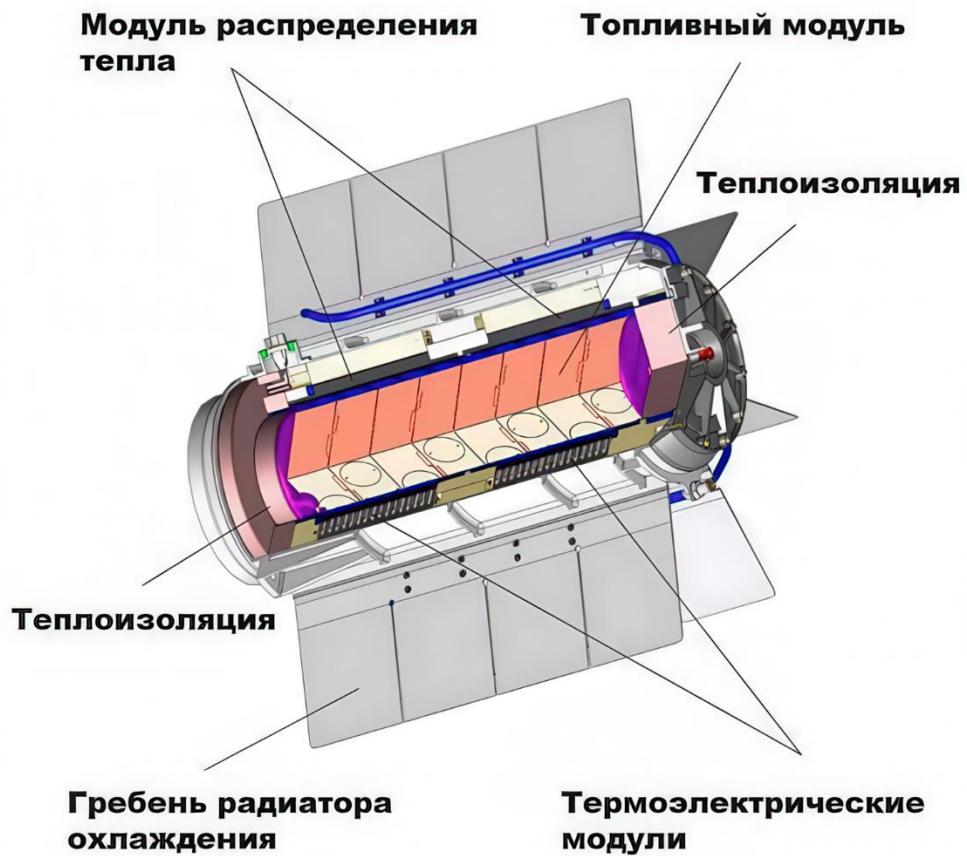


Рисунок 1.20 – Каскад термоэлектрических элементов

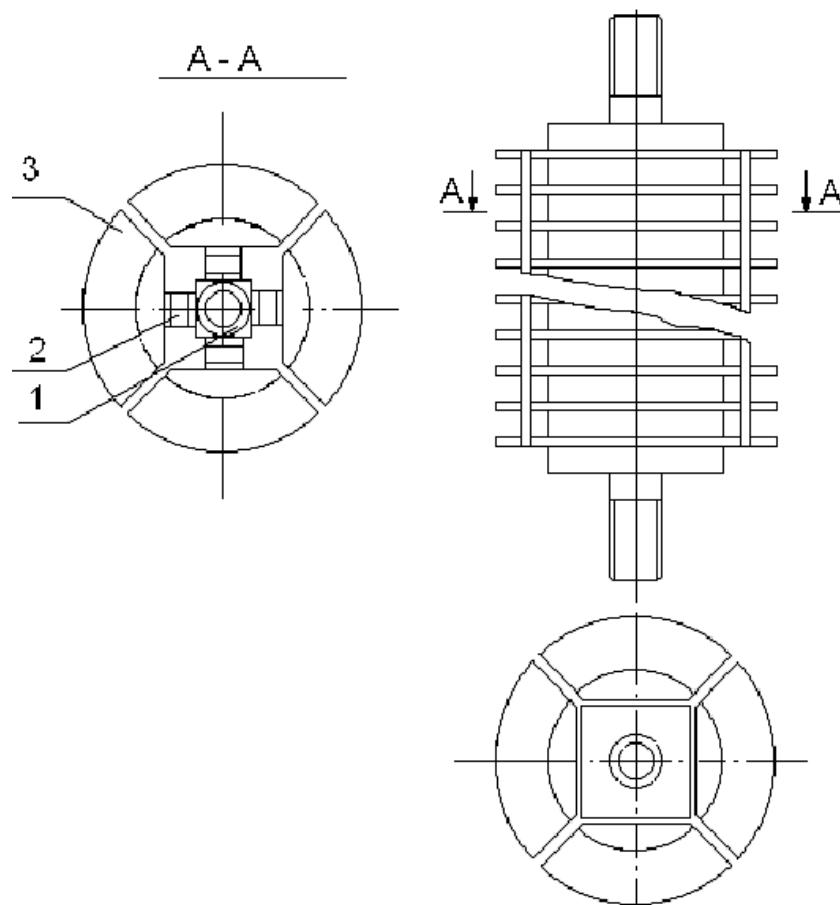


Рисунок 1.21 – Конструкция термоэлектрического теплообменного аппарата с поперечными ребрами, выполненными сегментарно

1.5. Разработки термоэлектрических генераторов

Источниками тепла для термоэлектрического генератора являются: тепло продуктов сгорания твердого, жидкого, газообразного топлива; радиоизотопы, ядерные реакторы, солнечная энергия.

При использовании органического топлива в качестве источника тока для термоэлектрогенераторов определяющим критерием качества изделия является КПД преобразования тепла. Предполагается, что для того, чтобы повысить КПД, нужно выбирать термоэлектрические материалы с широким интервалом температур, обладающими максимальными средними значениями добротности. Но с увеличением разности температур растет температура горячих спаев, отсюда следует, что растет и температура выходящих из термогенератора газообразных продуктов горения, что уменьшает КПД горелочных устройств и КПД изделия в целом. Учитывая это, одновременно растут тепловые потери с поверхностных частей генератора. Исходя из этого, чтобы получить максимальный КПД, температура горячего спая термобатареи должна быть оптимального значения.

В зависимости от вида горелочного устройства и исходя из расчетных и опытных данных можно увидеть, что оптимальное значение температуры может изменяться примерно от 300 до 600 °С. При производстве ТЭГ на органическом топливе для получения максимального КПД, или с минимальным расходом

топлива, необходимо выбрать халькогенидные материалы с максимальным значением добротности при интервале температуры от 100 до 600 °С. Но огромная стоимость и дефицит данных исходных веществ, таких как германий, теллур, висмут, уменьшают объемы производства термоэлектрогенераторов и определяют их высокую стоимость.

Термоэлектрические генераторы могут сочетаться с компактными и мощными источниками тепла, которыми являются *ядерные реакторы*.

Имеются два типа компоновки:

- установка ТЭГ в активную зону реактора, но при соблюдении условия применения материалов с большой радиационной стойкостью;

- вынесенным ТЭГ с применением тепловых труб, установка которых не отличается от других источников тепла.

Использование *солнечной энергии* в качестве источника тепла: в установку необходимо добавить систему для фокусировки солнечной энергии. Среднестатистические данные показывают, что на поверхность Земли приходится $800 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ($700 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) солнечной энергии. Правильнее всего использовать параболоидные концентраторы, которые увеличивают удельный поток солнечной энергии приблизительно в тысячу раз, тепловой поток в фокальном пятне концентратора достигает 700 тыс. $\text{kcal}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

1.5.1. Термоэлектрические генераторы на органическом топливе

На данный момент в основе всех разработок находятся два типа ТЭГ, непосредственно преобразующих тепло, при сжигании газовых или жидкого топлив:

- ГТГ-150Н: электрической мощностью 150–1500 Вт; напряжение 27–28 В; топливо – природный газ (рисунок 1.22) и термоэлектрические газовые генераторы ГТЭГ-500 (рисунок 1.23).

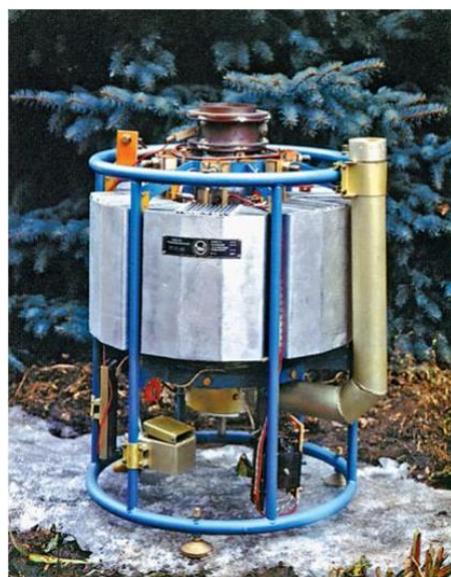


Рисунок 1.22 – Термоэлектрический генератор ГТГ-150Н



Рисунок 1.23 – Термоэлектрические газовые генераторы ГТЭГ-500 мощностью 500 Вт производства ООО «Экоген» (г. Санкт-Петербург)

- *ГТЖ-160*: генератор термоэлектрический ГТЖ-160 предназначен для использования в составе автономного источника питания АИП-320Ж для электропитания и обогрева радиоаппаратуры. В ГТЖ-160: ГТЖ – генератор термоэлектрический жидкотопливный; 160 – мощность, Вт. электрической мощностью 160 Вт; напряжение 27–27,5 В, дизельное топливо.

Генератор рассчитан на работу в термостатированном контейнере при температуре от 10 до 50°C. Высота над уровнем моря до 3000 м. Температура окружающего воздуха от минус 50 до 50°C. Относительная влажность воздуха до 98 % при 25°C (рисунок 1.24).



Рисунок 1.24 – Применение термоэлектрического генератора ГТЖ-160 на станции катодной защиты в нефтегазовой отрасли

Основным элементом термогенератора является термоэлектрическая батарея, преобразующая тепловую энергию от сгорания жидкого топлива в электрическую энергию. Термоэлектрическая батарея состоит из ряда последовательно соединенных групп термоэлементов, которые заключены в герметичный кожух, заполненный инертным газом для предотвращения окисления термоэлементов кислородом воздуха.

Приведенные в таблице 1.6 данные для разновидностей АИП мощностью 400, 640 и 900 Вт показывают, что фактически одна и та же конструкция АИП позволяет получить гамму свойств, которые могут удовлетворять запросы различных потребителей.

Таблица 1.6 – Характеристики автономных источников питания (АИП) с ТЭГ

Параметры, дополнительные сведения	АИП на газообразном топливе с ГТГ-150			АИП на жидкокомпьютерном топливе с ГТЖ-160		
	АИП - 400	АИП - 600	АИП - 900	АИП - 320	АИП - 480	АИП - 800
Электрическая мощность, Вт	400 (2×200)	640 (2×320)	900	320	480	800
Число ТЭГ в установке: рабочие резервные	4 2	4 2	5 1	2 1	3 1	5 1
Электрическая мощность одного ТЭГ, Вт	130	190	190	180	180	180
Номинальное напряжение АИП, В	27^{+1}_{-2}					
Расход топлива АИП и ТЭГ, кг/ч: часовой АИП, кг/ч (природный газ м ³ /ч) годовой АИП часовой ТЭГ (природный газ м ³ /ч)	1,5 (2,25) 13200 0,325 (0,49)	2,0 (3,0) 17520 0,475 (0,72)	2,4 (3,54) 21200 0,475 (0,72)	1,34 - 11750 0,67 -	2,02 17650 0,67	3,36 29400 0,67
Удельный расход топлива, кг/(кВт·ч): АИП ТЭГ	3,76 2,50	3,14 2,50	2,66 2,50	4,18 3,50	4,18 3,50	4,18 3,50
Запас топлива на автономность с учетом 20% остатка, т	15,75	21,00	25,50	7,00	19,50	17,70
Габаритные размеры блока энергопитания АИП, мм, не более: ширина длина высота (транспортная)	3240 6330 6600 (3200)	3240 6330 6600 (3200)	3240 6330 6600 (3200)	3240 4800 4800 (2600)	3240 5500 6600 (3200)	3240 6330 6600 (3200)
Масса блока энергопитания АИП, кг	8200	8200	8200	6800	7400	8200
Ресурс, лет	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

Все три установки имеют общую конструкцию и комплектацию АИП. Их различие состоит в способе коммутации генераторов и их нагрузки и в режимах эксплуатации ТЭГ.

Так, АИП-400 и АИП-600 обеспечивают питание двух гальванически связанных потребителей по 200 и 320 Вт соответственно. Эти установки имеют 50%-е резервирование.

Установки на жидком топливе АИП-320, АИП-480 и АИП-800 отличаются между собой числом рабочих ТЭГ (2,3 и 5 соответственно) при одном генераторе, находящемся в холодном резерве.

Во всех указанных АИП резервирование осуществляется включением резервного ТЭГ и автоматической заменой им отказавшего рабочего ТЭГ.

Термоэлектрические батареи вместе с теплоотводящими радиаторами пластинчатого типа расположены вокруг горячего теплоприемника и прижаты к нему с помощью плоских пружин. Внутри теплоприемника, имеющего форму полой шестигранной призмы и являющейся опорным элементом генератора, расположен излучающий стакан, выравнивающий тепловое поле по поверхностям, контактирующим с термобатареями.

Все элементы конструкции устанавливаются внутри трубчатой опорной рамы. В нижней части генератора расположены горелочное устройство и элементы топливной системы – электромагнитный клапан, дозатор расхода топлива и пусковой подогреватель топлива. Горелочное устройство состоит из жидкотопливной горелки испарительного типа с теплозащитным кожухом, промежуточного топливного бачка-отстойника и воздухозаборного устройства, соединенного с воздуховодом, в котором установлен вентилятор подачи воздуха в горелку. В нижней части генератора имеются штепсельные разъемы для стыковки его с блоком стабилизации напряжения, автоматики и управления.

ТЭГ помещаются в контейнеры с теплоизоляцией. От необходимой мощности и вида топлива производится установка от 1 до 6 ТЭГ с горелками на различном топливе.

Из-за высокой стоимости ТЭГ не используются в крупной стационарной энергетике. Область их применения – сравнительно малые автономные источники электроэнергии:

- радиорелейные и волоконные системы связи;
- автоматика и телемеханика трубопроводного и ж/д транспорта;
- гидрометеорологические и сейсмические автономные станции;
- маяки навигационных световых систем и радиомаяки.

Стоимость установленной мощности за 1 кВт создаваемых термогенераторов находится в диапазоне от 120 до 620 тыс. рублей, в основном из-за уникальности и единичности выпускаемой продукции и отсутствия организации работ по созданию части конструкционных узлов. С повышением уровня конструкторских разработок и запуска в серийное производство возможно снижение до 31 тыс. рублей за 1 кВт, что дает возможность увеличения области применения термоэлектрических генераторов. Общий КПД ТЭГ колеблется от 2 до 10 % в зависимости от типа, мощности и условий его эксплуатации. В лучших лабораторных образцах эта величина достигает 15 %, и предполагается, что может быть увеличена до 20–25 %.

1.5.2. Термоэлектрические генераторы с фотоэлементами (солнечными батареями)

Для электроснабжения предприятий связи, расположенных в районах с большим числом солнечных дней, где отсутствуют электрические сети общего пользования, целесообразно применение автономных установок на базе солнечных электрогенераторов (СЭ).

Внедрение на сети связи СЭ приходится на 80-е годы XX века. Пионерами в этой области выступили страны Западной Африки и Австралии. Описывается установка питания, внедренная в 1989 г. в Австралии для цифровой системы связи. В том же году английская компания *BritishTeleconsult* приступила к созданию в Западной Африке установок с использованием СЭ и резервными аккумуляторными батареями мощностью 52 кВт вместо дизель-генераторных и парогенераторных электростанций для электропитания аппаратуры радиорелейных станций. Весьма интересные работы были опубликованы в ряде европейских и американских изданий. В России в 1990 г. вышла работа, в которой исследовался автономный источник с СЭ для электропитания аппаратуры волоконно-оптической системы передачи.

Отметим два важнейших фактора, которые привлекают особое внимание, а именно экологическая безопасность и неограниченные во времени запасы солнечной энергии. В то же время при применении СЭ следует учитывать такие существенные проблемы, как флюктуации солнечной радиации в зависимости от погоды и месторасположения установки, а также сравнительно низкая плотность энергии солнечной радиации, мощность которой не превышает $2 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Технико-экономические показатели СЭ определяются в основном стоимостью фотоэлементов и их КПД. Наибольшее применение находят фотоэлементы на основе монокристаллического кремния. Этот тип элементов характеризуется отработанной технологией изготовления, достаточно высоким КПД, стабильностью и надежностью. Коммерческие образцы имеют КПД 14–17 %, в то время как отдельные лабораторные — 22–26 %. Что касается стоимости монокристаллических элементов, то за последующие пять лет ожидается ее снижение на 10–15 %. В промышленных установках возможны комбинации различных источников электроэнергии и СЭ, например, аккумуляторные батареи, дизель-генераторы, турбо и теплогенераторы. Перспективны установки на базе СЭ и аккумуляторов. Такие установки, как правило, содержат СЭ, статические преобразователи, аккумуляторные батареи или молекулярные накопители и систему контроля и управления. При выборе параметров отдельных устройств следует руководствоваться характером работы электрогенератора (в автономном режиме), технологической нагрузкой, мощностью световой энергии на квадратный метр для предполагаемого места размещения, соотношением солнечных и пасмурных дней в году, а также ожидаемыми экономическими показателями, включая эксплуатационные расходы.

Примером действующей на сети электросвязи промышленной установки, предназначеннной для электропитания промежуточной радиорелейной станции (РРС), может служить электростанция, схема которой представлена на рисунке 1.25.

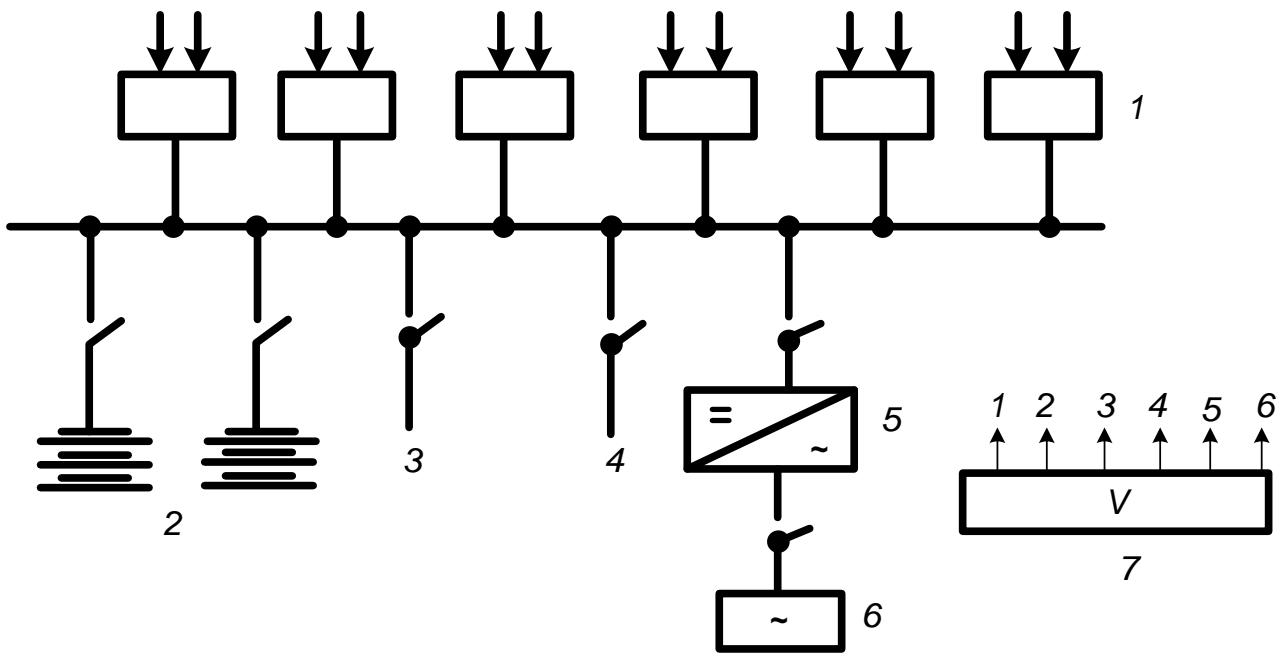


Рисунок 1.25 – Электростанция ТЭГ с использованием солнечных батарей:
 1 – солнечные батареи; 2 – аккумуляторные батареи; 3 – технологические
 нагрузки; 4 – вспомогательные нагрузки; 5 – выпрямители; 6 – АДЭС;
 7 – управляющее устройство

Солнечная батарея содержит 48 модулей, каждый из которых рассчитан на мощность 75 Вт при выходном напряжении 48 В.

Модули соединены последовательно по четыре штуки и собраны в шесть последовательно включенных групп. Общая площадь поверхности батареи составляет 30 м². Все модули установлены в одной плоскости и ориентированы на юг под углом 38–42° к горизонту. Двухгруппная аккумуляторная батарея на напряжение 48 В укомплектована аккумуляторами с номинальной емкостью 900 А·ч. Запас емкости рассчитан на 120 часов автономной работы.

Автоматизированный дизель-генератор на 8,5 кВА обеспечивает питание нагрузки и заряд аккумуляторной батареи, когда солнечная батарея не выдает запланированной мощности.

Управляющее устройство следит за работой оборудования и при необходимости включает или отключает дизель-генератор или группы солнечных батарей, а также выдает в систему телемеханики РРС информацию об оборудовании. Аппаратура РРС потребляет до 800 Вт электрической энергии постоянного тока при напряжении 48 В.

Все оборудование электростанции, за исключением солнечных батарей, размещается в терmostатированном контейнере. Параметры климата в контейнере поддерживаются автоматически и (или) вручную за счет обогрева дизель-генератором и работы вентиляции.

Солнечный ТЭГ мощностью 5 Вт с концентратором. ТЭГ с концентратором, являющийся моделью более мощной установки, испытан на экспериментальной базе ФТИ АН Туркменистана [9].

У этого ТЭГ (рисунок 1.26) каждая ветвь 7 ТЭЭЛ припаяна к алюминиевому полуцилиндру 8. Два таких полуцилиндра, разделенные электроизоляцией 9, образуют ТЭЭЛ, коммутация ветвей которого (а также с соседними ТЭЭЛ) осуществляется шинами с тепловыми компенсаторами 5, 10.

Нижняя часть ТЭЭЛ с упомянутыми полуцилиндрами вставляется в отверстие корпуса 3 с охлаждающей водой, сборка из полуцилиндров уплотняется с корпусом при помощи колец из вакуумной резины 2 и гайки из диэлектрика 1. Батарея ТЭЭЛ предназначена для работы в интервале температур 50–450 °С и изготовлена из 25 последовательно соединенных ТЭЭЛ из ТЭМ на основе свинца и селена. Длина ветви ТЭЭЛ 13 мм, сечение 13×6 мм.

Для коммутации по горячей стороне использованы шины из материала на основе никеля. Для получения диффузионного коммутационного перехода применялся селен или теллур, прошедшие термообработку в восстановительной среде при 600–700 °С. Омическое сопротивление контакта составляло от 10^{-4} до 10^{-6} Ом/см².

Испытанию стойкости этой коммутации при 450 °С в течение 1200 ч на воздухе показало, что сопротивление переходной зоны за этот период не меняется. По холодной стороне коммутация производилась припоем из 50 % висмута, 25 % олова и 25 % свинца с предварительным нанесением на контактную поверхность палладиевого покрытия гальваническим способом.

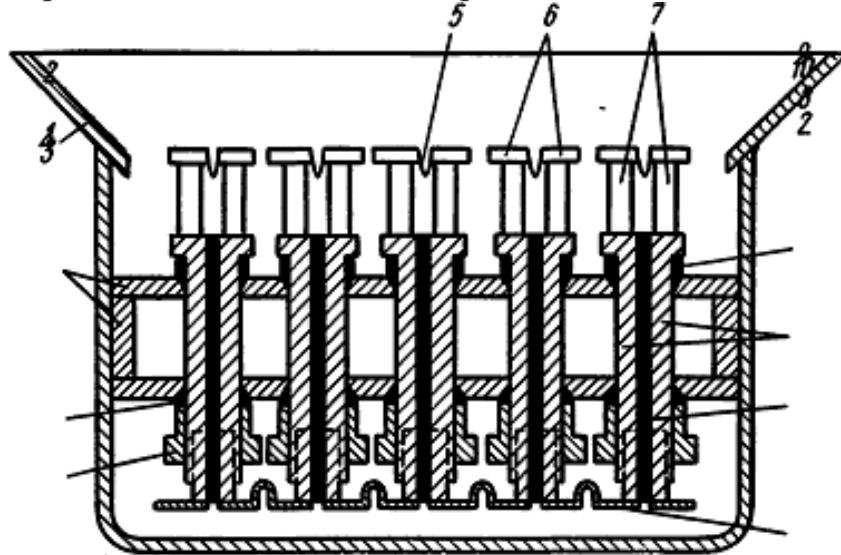


Рисунок 1.26 – Конструкция солнечного ТЭГ с концентратором:

- 1 – гайка из диэлектрического материала; 2 – уплотнение из вакуумной резины;
- 3 – пластмассовый корпус с охлаждающей водой; 4 – отражающий экран;
- 5 – тепловой компенсатор; 6 – соединительная пластина горячей стороны ТЭЭЛ; 7 – ветви ТЭЭЛ; 8 – полуцилиндры из Al; 9 – электроизоляция;
- 10 – соединительная шина с компенсатором холодного конца ТЭЭЛ

Общее омическое сопротивление ТЭГ – 0,156 Ом, сопротивление контактов на горячей стороне 25 – 250 мкОм/см², на холодной стороне 40 – 170 мкОм/см², сопротивление соединительных шин на холодной стороне 250 мкОм/см².

1.5.3. Электростанция ТЭГ с применением паротурбогенераторов

Для электроснабжения предприятий связи, расположенных в районах, где отсутствует энергетическая сеть общего пользования, успешно применяются автономные паротурбогенераторные электростанции постоянного тока [10]. Особенностью этих электростанций являются высокая надежность, длительный срок службы, отличная экология, минимальное обслуживание. В качестве топлива может использоваться природный газ, керосин или дизтопливо.

Как правило, электростанция содержит два паротурбогенератора, аккумуляторную батарею, горелку и блок контроля и управления. Паротурбогенератор работает следующим образом. Горелка нагревает в паротурбогенераторе жидкость, часть которой испаряется, и получившийся пар вращает колесо турбины, на валу которой расположен ротор генератора. Далее пар поступает в конденсатор, где охлаждается, конденсируется и полученная жидкость откачивается насосом в парогенератор. Цикл повторяется до тех пор, пока работает горелка. Система полностью герметизирована и никаких потерь рабочей жидкости не происходит. Электрический генератор вырабатывает трехфазный ток, который выпрямляется. Имеется система регулирования подачи топлива в зависимости от нагрузки. Паротурбогенератор отключается, если выходное напряжение постоянного тока ниже или выше заданной нормы или при превышении температуры рабочей жидкости. Кроме того, имеется защита от коротких замыканий и превышения скорости вращения турбины. Для заряда аккумуляторной батареи в генераторе предусмотрен необходимый запас мощности, а в схеме станции – возможность автоматического и ручного переключения батареи из режима непрерывного подзаряда в режим ускоренного заряда.

Обратный перевод в режим непрерывного подзаряда производится либо вручную, либо автоматически после истечения заданного времени заряда.

Выпускаются паротурбогенераторы на мощности от сотен ватт до нескольких киловатт на различные выходные напряжения. Они рассчитываются на работу от -60 до $+45$ °C (арктический вариант) и на высоте до 2000 м (специальный вариант до 4500 м).

Иллюстрацией к промышленным паротурбогенераторным установкам могут служить изделия известной фирмы «*Ормат*». По данным фирмы, опыт эксплуатации этих установок показывает 95 % вероятность безотказной работы за время не менее 2×10^5 часов, что значительно превышает нормы международных требований к первичным источникам энергии для удаленных телекоммуникационных систем. Установки характеризуются низкими эксплуатационными расходами, что объясняется высокой надежностью паротурбогенераторов за счет их конструктивных особенностей.



Рисунок 1.27 –Установка фирмы «Ормат»

Модельный ряд фирмы «*Ormat*» включает установки на выходную мощность от 0,2 до 4,5 кВт при напряжении постоянного тока 24,48 и 125 В. Изменения выходных напряжений не выходят за пределы $\pm 3,5\%$. Установки работают в широком диапазоне температур и на высоте до 4,5 км над уровнем моря. Топливом могут служить природный или сжиженный газ, дизельное топливо и керосин. Средний расход топлива при полной нагрузке паротурбогенератора и температуре окружающей среды +25 °С составляет 17600 ккал/ч на 1 кВт выходной мощности (рисунок 1.27).

По требованию заказчика фирма может поставлять гибридные установки с СЭ и ветрогенераторами. Кроме того, ТЭГ можно использовать в системе утилизации отработанных газов ДВС. Пример схемы ТЭГ в ДВС и распределение температур по поверхности представлены на рисунке 1.28 [11].

1.5.4. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы

Еще одним очень интересным способом получения энергии, из нетрадиционной энергетики, является генерация её при радиоактивном распаде.

Установки, использующие данную технологию, называются *радиоизотопными термоэлектрическими генераторами* (далее – РИТЭГ). РИТЭГ преобразует тепловую энергию, выделяющуюся в процессе естественного неконтролируемого распада активных веществ, в электроэнергию при помощи термоэлектрических преобразователей (рисунок 1.29) [12].

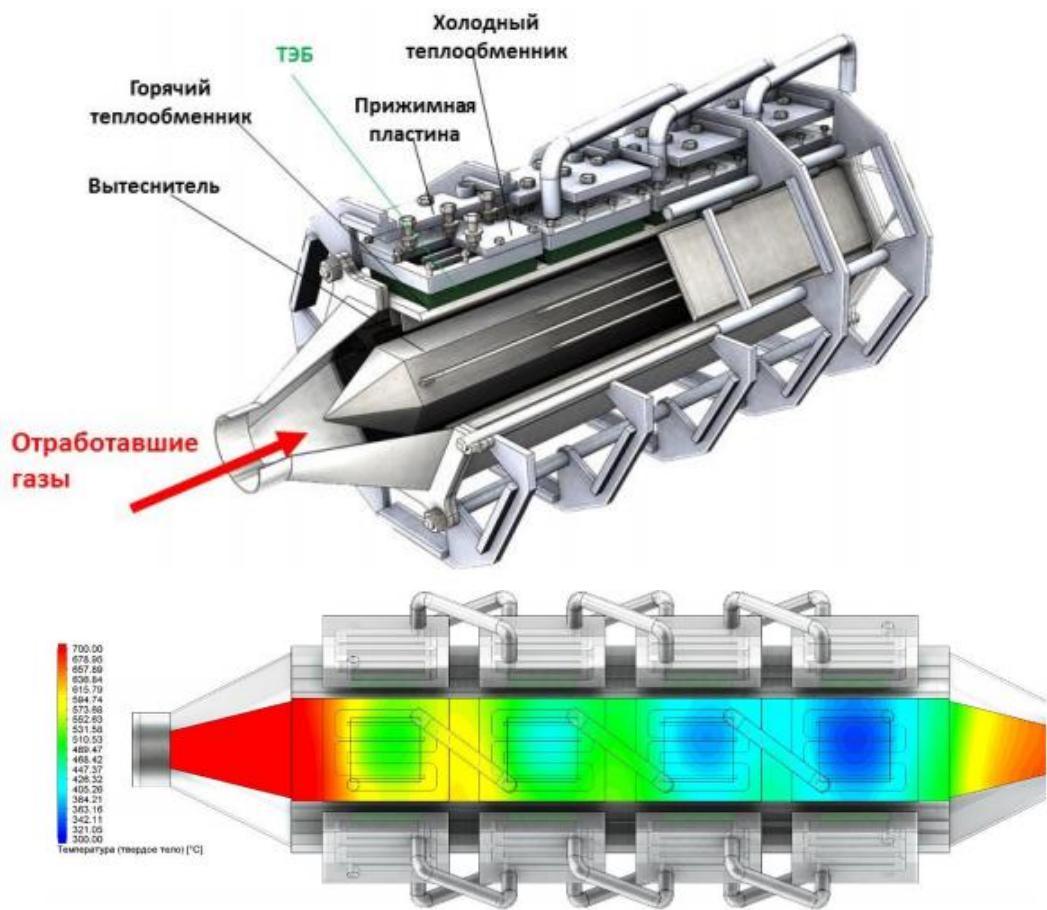


Рисунок 1.28 – Схема и распределение температур по поверхности ТЭГ с ДВС

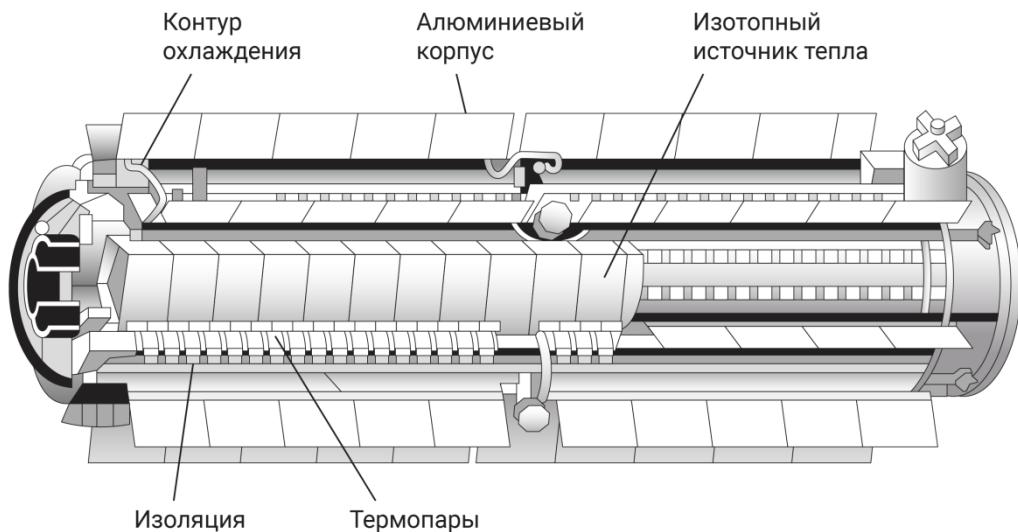


Рисунок 1.29 – Конструкция радиоизотопного термоэлектрического генератора

Достоинство РИТЭГов заключается в их компактности, простоте обслуживания и в долговременной работе (могут работать десятилетиями). Основным недостатком является мощность и КПД таких установок, они во много раз меньше, чем у реакторов, использующих контролируемую цепную реакцию деления ядер тяжелых элементов.

РИТЭГи являются источниками автономного электропитания с постоянным напряжением от 7 до 30 В для различной автономной аппаратуры мощностью от нескольких ватт до 80 Вт. В совокупности с РИТЭГами используются различные электротехнические устройства, обеспечивающие накопление и преобразование генерируемой электрической энергии.



Рисунок 1.30 – Внешний вид РИТЭГ перед установкой

В этих установках используются источники тепла на основе радионуклида стронций-90 (РИТ-90). РИТ-90 представляет собой закрытый источник излучения, в котором топливо, обычно в форме керамического титаната стронция-90 ($SrTiO_3$), дважды герметизирована аргоно-дуговой сваркой в капсуле. В некоторых РИТЭГах стронций используется в форме стронциевого боросиликатного стекла. Капсула защищена от внешних воздействий толстой оболочкой РИТЭГа, сделанной из нержавеющей стали, алюминия и свинца (рисунок 1.30). Биологическая защита изготовлена таким образом, чтобы на поверхности устройств доза радиации не превышала 200 мР/ч, а на расстоянии метра – 10 мР/ч [13].

Период радиоактивного полураспада стронция-90 (^{90}Sr) – 29 лет. На момент изготовления РИТ-90 содержат от 30 до 180 кКи ^{90}Sr . При распаде стронция образуется дочерний изотоп, бета-излучатель, иттрий-90 с периодом полураспада 64 часа. Мощность дозы гамма-излучения РИТ-90 самого по себе, без металлической защиты, достигает 400-800 Р/ч на расстоянии 0,5 м и 100-200 Р/ч в 1 м от РИТ-90. Сравнительный анализ установок приведен в таблице 1.7. Конструктивная схема РИТЭГ типа «Бета-М» представлена на рисунке 1.31.

Для высокоэнергетических радионуклидных энергетических установок в качестве топлива применяют плутоний-238, однако использование в РИТЭГах источников тепла на основе плутония-238 требует больших финансовых затрат, связанных с безопасностью эксплуатации, поэтому в установках, предназначенных для наземного использования, данный изотоп не применяется.

1 —	радиатор
2 —	электровывод
3 —	крышка
4 —	крышка тормоблока
5 —	прокладка
6 —	опора теплового источника
7 —	радиационная защита
8 —	блок термоэлектрический
9 —	теплопореход
10 —	радиоизотопный источник тепла
11 —	блок защиты
12 —	радиационная защита
13 —	блок экранов
14 —	корпус
15 —	основание

Конструктивная схема РИТЭГа типа «Бета-М»

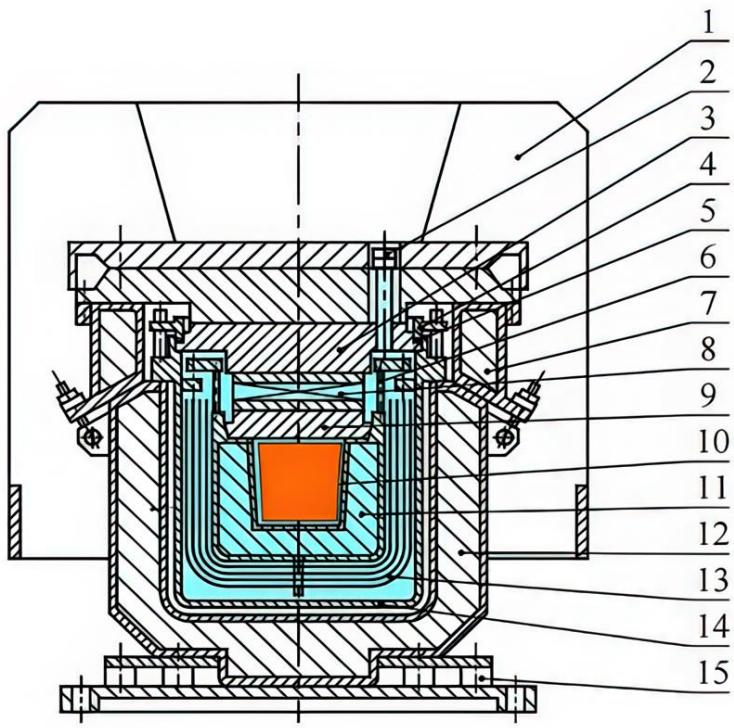


Рисунок 1.31 – Конструктивная схема РИТЭГ типа «Бета-М»

Плутоний- 238 в 2006 г. при запуске зонда *New Horizons* к Плутону нашёл свое применение в качестве источника питания для аппаратуры космического аппарата. Радиоизотопный генератор содержал 11 кг высокочистого диоксида ^{238}Pu , производящего в среднем 220 Вт электроэнергии на протяжении всего пути (240 Вт в начале пути и, по расчётом, 200 Вт к концу).

Таблица 1.7 – Типы установок РИТЭГ

Тип радиоактивных энергетических устройств	Активность, по стронцию-90, кКи	Активность, по стронцию-90, Бк
ИЭУ-1	465,0	1,72E+16
ИЭУ-2	100,75	3,73E+15
Горн	185,0	6,85E+15
ИЭУ-2М	116,25	4,30E+15
Бета-М	35,7	1,32E+15
Гонг	46,5	1,72E=15
Эфир-МА	104,45	3,8E+15

Зонды *Галилео* и *Кассини* были также оборудованы источниками энергии, в качестве топлива для которых служил плутоний. Марсоход *Curiosity* получает энергию благодаря плутонию-238. Марсоход использует последнее поколение РИТЭГов, называемое *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*. Это

устройство производит 125 Вт электрической мощности, а по истечении 14 лет – 100 Вт.

РИТЭГи являются идеальным решением проблемы энергообеспечения объектов, например, РИТЭГами оснащались маяки в Финском заливе, на островах *Родшер*, *Нерва* в Балтийском море, на острове *Гейсбера*, на трассе Северного морского пути и т. д. Также они используются в полевых условиях на Камчатке и Кольском полуострове. Они являются основным источником электропитания на космических аппаратах, имеющих продолжительную миссию и сильно удаляющихся от Солнца (например, *Вояджер-2* или *Кассини-Гюйгенс*), где использование солнечных батарей неэффективно или невозможно.

В ближайшие 20–30 лет улучшенные конструкции РИТЭГов смогут стать одним из основных источников энергии в ожидаемом нас энергетическом кризисе. Увеличение энергопотребления ведет к истощению запасов полезных ископаемых топлив, таких как уголь, нефть, газ, ядерное топливо, поэтому одним из оптимальных выходов является усовершенствование конструкций РИТЭГ для большей безопасности и дешевизны эксплуатации.

1.6. Термоэлектрические явления в растворах электролитов

Классические опыты по наблюдению термоэлектрических эффектов были поставлены на твердотельных образцах: металлах, кристаллических полупроводниках. При этом последние, характеризующиеся двумя типами носителей зарядов, особыми электрическими свойствами, позволили от демонстрации явлений перейти к решению задач создания эффективных термоэлектрических преобразователей [14].

Развитые ранее подходы позволяют описывать термоэлектрические эффекты в любых конденсированных средах, в том числе жидкостях и плазме. Термоэлектрические эффекты относительно просто проанаблюдать в растворах электролитов. При этом перенос зарядов в них осуществляется, как и в полупроводниках, двумя типами носителей, в данном случае положительными и отрицательными ионами.

1.6.1. Термодиффузионные и термоэлектрические явления в жидких электролитах

В формирование термо-э.д.с. существенный вклад вносят зависящие от температуры диффузионные процессы.

Диффузия ионов в растворах – самопроизвольный процесс перемещения ионов под действием градиента концентрации, характеризующего неравномерность распределения растворенного вещества (рисунок 1.32).

Диффузионный потенциал зависит от общей электропроводности электролита и уменьшается с её ростом, например, в растворах, содержащих фоновый электролит.

В гомогенном (относительно концентрации) растворе электролита, находящемся в температурном поле, благодаря перемещению ионов практически мгновенно возникает внутреннее электрическое поле.

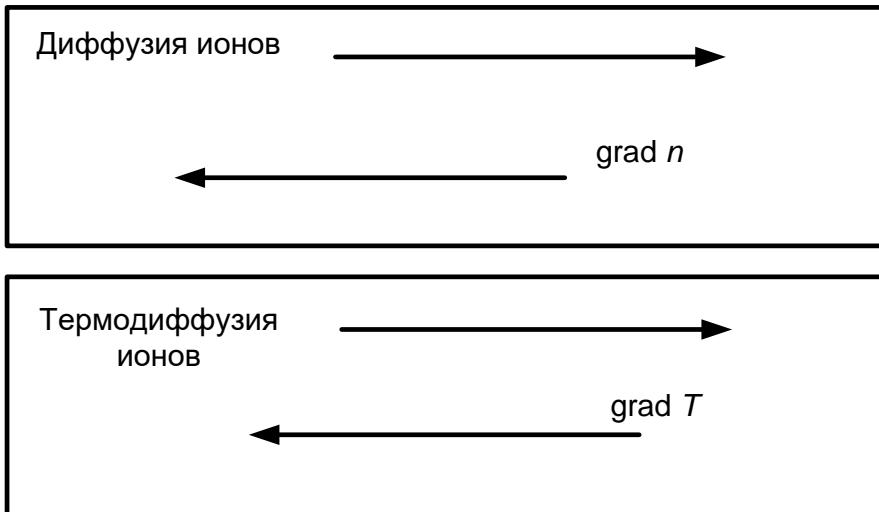


Рисунок 1.32 – Направление диффузии и термодиффузии ионов в конденсированных средах

Этому электрическому полю соответствует электрический потенциал, который называют *термодиффузионным потенциалом*, распределению которого соответствует термоэлектрическое поле, напряженность которого E обычно пропорциональна градиенту температуры с коэффициентом пропорциональности α , являющимся коэффициентом термо-Э.д.с. электролита:

$$E = \alpha \cdot \text{grad}T. \quad (1.17)$$

По истечении некоторого времени за счет эффекта термодиффузии в растворе возникает также градиент концентрации, который приводит к появлению потенциала диффузии. Очевидно, эти разности потенциалов термодиффузионная в узком смысле и диффузионная имеют противоположные знаки. Сумма термодиффузионного потенциала (в узком смысле) и диффузионного потенциала называют *термодиффузионным потенциалом* φ_{Th} в широком смысле.

1.6.2. Термоэлектрокинетические явления в жидкких электролитах

Термоэлектрокинетический эффект возникает при действии 3-х термодинамических сил, т. е., например, при наличии термоэлектрического и электрохимического явлений [15]. Если скорость течения жидкости равна нулю, эффект близок к термоэлектрическому, если градиент температуры равен нулю – к электрохимическому. При оптимальных условиях термоэлектрокинетическая и термоэлектрическая ЭДС близки по порядку величины, но по ряду факторов это новый класс явлений.

На основе теории *Онзагера* [16] можно сделать вывод о существовании класса термоэлектрокинетических эффектов:

- перенос массы, обусловленный наличием одновременно градиента температуры и переносом электрического заряда;
- перенос внутренней энергии, обусловленный наличием одновременно переноса массы и переносом электрического заряда;
- перенос электрического заряда, обусловленный одновременно наличием переноса массы и переноса внутренней энергии (наличием градиента температуры).

Установка для измерения термоэлектрокинетической ЭДС состоит из U-образной трубки, рисунок 1.33 [12], через которую может протекать электропроводящая жидкость, при наличии вертикального градиента температуры.

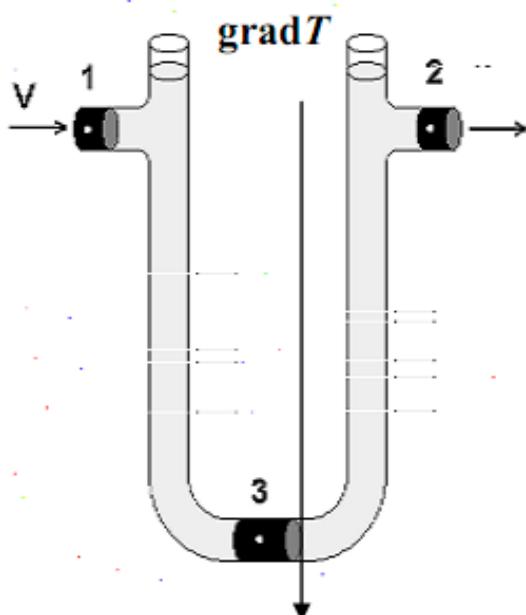


Рисунок 1.33 – Схема установки для наблюдения термоэлектрокинетического эффекта

Сущность кинетической неоднородности, как это видно из рисунка 1.34, заключается в том, что в одном из колен U-образной трубы скорость течения жидкости совпадает по направлению с градиентом температуры, а в другом колене эти направления противоположны.

Таким образом, обусловленные термодиффузией потоки ионов направлены в одном колене (рисунок 1.34, а) по течению, а в другом – против течения электропроводящей жидкости (рисунок 1.34, б). Следует ожидать, что термоэлектродвижущая сила будет наибольшей при наибольшем различии подвижностей положительных и отрицательных ионов электролита [17].

В окружающем нас мире жидкие среды, как правило, представляют собой коллоидные системы. По своему определению такие системы являются гетерогенными и состоят из взвеси или аэрозоля одной фазы в другой.

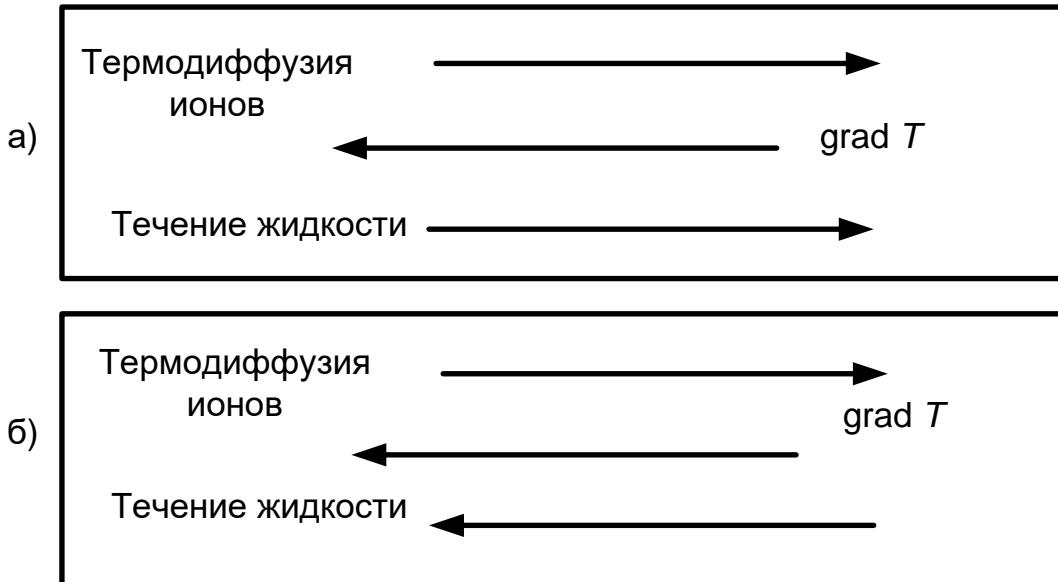


Рисунок 1.34 – Направления потоков переноса массы, тепла и заряда в левом (а) и правом (б) коленах U-образной трубы

1.6.3. Термоэлектрические явления в коллоидных системах

Более общее название таких систем, охватывающее помимо жидкостей, также газы и твердые тела – дисперсные системы. Такие системы состоят из непрерывной фазы или среды, называемой дисперсионной, и прерывистой фазы, равномерно распределенной в дисперсионной среде и называемой *дисперсной*. Если мы говорим о жидких системах, то это или взвеси мельчайших твердых частиц или мелких пузырьков газа в жидкости [18].

В зависимости от размера взвешенных частиц коллоидные жидкие системы подразделяют на суспензии и коллоидные растворы. К первым относятся грубодисперсные взвеси частицы дисперсной фазы, которой имеют размеры более 1000 нм. Отличительной особенностью таких систем является то, что дисперсные частицы в таких системах можно увидеть в оптический микроскоп. Например, в широко известном явлении броуновского движения броуновские частицы как раз представляют собой дисперсную среду, и поскольку их можно было наблюдать в оптический микроскоп, то данная система представляет собой суспензию. Также отличительной особенностью суспензий является возможность механического разделения двух фаз в поле силы тяжести.

Дисперсные системы, в которых размер частиц менее 1000 нм, называются уже *коллоидными растворами*. Внешне они очень похожи на истинные растворы, и частицы твердой фазы уже невозможно различить в оптический микроскоп, по сравнению с суспензиями они более устойчивы к разделению на две фазы.

Важную роль в устойчивом существовании частиц твердой фазы в коллоидных растворах играет явление *адсорбции* – избирательного поглощения

поверхностью коллоидных частиц ионов одного знака, присутствующих в жидкости. В результате коллоидные частицы заряжаются электрическими зарядами одного знака, что приводит к их электростатическому отталкиванию и препятствует их агрегации.

Существует несколько способов получения коллоидных растворов, однако все их можно подразделить на два пути.

1. *Дисперсионный* – в этом случае частицы коллоидного размера получают измельчением более крупных частиц. Для этого используют специальные коллоидные мельницы.

2. *Конденсационный* – противоположный дисперсионному. Частицы дисперсионной фазы получаются путем укрупнения частиц истинных растворов (ионов или молекул) до размера коллоидных частиц. Как правило, к данному способу относятся различные химические методы.

Таким образом, поскольку в коллоидных растворах дисперсные частицы имеют заряд одного знака, а дисперсионная среда соответственно другой знак, то в таких растворах наблюдаются различные электрические явления. Например, приложении электрической разности потенциалов к такой системе будет происходить направленное перемещение заряженных коллоидных частиц и дисперсионной среды в противоположные стороны. Для коллоидной системы, в которой дисперсионная среда является жидкостью, а дисперсные частицы относятся к твердой фазе, будет наблюдаться направленное перемещение дисперсных частиц в электрическом поле. Данное явление носит название *электрофореза* и широко применяется в настоящее время.

В конце прошлого века было открыто, что коллоидные растворы имеют рекордные значения коэффициента *Cope*, который на 2–3 порядка превышает максимальные значения для ионных электролитных систем.

При наличии градиента температуры, заряженные коллоидные частицы будут испытывать тепловой дрейф, формируя градиент концентрации:

$$\frac{\Delta n}{n} = -s_T \cdot \Delta T, \quad (1.18)$$

где s_T – коэффициент *Cope*. Неоднородное распределение заряженных частиц в жидкой среде вызовет формирование внутреннего электрического поля

$$E = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1.19)$$

пропорционального градиенту температуры с коэффициентом пропорциональности α , имеющим смысл коэффициента термоэлектродвижущей силы.

Коэффициенты *Cope* и термоэлектродвижущей силы заряженных коллоидных частиц зависят от энтропии переноса заряженных коллоидных частиц *Si*. Причем абсолютное значение энтропии переноса увеличивается с увеличением размера заряженной частицы, вследствие этого коллоидные растворы обладают рекордными по сравнению с истинными растворами

электролитов значениями коэффициента *Cope*. Так, в ряде исследований наблюдалось интенсивное движение таких коллоидных частиц, как двуокись кремния, молекулы ДНК, полистирольные сферы в неоднородном температурном поле.

Интерес к термоэлектрическим свойствам коллоидных систем обусловлен, прежде всего, перспективами их применения в термоэлектрохимических генераторах.

1.7. Расчет термоэлектрического генератора

Термоэлектрический генератор имеет выходную мощность 100 кВт при напряжении на выводах 115 В. Температура его горячей стенки 1500 К, а температура холодной стенки – 1000 К. При такой достаточно высокой температуре холодной стенки термоэлектрический генератор может быть установлен на паросиловой установке в качестве надстройки к обычному тепловому циклу.

Характеристики материалов термопары следующие [19]:

- коэффициент Зеебека (усреднённый по рабочему диапазону температур) – 0,0005 В/К;
- электрическое сопротивление ветви A – 0,002 Ом·см;
- электрическое сопротивление ветви B – 0,003 Ом·см;
- теплопроводность ветви A – 0,032 Вт/(см·К);
- теплопроводность ветви B – 0,021 Вт/(см·К);
- максимально возможная плотность электрического тока – 100 А/см².

Для простоты примем, что длина ветвей A и B одинакова (при этом площади их поперечного сечения могут быть разными).

Определить:

- 1) максимальную тепловую эффективность;
- 2) число последовательно соединённых термопар;
- 3) размеры каждой из ветвей термопары (A и B);
- 4) электродвигущую силу (ЭДС);
- 5) тепловую мощность на входе и выходе при полной (максимальной) нагрузке, без нагрузки.

Решение:

Обозначим ЭДС одной термопары через V_{oc} :

$$V_{oc} = \alpha \cdot (T_H - T_C) = 0,0005 \cdot (1500 - 1000) = 0,25 \text{ В.} \quad (1.20)$$

Пусть I – ток, проходящий через каждую термопару (он равен суммарному току, поскольку термопары соединены последовательно):

$$I = 1000000 \text{ Вт}/115 \text{ В} = 870 \text{ А.} \quad (1.21)$$

Если последовательно соединены n термопар, каждая из которых имеет сопротивление R , то

$$n \cdot V_{oc} - n \cdot R \cdot I = 115 \text{ В.} \quad (1.22)$$

Для того чтобы определить n , необходимо знать R . При максимальной эффективности нагрузка R_L должна быть равна $m \cdot R_{batt}$, или $R_L = m \cdot n \cdot R$, где $m = \sqrt{1 + \langle T \rangle \cdot Z}$. Здесь R – сопротивление одной термопары, а R_{batt} – сопротивление всей батареи последовательно соединённых термопар, которое равно $n \cdot R$.

В данном случае

$$RL = 115 \text{ В} / 870 \text{ А} = 0,132 \text{ Ом}, \quad (1.23)$$

$$Z = \alpha^2 / (\lambda R), \quad (1.24)$$

$$\lambda R = [\sqrt{\lambda_A \cdot \rho_A} + \sqrt{\lambda_B \cdot \rho_B}]^2 = [\sqrt{0,032 + 0,002} + \sqrt{0,021 + 0,003}]^2 = 254 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}^2/\text{К}, \quad (1.25)$$

$$Z = \frac{0,0005^2}{254 \cdot 10^{-6}} = 980 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}, \quad (1.26)$$

$$\langle T \rangle = \frac{1500+1000}{2} = 1250 \text{ К} \quad (1.27)$$

$$m = \sqrt{1 + 980 \cdot 10^{-6} \cdot 1250} = 1,49, \quad (1.28)$$

$$nR = \frac{R_L}{m} = \frac{0,132}{1,49} = 0,0886 \text{ Ом}, \quad (1.29)$$

$$n = \frac{115+nRI}{V_{oc}} = \frac{115+0,0886 \cdot 870}{0,25} = 768,3. \quad (1.30)$$

Таким образом, в батарее необходимо последовательно установить 768 термопар.

$$V_{oc} = \text{ЭДС батареи термопар} = n \cdot V_{oc} = 0,25 \cdot 768 = 192 \text{ В,} \quad (1.31)$$

$$P_{Hnoload} = \lambda_{batt}(T_H - T_C), \quad (1.32)$$

$\lambda_{batt} = n \cdot \lambda$, потому что, исходя из теплопередачи, термопары установлены параллельно.

$$\lambda = \frac{\lambda \cdot R}{R} = \frac{254 \cdot 10^{-6}}{0,886/768} = 2,20 \text{ Вт/К,} \quad (1.33)$$

$$\lambda_{batt} = 768 \cdot 2,20 = 1690 \text{ Вт/К,} \quad (1.34)$$

$$P_{Hnoload} = 1690 \cdot (1500 - 1000) = 846 \text{ кВт,} \quad (1.35)$$

$$P_{Cnoload} = 846 \text{ кВт,} \quad (1.36)$$

$$P_{Hfullload} = 846 + n \cdot T_H \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot n \cdot R = 846 + 768 \cdot 0,0005 \cdot 1500 \cdot 870 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2} \cdot 870^2 \cdot 0,0886 \cdot 10^{-3} = 1310 \text{ кВт.} \quad (1.37)$$

$$\eta = \frac{100}{P_H} = \frac{100}{1310} = 0,076, \quad (1.38)$$

$$P_{Cfullload} = P_H - 100 = 1300 - 100 = 1210 \text{ кВт.} \quad (1.39)$$

Поскольку длина ветвей в термопаре одинакова, то уравнение упрощается:

$$\frac{A_B}{A_A} = \sqrt{\frac{\lambda_A \cdot \rho_B}{\lambda_B \cdot \rho_A}} = \sqrt{\frac{0,032 \cdot 0,003}{0,021 \cdot 0,002}} = 1,51. \quad (1.40)$$

При $I_{max} = 100 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ площадь меньшего из двух сечений A_A должна быть равна $\frac{870}{100} = 8,7 \text{ см}^2$.

Площадь большего сечения $A_B = 1,51 \cdot 8,7 = 13,1 \text{ см}^2$.

Электрическое сопротивление каждой термопары

$$R = \frac{n \cdot R}{n} = \frac{0,0886}{768} = 0,000115 \text{ Ом.}$$

$$0,000115 = \rho_A \cdot \frac{l}{A_A} + \rho_B \cdot \frac{l}{B} = \left(\frac{0,002}{8,7} + \frac{0,003}{13,2} \right) \cdot l, \quad (1.41)$$

откуда получаем $l = 0,36 \text{ см}$.

Если тепловой поток, выходящий из термоэлектрического генератора при температуре 1000°C , направить затем в паровую турбину эффективностью 30% , то электрическая мощность, генерируемая ею, будет равна $0,3 \cdot 1210 = 363 \text{ кВт}$. С учётом 100 кВт , которые мы получаем от термобатареи, суммарная вырабатываемая мощность составляет 463 кВт и эффективность преобразования:

$$\eta = \frac{463}{1310} = 0,35. \quad (1.42)$$

Таким образом, очевидно, что термоэлектрический генератор может быть использован как вполне приемлемый надстроочный цикл.

Метод регулярного режима. Принцип действия основан на определении количества энергии, поглощённой массой термоэлектрического генератора. В данном случае уравнение энергетического баланса будет выглядеть следующим образом:

$$W \cdot \tau = \Delta I_l + \Delta Q_{окр.ср}, \quad (1.43)$$

где W – мощность нагревателя; τ – время нагрева термоэлектрического генератора; ΔI_l – изменение энталпии термоэлектрического генератора за время

нагрева τ ; $\Delta Q_{\text{окр.ср}}$ – суммарное тепло, отдаваемое термоэлектрическим генератором в окружающую среду за счёт естественной конвекции.

В свою очередь, изменение энталпии термоэлектрического генератора за время нагрева τ определяется по формуле:

$$\Delta I_L = C_P \cdot m \cdot (T_L - T_{L0}), \quad (1.44)$$

где C_P – средняя теплоёмкость термоэлектрического генератора [$C_P = 338 \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$]; m – масса его нагревающей части; T_L – температура нагрева термоэлектрического генератора через контрольный промежуток времени измерения; T_{L0} – начальная температура термоэлектрического генератора.

Таким образом, первое слагаемое в формуле ΔI_L может быть определено по формуле (1.44). Второе слагаемое $\Delta Q_{\text{окр.ср}}$, в формуле (1.43), как уже было выше сказано, представляет собой суммарное тепло, отдаваемое термоэлектрическим генератором в окружающую среду за счёт естественной конвекции. Эта балансовая составляющая определялась по следующей формуле:

$$\Delta Q_{\text{окр.ср}} = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_L - T_{\text{окр.ср}}) \cdot d\tau, \quad (1.45)$$

где α_{Σ} – общий коэффициент теплоотдачи; F – площадь нагревающей поверхности термоэлектрического генератора; T_L – температура термоэлектрического генератора; $T_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды; $d\tau$ – элементарный промежуток времени нагрева термоэлектрического генератора.

Общий коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально с применением метода регулярного режима при выключении нагревателя и охлаждения термоэлектрического генератора естественным образом. Сам эксперимент проводится сразу же после нагрева термоэлектрического генератора.

К телу, остывающему в изобарных условиях, применимо аналитическое выражение первого начала термодинамики в форме, которая устанавливает связь между теплотой и энталпией:

$$dQ = -m \cdot dh. \quad (1.46)$$

Выражение (1.46) справедливо для равновесных и неравновесных процессов. Как уже было сказано выше, для термоэлектрического генератора dQ в левой части выражается суммой:

$$dQ = dQ_{\text{ест.конв}} + dQ_{\text{отр}} + dQ_{\text{изл}}, \quad (1.47)$$

где $dQ_{\text{ест.конв}}$ – тепло, отдаваемое за счёт естественной конвекции; $dQ_{\text{изл}}$ – тепло, отдаваемое за счёт лучистого теплообмена;

$dQ_{\text{отр}}$ – тепло, отдаваемое за счёт отражения части тепловой энергии. Для определения энталпии dh используем следующую формулу:

$$dh = C_p \cdot dT. \quad (1.48)$$

Подставляя формулы (1.46), (1.48) в формулу (1.45), получаем:

$$-m \cdot C_p \cdot dT = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_L - T_{\text{окр.ср}}) \cdot d\tau. \quad (1.49)$$

Принимая $T_L - T_{\text{окр.ср}} = v$, и из условия $T_{\text{окр.ср}} = \text{const}$ следует, что $dv = dT$.

С учётом дополнительных обозначений получаем форму дифференциального уравнения нестационарного теплообмена:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{\alpha_{\Sigma} \cdot F}{C_p \cdot m} \cdot d\tau. \quad (1.50)$$

Введя обозначение:

$$M = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot F}{C_p \cdot m} \quad (1.51)$$

и интегрируя уравнение (1.51), получаем:

$$\ln v = -M \cdot \tau + \text{const}. \quad (1.52)$$

Из уравнения (1.51) следует, что логарифм натуральный избыточной температуры v является линейной функцией времени τ . При выводе уравнения (1.51) сделаны следующие допущения:

- температурное поле по всему объёму термоэлектрического генератора равномерно;
- $\alpha_{\Sigma} = \text{const}$, величина радиационного коэффициента теплоотдачи α_R , входящая в состав α_{Σ} , зависит как от v , так и от абсолютных значений температур T_L и $T_{\text{окр.ср}}$. Поскольку α_R входит слагаемым в состав α_{Σ} и составляет от α_{Σ} величину порядка 5 %, то полное изменение α_{Σ} за время измерения мощности излучения не превышает 0,5%.

В теории регулярного режима величина M именуется «темпом охлаждения». Любые исследования, связанные с применением регулярного режима, всегда сводятся к определению M . В данном случае по значению величины M соотношения (1.51) определяется α_{Σ} .

Эксперимент начинается сразу же после того, как термоэлектрический генератор нагрелся и отключён нагреватель и охладитель.

Запускается секундомер и происходит замер температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического генератора при его остывании. Измерения производятся через одну минуту в течение 5–10 мин.

Находится значение избыточной температуры: $T_{\text{Л}} - T_{\text{окр.ср}} = \nu$, затем строится график $\ln \nu = f(\tau)$. Через точки графика проводится усредняющая прямая. По её наклону определяется темп охлаждения:

$$M = \frac{\ln \nu_1 - \ln \nu_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (1.53)$$

Индексы 1 и 2 относятся к любым двум точкам, находящимся на усредняющей прямой. Суммарный коэффициент теплоотдачи определяется из уравнения (1.51):

$$\alpha_{\Sigma} = M \cdot \frac{C_P \cdot m}{F}. \quad (1.54)$$

Линейность функции $\ln \nu = f(\tau)$ подтверждает наличие регулярного режима и, следовательно, правильность применения метода.

В данном случае $m = 0,155$ кг; $C_P = 385$ Дж/(кг·К); $M \approx 10^{-3}$ с⁻¹; $F = 51$ см. Таким образом, зная α_{Σ} и все остальные параметры и характеристики, а также произведя замеры температуры термоэлектрического генератора $T_{\text{Л}}$ в течение времени его нагрева через определённые интервалы времени $\Delta\tau$ из формулы (1.43), преобразовав её в соответствии с формулами (1.44) и (1.45), получаем следующее выражение для мощности излучения:

$$W = \frac{C_P \cdot m \cdot (T_{\text{Л2}} - T_{\text{Л1}}) + \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_{\text{Л2}} - T_{\text{окр.ср}})}{\tau}. \quad (1.55)$$

1.8. Термоэлектрические холодильники и тепловые насосы

1.8.1. Термоэлектрические методы получения холода

Важные преимущества термоэлектрического метода получения холода в сравнении с другими типами охлаждения обусловили широкую сферу применения этого метода.

В зависимости от холодопроизводительности можно выделить три класса использования термоэлектрических холодильных машин [20]:

1. *Маломощные охладители* ($Q_0 < 100$ Вт). Подавляющее число термоэлектрических холодильников относятся именно к этому классу. С экономической точки зрения при таких мощностях они сравнимы с компрессионными машинами.

2. *Термоэлектрические холодильники средней мощности* ($100 < Q_0 < 500$ Вт). При таких мощностях экономическая эффективность термоэлектрических холодильников, как правило, ниже, чем компрессионных.

3. *Высокомощные охладители* ($Q_0 > 500$ Вт). Применение термоэлектрических холодильников для создания таких мощностей может быть оправдано при выполнении каких-либо специфических требований, таких как повышенные требования к весу, размерам, устойчивости к перегрузкам, необходимости автономной работы и т. п. Например, в США разработана термоэлектрическая микроклиматическая установка для пилотов вертолётов с $Q_0 = 1\text{кВт}$.

К *термоэлектрическим холодильникам потребительского назначения* относятся портативные пикник-боксы, переносные домашние холодильники, охладители для напитков (соков, вина), стационарные охладители-фильтры воды, нагреватели-охладители детского питания, холодильники для гостиничных номеров (рисунок 1.35).

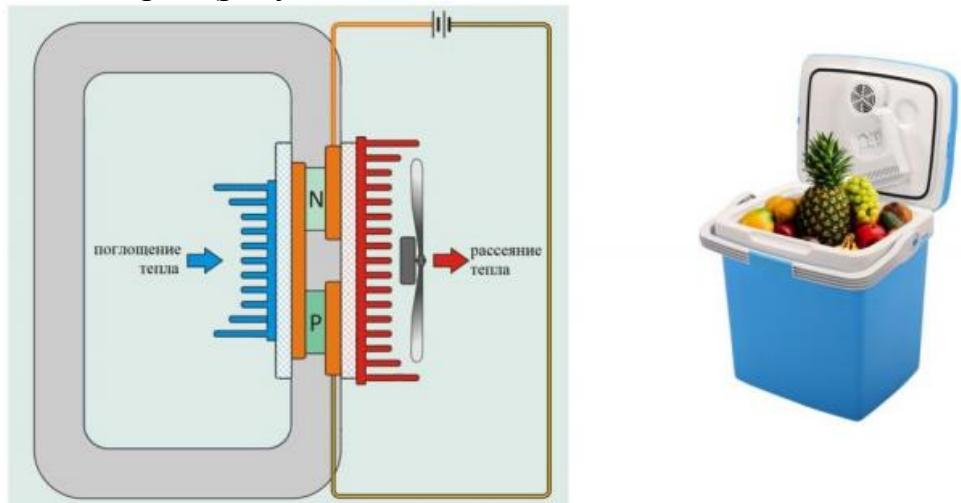


Рисунок 1.35 – Пример использования термоэлектрических охладителей в быту

Использование постоянного тока делает очень удобным *применение термоэлектрических охладителей на транспорте*. Разработаны автомобильные мини-холодильники, автомобили с термостатированным кузовом, охладители автомобильных сидений и мотоциклетных шлемов, охладители питьевой воды для самолётов и пассажирских железнодорожных вагонов.

Созданы термоэлектрические блоки для кондиционеров на поездах шведских и французских железных дорог. Проходят испытания термоэлектрические кондиционеры на российских железных дорогах. Представляются весьма перспективными автомобильные локальные кондиционеры для комфорtnого охлаждения водителя или одного пассажира.

Использование термоэлектрического охлаждения в промышленности и системах телекоммуникаций – это управление температурными процессами, в том числе точное поддержание температуры различных электронных блоков, жесткая защита критических систем от внешних тепловых воздействий, терmostатирование микропроцессоров вычислительных систем и систем

автоматики, охлаждение волоконно-оптических систем и лазерных диодов с целью стабилизации их параметров (рисунок 1.36).

На предприятиях торговли и питания используются охлаждаемые бары для напитков и охлаждаемые витрины, устройства для охлаждения и взбивания масла, мороженого и сливок, индивидуальные порционные охладители блюд, охладители молока и т. п.

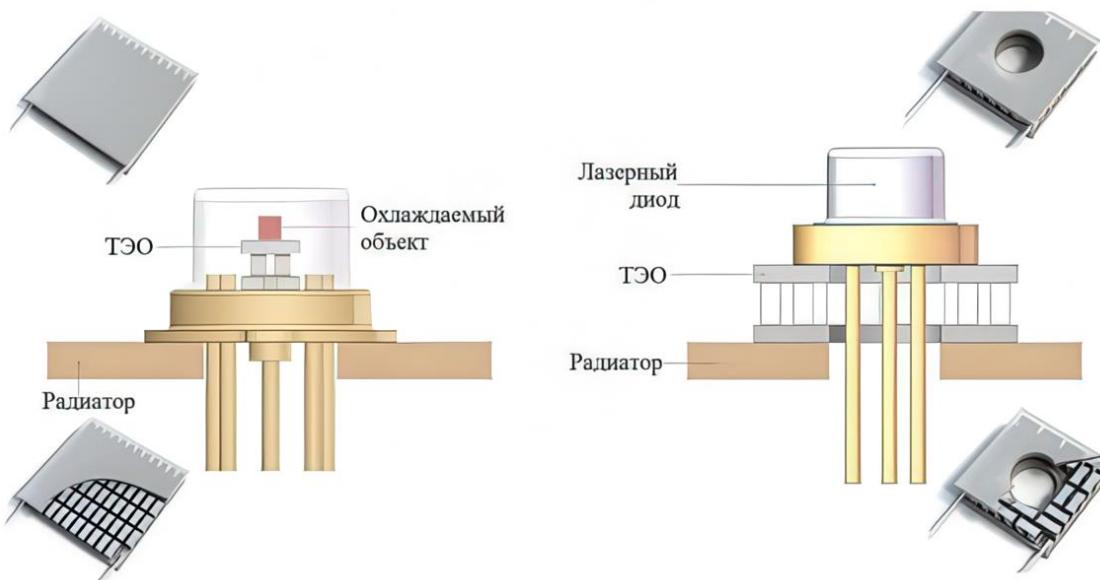


Рисунок 1.36 – Пример использования термоэлектрических охладителей в технике

Применение термоэлектрического охлаждения в медицине. Это приборы для анализа крови, стационарные и переносные холодильники для лекарств, в том числе домашние охладители инсулина, оборудование для препарирования и хранения тканей, биостимуляторы, криогенные пинцеты для офтальмологии, криогенные скальпели, охлаждаемые предметные столики для микроскопов, охлаждаемые подложки для зубоврачебного цемента, термостатированные терапевтические одеяла, персональные больничные холодильники.

Далеко не полный список лабораторного и научного оборудования с использованием термоэлектрических охладителей включает: охлаждаемые инфракрасные детекторы, рефрактометры, лазерные коллиматоры, фотоумножители, ПЗС матрицы, интегральные схемы, электронные платы, спектрофотометры, термопрограмматоры, охлаждаемые камеры и мешалки, детекторы точки замерзания и точки росы, эталоны абсолютно черного тела, ячейки для электрофореза, осмометры, анализаторы загрязнения воздуха, приборы определения температуры застывания нефти.

Другие примеры применения термоэлектрического охлаждения можно найти в литературе [21].

Эффект *Пельтье* обратим, поскольку направление теплового потока зависит от направления, протекающего через термопару тока. Тепловой поток может передаваться от холодной стороны термопары к горячей и, следовательно,

термопара может работать как холодильник или тепловой насос. Как количество тепла может быть передано в этом случае? Для упрощения задачи предположим, что α , R и Λ не зависят от температуры.

Пусть имеется некоторая батарея из термопар, для которой параметры α , R и Λ известны. Предположим, например, что $\alpha = 0,055 \text{ В/К}$, $R = 4,2 \text{ Ом}$, $\Lambda = 0,25 \text{ Вт/К}$. Предположим также, что тепловой поток направлен от стенки с температурой $T_C = 278 \text{ К}$ к стенке с температурой $T_H = 338 \text{ К}$. В этом случае $\Delta T = 60 \text{ К}$.

Пусть P_C – тепловая мощность, отнимаемая от холодного резервуара,

$$P_C = -\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2. \quad (1.56)$$

В данном случае

$$P_C = 15,0 + 15,29 \cdot I - 2,1 \cdot I^2. \quad (1.57)$$

Количество электрической энергии, требуемой для осуществления этого процесса:

$$P_C = \alpha \cdot \Delta \cdot T \cdot I + R \cdot I^2. \quad (1.58)$$

Отношение тепловой мощности, отбираемой от холодной стенки, к затраченной электрической мощности называется *коэффициентом преобразования теплового насоса* φ_C :

$$\varphi_C = \frac{-\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2}{\alpha \cdot \Delta \cdot T \cdot I + R \cdot I^2}. \quad (1.59)$$

Для «идеальной» термопары ($R = 0$ и $\Lambda = 0$) и $\varphi_C = \frac{T_C}{\Delta T}$. Этот коэффициент называется *эффективностью (КПД) цикла Карно для тепловых насосов* φ_{Carnot} . В нашем случае $\varphi_{Carnot} = 4,63$. Реальная термопара имеет коэффициент преобразования гораздо более низкий, чем φ_{Carnot} .

На рисунке 1.37 показана зависимость мощности P_C , отбираемой у холодного резервуара, от электрического тока, протекающего через термопару. В том случае, если $I < 0$ (не показано на рисунке), тепловой поток будет направлен в сторону холодного резервуара. При $I = 0$ (также не показано на рисунке) эффект *Пельтье* отсутствует и тепловой поток, обусловленный теплопроводностью, по-прежнему направлен в ту же сторону. При дальнейшем увеличении тока из-за эффекта *Пельтье* тепловой поток начинает уменьшаться и в какой-то момент (в устройстве, сконструированном должным образом), тепловой поток поменяет направление, т. е. тепло будет передаваться от холодной стенки к горячей. Вначале количество тепла, передаваемого в этом направлении, будет расти с ростом тока I , но затем увеличение количества тепла, выделяемого в результате *Джоулева* нагрева, приведёт к подавлению эффекта *Пельтье* и соответствующему уменьшению теплового потока, направленного от холодной стенки к горячей.

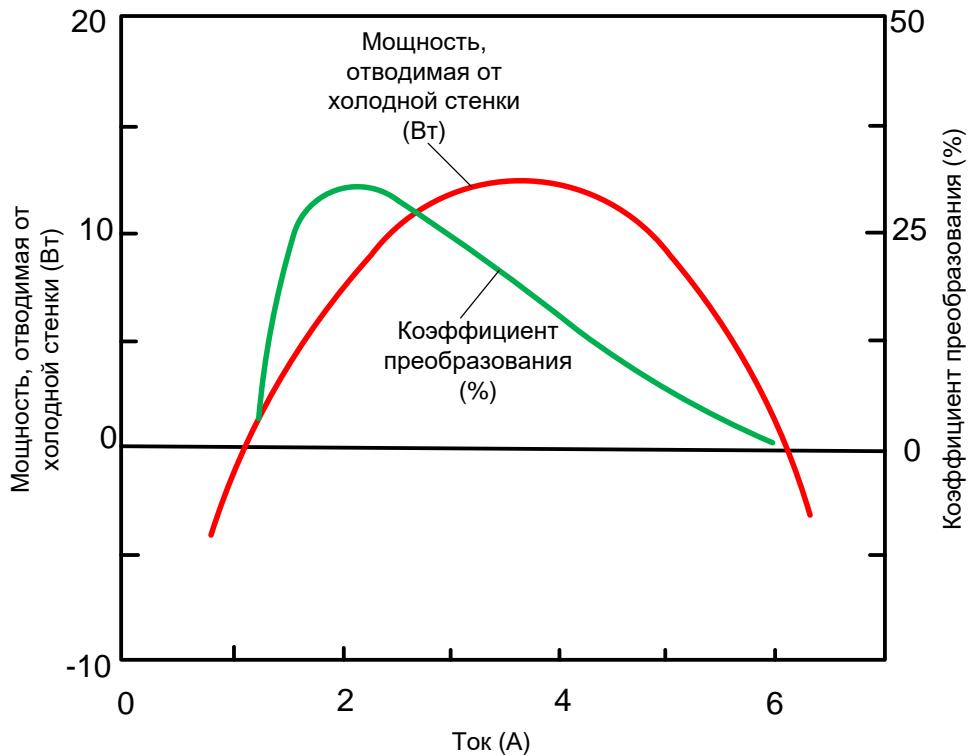


Рисунок 1.37 – Зависимости тепловой мощности (Вт), передаваемой от холодной стенки к горячей, и коэффициента преобразования теплового насоса (%) от величины электрического тока I (А)

Легко вычислить ток, при котором тепловой поток P_C будет иметь максимальное значение:

$$\frac{\partial P_C}{\partial I} = \alpha \cdot T_C - R \cdot I = 0, \quad (1.60)$$

откуда

$$I_{max.cooling} = \alpha \cdot T_C / R, \quad (1.61)$$

при этом мощность теплового насоса:

$$P_{Cmax} = -\Lambda \Delta T + \frac{\alpha^2 T_C}{2R}. \quad (1.62)$$

В нашем случае ток, соответствующий максимальной мощности, равен 3,64 А, а сама максимальная мощность равна 12,83 Вт.

Минимальная температура, которую можно достичь с помощью теплового насоса, соответствует температуре, при которой $P_{Cmax} = 0$:

$$\frac{\alpha^2 T_C}{2R} = \Lambda(T_H - T_C), \quad (1.63)$$

откуда

$$T_{Cmin} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2ZT_H}}{Z}, \quad (1.64)$$

$$Z = \alpha^2 / \Lambda R. \quad (1.65)$$

В нашем примере мы имеем $Z = 0,0028 K^{-1}$ и $T_{Cmin} = 249 K$.

Ток, при котором получается минимальная температура, равен 3,26 A, при этом перекачиваемая мощность равна нулю. Таким образом, может быть достигнута любая температура выше 249 K.

Аналогичным образом можно вычислить значение тока, при котором будет иметь место максимальное значение коэффициента преобразования теплового насоса

$$\frac{\partial \varphi_C}{\partial I} = \left(-\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2 \right)^{-1} \cdot (\alpha \cdot \Delta T \cdot I + RI^2)^{-2} \cdot \\ (\alpha \cdot \Delta T + 2R \cdot I) + (\alpha \cdot \Delta T \cdot I + R \cdot I^2)^{-1} \cdot (\alpha \cdot T_C - R \cdot I) = 0, \quad (1.66)$$

отсюда получим:

$$I = \frac{\Lambda \cdot \Delta T}{\alpha \cdot T_C} \cdot (m + 1). \quad (1.67)$$

Это выражение может быть записано в виде:

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R \cdot (m - 1)}. \quad (1.68)$$

Подставляя выражение для I в уравнение (1.59) и проводя алгебраические преобразования, можно показать, что максимальное значение коэффициента преобразования термоэлектрического холодильника равно:

$$\varphi_{Copt} = \frac{T_C}{\Delta T} \left(\frac{m - T_H/T_C}{m + 1} \right), \quad (1.69)$$

где $m = \sqrt{1 + Z \langle T \rangle}$, а $\frac{T_C}{\Delta T}$, согласно данному выше определению, – эффективность цикла Карно для холодильника.

В данном случае имеем:

$$m = \sqrt{1 + Z \langle T \rangle} = \sqrt{1 + 0,00288 \left(\frac{338 + 278}{2} \right)} = 1,374, \quad (1.70)$$

$$\varphi_{Copt} = \frac{278}{338 - 278} \left(\frac{1,374 - 338/278}{1,374 + 1} \right) = 0,308. \quad (1.71)$$

При этом ток будет равен:

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R \cdot (m - 1)} = \frac{0,055 \cdot (338 - 278)}{4,2 \cdot (1,374 - 1)} = 2,10 A. \quad (1.72)$$

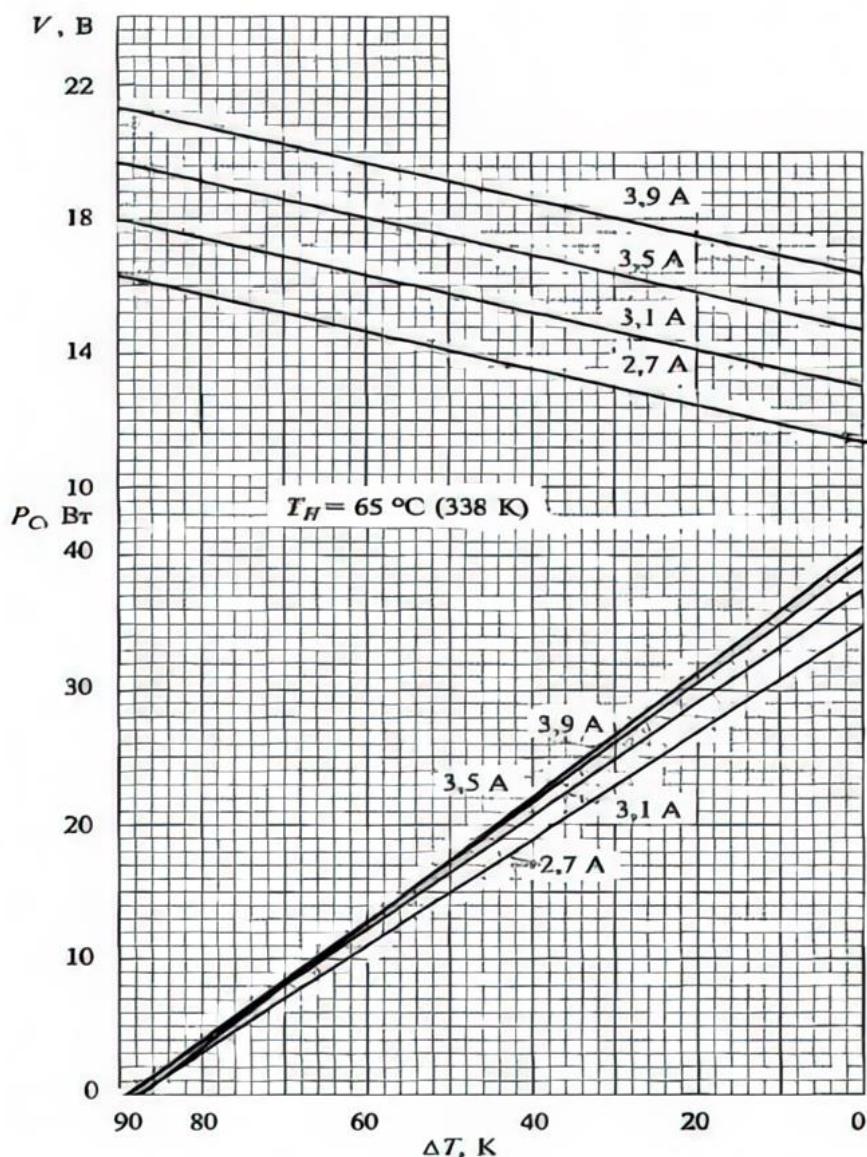


Рисунок 1.38 – Типичные характеристики элемента *Пельтье*

В таблице 1.8 проводится сравнение двух батарей, изготовленных из идентичных термопар. Каждая из батарей отводит 100 Вт тепла от стенки с температурой от 258 к 323 К. Одна батарея работает с минимальным числом элементов, т. е. при токе, который соответствует максимальному значению P_C .

Вторая батарея работает в режиме, при котором ток имеет значение, соответствующее максимальному значению коэффициента преобразования. Большая эффективность второй батареи достигается за счёт большего числа используемых элементов.

Таблица 1.8 – Характеристики устройства, работающего в режиме максимального теплового потока P_C и оптимального φ_C при $P_C = 100$ Вт

Режим	Число ячеек	P_E , Вт	P_H , Вт	φ , %
Максимум P_C	100	540	640	18,5
Оптимум φ_C	161	336	436	29,7

Обычно характеристики термопар, используемых в качестве теплового насоса, представляют на графике, подобном изображённому на рисунке 1.38, где приведена характеристика устройства из нашего примера, которая в определённой степени соответствует характеристике модуля *Tellurex CZ1-1.0-127-1.27*, представляющего собой батарею из 127 элементов, соединённых последовательно. Большое значение α , принятое выше, относится ко всему модулю и, следовательно, α одного элемента равно $\frac{0,055}{127} = 0,00043 \text{ В/К}$.

1.8.2. Основные расчетные соотношения для охлаждающего термоэлемента

Рассмотрим работу термоэлемента, состоящего из двух полупроводниковых ветвей с электронной и дырочной проводимостями и из металлических контактных перемычек. При распространении постоянного тока в указанном направлении нижние перемычки нагреваются, а верхние – охлаждаются. В этом случае верхнюю перемычку называют холодным спаем (температура T_x), а нижнюю – горячим спаем (температура T_g).

Количество теплоты, которое выделяет горячий спай, будет больше теплоты, которую поглощает холодный спай, на величину затрат электроэнергии [22]:

$$Q_g = P + Q_0. \quad (1.73)$$

Энергия P расходуется на совершение работы A по перемещению зарядов против разности электрических потенциалов, возникающих в цепи при неравенстве T_g и T_x в соответствии с законом Зеебека. Таким образом,

$$A = Q_g - Q_x = \alpha \cdot T_g \cdot I - \alpha \cdot T_x \cdot I = \alpha \cdot I \cdot (T_g - T_x), \quad (1.74)$$

где α – коэффициент дифференциальной термо-э.д.с., зависящей от физических свойств материала и его температуры; I – сила тока.

Холодильный коэффициент обратного цикла термоэлемента, в котором роль рабочего вещества выполняет электронный газ и отсутствуют необратимые потери, определяется формулой:

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{A} = \frac{\alpha \cdot T_x \cdot I}{\alpha \cdot I \cdot (T_g - T_x)} = \frac{T_x}{T_g - T_x}. \quad (1.75)$$

Величина ε совпадает с холодильным коэффициентом обратного цикла *Карно*, так как теплота отводится при постоянной температуре T_g , а подводится к горячему источнику при постоянной температуре T_x .

В действительности работа термоэлемента сопровождается необратимыми потерями двух типов: распространение тока по проводнику влечет *Джоулевы* потери, а по проводникам, из которых состоит цепь, непрерывно идет теплота от горячего спая к холодному за счёт теплопроводности.

Джоулевы потери определяются соотношением:

$$Q_{\text{дж}} = I^2 \cdot R, \quad (1.76)$$

где R – сопротивление ветвей термоэлемента.

С высокой степенью точности можно считать, что половина теплоты, выделяющейся в цепи в виде *джоулевых* потерь, поступает к холодному спаю, а половина – к горячему.

Теплота, переходящая от горячего спая к холодному:

$$Q_m = \lambda \cdot (T_g - T_x), \quad (1.77)$$

где λ – средний удельный коэффициент теплопроводности ветвей термоэлемента.

Таким образом, холодопроизводительность термоэлемента с учётом потерь определится из выражения:

$$Q_0 = \alpha \cdot T_x \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_g - T_x). \quad (1.78)$$

Теплота, отводимая от горячего спая:

$$Q = \alpha \cdot T_g \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_g - T_x). \quad (1.79)$$

Реальная работа цикла с учетом потерь:

$$A_{\text{ц.д}} = Q - Q_0 = \alpha \cdot I \cdot (T_g - T_x). \quad (1.80)$$

Холодильный коэффициент реального цикла термоэлектрической холодильной машины:

$$\varepsilon_d = \frac{\alpha \cdot I \cdot (T_g - T_x)}{I^2 \cdot R + \alpha \cdot I \cdot (T_g - T_x)}. \quad (1.81)$$

Таким образом, холодильный коэффициент зависит от величины питающего термоэлемент тока. Можно показать, что максимальное значение холодильный коэффициент приобретает при токе [23]:

$$I = \frac{\alpha \cdot (T_g - T_x)}{R \cdot [\sqrt{1 + 0,5 \cdot Z \cdot (T_g - T_x)} - 1]}. \quad (1.82)$$

Материалы для термоэлектрических преобразователей (термоэлектрики) характеризуются *добротностью* Z . Данный параметр определяется физическими свойствами термоэлектрика – электропроводностью σ , теплопроводностью λ и коэффициентом термо-Э.Д.С. α , связанными формулой:

$$Z = \sigma \cdot \alpha^2 / \lambda. \quad (1.83)$$

Введем вспомогательный коэффициент M :

$$M = 1 + 0.5 \cdot Z \cdot (T_g - T_x) - 1. \quad (1.84)$$

Тогда, подставляя (1.84) в (1.81), получаем:

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_x}{T_g - T_x} \cdot \frac{M - \frac{T_g}{T_x}}{M + 1}. \quad (1.85)$$

Важно отметить, что холодильный коэффициент зависит от разности температур ($T_g - T_x$), создаваемой термоэлектрической батареей, и величины Z , характеризующей свойства термоэлектрика. Холодильный коэффициент стремится к своему максимальному значению при $Z \rightarrow \infty$. Поэтому основная задача термоэлектрического материаловедения – повышение добротности используемых материалов.

1.8.3. Режимы работы охлаждающих термоэлементов

Термоэлектрический холодильник может работать в различных режимах, наиболее важными из которых являются:

- 1) режим максимального холодильного коэффициента ε_{max} ;
- 2) режим максимальной холодопроизводительности Q_{max} .

В первом случае термоэлемент будет наиболее эффективно преобразовывать потребляемую электрическую энергию в «холод», во втором – в ущерб экономичности может быть получено наибольшее понижение температуры.

Иными словами, режим ε_{max} характеризует наиболее экономичную работу термоэлектрического холодильника, в то время как режим Q_{max} обеспечивает максимальное количество отведённого тепла в единицу времени.

В условиях *максимальной холодопроизводительности* холодильный коэффициент можно представить в виде:

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2T_g} \cdot \left(T_x - \frac{2 \cdot (T_g - T_x)}{Z \cdot T_x} \right). \quad (1.86)$$

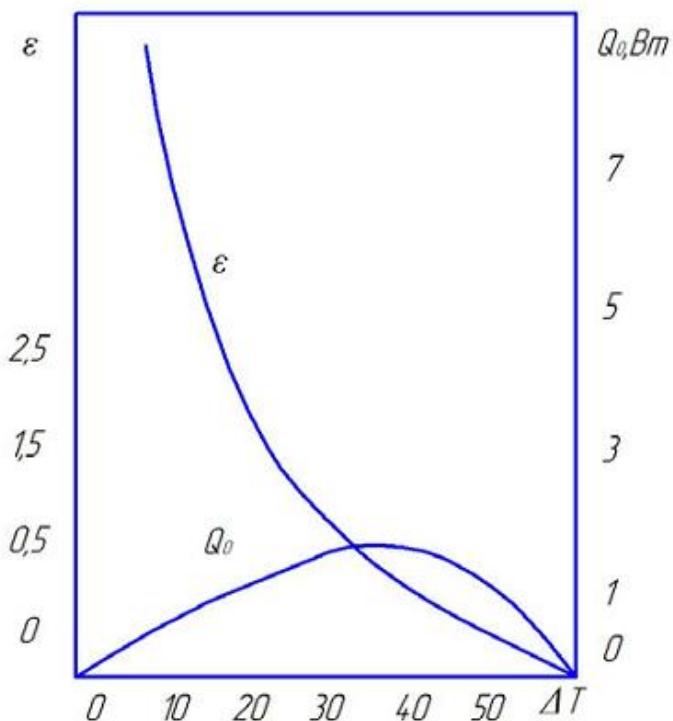


Рисунок 1.39 – Зависимость холодильного коэффициента ε и холодопроизводительности Q_0 от разности температур для режима максимального холодильного коэффициента

Режимы, близкие к максимальной холодопроизводительности, используются в маломощных системах, в которых экономия электроэнергии не является важным фактором. Напротив, в достаточно мощных устройствах целесообразно использовать режимы, близкие к условиям максимального холодильного коэффициента.

На практике термоэлектрические холодильники обычно работают при токах, составляющих $25 - 80\% I_{max}$.

Для термоэлектрического охладителя очень просто изменять режим работы от ε_{max} до Q_{max} и наоборот, а также работать в некотором промежуточном режиме путем изменения электрического напряжения. Иными словами, термоэлектрический охладитель отличает высокая функциональная гибкость.

Режим Q_{max} соответствует максимально возможному значению рабочего тока в термоэлементе. Для режима ε_{max} характерно то, что рабочий ток меняется в соответствии с изменением разности температур на спаях.

На рисунках 1.39 и 1.40 представлены типичные графические зависимости холодильного коэффициента и холодопроизводительности от перепада температур на термоэлементе для случаев режима максимального холодильного коэффициента и максимальной холодопроизводительности.

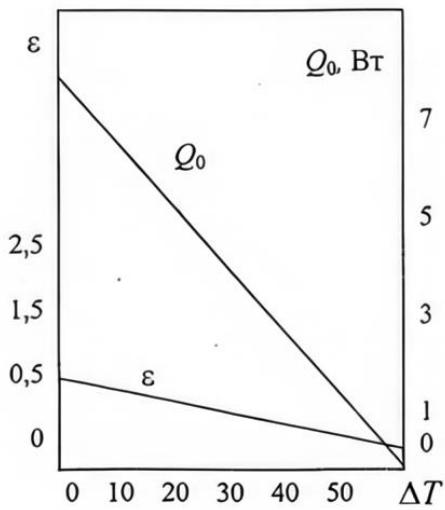


Рисунок 1.40 – Зависимость холодильного коэффициента ϵ и холодопроизводительности Q_0 от разности температур для режима максимальной холодопроизводительности

1.8.4. Расчёт термоэлектрических охлаждающих устройств

a) *Расчёт охлаждающей термобатареи в режиме максимального холодильного коэффициента.*

Иногда требуется произвести расчёты основных параметров термобатареи при заданных условиях эксплуатации и заданной холодопроизводительности при использовании полупроводникового вещества с известными характеристиками. Такими параметрами являются:

- холодильный коэффициент;
- мощность, которую будет потреблять термобатарея из сети;
- теплота, выделяемая на горячих спаях.

Режим максимального холодильного коэффициента в практических целях используется достаточно редко.

Следует также учитывать, что расстояние между спаями термоэлемента обычно не превышает 2 мм, поскольку при малых длинах возникают слишком большие теплопритоки с горячего спая на холодный. Чрезмерное же увеличение длины приводит к излишнему расходу материала и увеличению хрупкости конструкции.

b) *Расчёт охлаждающей термобатареи в режиме максимальной холодопроизводительности.*

При заданной геометрии ветви и известных характеристиках полупроводникового вещества требуется рассчитать:

- число термоэлементов;
- ток, проходящий через них;
- напряжение источника питания;
- потребляемую термобатареей мощность;
- холодильный коэффициент.

В таблице 1.9 представлены результаты и порядок расчёта конкретной термобатареи на основании следующих исходных данных: длина термоэлемента $l = 4 \text{ мм}$; сечение $S = 5,5 \text{ мм}^2$; добротность материала $Z = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; коэффициент термо-Э.д.с. $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ В/К}$; коэффициент электропроводности $\sigma = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; требуемая холодопроизводительность $Q_0 = 20 \text{ Вт}$; условия эксплуатации $T_x = 280 \text{ К}$, $T_g = 310 \text{ К}$.

Таблица 1.9 – Результаты расчета термобатареи

№ п/п	Определяемая величина	Расчетная формула	Результат расчета
1	Оптимальный ток $I_{\text{опт}}$, А	$I_{\text{опт}} = \alpha \cdot T_x \cdot \sigma \cdot S / 2 \cdot l$	5,7
2	Падение напряжения U_0 , В	$U_0 = \alpha \cdot T_g$	0,115
3	Холодильный коэффициент ε_d	$\varepsilon_d = \frac{1}{2T_g} \cdot \left(T_x - \frac{2 \cdot (T_g - T_x)}{Z \cdot T_x} \right)$	0,96
4	Сопротивление термопары R_0 , Ом	$R_0 = 2 \cdot l / \sigma \cdot S$	0,0182
5	Холодопроизводительность термопары Q^* , Ом	$Q^* = \frac{\alpha}{R_0} \cdot \left(\frac{T_x^2}{2} - \frac{T_g - T_x}{Z} \right)$	0,22
6	Число термопар N	$N = Q_0 / Q^*$	91
7	Мощность, затрачиваемая одной термопарой P_0 , Вт	$P_0 = Q_0 / \varepsilon_d$	0,76
8	Мощность источника питания P , Вт	$P = P_0 \cdot N$	69,16
9	Теплота горячих спаев Q_g , Вт	$Q_g = P + Q_0$	89
10	Напряжение источника питания U_n , В	$U_n = U_0 \cdot N$	10,5

Выбор стандартного термоэлектрического модуля для конкретного применения основывается, по крайней мере, на трёх параметрах [24].

Ими являются температуры горячей T_g и холодной T_x сторон модуля, а также тепловая нагрузка Q_0 , которую следует отводить от холодной стороны.

c) *Расчёт температуры горячей стороны модуля.*

Горячей стороной модуля является та сторона, на которой тепло выделяется при подаче постоянного электрического тока. На эту сторону монтируется теплообменник. При использовании воздушного охлаждения последнего (естественный или вынужденный теплообмен), температура горячей стороны может быть рассчитана по формуле:

$$T_g = T_{\text{окр}} + R_g \cdot Q_g, \quad (1.87)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$, R_g – тепловое сопротивление теплообменника горячей стороны модуля, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; Q_g – теплота, выделяемая на горячих спаях, Вт:

$$Q_g = P + Q_0, \quad (1.88)$$

здесь P – подводимая мощность, Вт.

Наличие теплового сопротивления теплообменника приводит к тому, что температура горячей стороны становится выше температуры окружающей среды на некоторую величину. Если тепловое сопротивление неизвестно, то оценить эту величину можно для различных случаев теплообмена:

- естественная конвекция – от 20 до 40°C;
- вынужденная конвекция – от 10 до 15°C;
- жидкостное охлаждение – от 2 до 5°C (выше температуры охлаждающей жидкости).

Теплообменник является ключевым компонентом данной конструкции. Если поверхность теплообмена оказывается недостаточной, то желаемое охлаждение может быть не достигнуто.

d) Расчёт температуры холодной стороны модуля.

Холодной стороной термоэлектрического модуля является та сторона, на которой тепло поглощается при пропускании через термобатарею постоянного тока. Температура холодной стороны T_x должна быть ниже температуры охлаждаемого объекта $T_{\text{об}}$, особенно, если он не находится с ней в непосредственном тепловом контакте:

$$T_x = T_{\text{об}} - R_x \cdot Q_0. \quad (1.89)$$

e) Расчёт требуемой холодопроизводительности.

Расчёт тепловой нагрузки, которую необходимо отводить с холодной стороны модуля для понижения температуры охлаждаемого объекта на определённую величину, представляется достаточно сложным, так как все тепловые нагрузки должны быть учтены. Среди таких нагрузок необходимо указать следующие:

- непосредственно тепло, которое необходимо отводить от охлаждаемого объекта для понижения его температуры на определённую величину:

$$Q = h \cdot G, \quad (1.90)$$

где h – энталпия охлаждаемого вещества, кДж/кг; G – его массовый расход, кг/с;

- теплоприток с горячей стороны модуля вследствие теплопроводности;
- тепло, выделяемое проводниками при прохождении через них электрического тока (с высокой степенью точности полагают, что половина джоулевого тепла $I^2 \cdot R$ поступает на холодную сторону, а половина – на горячую);
- теплоприток через слой теплоизоляции:

$$Q_{\text{прит}} = \lambda \cdot \Delta T \cdot S / \delta, \quad (1.91)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/м·К;

δ – толщина слоя теплоизоляции, м;

ΔT – перепад температур по толщине слоя, К;

S – поверхность теплоизоляции, м²;
– затраты «холода» на охлаждение материалов конструкции (теплообменник, трубопроводы подачи и т. д.).

f) Управление работой термоэлектрического охладителя.

Работа любого термоэлектрического модуля характеризуется параметрами I_{max} , V_{max} , Q_{max} и ΔT_{max} при определённом значении T_r .

Работа при максимальных значениях тока относительно неэффективна вследствие высоких значений джоулевого тепла. Поэтому обычно работают при значениях тока, составляющих от 25 до 80 % его максимальной величины. Подводимая мощность определяет температуру горячей стороны и холодопроизводительность при данной нагрузке.

Для любого термоэлектрического охладителя значение Q_{max} соответствует I_{max} и V_{max} , при нулевой разности температур. Значение ΔT_{max} соответствует максимальной разности температур между холодной и горячей сторонами модуля для I_{max} и V_{max} , при отсутствии нагрузки $Q_0 = 0$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 1

1. Что такое термоэлектрический генератор?
2. Применение элементов *Пельтье*.
3. Каковы особенности эксплуатации элементов *Пельтье*?
4. Принцип работы термоэлектрического генератора.
5. Способы оптимизации эффективности термопары.
6. На чем основывается эффект *Пельтье*?
7. Чем вызван эффект *Зеебека*?
8. Что такое эффект *Томсона*?
9. От чего зависит добротность материала и что это такое?
10. Каким показателем характеризуются материалы для термоэлектрических преобразователей?
11. Назовите основные разработки ТЭГ на органическом топливе.
12. Особенности ТЭГ с фотоэлементами (солнечными батареями).
13. Группы интервалов рабочих температур термопар.
14. Особенности автономных паротурбинных электростанций с ТЭГ.
15. Конструкции с радиоизотопными термоэлектрическими генераторами.
16. Достоинства элементов *Пельтье*.
17. Недостатки элементов *Пельтье*.
18. Допущения метода регулярного режима применительно к ТЭГ, ТЭО.
19. Приведите описание солнечного ТЭГ с концентратором и мощностью 5 Вт.
20. Какие характеристики необходимо знать для расчёта основных параметров термобатареи при заданных условиях эксплуатации и заданной холодопроизводительности при использовании полупроводникового вещества?
21. Какие параметры требуется рассчитать при заданной геометрии ветви и известных характеристиках полупроводникового вещества?

22. Какие параметры необходимо учитывать при расчете тепловой нагрузки?
23. В каких режимах может работать термоэлектрический холодильник?
24. В каких системах используются режимы, близкие к максимальной холодопроизводительности?
25. Какая сторона термоэлектрического модуля является холодной?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К РАЗДЕЛУ 1

1. Rowe D. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano [Book]. – Boca Raton : CRC Press, 2006. – Vol. Fl
2. A. B. Zhang, B.L. Wang, D. D. Pang, et. Influence of leg geometry configuration and contact resistance on the performance of annular thermoelectric generators [Journal] // Energy Conversion and Management. – 2018. – pp. 337-342.
3. Ahmet Z. Sahin, Bekir S. Yilbas The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry [Journal] // Energy Conversion and Management. – 2013. – pp. 26–32.
4. Luo Y., Kim C. H. Effects of the cross-sectional area ratios and contact resistance on the performance of a cascaded thermoelectric generator [Journal] // J. International Journal of Energy Research. – 2019. – pp. 572-596.
5. R. R. Heikes, R. W. Ure. Thermoelectricity [Article] // Science and Engineering Interscience. - New York: [s.n.], 1961.
6. Зайцев, А. А. Основы физики термоэлектричества: учебно-методическое пособие / А. А. Зайцев, Д. В. Кузнецов, А. В. Сидоров. – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2018. – 41 с.
7. Бернштейн, А. С. Термоэлектрические генераторы. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 47 с.
8. Galitskaya, A. O., Buslaev, R. D. Simulation of flexible thermo electric generators with different geometry [Journal] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019.
9. Поздняков, Б. С. Термоэлектрическая энергетика / Б. С. Поздняков, Е. А. Коптелов. – М.: Атомиздат, 1974. – 264 с.
10. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: учебное пособие для вузов / В. М. Бушуев, В. А. Демянский, Л. Ф. Захаров и др. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 384 с.
11. Онищенко, Д. О. Верификация расчётной модели термоэлектрического генератора для перспективного применения в составе ДВС / Д. О. Онищенко, Р. А. Сафонов, Г. А. Арутюнян. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия.
12. Бибик, И. С. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы: большое в малом / И. С. Бибик, А. И. Вальцева. – УФУ, 2015. – С. 351-354.
13. Nilsen, T. Nuclear Powered Lighthouses // Bellona working paper: Oslo, 1992. – № 5.
14. Зайцев, А. А. Основы физики термоэлектричества: учебно-методическое пособие / Зайцев А. А., Кузнецов Д. В., Сидоров А. В. – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2014. – 43 с.
15. Грабов, В. М. и др. Термоэлектрические явления и термоэлектрокинетические явления в жидких биологических системах // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88. – № 10. – С. 1462–1466.
16. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов. – М.: Мир, 1967. – 544 с.

17. Франк-Каменецкий, Д. А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 408 с.
18. Воюцкий, С. С. Курс коллоидной химии. 2-е изд. М.: Химия, 1975. – 512 с.
19. Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора: лаб. практикум / В. Н. Белозерцев и др. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 76 с.
20. Булат, Л. П., Ведерников М. В. и др. Термоэлектрическое охлаждение: Текст лекций – СПб: СПбгуНиПТ, 2002. – 147 с.
21. Thermoelectric Materials – New Directions and Approaches // MRS, Pittsburgh, 1998. – V.478. – 348 p.
22. Холодильные машины: учеб. для студентов втузов специальности «Техника и физика низких температур» / [А. В. Бараненко и др.]; под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 1997. – 992 с.
23. Anatychuk L.I. Physics of Thermoelectricity. – Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 1998.
24. Godfrey S. An Introduction to Thermoelectric Coolers // Electronics Cooling. 1996. vol. 2. No.3.
25. Стаханов, И. П. Физика термоэмиссионного преобразователя / И. П. Стаханов, В. Е. Черковец. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
26. Ярыгин, В. И. Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии. Ч. 1. Введение в специальность: учебное пособие. Обнинск: ИАТЭ, 2006. – 104 с.
27. Ушаков, Б. А. Основы термоэмиссионного преобразования энергии / Б. А. Ушаков, В. Д. Никитин, И. Я. Емельянов – М.: Атомиздат, 1974. – 289 с.

РАЗДЕЛ 2. ТЕРМОЭМИССИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

2.1. Термоэлектронная эмиссия

Явления, происходящие в термоэмиссионных преобразователях, особенно в газонаполненных, довольно сложны. Однако работа всех типов термоэмиссионных преобразователей основана на использовании двух эффектов: *термоэлектронной эмиссии и контактной разности потенциалов*. Контактная разность потенциалов возникает между поверхностями двух разнородных тел, электрически соединенных друг с другом. Если работы выхода этих тел равны соответственно φ_1 и φ_2 , то между их поверхностями существует разность потенциалов, называемая *контактной* и численно равная разности работ выхода:

$$E_k = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2.1)$$

В выражении (2.1) φ представляет собой истинную работу выхода, обычно измеряемую в электрон-вольтах или в вольтах, в последнем случае под работой выхода понимается значение φ/e , где e – заряд электрона. В обоих случаях численные значения работы выхода одинаковы.

Термоэлектронная эмиссия характеризуется плотностью тока насыщения эмиссии, т. е. максимальной при данной температуре поверхности и отсутствии электрических полей плотностью тока эмиссии. Плотность эмиссионного тока насыщения J_s определяется по формуле, называемой *формулой Ричардсона–Дэшмана*:

$$J_s = A \cdot T^2 \cdot \exp[-\varphi/(k \cdot T)], \quad (2.2)$$

где $A = 4\pi \cdot m \cdot e \cdot k^2 \cdot h^{-3} = 120,4 \text{ а}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ – универсальная постоянная, иногда называемая постоянной Зоммерфельда; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – температура поверхности. Следует подчеркнуть, что формула (2.2) дает значение плотности эмиссионного тока насыщения для случая, когда внешнее электрическое поле у поверхности равно нулю. При наличии внешнего электрического поля E эмиссионный ток не имеет истинного насыщения и непрерывно увеличивается с возрастанием электрического поля. Этот эффект получил название *эффекта Шоттки*. В этом случае плотность эмиссионного тока определяется формулой:

$$J = J_s \cdot \exp[e^{2/3} \cdot E^{1/2}/(k \cdot T)]. \quad (2.3)$$

Уравнение (2.2) не определяет еще зависимость плотности тока насыщения эмиссии от температуры в явном виде, поскольку истинная работа выхода φ также зависит от температуры. Для небольшого интервала изменения

температуры относительно некоторого значения T_0 можно разложить $\varphi(T)$ в ряд и ограничиться только первыми двумя членами разложения:

$$\varphi(T) = \varphi(T_0) + (d\varphi/dT)_{T_0}(T - T_0). \quad (2.4)$$

Перепишем соотношение (2.4) в виде $\varphi(T) = \varphi(T_0) + \alpha(T - T_0)$, где $\alpha = (d\varphi/dT)_{T_0}$. Подставляя это соотношение в формулу (2.2), получаем:

$$J_S = A_R \cdot T^2 \cdot \exp[-\varphi_R/(k \cdot T)], \quad (2.5)$$

где

$$A_R = A \exp(-\alpha/k); \quad \varphi_R = \varphi(T_0) - \alpha T_0. \quad (2.6)$$

В уравнении (2.5) A_R и φ_R – не зависящие от температуры величины. Постоянная A_R называется *постоянной Ричардсона*, φ_R – *работа выхода Ричардсона*.

Значения A_R и φ_R определяются по экспериментальной зависимости $J_S(T)$. Подставляя в уравнение (2.5) численное значение постоянной Больцмана и переходя к десятичному основанию, получаем:

$$J_S = A_R \cdot T^2 \cdot 10^{-(5040\varphi_R/T)}. \quad (2.7)$$

Прологарифмировав уравнение (2.7), будем иметь:

$$\lg(J_S/T^2) = \lg A_R - (5040\varphi_R/T). \quad (2.8)$$

Если для некоторого эмиттера экспериментально измерить плотность эмиссионного тока насыщения при различных температурах эмиттера и построить зависимость $\lg(J_S/T^2)$ от $5040/T$, то на графике должна получиться прямая линия, поскольку A_R и φ_R от температуры не зависят [см. формулу (2.6)].

Таблица 2.1 – Эмиссионные характеристики карбидов

Материал	$A_R, a/(\text{см}^2 \cdot \text{K}^2)$	$\varphi_R, \text{эВ}$	φ_{120} при 1800 К, эВ	$\alpha, \text{эВ} \cdot \text{К}^{-1}$
TaC _{0,8} -ZrC _{0,2}	2	3,4	4,0	$\sim 10^{-4}$
TaC	40	4,0	4,1	$\sim 10^{-5}$
ZrC _{0,5} -UC _{0,5}	40	3,5	3,7	$\sim 10^{-5}$
ZrC	45	4,2	4,4	$\sim 10^{-5}$
TiC	90	4,1	4,1	$\sim 10^{-5}$
UC	33	2,94	-	$1,1 \cdot 10^{-4}$
ZrC _{0,8} -UC _{0,2}	12	3,1	-	-

Если $\lg(J_S/T^2)$ откладывать по оси ординат, то тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс будет равен φ_R , а пересечение прямой (или её

продолжения) с осью ординат определит отрезок на оси ординат, равный $\lg A_R$. Как видно из соотношения (2.6), постоянная Ричардсона A_R может быть как больше A , так и меньше, поскольку коэффициент α может быть и отрицательным, и положительным.

Для большинства металлов значения истинной работы выхода лежат в диапазоне 4–5 эВ. Наименьшую работу выхода из изученных элементов имеет цезий (1,8 эВ), а наибольшую – йод (6,8 эВ). Помимо истинной и ричардсоновской работ выхода часто используют так называемую *эффективную работу выхода*. Эффективная работа выхода получается из уравнения Ричардсона-Дэшмана (2.2) при подстановке в это уравнение значения $A = 120 a / (\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$, а также температуры эmitтирующей поверхности T и экспериментального значения плотности эмиссионного тока насыщения при этой температуре, т. е.:

$$\varphi_E = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{120 \cdot T^2}{J_S}\right). \quad (2.9)$$

Эффективную работу выхода иногда обозначают φ_{120} . Как видно из формулы (2.9), эффективная работа выхода зависит от температуры. Эмиссионные характеристики некоторых соединений приведены в таблице 2.1 [1]. Существование контактной разности потенциалов вместе с явлением термоэмиссионной эмиссии и позволяет создать термоэмиссионный преобразователь тепловой энергии непосредственно в электрическую.

2.2. Принцип действия вакуумного термоэмиссионного преобразователя

Принцип работы термоэмиссионных преобразователей основан на явлении эмиссии заряженных частиц с нагретого электрода. Имеет широкое распространение в радиотехнике. С 1960-х годов началось исследование с использованием термоэмиссии для производства электроэнергии. Термоэмиссионное преобразование энергии основано на использовании двух физических явлений – термоэлектронной эмиссии и контактной разности потенциалов, возникающей между поверхностями двух разнородных тел, электрически связанных друг с другом и имеющих разные работы выхода электрона.

Простейший термоэмиссионный преобразователь представляет собой диод, межэлектродное пространство которого откачено до низкого давления 10^{-6} – 10^{-8} мм рт. ст. (рисунок 2.1). Подобный преобразователь обычно называют вакуумным. При нагревании одного из электродов – эmitтера – с поверхности последнего начинают эmitтировать электроны. Через межэлектродный промежуток электроны эмиссии поступают на второй электрод – коллектор, температура которого должна быть существенно ниже температуры эmitтера. В отличие от радиотехнического диода, к коллектору диода-преобразователя не прикладывается внешнее напряжение. Диод-

преобразователь сам является источником напряжения. Необходимое условие для этого заключается в том, чтобы работа выхода эмиттера φ_E была больше работы выхода коллектора φ_C . В этом случае между ними будет существовать разность потенциалов E_k , равная разности их работ выхода [см. формулу (2.1)]. Чтобы диод был источником электрического тока, температура одного из электродов – эмиттера – должна быть достаточно высокой, чтобы плотность эмиссионного тока насыщения с эмиттера J_{SE} , определяемая уравнением (2.2), достигала значений, представляющих практический интерес. Температура коллектора, наоборот, должна быть достаточно низкой, чтобы плотность эмиссионного тока насыщения с коллектора J_{SC} , была значительно меньше J_{SE} .

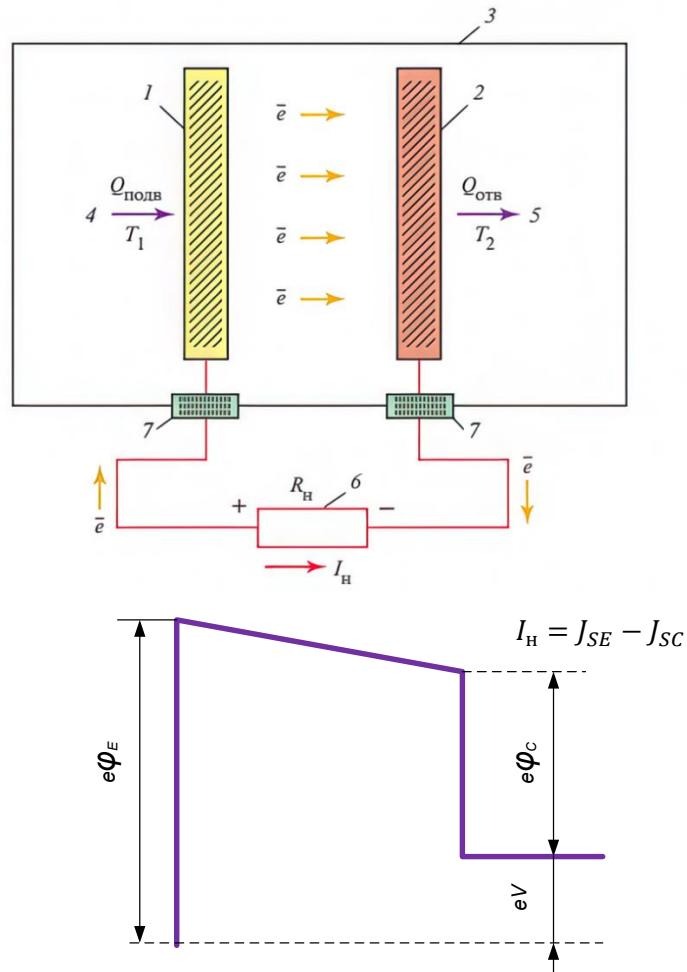


Рисунок 2.1 – Схема ТЭП: 1 – эмиттер (катод); 2 – коллектор (анод); 3 – герметичный корпус; 4 – подводимая теплота; 5 – отводимая теплота; 6 – нагрузка; 7 – вакумно-плотный узел

Таким образом, диод-преобразователь состоит (рисунок 2.1) из двух электродов: высокотемпературного эмиттера 1 и имеющим меньшую температуру коллектора 2, с применением межэлектродного зазора, который заполнен паром цезия, создающий при работе прибора слабоионизованную плазму или проводящую среду с высоким коэффициентом термоэлектродвижущей силы. Электроды расположены в герметичном корпусе.

Если предположить, что электроны эмиссии беспрепятственно проходят через межэлектродный промежуток, то плотность тока преобразователя будет равна $J_{np} = J_{SE} - J_{SC}$. Электроны эмиссии уносят с электрода определенную энергию. Если $J_{SC} = 0$, то при плотности тока эмиттера J_{SE} с единицы его площади уносится энергия, равная $(1/e) \cdot J_{SE} \times (e \cdot \varphi_{SE} + 2kT_E)$ (здесь и в дальнейшем работа выхода выражается в вольтах). Первое слагаемое в скобках представляет собой *потенциальную энергию электронов эмиссии относительно уровня Ферми* эмиттера, а второе – *среднюю кинетическую энергию электронов эмиссии* при температуре эмиттера T_E . Попадая на коллектор, электроны отдают ему свою кинетическую энергию $2kT_E$ и, опускаясь на уровень *Ферми* коллектора, уменьшают свою потенциальную энергию относительно уровня Ферми эмиттера на величину $e\varphi_C$. Если $\varphi_E > \varphi_C$, то электроны имеют избыток потенциальной энергии, равный $J_{SE} \cdot (\varphi_E - \varphi_C)$. Прежде чем по внешней электрической цепи вернуться на эмиттер, электроны за счет этого избытка энергии могут совершить полезную работу. Отдавая коллектору часть своей энергии, электроны, естественно, нагревают его. Поэтому *от коллектора необходимо постоянно отводить тепло*.

Электроны эмиссии уносят с эмиттера значительное количество тепловой энергии, однако только часть её может быть непосредственно превращена в электрическую. Остальная часть энергии, равная $J_{SE} \left(\varphi_C + \frac{2k}{e} T_E \right)$, идет *на нагревание коллектора* и для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую уже потеряна. Кроме того, часть тепловой энергии, подводимой к эмиттеру, *теряется излучением* и также не участвует в непосредственном преобразовании энергии. К сожалению, в вакуумном термоэмиссионном преобразователе существует еще один источник потерь, свойственный этому типу преобразователя. Дело в том, что электроны эмиссии создают в межэлектродном промежутке *отрицательный пространственный заряд*, который препятствует движению электронов эмиссии к коллектору вследствие отталкивания одноименных зарядов. Чем больше межэлектродное расстояние, тем больше ширина и высота потенциального барьера и тем меньше электронов преодолеют этот барьер и достигнут коллектора. При межэлектродном расстоянии порядка 0,1 мм или больше эмиссионный ток, достигающий коллектора, составляет ничтожно малую долю от тока насыщения эмиттера. Уменьшение межэлектродного расстояния до 0,01 мм и меньше приводит к значительному уменьшению влияния пространственного заряда электронов.

Более того, даже при значительном уменьшении влияния пространственного заряда вследствие уменьшения межэлектродного расстояния длительная работа вакуумного термоэмиссионного преобразователя с достаточно высокими плотностями тока оказывается невозможной из-за *испарения материала эмиттера*.

2.3. Теория идеального диода

Рассмотрим электрические характеристики идеального диода – преобразователя тепловой энергии непосредственно в электрическую для определения предельных характеристик реального ТЭП.

Идеальным диодом называется диод, в котором:

- электроны эмиссии беспрепятственно достигают коллектора;
- отсутствуют *джоулевы* потери энергии в электродах и токовводах;
- эмиттер является изотермическим;
- температура коллектора настолько низка, что эмиссионный ток с его поверхности отсутствует.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеального диода имеет вид, изображенный на рисунке 2.2. Там же показаны распределение потенциальной энергии электронов по межэлектродному промежутку, соответствующие различным участкам ВАХ. Участок *AB* характеризует область тока насыщения. Для любой точки этого участка плотность тока диода равна плотности тока насыщения J_{SE} . Полезное напряжение диода увеличивается при перемещении к точке *B*, в которой оно достигает значения U_0 , равного контактной разности потенциалов, т. е. $U_0 = \varphi_E - \varphi_C$.

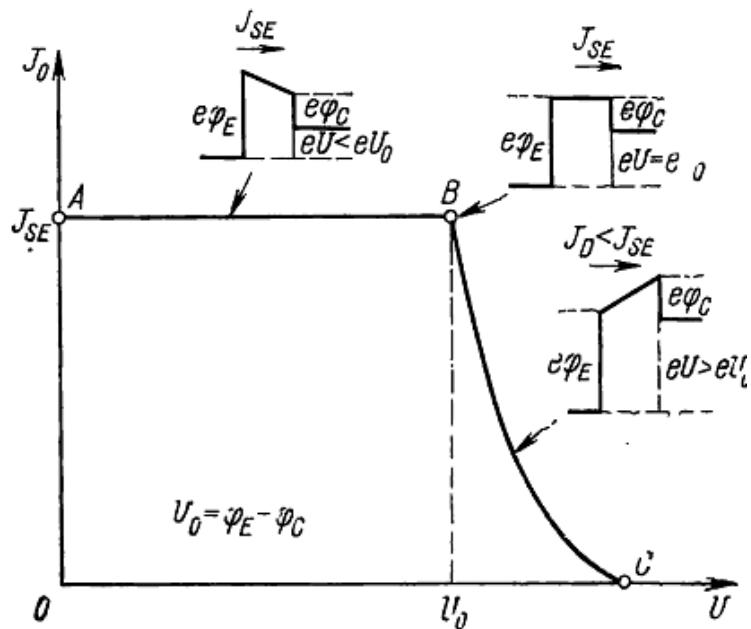


Рисунок 2.2 – Вольт-амперная характеристика идеального диода-преобразователя и диаграммы потенциальной энергии электронов

В соответствии с этим плотность полезной мощности диода линейно увеличивается от нуля в точке *A* до значения $p_0 = J_{SE} \cdot U_0$, в точке *B*, в которой потенциалы эмиттера и коллектора равны.

При дальнейшем увеличении сопротивления нагрузки, приводящем к возрастанию полезного напряжения, потенциал коллектора становится меньше потенциала эмиттера (потенциал и потенциальная энергия электрона имеют

положительные знаки). Плотность тока диода J_D уже не зависит от работы выхода эмиттера и определяется высотой потенциального барьера ($\varphi_C + U$):

$$J_D = A \cdot T_E^2 \exp[-e(\varphi_C + U)/(k \cdot T_E)] = J_{SE} \exp[-e\Delta V/(kT)], \quad (2.10)$$

где $\Delta V = -\varphi_E + \varphi_C + U$. Так как $\Delta V > 0$, то $J_D < J_{SE}$. Поэтому участок ВС на ВАХ называется *областью задерживающего потенциала*. Плотность электрической мощности диода в этой области равна:

$$p = J_D \cdot U = J_{SE} \cdot U \exp[-e\Delta V/(k \cdot T)]. \quad (2.11)$$

Коэффициент полезного действия диода η равен отношению полезной электрической мощности к полной подводимой к эмиттеру тепловой мощности. В установившемся режиме эта тепловая мощность равна потерям тепловой энергии эмиттером.

Для идеального диода потери энергии эмиттером определяются двумя процессами: эмиссией электронов и излучением. Тепловая энергия, уносимая электронами эмиссии с единицы поверхности эмиттера в единицу времени, равна:

$$q_e = J_D [\varphi_E + (2k \cdot T_E/e)]. \quad (2.12)$$

Как известно, максимально возможные при температуре T_E потери энергии излучением – у *абсолютно черного тела* – равны σT_E^4 с единицы поверхности в единицу времени. Отличие реальной поверхности от поверхности абсолютно черного тела характеризуется *степенью черноты* ε , значения которой лежат в диапазоне $0 < \varepsilon < 1$. Вообще говоря, степень черноты ε зависит от температуры поверхности. Для системы, состоящей из двух противостоящих друг другу поверхностей различных тел, перенос энергии излучением с одной поверхности на другую помимо температур последних определяется *эффективной степенью черноты* ε_S .

В рассматриваемом случае подобную систему составляют эмиттер и коллектор. В этой системе потери энергии излучением с эмиттера с единицы площади за 1 сек равны:

$$q_\Gamma = \varepsilon_S \sigma (T_E^4 - T_C^4), \quad (2.13)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻² · К⁻⁴ – постоянная Стефана-Больцмана; T_E, T_C – соответственно температуры эмиттера и коллектора; ε_S – эффективная степень черноты (для плоских электродов $\varepsilon_S = \left(\frac{1}{\varepsilon_E} - \frac{1}{\varepsilon_C} + 1 \right)^{-1}$, где $\varepsilon_E, \varepsilon_C$ – степени черноты эмиттера и коллектора соответственно; для цилиндрических

электродов $\varepsilon_S = \left[\frac{1}{\varepsilon_E} + \frac{r_E}{r_C} \left(\frac{1}{\varepsilon_C} - 1 \right) \right]^{-1}$, где r_E, r_C – радиус эмиттера и коллектора соответственно.)

Таким образом, коэффициент полезного действия идеального диода:

$$\eta_D = \frac{J_D \cdot U}{J_D [\varphi_E + (2kT_E/e)] + \varepsilon_S \sigma (T_E^4 - T_C^4)}, \quad (2.14)$$

где J_D – плотность тока диода; U – полезное напряжение диода.

Зависимость КПД и плотности электрической мощности идеального диода от полезного напряжения диода U для участка AB ВАХ:

$$J_D = J_{SE} = AT_E^2 \exp[-e\varphi_E/(kT_E)]. \quad (2.15)$$

Максимальная электрическая мощность p_{\max} достигается в точке B , где:

$$p_{\max} = J_{SE}(\varphi_E - \varphi_C). \quad (2.16)$$

КПД η_{\max} также достигает максимума в точке B , где

$$\eta_{\max} = \frac{J_{SE}(\varphi_E - \varphi_C)}{J_{SE}[\varphi_E + (2kT_E/e)] + \varepsilon_S \sigma (T_E^4 - T_C^4)}. \quad (2.17)$$

Для идеального диода оптимальное полезное напряжение $U = U_0 = (\varphi_E - \varphi_C)$. Определим оптимальное (относительно электрических характеристик идеального диода) значения работ выхода эмиттера и коллектора. Поскольку эмиссионный ток коллектора считается пренебрежительно малым, то чем меньше работа выхода коллектора φ_C , тем больше p_{\max} и η_{\max} .

Значения φ_E , при которых для точки B достигаются максимальные значения КПД, определяются из условия $\partial\eta_D/\partial\varphi_E = 0$.

Дифференцируя (2.17) и приравнивая получившееся выражение нулю, будем иметь:

$$(\varphi_E)_{\text{опт}} = \varphi_C + (kT_E/e) \left[1 + \frac{(\varphi_C + 2kT_E/e)J_{SE}}{q_r} \right]. \quad (2.18)$$

2.4. Идеальный ТЭП. Поверхностная ионизация

Рассмотрим возможность достижения характеристик идеального ТЭП. На работу ТЭП оказывает влияние отрицательный пространственный заряд электронов, что при технически возможных межэлектродных расстояниях приводит к резкому уменьшению тока эмиссии с эмиттера. В результате полезная электрическая мощность вакуумного ТЭП оказывается очень низкой и

большого практического интереса не представляет. Для нейтрализации отрицательного пространственного заряда электронов более перспективно введение в межэлектродный промежуток ТЭП положительных ионов. Существуют два способа введения положительных ионов:

- *поверхностная ионизация*;
- *объемная ионизация*, т. е. ионизация газа в межэлектродном промежутке.

Первый способ – *поверхностная ионизация*. Если межэлектродный промежуток ТЭП заполнить газом, атомы которого имеют низкий потенциал ионизации, то при ударе нейтральных атомов газа о нагретую до высокой температуры (порядка 2000 К) поверхность эмиттера часть газов ионизируется. Ионизация атомов газа на нагретой поверхности твердого тела называется *поверхностной ионизацией*. Впервые поверхностную ионизацию наблюдали *Ленгмюр и Кингдон* в 1923 году при рассмотрении ионизации атомов цезия на поверхности вольфрама.

Поверхностную ионизацию принято характеризовать отношением потока ионов v_i , идущего от поверхности, к потоку нейтральных атомов v , поступающему на поверхность из межэлектродного промежутка за тот же промежуток времени:

$$\beta = v_i/v. \quad (2.19)$$

Величина β называется *коэффициентом поверхностной ионизации*. Если все удары атомов о поверхность приводят к их ионизации, то $\beta = 1$. В другом крайнем случае, когда ионизация не происходит, $\beta = 0$.

Иногда используют отношение потока ионов v_i , идущего от поверхности, к потоку атомов v_a , идущему от поверхности за тот же период времени:

$$\alpha = v_i/v_a. \quad (2.20)$$

Отношение α называется *степенью ионизации*. В стационарном случае $v = v_i + v_a$. Следовательно, из (2.19) и (2.20) имеем:

$$\beta = \alpha/(\alpha + 1). \quad (2.21)$$

Очевидно, что $0 \leq \beta \leq 1$, $0 \leq \alpha \leq \infty$. Зависимость степени ионизации α от потенциала ионизации атома, работы выхода и температуры поверхности определяется формулой *Саха-Ленгмюра*:

$$\alpha = (g_i/g_0)\exp[e(\varphi_E - V_i)/(kT)], \quad (2.22)$$

где g_i, g_0 – статистические веса ионов и атомов соответственно; V_i – потенциал ионизации атомов.

С помощью формулы (2.21) из выражения (2.22) для коэффициентов поверхностной ионизации β получим:

$$\beta = \{1 + (g_i/g_0)\exp[-e(\varphi_E - V_i)/(kT)]\}^{-1}. \quad (2.23)$$

Из формулы (2.23) видно, что для получения больших значений коэффициента ионизации необходимо выполнение условия $\varphi_E > V_i$. При $\varphi_E > V_i$ и увеличении разности $\varphi_E - V_i$ коэффициент ионизации стремится к 1, а при $\varphi_E < V_i$ и увеличении разности $V_i - \varphi_E$ коэффициент ионизации стремится к 0. Условие ионизации $\varphi_E > V_i$ выполняется при ионизации атомов цезия ($V_i = 3,89$ В) на поверхности вольфрама ($\varphi_E = 4,5$ В).

Зависимость β при ионизации атомов цезия от работы выхода поверхности приведена на рисунке 2.3.

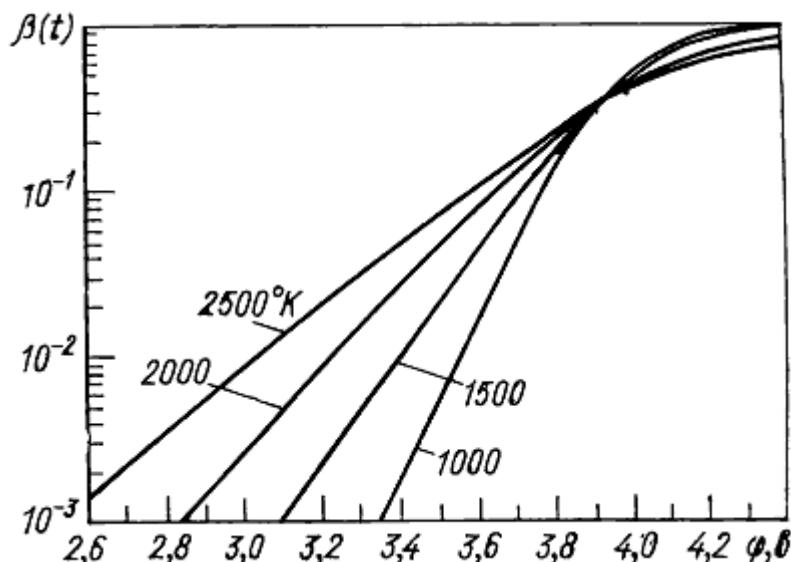


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента ионизации атомов цезия от работы выхода поверхности

Условие нейтрализации пространственного заряда электронов ионами, образующимися в результате поверхностной ионизации, сводится к равенству объемных концентраций n_e и положительно заряженных ионов n_i во всем межэлектродном промежутке:

$$J_{SE} = e\beta(m/M)^{1/2}\nu, \quad (2.24)$$

где J_{SE} – плотность эмиссионного тока насыщения; m и M – массы электронов и ионов соответственно; ν – поток атомов на поверхность эмиттера из межэлектродного пространства, $\nu = p(2\pi M k T_\Gamma)^{-1/2}$.

Тогда давление газа в межэлектродном промежутке, необходимое для полной нейтрализации пространственного заряда электронов при эмиссионном токе насыщения J_{SE} и данном значении β :

$$p = [J_{SE}/(e\beta)](2\pi M k T_\Gamma)^{1/2}, \quad (2.25)$$

где M – масса ионов; T_g – температура газа в межэлектродном пространстве.

Подставляя в (2.25) значение β из формулы (2.23), получаем окончательно условие нейтрализации пространственного заряда электронов ионами, образующимися в результате поверхностной ионизации:

$$p = (J_{SE}/e)(2\pi M k T_g)^{1/2} \{1 + (g_i/g_0)\exp[-e(\varphi_E - V_i)/(kT)]\}. \quad (2.26)$$

Поверхностная ионизация позволяет нейтрализовать отрицательный заряд электронов. При этом давления паров цезия, необходимые для нейтрализации плотностей эмиссионного тока порядка $10\text{--}20 \text{ а/см}^2$, представляющих практический интерес, оказываются достаточно низкими – менее $0,1 \text{ мм рт. ст.}$ При таких давлениях атомы цезия, заполняющие межэлектродный промежуток, незначительно влияют на перенос электронов эмиссии с эмиттера на коллектор при реально осуществимых межэлектродных расстояниях $0,1\text{--}0,5 \text{ мм.}$

Однако, из-за испаряемости эмиттера, достигнуть характеристики идеального ТЭП невозможно.

2.5. Чистые эмиттеры

Возможность достижения характеристик идеального ТЭП появляется при использовании чистых эмиттеров, т. е. эмиттеров, поверхность которых состоит из тех же атомных компонентов, что и внутренние слои.

В таблице 2.2 приведены значения работ выхода некоторых тугоплавких металлов и соединений, возможных в качестве материалов эмиттеров, а также оптимальные рабочие температуры, полученные для указанных материалов для типичных значений работы выхода коллектора $\varphi_C = 1,8 \text{ В}$ и эффективной степени черноты $\varepsilon_S = 0,25$.

Сравнение оптимальных температур, соответствующих максимально достижимому КПД для данного материала эмиттера, с температурами плавления показывает, что тугоплавкие металлы, а также карбиды циркония и урана не позволяют осуществить оптимальный режим, поскольку их оптимальные температуры близки к температурам плавления, а в случае молибдена и рения даже превышают их.

Приемлемые на практике значения КПД и полезной электрической мощности достигаются при плотности эмиссионного тока эмиттера порядка $J_{SE} = 10 \text{ А/см}^2$. Соответствующие значения температур приведены в таблице 2.2. Эти значения меньше оптимальных, но все-таки достаточно высоки, так что вполне естественно ожидать большой скорости испарения материалов чистых эмиттеров при указанных температурах. Приведенные в предпоследнем столбце таблицы 2.2 скорости испарения, выраженные в толщинах слоя, испаряющегося с поверхности эмиттера за год непрерывной работы ТЭП при $J_{SE} = 10 \text{ А/см}^2$, подтверждают эти опасения.

Таблица 2.2 – Характеристики материалов чистых эмиттеров

Материал	Работа выхода φ_E , В	Температура плавления, К	Температура, К, при $\varphi_c = 1,8$ В; $\varepsilon_s = 0,25$		Испаряемость при $J_{SE} = 10$ А/см ² , мм/год	$F_a/(e\varphi_E)$
			Оптимальная, К	при $J_{SE} = 10$ А/см ²		
Mo	4,3	2890	3400	2750	1000	0,6
Re	4,9	3450	3800	3050	100	0,8
W	4,54	3680	3600	2900	5	1,0
Ta	4,2	3270	3200	2700	5	1,0
ZrC	3,8	3690	3000	2450	5	1,0
UC	3,3	2750	2600	2150	0,86	1,1
ZrC _{0,8} -UC _{0,2}	3,3	-	2600	2100	0,15	1,2
LaB ₆	2,7	-	2000	1900	0,15	1,2

Таким образом, испаряемость материала эмиттера является серьезным препятствием для использования даже наиболее перспективных материалов чистых эмиттеров при плотностях тока преобразователя порядка 10 А/см² и длительном (около 1 года) сроке службы.

При обычных температурах атомы крепко связаны друг с другом и самопроизвольно не могут покинуть данный образец металла. Можно представить, что на его границе с вакуумом существует потенциальный барьер. При нагревании металла атомы, составляющие кристаллическую решетку, все более интенсивно совершают колебательное движение относительно своего равновесного положения – *возбуждаются*. В результате у атомов появляется заметная вероятность преодолеть потенциальный барьер на границе рассматриваемого образца с вакуумом и покинуть металл – испариться. Как и в случае эмиссии электронов, зависимость скорости испарения атомов v_a от температуры имеет экспоненциальную форму, характерную для термического процесса [2]:

$$v_a = (a/\rho)(M/T_E)^{1/2} \exp[-F_a/(kT_E)], \quad (2.27)$$

где v_a – поток испаряющихся атомов; a – некоторая постоянная; ρ – плотность; F_a – энергия испарения; M – молекулярный вес.

Таблица 2.3 – Скорость испарения материала эмиттера при различных значениях $F_a/(e\varphi_E)$

$F_a/(e\varphi_E)$	Скорость испарения, мм/год	$F_a/(e\varphi_E)$	Скорость испарения, мм/год
0,9	30	1,2	0,15
1,0	5,0	1,3	0,025
1,1	0,86	1,4	0,0050

В таблице 2.3 приведены значения скорости испарения материала катода при различных значениях отношения $F_a/(e\varphi_E)$ для типичных значений параметров, входящих в уравнение (2.26), и для $J_{SE} = 10 \text{ A}/\text{см}^2$. Из данных таблицы 2.3 видно, что материалы, имеющие отношение $F_a/(e\varphi_E) \leq 1,2$, интенсивно испаряются при непрерывной работе эмиттера в течение года при температурах, обеспечивающих плотность эмиссионного тока $10 \text{ A}/\text{см}^2$.

Возвращаясь к таблице 2.2, замечаем, что приведенные в ней материалы чистых эмиттеров не удовлетворяют условию $F_a/(e\varphi_E) \leq 1,2$ и лишь некоторые (например, $ZrC_{0,8}$ - $UC_{0,2}$) приближаются к этому пределу.

Анализ процессов эмиссии электронов и испарения атомов [3] показывает, что большая скорость испарения атомов чистого эмиттера неизбежна при температурах, обеспечивающих получение $J_{SE} \geq 10 \text{ A}/\text{см}^2$.

В результате ограничения по испарению эмиттера длительная эффективная работа ТЭП с чистым эмиттером при плотностях эмиссионного тока $J_{SE} \geq 10 \text{ A}/\text{см}^2$ оказывается невозможной.

2.6. Адсорбирующие эмиттеры

Адсорбция томов газов (или паров) элементов, имеющих низкое значение работы выхода, на поверхности эмиттера с высокой работой выхода приводит к уменьшению эффективной работы выхода эмиттера. В результате значительные плотности эмиссионного тока можно получить при умеренных температурах эмиттера (1500 – 1700 °С). Именно *использование явления адсорбции для изменения работы выхода электродов позволяет создать термоэмиссионные преобразователи с длительным ресурсом и хорошими электрическими характеристиками*.

Рассмотрим вопрос, как изменятся условия работы эмиттера при адсорбции паров цезия на его поверхности. Уменьшение работы выхода эмиттера при адсорбции газов приводит к искусциальному увеличению отношения $F_a/(e\varphi_E)$, что в соответствии с данными таблицы 2.3 вызывает уменьшение скорости испарения материала эмиттера. Например, для чистого вольфрама $F_a/(e\varphi_E) = 1,0$, что при $J_{SE} = 10 \text{ A}/\text{см}^2$ соответствует испарению слоя толщиной около 5 мм за 1 год работы ТЭП. При уменьшении работы выхода вольфрама до $\varphi_E = 3,6$ В за счет адсорбции получим $F_a/(e\varphi_E) = 1,3$, что соответствует толщине слоя 0,025 мм, испаряющегося за 1 год при $J_{SE} = 10 \text{ A}/\text{см}^2$.

Адсорбция паров цезия на поверхности вольфрамового эмиттера позволяет в принципе получить работу выхода эмиттера в значительно более широком диапазоне, чем необходимо для выполнения условия $F_a/(e\varphi_E) > 1,2$.

Определим теперь минимальное значение работы выхода эмиттера, которое при фиксированных значениях давления паров позволяет нейтрализовать плотность тока насыщения эмиттера. Условие нейтрализации дается формулой (2.24). Если работа выхода эмиттера φ_E меньше потенциала

ионизации атомов цезия, то единицей в знаменателе формулы (2.23) для β можно пренебречь, подставляя результирующее выражение в формулу (2.24) и выражая работу выхода эмиттера в явном виде, получаем:

$$\varphi_{\min} = \frac{V_i}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{2AT^2}{ev} \sqrt{\frac{m}{M}} \right); \varphi_E < V_i, \quad (2.28)$$

где φ_{\min} – минимальное значение работы выхода, достаточное для нейтрализации заряда электронов при данной плотности тока насыщения с эмиттера только эмиссией ионов. Если φ_E меньше оптимального (φ_E)_{опт}, то φ_{\min} определяется уравнением:

$$\varphi_{\min} = V_i - \varphi_{\text{опт}} + kT \ln \left\{ [AT^2/(ev)] \sqrt{m/M} \right\}, \varphi_{\text{опт}} \leq \varphi_E < V_i, \quad (2.29)$$

При выводе этой формулы J_{SE} определялось по выражению:

$$J_{SE} = AT^2 \exp[-e\varphi_{\text{опт}}/kT]. \quad (2.30)$$

На рисунке 2.4 приведены зависимости минимальной работы выхода, достаточной для нейтрализации заряда при плотности электронного тока насыщения эмиттера, от температуры эмиттера при различных фиксированных значениях давлений паров цезия. При построении графика была использована зависимость $\varphi_{\text{опт}}(T_E)$, приведенная на рисунке 2.2 для $\varphi_C = 1,8$ и $\varepsilon_S = 0,25$.

При $\varphi_E < \varphi_{\min}$ для данного давления паров цезия эмиссия ионов недостаточна для нейтрализации плотности электронного тока насыщения с эмиттера.

Если давление паров цезия превышает 0,1–0,5 мм рт. ст., то при $d \approx 0,1$ –0,5 мм рассеяние электронов на атомах цезия приводит к значительному уменьшению тока преобразователя. Данные рисунка 2.4 показывают, что при $p_{Cs} = 0,1$ мм рт. ст. минимальное значение оптимальной работы выхода, при которой эмиссия ионов достаточна для нейтрализации электронного тока насыщения с эмиттера, равно примерно 3,5 В (точка F на рисунке 2.4).

Если материал эмиттера хорошо адсорбирует пары цезия (например, тугоплавкие металлы), то условие нейтрализации пространственного заряда электронов при фиксированном давлении паров цезия должно выполняться одновременно с условием достижения данного значения работы выхода $\varphi_{\text{ад}}$ за счет адсорбции.

На рисунке 2.4 приведены зависимости $\varphi_{\text{ад}}(T)$ для вольфрама ($\varphi_0 = 4,5$) при различных давлениях паров цезия, определяемые адсорбцией цезия.

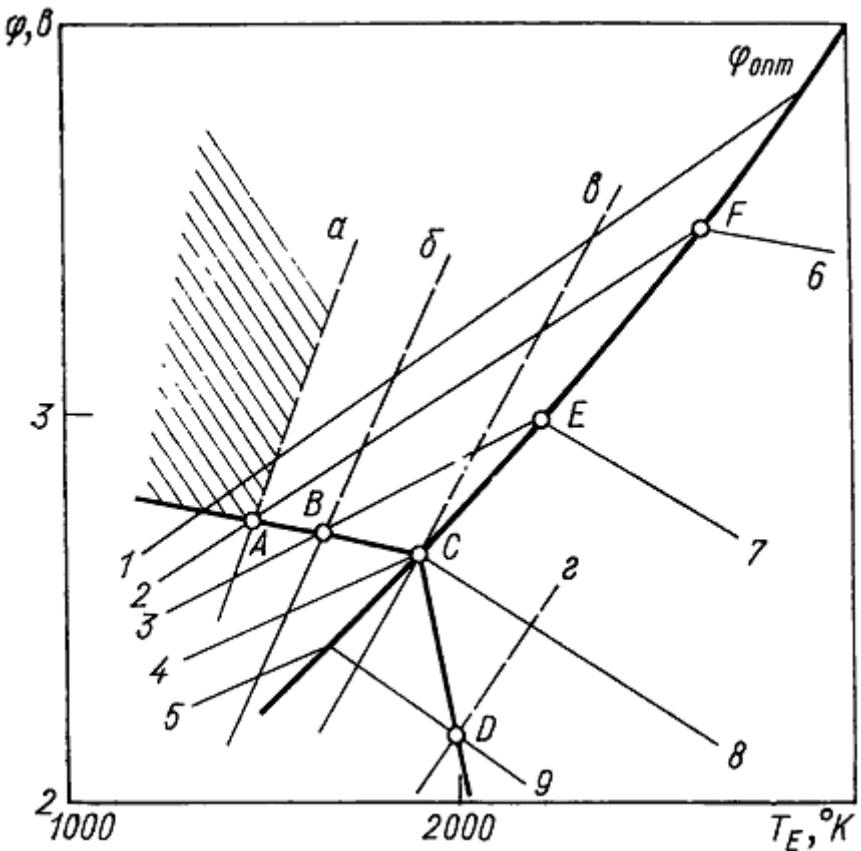


Рисунок 2.4 – Условие нейтрализации оптимального тока эмиссии с эмиттера ионами цезия, образующимися при поверхностной ионизации, с учетом адсорбции паров цезия на поверхности вольфрама
 φ_{\min} – для нейтрализации эмиссионного тока насыщения:

$1 - p_{Cs} = 0,01$ мм рт. ст; $2 - p_{Cs} = 0,1$ мм рт. ст; $3 - p_{Cs} = 1,0$ мм рт. ст;
 $4 - p_{Cs} = 10$ мм рт. ст; $5 - p_{Cs} = 100$ мм рт. ст.

φ_{\min} – для нейтрализации оптимального тока:

$6 - p_{Cs} = 0,1$ мм рт. ст; $7 - p_{Cs} = 1,0$ мм рт. ст; $8 - p_{Cs} = 10$ мм рт. ст;
 $9 - p_{Cs} = 100$ мм рт. ст.

φ_{ad} – работа выхода вольфрама, обусловленная адсорбцией цезия:

$a - p_{Cs} = 0,1$ мм рт. ст; $b - p_{Cs} = 1,0$ мм рт. ст; $v - p_{Cs} = 10$ мм рт. ст;
 $z - p_{Cs} = 100$ мм рт. ст.

Заштрихованная область – область нейтрализации пространственного заряда электронов только поверхностной ионизацией цезия с учетом адсорбции цезия на поверхности вольфрама.

Пересечение зависимостей $\varphi_{\min}(T)$ и $\varphi_{ad}(T)$, соответствующих одинаковым давлениям паров цезия (в точках A, B, C, D на рисунке 2.4), определяет линию ($ABCD$ на рисунке 2.4), на которой одновременно выполняются перечисленные два условия.

Для значений φ_E , расположенных ниже линии $ABCD$, эмиссия ионов недостаточна для нейтрализации электронного тока насыщения с эмиттера.

Поскольку при $p_{Cs} > 0,1$ мм рт. ст. и $d \approx 0,5$ мм процессы рассеяния электронов на атомах цезия приводят к значительному уменьшению тока преобразователя, то для вольфрамового эмиттера при использовании только эмиссии ионов для нейтрализации пространственного заряда электронов область, в которой процессы рассеяния не играют существенной роли, довольно ограничена (заштрихованная область на рисунке 2.4). Однако этой области соответствуют большие работы выхода и малые температуры эмиттера, при которых электрические характеристики ТЭП практического интереса не представляют. Поэтому на практике при использовании поверхностной ионизации ТЭП работает в режиме, в котором $d/l \gg 1$, и при расчете электрических характеристик необходимо учитывать рассеяние электронов. Подобный режим работы ТЭП получил название *диффузионного*.

2.7. Режимы работы термоэмиссионного преобразователя

Электрические параметры ТЭП имеет зависимость от эмиссионных свойств электродов, а также среды в межэлектродном зазоре. Как правило, среда является плазменной. Исходя из научных данных плазма – это квазинейтральная система, с содержанием положительно n_e и отрицательно n_i заряженных свободных частиц.

К параметрам квазинейтральности относятся *дебаевская длина* $r_D = \sqrt{kT/(4\pi e^2 n_e)}$ (*Дебаевская длина* – расстояние, на которое распространяется действие электрического поля отдельного заряда в квазинейтральной среде, содержащей свободные положительно и отрицательно заряженные частицы. Вне сферы радиуса дебаевской длины электрическое поле экранируется в результате поляризации окружающей среды) и *ширина межэлектродного зазора* d .

Следовательно, мы имеем два режима работы исходя из условий:

- $r_D >> d$ – *плазменный*;
- $r_D \leq d$ – *вакуумный*.

Также с учетом длины свободного пробега электронов l и его отношения к ширине межэлектродного зазора d , плазменный режим характеризуется:

- $l >> d$ – *бесстолкновительный режим* (квазивакуумный, Кнудсеновский, прямопролетный)
- $l \ll d$ – *диффузионный режим*;
- $l \sim d$ – *газокинетический режим*.

Данные режимы имеют возможность описываться как роль процессов ионизации и рекомбинации в объеме плазмы. При условии длины ионизации L , которая больше межэлектродного зазора d , объемные процессы имеют малую роль, следовательно, режимы классифицируются как *безразрядные*; если условие выполняется, наоборот, то как *разрядные* или *дуговые*. Возможна и дальнейшая классификация, не полная её часть приведена на рисунке 2.5. Например, в основу дальнейшей градации можно положить принцип стабильности, подразделяя режимы на *стабильные* и *нестабильные*. Иногда

бывает удобно определять режимы работы по параметру компенсации α , различая *перекомпенсированный* ($\alpha > 1$) и *недокомпенсированный* ($\alpha < 1$) режимы.

Вакуумный режим характеризуется нарушением переноса электронов от нагретого эмиттера к коллектору при условии огромной эмиссии и огромного межэлектродного зазора. Также происходит появление отрицательного пространственного заряда, который преграждает проход электронов с эмиттера на коллектор.

Бесстолкновительный или *квазивакуумный* режим в этом случае компенсация пространственного заряда в межэлектродном зазоре производится вводом паров легко ионизируемых щелочных металлов (паров цезия). Малое количество добавок цезия устраниет пространственный заряд в межэлектродном промежутке.

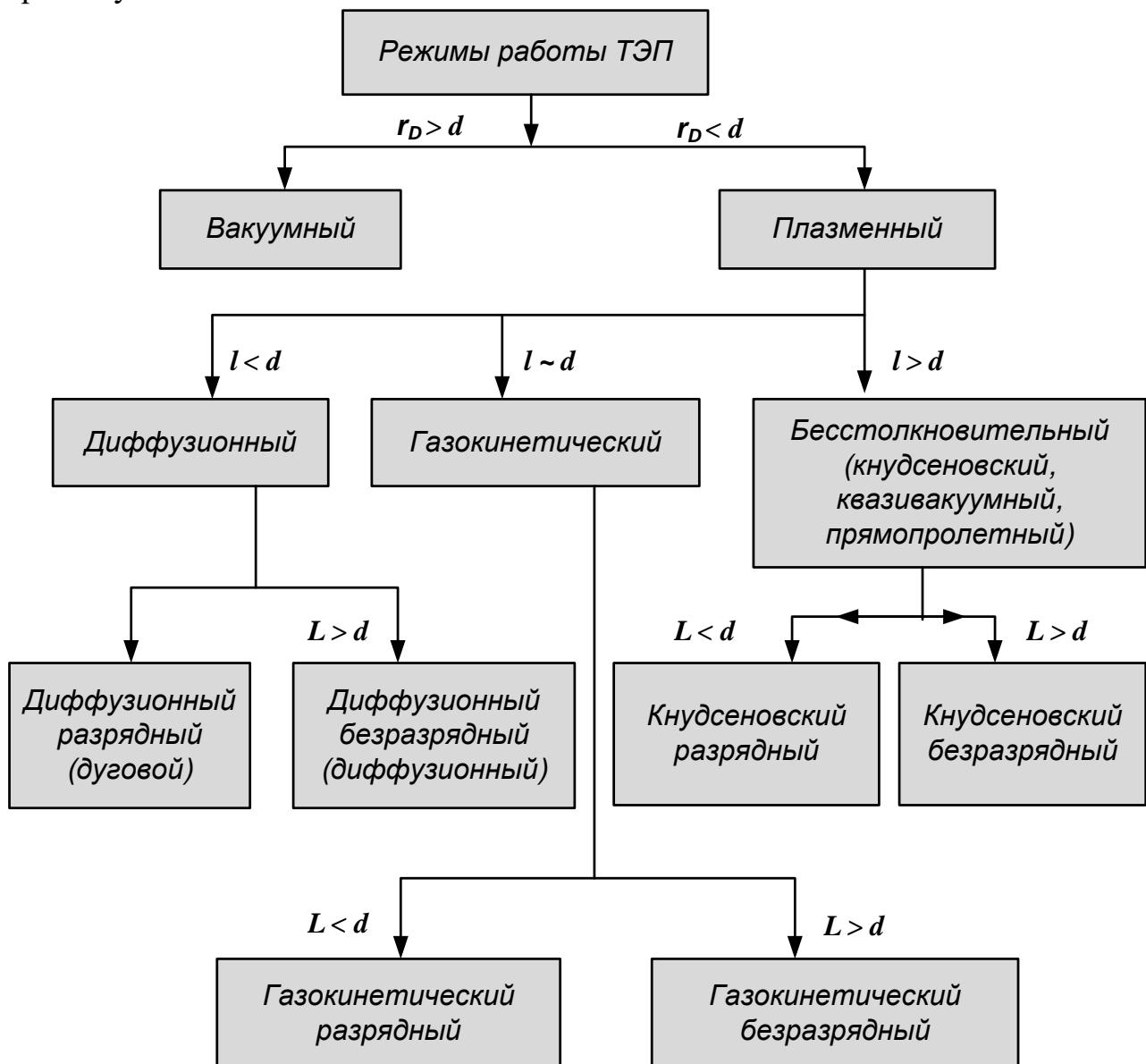


Рисунок 2.5 – Классификация режимов работы ТЭП

Диффузионный режим. При данном режиме плазма в приэлектродном слое в термодинамическом равновесии с катодом, следовательно, ток в межэлектродном зазоре происходит за счет переноса электронов плазмы из-за диффузии от прикатодного конца к прианодному, с условием их высокой температуры.

Рассмотренные выше режимы (вакуумный, квазивакуумный и диффузионный) имеют огромную теоретическую базу, что соответствует всем проведенным экспериментам в этом направлении. Однако дуговой режим имеет большое количество вопросов, с отсутствием теоретической модели, которая бы полностью согласовалась с экспериментами. Являясь самым перспективным, при расчете генератора, отталкиваются от экспериментальных данных, так как доля теоретических характеристик мала и не подвержена рассмотрению.

2.8. Разработка узлов термоэмиссионного преобразователя

При разработке реального ТЭП важнейшими проблемами являются:

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

Материалы, используемые в ТЭП, должны обладать следующими свойствами:

- высокой тепловой и электрической прочностью;
- высокой температурой плавления;
- хорошими эмиссионными свойствами;
- низкой испаряемостью;
- хорошей термохимической совместимостью с другими материалами;
- высокой механической прочностью;
- хорошей тепло- и электропроводностью;
- низкой степенью черноты;
- удовлетворительными нейтронно-физическими свойствами.

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

Рабочие температуры эмиттера обычно лежат в диапазоне $1600 > 2100 \text{ К}$. Токоввод эмиттера обеспечивает перепад температур до 1500 К . Эмиттерный узел в большинстве случаев находится в среде цезия при p_{Cs} до $2 \cdot 10^3 \text{ Па}$. Через эмиттер могут проходить токи порядка $50\text{--}100 \text{ А}$. материал эмиссионного

покрытия должен иметь температуру плавления 2000 К, а материал оболочки – не менее 2700 К.

Скорость испарения материала эмиттера не должна превышать 10 мкм/год, что соответствует давлению паров эмиттера не более 10^{-6} Па. В качестве материалов эмиттерного узла используются тугоплавкие металлы, их сплавы и композитные материалы на их основе: *W, Re, Ta, Mo, Nb, UC, ZrC, UN*.

Коллекторный узел ТЭП состоит из коллектора и защитного чехла, которые герметично отделяют межэлектродную полость от внешней полости, возможно исполнение с вакуумом или заполнением газами или охлаждающими жидкостями. Температуры, при которых коллекторный узел работает от 700 до 1300 К. Коллектор и защитный чехол пропускают электрический ток до 500 А. Температура, при которой происходит плавление материала коллектора и защитного чехла, не менее 1300 К, работа выхода коллектора составляет 3,6 эВ, испаряемость составляет 10–12 м/с, давление пара составляет 10^{-6} Па. Материалами коллектора являются: нержавеющая сталь, медь и медь, покрытая *Ni, Mo, Nb* и сплавы ниобия с 1 % циркония, никель, рений.

Как конструкционные материалы применяются медь и ее сплавы, никель и его сплавы, нержавеющие стали.

Устранение выделяющихся в процессе работы газов во внутреннем объеме устанавливают газопоглотители – *геттеры*. Для этого применяются активные металлы: *Nb, Ti, Zr, Ba*, и сплавы: *Zr-Al, Zr-Al-Ni, Zr-Ti*.

Изоляционными материалами служат, как правило, материалы на основе оксидов *Al₂O₃, BeO, V₂O₂, MgO*.

2.9. Схемы подключения ТЭП

Термоэмиссионный преобразователь – это источник постоянного тока. Необходимые значения напряжения и силы тока достигаются применением последовательно-параллельных соединений ТЭП. Переменный ток выдают инверторы.



Рисунок 2.6 – Комбинации схем ТЭП

Возможны схемы включения и режимы, в которых вырабатывается пульсирующий ток, позволяющий выделять переменную составляющую. Некоторые комбинации схем термоэмиссионного преобразователя представлены на рисунке 2.6.

Рассмотрим ТЭП в форме цилиндра, предназначенный для использования непосредственно в активной зоне ядерного реактора. Схема преобразователя изображена на рисунке 2.7.

Эмиттер преобразователя представляет собой оболочку из тугоплавкого металла, внутри которой находится ядерное горючее. Длину эмиттера обозначим L_E , радиус – r_E , а толщину оболочки – δ . Межэлектродное пространство равно d . К одному из торцов эмиттера присоединен токоввод, представляющий собой цилиндрический стержень длиной l_t и радиусом r_t .

Второй торец эмиттера свободен. В принципе возможна конструкция ТЭП, когда токоввод присоединяется и ко второму торцу эмиттера. Однако с точки зрения методики расчетов эти конструкции принципиально не различаются. Для рассматриваемой конструкции возможны два варианта соединения электродов (рисунок 2.8).

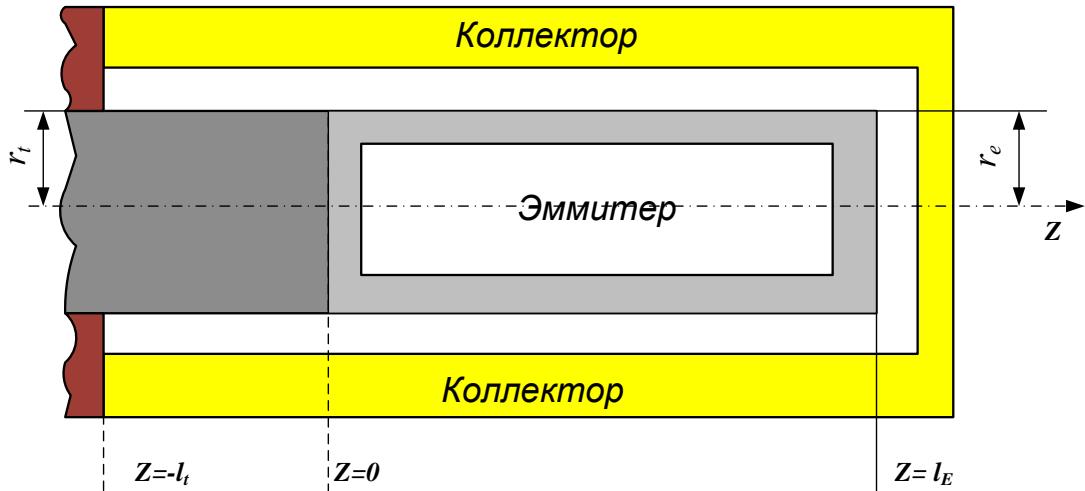


Рисунок 2.7 – Схема термоэмиссионного преобразователя

Если энергоустановка состоит из нескольких ТЭП, то схема коммутации электродов при их последовательном электрическом соединении изображена на рисунке 2.8, *a*. Для параллельного соединения или при наличии только одного ТЭП в энергоустановке схема коммутации изображена на рисунке 2.8, *б*. В отношении методики расчетов эти различия не принципиальны, однако для определенности в дальнейшем будем рассматривать первый тип коммутации электродов (рисунок 2.8, *а*).

Для поддержания заданной величины межэлектродного промежутка d в ряде конструкций ТЭП предполагается использовать дистанционирующие элементы различной геометрической формы, что приводит к дополнительным утечкам тепловой энергии через эмиттер. Поэтому в дальнейшем рассматривается конструкция ТЭП без дистанционирующих элементов, при

этом предполагается, что фиксированное положение эмиттера обеспечивается с помощью токоввода.

Вследствие омического сопротивления эмиттера и коллектора поверхности этих электродов не эквипотенциальны (эквипотенциальная поверхность – это поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковое значение. Эквипотенциальные поверхности замкнуты и не пересекаются.). Для эмиттера считаем, что его потенциал в каждой точке различен, и плотность снимаемого с эмиттера тока является сложной функцией координаты z , т.е. $J = J[T(z), V(z)]$, где z – координата точки, под которой понимается любая точка, расположенная на окружности, образованной пересечением эмиттирующей поверхности плоскостью, перпендикулярной к оси цилиндра.

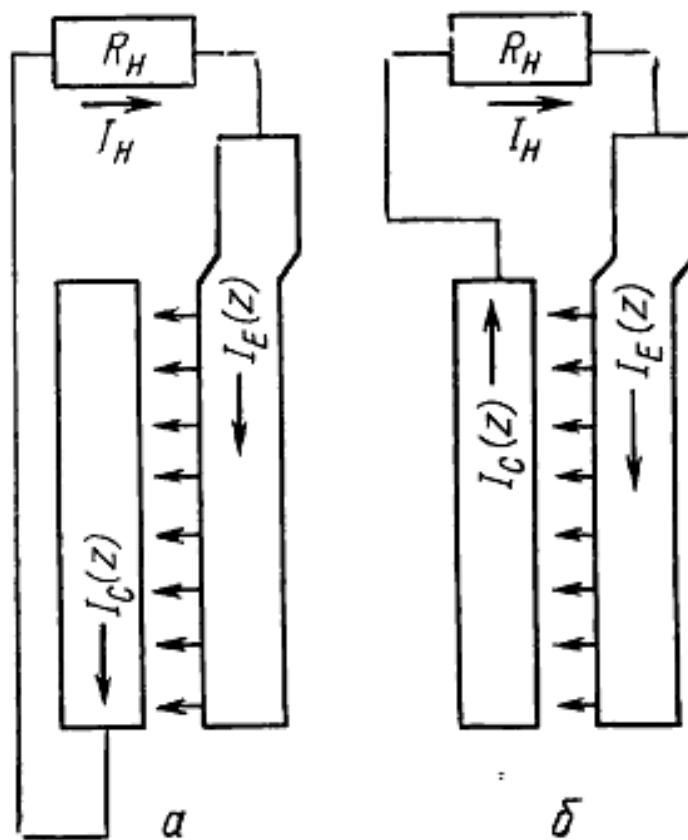


Рисунок 2.8 – Схемы коммутации ТЭП: *а* – при последовательном электрическом соединении электродов; *б* – при параллельном соединении или при наличии одного ТЭП

Коллектор также не является эквипотенциальным, однако полное сопротивление коллектора обычно в 3–5 раз меньше электросопротивления эмиттера. В результате и неравномерность распределения потенциала по коллектору соответственно меньше, чем по эмиттеру. Поэтому для простоты считается, что коллектор эквипотенциален.

2.10. Методика расчета термоэмиссионного преобразователя

Эмиссионный ток, приходящийся на длину эмиттера dz , т. е. ток, снимаемый с поверхности эмиттера, заключенной между сечениями с координатами z и $z + dz$, равен:

$$dI(z) = J(z)dS = 2\pi r_E J[T(z), V(z)]dz. \quad (2.31)$$

При этом предполагается, что участок эмиттирующей поверхности длиной dz изотермичен и эквипотенциален и характеризуется температурой и потенциалом в точке z , т. е. фактически реальный ТЭП представляется бесконечно большим числом преобразователей с изотермическими и эквипотенциальными электродами и эмиттирующей поверхностью $2\pi r_E dz$ каждый. Взаимное влияние соседних участков эмиттера не учитывается. Это предположение представляется разумным, поскольку при $d \ll l_E$ напряженность электрического поля в радиальном направлении обычно значительно больше, чем в осевом, хотя разность потенциала между концами эмиттера $V_E = V(0) - V(l_E)$ может быть и сравнимой с межэлектродной разностью потенциалов. В соответствии со сделанным предположением $J[T(z), V(z)]$ представляет собой плотность тока преобразователя с изотермическим и эквипотенциальным эмиттером длиной dz с температурой поверхности $T(z)$ и разностью потенциалов между электродами $V(z)$. Значения $J[T(z), V(z)]$ можно определить теоретически, решая уравнения переноса изложенными в главе 3 [12] методами для данных значений d , p_{CS} , T и V . В качестве $J[T(z), V(z)]$ можно использовать экспериментальные значения, полученные на моделях ТЭП при тех же значениях d и p_{CS} . Полный ток преобразователя I определяется суммированием токов $dI(z)$ по всей поверхности эмиттера. Заменяя суммирование интегрированием из выражения (2.31), получаем:

$$I = \int_0^{l_E} J(T, V) dS = 2\pi r_E \int_0^{l_E} J[T(z), V(z)] dz. \quad (2.32)$$

Таким образом, для расчета полного тока энергетической модели ТЭП необходимо найти самосогласованное решение задачи, дающее, во-первых, распределение температуры по поверхности эмиттера, во-вторых, распределение потенциала по эмиттеру, в-третьих, распределение плотности эмиссионного тока по эмиттеру.

В стационарном случае выделяющаяся в эмиттере в единицу времени тепловая энергия равна сумме потерь тепловой энергии эмиттером в единицу времени. Для цезиевых ТЭП составляющие тепловых потерь эмиттером с боковой поверхности при длине dz в единицу времени следующие:

электронное охлаждение:

$$dG_e = q_e dS = J[T(z), V(z)]\{\varphi_E[T_{Cs}, T(z)] + 2(k/e)T(z)\}2\pi r_E dz. \quad (2.33)$$

излучение:

$$dG_r = q_r dS = \varepsilon_S \sigma [T^4(z) - T_C^4]2\pi r_E dz. \quad (2.34)$$

Для цилиндрической геометрии электродов приведенная степень черноты:

$$\varepsilon_S = [1/\varepsilon_E + (r_E/r_C)(1/\varepsilon_C - 1)]^{-1}, \quad (2.35)$$

где $\varepsilon_E, \varepsilon_C$ – степени черноты эмиттера и коллектора соответственно; r_E – радиус эмиттера; r_C – внутренний радиус коллектора; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴); T_C – температура коллектора.

Теплопроводность паров цезия:

$$dG_\pi = q_\pi dS = (\lambda_{Cs}/d)[T(z) - T_C]2\pi r_E dz, \quad (2.36)$$

где λ_{Cs} – коэффициент теплопроводности паров цезия.

Потери тепла теплопроводностью через токоввод эмиттера. На границе эмиттера с токовводом поток тепла, поступающий в токоввод, равен потоку тепла, уходящего с эмиттера:

$$G_t = \pi r_E^2 \lambda_E (dT/dz) = \pi r_t^2 \lambda_t (dT/dz), \quad (2.37)$$

где r_t – радиус токоввода; λ_E, λ_t – коэффициенты теплопроводности токоввода и эмиттера соответственно. Эффективный коэффициент теплопроводности эмиттера, состоящего из оболочки толщиной δ и горючего, определяется через коэффициенты теплопроводности горючего λ_r и оболочки λ_0 по формуле:

$$\lambda_E = \lambda_0(\delta/r_E)(2 - \delta/r_E) + \lambda_r(1 - \delta/r_E)^2. \quad (2.38)$$

Джоулевы потери. При прохождении по участку эмиттера длиной dz тока

$$I(z) = 2\pi r_E \int_z^{l_E} J[T(z'), V(z')] dz', \quad (2.39)$$

на этом участке будет выделяться джоулево тепло:

$$dG_{ДЖ} = 4\pi \rho_E \left\{ \int_z^{l_E} J[T(z'), V(z')] dz' \right\}^2 dz, \quad (2.40)$$

где ρ_E – эффективная электропроводность эмиттера, определяется через электропроводность оболочки ρ_0 и горючего ρ_Γ :

$$\rho_E = \rho_0 \left[\frac{\delta}{r_E} \left(2 - \frac{\delta}{r_E} \right) + \frac{\rho_0}{\rho_\Gamma} \left(1 - \frac{\delta}{r_E} \right) \right]^{-1}. \quad (2.41)$$

Распределение температуры по эмиттеру определяется уравнением теплопроводности. Для цилиндрической геометрии при азимутальной симметрии это уравнение для эмиттера имеет вид:

$$-\lambda_E \Delta T(z, r) = Q, \quad (2.42)$$

где $\Delta = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} r \frac{d}{dr} + \frac{d^2}{dz^2}$; Q – тепловыделение в эмиттере, Вт/см³. Границное условие на боковой поверхности эмиттера:

$$-\left[\frac{dT}{dr} \right]_{r=r_E} = \frac{1}{\lambda_E} (q_e + q_r + q_\pi) \equiv f(T), \quad (2.43)$$

где q_e , q_r , q_π – определяются из выражений (2.33), (2.34), (2.36), при записи которых использовано соотношение $dS = 2\pi r_E dz$. Границное условие на свободном конце эмиттера ($z = l_E$):

$$\left[\frac{dT}{dz} \right]_{z=l_E} = -\frac{q_\pi + q_r}{\lambda_E}. \quad (2.44)$$

На границе эмиттера с токовводом ($z = 0$) должны выполняться условия непрерывности температуры и потока тепла, т. е.:

$$[T]_{z=+0} = [T]_{z=-0}; S_t \lambda_t \left[\frac{dT}{dz} \right]_{z=-0} = S_E \lambda_E \left[\frac{dT}{dz} \right]_{z=+0}, \quad (2.45)$$

где S_t, S_E – площади поперечного сечения токоввода и эмиттера соответственно.

Совместное решение уравнений с граничными условиями при использовании зависимости $J[T, V(z)]$, полученной либо экспериментально на лабораторной модели ТЭП с изотермическим эмиттером, либо теоретически для различных значений Т и В, позволяет получить следующую информацию:

- распределение температуры по эмиттеру;
- распределение потенциала по эмиттеру;
- распределение плотности тока эмиссии по эмиттеру;
- вольт-амперную характеристику преобразователя $I = I(U_{\text{пр}})$;
- КПД ТЭП;
- полную полезную электрическую мощность преобразователя;
- составляющие тепловых потерь эмиттером;

- составляющие электрических потерь преобразователем.

Полезная электрическая мощность ТЭП равна произведению полезного напряжения преобразователя $U_{\text{пр}}$ на полный ток I : $P_e = I \cdot U_{\text{пр}}$. Используя выражение (2.32), получаем:

$$P_e = 2\pi r_E \cdot U_{\text{пр}} \int_0^{l_E} J(T, V) dz. \quad (2.46)$$

Составляющие тепловых потерь с боковой поверхности эмиттера определяются интегрированием выражений (2.33), (2.34), (2.36):

потери тепла электронным охлаждением:

$$G_e = 2\pi r_E \int_0^{l_E} J(T, V) \{\varphi_E(T, T_{CS}) + 2kT/e\} dz; \quad (2.47)$$

потери тепла излучением:

$$G_r = 2\pi r_E \varepsilon_s \sigma \int_0^{l_E} [T^4(z) - T_C^4] dz; \quad (2.48)$$

потери тепла теплопроводностью паров цезия:

$$G_{\Pi} = \frac{2\pi r_E \lambda_{CS}}{d} \int_0^{l_E} [T(z) - T_C] dz. \quad (2.49)$$

джаулево тепло, выделяющееся в эмиттере:

$$G_{\text{дж}} = 4\pi \rho_E \int_0^{l_E} \left\{ \int_z^{l_E} J[T(z'), V(z')] dz' \right\}^2 dz. \quad (2.50)$$

Помимо потерь энергии с боковой поверхности, имеются еще *потери тепловой энергии с торцевой поверхности эмиттера*:

$$G_T = \pi r_E^2 [q_{\Pi} + q_r]_{z=l_E}. \quad (2.51)$$

Потери тепловой энергии теплопроводностью через токоввод G_t определяются выражением (2.37).

В результате коэффициент полезного действия преобразователя:

$$\eta = P_e / (G_e + G_r + G_{\Pi} + G_t - G_{\text{дж}} + G_T). \quad (2.52)$$

Таблица 2.4 – Значения параметров, использованных в расчетах

Параметр	Эмиттер		Токоввод эмиттера
	оболочка	горючее	
Радиус r , см	0,5	0,4	0,3–0,5
Длина l , см	2,0–7,0	2,0–7,0	2,0
Средний коэффициент: электропроводности, Ом·см теплопроводности, Вт/(см·К)	$0,56 \cdot 10^{-4}$ 1,2	$4,5 \cdot 10^{-4}$ 0,18	$0,5 \cdot 10^{-4}$ 0,46
Эффективная степень черноты	0,25	-	0,25

На рисунке 2.9 приведены зависимости средней по эмиттеру удельной электрической мощности и КПД преобразователя от длины эмиттера при различных значениях радиуса токоввода. Диаметр эмиттера и длина токоввода при этом считались постоянными и приведены в таблице 2.4. Значение средней по эмиттеру удельной электрической мощности p определено из соотношения $\bar{p} = P_e / (2\pi r_E l_E)$, где P_e дано выражением (2.46).

Наличие максимума объясняется тем, что при малых l_E относительно велика роль потерь тепла теплопроводностью через токоввод, а при больших l_E велико падение напряжения на эмиттере U_E . В принципе, при некоторой длине эмиттера падение напряжения оказывается настолько большим, что полезное напряжение $U_{\text{пр}}$, а следовательно, и полезная электрическая мощность, и КПД преобразователя становятся равными нулю.

Для рассматриваемого случая, например, при $r_t = 0,4$ см, предельная длина эмиттера равна 10 см, при уменьшении геометрических размеров ТЭП средняя по эмиттеру удельная электрическая мощность и КПД увеличиваются.

Абсолютный максимум при этом не достигается, так как электрические характеристики ТЭП с уменьшением его размеров приближаются к электрическим характеристикам модели со свойственными ей изотермичностью эмиттера и малыми электрическими потерями.

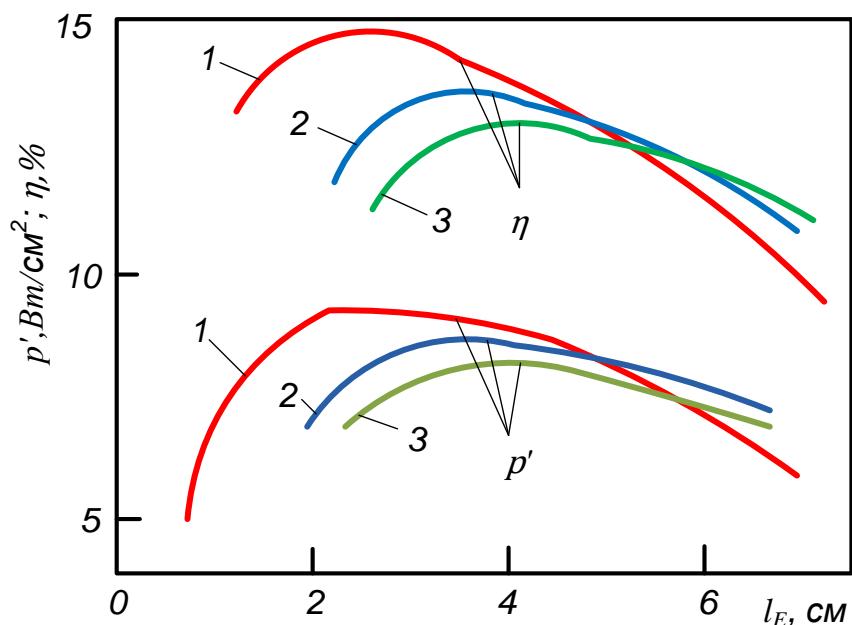


Рисунок 2.9 – Зависимость средней удельной электрической мощности и КПД преобразователя от длины эмиттера: 1 - $r_t = 0,3$ см; 2 - $r_t = 0,4$ см; 3 - $r_t = 0,5$ см

Сказанное справедливо при условии, что максимальная температура эмиттера сохраняется постоянной при изменении геометрических размеров ТЭП.

В качестве примера приведем значения тепловых и электрических характеристик ТЭП для случая, когда геометрические размеры ТЭП и полезное

напряжение (при использовании указанных выше вольт-амперных характеристик модели) близки к оптимальным (таблица 2.5):

Приведенные характеристики получены при значениях параметров: $r_t = 0,4 \text{ см}$; $l_E = 5,0 \text{ см}$; $T_C = 1000 \text{ К}$; $\lambda_{CS} = 0,65 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$, остальные параметры приведены в таблице 2.4.

Как видно, для рассматриваемого случая электронное охлаждение эмиттера составляет примерно 50 % всех тепловых потерь эмиттера. В этом случае изменение электрической нагрузки приводит в значительному изменению температурного режима эмиттера ТЭП.

2.11. КПД термоэмиссионного преобразователя

У идеального термоэмиссионного преобразователя КПД близок к КПД цикла Карно, действующего в диапазоне температур между температурами эмиттера и коллектора.

Но в реальности КПД термоэмиссионного преобразователя меньше, из-за переноса теплоты с высокотемпературного эмиттера на коллектор методом излучения. А также в зазоре эмиттера и коллектора с учетом высокой концентрации электронов появляется пространственный заряд. Следовательно, электронам для достижения коллектора необходимо иметь дополнительную энергию, которая потом образуется на коллекторе в виде теплоты. Присутствие пространственного заряда сильно уменьшает характеристики ТЭП. Отсюда идёт разработка методов борьбы с ним:

Таблица 2.5 – Оптимальные характеристики ТЭП

Параметр	Значение
Полная тепловая мощность, подводимая к эмиттеру, Вт	940
Джоулев нагрев эмиттера, Вт	10
Потери тепла, Вт:	
излучением	315
током эмиссии	475
теплопроводностью через токоввод	105
теплопроводностью через пары цезия	40
излучением с торца эмиттера	15
Полная полезная электрическая мощность, Вт	128
Джоулев нагрев токоввода, Вт	17
Полный ток, А	204,5
Средняя плотность тока, А/см ²	13,0
Полезное напряжение, В	0,625
Удельная полезная электрическая мощность, Вт/см ²	8,13
КПД, %	13,5
Температура эмиттера, К:	
максимальная	2000
минимальная	1795
свободного торца	1985

- уменьшение расстояние между электродами: для получения приемлемой мощности (несколько Ватт на см²) необходимо иметь зазор не более $d \leq 0,01$ мм;

- ввод положительных ионов для компенсации пространственного заряда электронов. В зависимости от образования ионов различают режимы с поверхностной и объемной ионизацией. В первом случае в межэлектродном промежутке создается атмосфера паров Cs. За счет высокой работы выхода тугоплавких металлов (для $w, \varphi > 4$ эВ) каждый атом цезия, попадающий на его поверхность, ионизируется. Пары цезия играют в ТЭП троякую роль. Во-первых, из атомов Cs создаются ионы Cs, компенсирующие отрицательный объемный заряд электронов. Во-вторых, атомы Cs, адсорбируясь на поверхности коллектора, понижают их работу выхода и смещают ВАХ влево (см. рисунок 2.2). В-третьих, при больших давлениях паров Cs атомы его могут адсорбироваться и на поверхности горячего эмиттера, также снижая работу выхода.

Учитывая принимаемые меры, КПД ТЭП достигает 9–16 %.

Наличие электропроводной плазмы и снижение работы выхода электродов в парах цезия или смеси цезия и бария дают экономичную работу с условием удельной мощности на электродах 1–10 Вт/см², это дает возможность производить компактные энергетические источники с малым весом термоэмиссионной системы. Современные приборы с электродами с применением тугоплавких металлов: эмиттера – монокристаллические сплавы вольфрама или молибдена; коллектора – ниобий или молибден, возможно использование покрытия для улучшения электронных и оптических свойств поверхности. Адсорбция цезия на поверхности эмиттера дает снижение работы выхода электродов до уровня, пригодного для эффективной работы прибора: 2,5–3 эВ на эмиттере и 1,5–2 эВ на коллекторе. Это максимальные показатели с применением твердых покрытий, широкое распространение имеет использование приборов на цезиевых адсорбционных электродах.

Использование нанотехнологий для производства материалов с заданной работой выхода впервые началось с экспериментов в ФЭИ Обнинска с привлечением кафедры физической электроники МГУ, целью, которых была разработка модифицированных углеродных материалов с работой выхода на уровне 0,4–0,6 эВ.

Выходные параметры термоэмиссионных преобразователей и электрогенерирующих каналов увеличиваются при *снижении расстояния в межэлектродном зазоре*. Но уменьшение зазора до 0,5 мм и менее ужесточает требования по разрешенной деформации эмиттерной оболочки при работе электрогенерирующих каналов с необходимостью ее постоянного контроля. Иначе неизбежно образование электро- и теплопроводных мостиков между эмиттером и коллектором, которые ведут к падению вырабатываемой электрической мощности, возможно, даже до нуля при действующем коротком замыкании эмиттера на коллектор.

При высоких T , вследствие коробления или разбухания поверхности, выдерживать такой зазор в течение длительного времени очень трудно. Кроме того, в настоящее время отсутствуют материалы, пригодные для работы в вакуумном режиме достаточно длительное время. Материалы с высокой эмиссией (около 10 A/cm^2) при $T \sim 2300 \text{ K}$ имеют недопустимо высокую скорость испарения. Скорость испарения металлов в вакууме пропорциональна e^{-Fa/KT_3} , эмиссионная способность пропорциональна $e^{-\varphi_3/KT_3}$. Поэтому чем больше отношение Fa/φ_3 , тем более пригоден материал для эмиттера ТЭП.

Электроды в ТЭП, в зависимости от параметров величины межэлектродного зазора и параметров межэлектродной среды, имеют возможность работы в диффузионном или разрядном режимах.

Диффузионный режим достигается при условии, если число Кнудсена для плазмы формула (2.53) намного больше единицы, а электрическое поле в плазме находится ниже порога появления контрагированного разряда. В межэлектродном зазоре происходит стандартный режим переноса электронов с помощью механизма амбиполярной диффузии в плазме, производимой в результате поверхностной ионизации цезия:

$$K_n = d/L, \quad (2.53)$$

где d – межэлектродный зазор; L – длина свободного пробега электрона.

Переход к разрядному режиму достигается при условии большой концентрации плазмы, появляющейся в межэлектродном зазоре благодаря механизму ступенчатой ионизации в момент столкновения электронов с атомами межэлектродной среды. Данный режим характеризуется высокими показателями плотности тока – около 20 A/cm^2 и выше, а также КПД ТЭП от 10 до 12 % и выше.

Разрядный режим электродов стоит в основе применения в большинстве технических устройствах ТЭП.

Таким образом, основная цель термоэмиссионного преобразования энергии состоит в генерации электричества для использования в удаленных полярных районах, под водой и в космосе. Кроме того, в перспективе рассматриваются возможности использования ТЭП в качестве надстройки к обычным ТЭС.

По типу источника тепловой энергии делятся на ядерный нагрев; изотопный источник тепла; нагрев пламенем органического топлива; нагрев концентрированным солнечным излучением.

Таблица 2.6 – Значения констант в формуле (2.54) для некоторых материалов эмиттеров

Константа	Ir	Re	W	Mo	Ta
$\varphi_1, \text{эВ}$	1,99	1,57	2,08	2,15	1,86
$\varphi_2, \text{эВ}$	3,19	3,57	2,48	2,35	2,44
α	3,96	5,63	11,76	10,76	11,15
β	40,93	20,83	40,77	37,83	36,75

Выгодное сочетание ТЭП с ядерными реакторами и изотопными источниками тепла определяют их огромную автономность, что ставит их в приоритет перед применением тепла органических топлив и солнечной энергии. Проводимые опыты в составе ядерных энергетических установок достигают до 20 тыс. ч и более с надежной непрерывной работой ТЭП. Прогрессу в увеличении ресурсных возможностей ТЭП предшествует правильный выбор радиационно-стойких, теплостойких материалов.

Коэффициент полезного действия термоэмиссионного преобразователя определяется по формуле (2.52).

Кроме того, для практических расчетов эффективную работу выхода тугоплавких металлов в парах цезия удобно представить в виде зависимости $\varphi(T/T_{Cs})$, где T – температура поверхности. Для значения $T/T_{Cs} > 2,7$ можно использовать эмпирическую формулу:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \left\{ 1 + \exp \left[\left(\beta \frac{T_{Cs}}{T} \right) - \alpha \right] \right\}^{-1}. \quad (2.54)$$

Значения констант, входящих в формулу (2.54), для некоторых материалов эмиттеров приведены в таблице 2.6.

2.12. Энергетические установки малой мощности с термоэмиссионными преобразователями

2.12.1. Термоэмиссионный преобразователь солнечной энергии

Установка с термоэмиссионным преобразованием солнечной энергии (СТЭУ) представляет собой генератор электрической энергии, в котором нагрев эмиттера термоэмиссионного преобразователя осуществляется солнечной энергией. Под солнечной энергией понимается непосредственное солнечное излучение. Использование СТЭУ возможно как в наземных условиях в районах с достаточно большим количеством солнечных дней, так и в космических условиях.



Рисунок 2.10 – Следящая система концентраторов СТЭУ

Основные особенности солнечной энергии определяют достоинства и недостатки СТЭУ:

- солнечная энергия является даровой;
- солнечная энергия неисчерпаема;
- источник солнечной энергии определенным образом ориентирован в пространстве;
- интенсивность солнечного излучения для околоземной области пространства сравнительно мала.

Ресурс работы СТЭУ определяется вероятностью и скоростью необратимых процессов, происходящих в самом генераторе и приводящих к постепенному изменению режима работы СТЭУ или даже её разрушению (например, испаряемость материала эмиттера, химические взаимодействия или метеоритные повреждения).

Основные элементы СТЭУ: концентратор солнечной энергии, собственно термоэмиссионный преобразователь (ТЭП) и следящая система.

Наличие следящей системы усложняет конструкцию СТЭУ, и, кроме того, эта система потребляет часть вырабатываемой электроэнергии (около 1,5 % генерируемой СТЭУ электроэнергии).

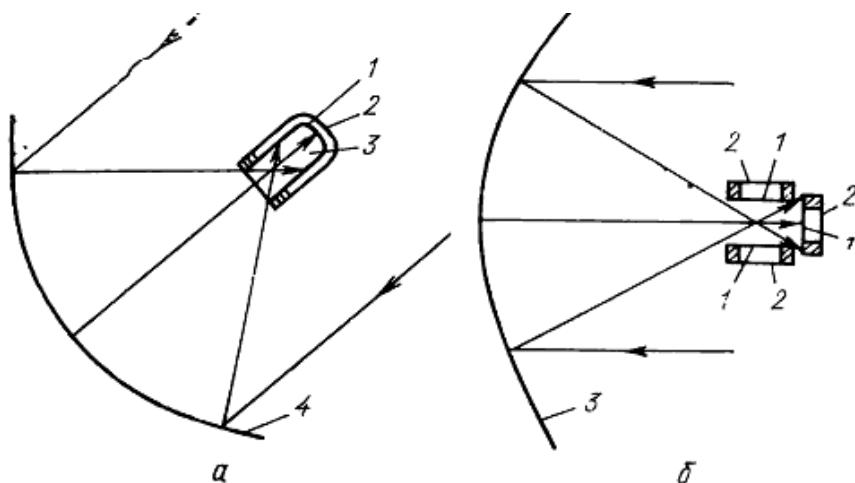


Рисунок 2.11 – Схема СТЭП с теплоприемной полостью (*а*) и с несколькими ТЭП (*б*): 1 – эмиттер; 2 – коллектор; 3 – теплоприемная полость; 4 – концентратор

Для околоземного пространства удельный тепловой поток солнечной энергии составляет $q_0 \approx 1,98 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{мин}} = 0,14 \text{ Вт}/\text{см}^2$. В то же время при работе ТЭП с КПД, например, равным 10 %, и при плотности электроэнергии 10 Вт/см² необходимый тепловой поток на поверхности эмиттера должен составить 100 Вт/см². Следовательно, СТЭУ необходимо иметь систему, концентрирующую солнечную энергию на эмиттер. Минимальное значение поверхности концентратора для данной площади поверхности эмиттера можно оценить в предположении, что потери солнечной энергии обратным излучением с поверхности эмиттера отсутствуют, а концентратор идеальный, т. е. не

поглощающий и не рассеивающий солнечную энергию. В таком случае требуемая площадь концентратора определяется из соотношения: $S_K = S_E(\rho/\eta q_0)$, где S_K , S_E – площадь поверхности концентратора и эмиттера соответственно. При $\eta = 0,10$, $\rho = 10 \text{ вт}/\text{м}^2$ и $S_E = 2,0 \text{ см}^2$ получим, что $S_K = 1430 \text{ см}^2$. В действительности из-за наличия потерь площадь концентратора должна быть еще больше.

Устройство ТЭП в СТЭУ в принципе не отличается от конструкций ТЭП, используемых в энергоустановках различного назначения. Простейшим солнечным ТЭП является система с плоскими электродами. Эмиттер находится в фокусе концентратора, представляющего собой зеркало с высокой отражающей способностью. Межэлектродный объем вакуумирован и заполнен парами цезия. В более совершенной конструкции ТЭП эмиттер (или несколько эмиттеров) выполнен в форме цилиндрического стакана (рисунок 2.11). Подобная форма эмиттера позволяет в большей степени использовать солнечную энергию, направляемую в полость стакана концентратором.

Если интенсивность солнечного излучения постоянна и система ориентирована идеально, то КПД СТЭУ определяется соотношением:

$$\eta = \eta_k \cdot \eta_p \cdot \eta_c, \quad (2.55)$$

где η_k – интегральный коэффициент отражения для поверхности концентратора; η_p – КПД приемника солнечного излучения; η_c – КПД самого ТЭП; η_k не зависит от удельной электрической мощности генератора p , а η_p и η_c зависят от мощности, причем влияние p на η_p и η_c в диапазоне рабочих температур ТЭП противоположно. При увеличении выходной электрической мощности η_c возрастает, а η_p – уменьшается.

Уменьшение η_p с ростом p вызвано увеличением потерь на излучение из полости приемника и с поверхности эмиттера ТЭП. На рисунке 2.12 приведена зависимость КПД генератора от удельной электрической мощности СТЭП для трех различных температур приемника при диаметре концентратора 1,5 м для типичной конструкции СТЭУ [12].

Зависимости показывают, что оптимальные значения КПД СТЭУ лежат в диапазоне 7–7,5 %, и эти значения соответствуют удельной полезной электрической мощности СТЭП 6–10 Вт/см².

При использовании СТЭУ возможны случаи, когда солнечное излучение не будет попадать на концентратор. Для наземной установки это произойдет в ночное время или в облачные дни, а для космической – при прохождении установки по затемненной части орбиты. Если электроэнергия требуется непрерывно, то необходимо аккумулировать энергию, вырабатываемую генератором, с последующим расходованием ее в период затененности концентратора.

В наземных условиях возможно использование аккумуляторных батарей, однако в космических условиях более выгодны тепловые аккумуляторы,

использующие теплоту фазовых превращений материалов – плавления и кристаллизации.

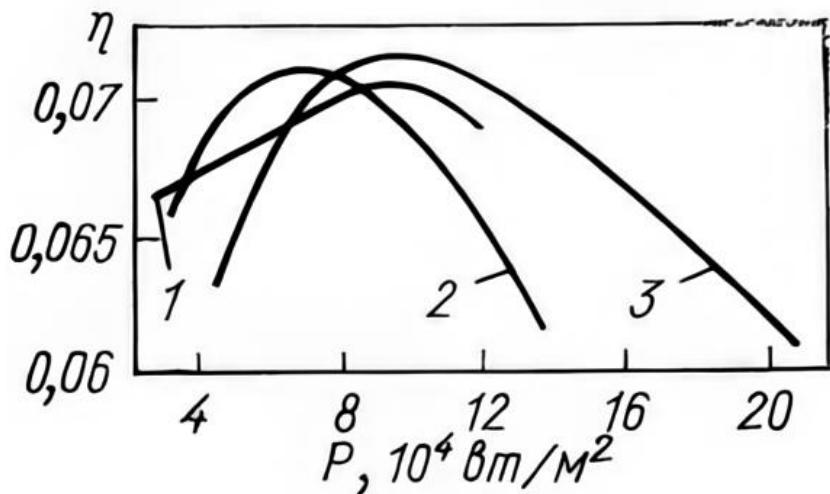


Рисунок 2.12 – Зависимость КПД СТЭУ от удельной мощности СТЭП (диаметр концентратора 1,5 м, интенсивность солнечного излучения $814 \text{ Вт}/\text{м}^2$):
 1 – $T_E = 1823 \text{ K}$; 2 – $T_E = 1923 \text{ K}$; 3 – $T_E = 2023 \text{ K}$

В качестве материала теплового аккумулятора можно использовать тугоплавкие металлы, бинарные соединения металлов, а также окислы металлов, таких как BeO , MgO , CaO и их композиции. Сравнение тепловых аккумуляторов с химическими показывает, что при длительном сроке службы СТЭУ более выгодны тепловые аккумуляторы.

2.12.2. Термоэмиссионные ЭУ на природном топливе

В ЭУ с термоэмиссионными преобразователями в качестве источника тепловой энергии можно использовать тепло, выделяющееся при химических реакциях горения обычного природного топлива. Эффективная работа преобразователя требует рабочей температуры эмиттера не менее 1600 К. При дальнейшем увеличении температуры эмиттера до 1900 К удельная электрическая мощность примерно удваивается при повышении температуры эмиттера на каждые 100 К. Для обеспечения подобного температурного режима эмиттера необходима еще более высокая температура пламени. В то же время температура пламени при горении обычного природного топлива в воздухе равна примерно 1870 °С (метан) – 1925 °С (пропан). Поэтому необходимо или применять специальное топливо с высокой температурой пламени, или же принимать меры по повышению температуры пламени обычного топлива (ископаемого), чего можно достичь предварительным подогревом горячей смеси или воздуха. В этом случае можно использовать тепло, отводимое с коллектора. Обогащение воздуха кислородом также приводит к повышению температуры пламени, но этот путь значительно усложняет конструкцию ЭУ и неэкономичен.

При создании ЭУ с подогревом эмиттера пламенем возникают две основные проблемы:

- 1) необходимо предохранить материал эмиттера от химического взаимодействия с продуктами сгорания;
- 2) обеспечить герметичность термоэмиссионного преобразователя и предотвратить попадание продуктов горения в межэлектродный промежуток ТЭП.

Решить эти проблемы возможно созданием защитной оболочки эмиттера. При этом она может быть отделена от эмиттера пространством, заполненным высокотемпературным теплоносителем (жидкостью или газом), или же непосредственно примыкать к эмиттеру.

Если в первом случае оболочка не подвержена большим напряжениям из-за различия в коэффициентах теплового расширения материалов эмиттера и оболочки (что характерно для второго случая). Однако неизбежные температурные градиенты по защитной оболочке и теплоносителю значительно снижают рабочие температуры эмиттера, что вызывает соответственно снижение удельной мощности ТЭП, поскольку температуры пламени ограничены. Более эффективно создание оболочки, находящейся в непосредственном контакте с эмиттером. Подобная оболочка должна удовлетворять целому ряду требований:

- a) коэффициенты теплового расширения материалов эмиттера и защитной оболочки должны быть примерно одинаковыми, чтобы исключить возможный разрыв связи при термокачках;
- b) материалы эмиттера и оболочки должны быть химически совместимы;
- c) материал оболочки должен быть непроницаем для продуктов сгорания топлива.

В качестве материалов защитной оболочки могут применяться дисилициды молибдена и вольфрама, графиты, карбид кремния, окислы бериллия, алюминия, циркония, тория, а также нитрид бора и другие металлы.

Важную роль в улучшении характеристик генераторов электроэнергии с ТЭП, работающих на природном топливе, принадлежит *тепловым трубкам* (см. параграф 2.12.3). При использовании тепловой трубы для подачи тепла от камеры сгорания к эмиттеру возможна работа как камеры сгорания, так и ТЭП в индивидуальных оптимальных режимах. Например, если наибольший КПД камеры сгорания достигается при удельном тепловом потоке, отводимом от камеры, $15 \text{ Вт}/\text{см}^2$, а в оптимальном режиме работы ТЭП необходим подвод тепловой мощности к эмиттеру $30 \text{ Вт}/\text{см}^2$, то применение тепловой трубы с входным сечением, вдвое большим выходного, позволяет осуществить одновременно оптимальные режимы работы камеры сгорания и ТЭП. В случае применения тепловой трубы необходимо защищать от взаимодействия с продуктами сгорания уже не эмиттер, а тепловую трубку.

Использование генераторов электроэнергии с ТЭП тепловой энергии, выделяющейся при сгорании органического топлива, наиболее оправданно в тех случаях, когда необходим автономный источник электроэнергии сравнительно малой мощности. На рисунке 2.13 приведена схема ТЭП с непосредственным нагревом эмиттера в пламени при сгорании природного топлива (газолина) [10].

С помощью тепловой трубы тепло с никелевого коллектора передается охлаждающим ребрам, сброс тепла с которых происходит посредством конвекции. В качестве рабочего тела в тепловой трубке используется калий, а в качестве материала оболочки – никель. Эффективная теплопроводность тепловой трубы в 5 – 10 раз превышает теплопроводность медного стержня с той же площадью поперечного сечения. Межэлектродный промежуток в ТЭП равен 0,25 мм. При температуре эмиттера 1450 °С предполагаемая электрическая мощность генератора равна 100 Вт.

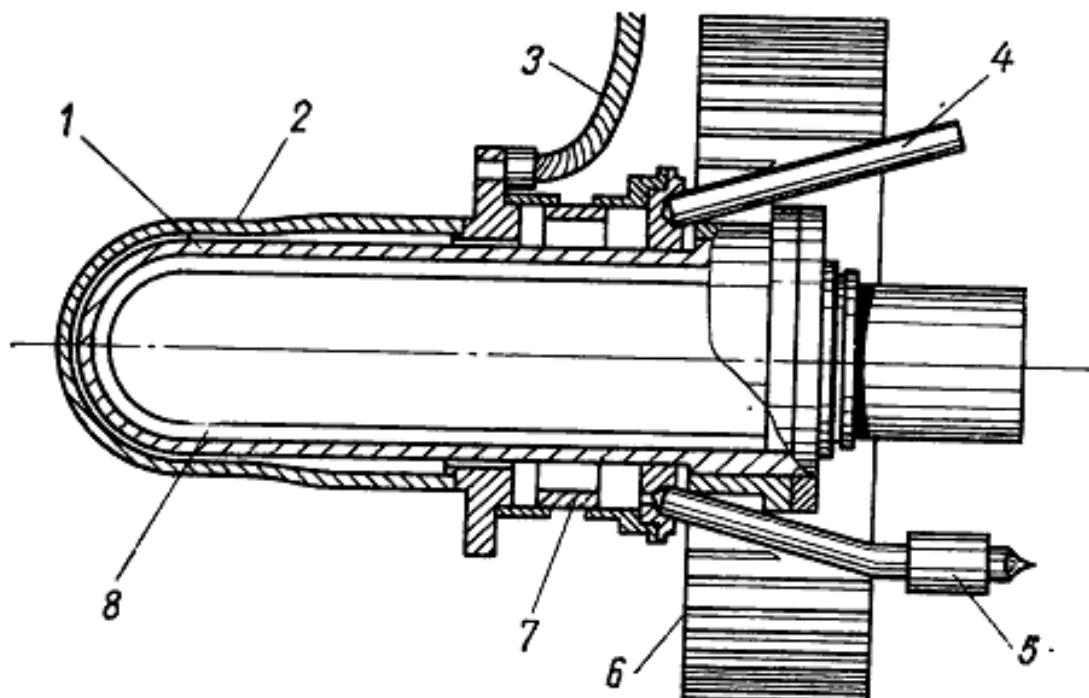


Рисунок 2.13 – Схема ТЭП генератора, работающего на природном топливе:
 1 – коллектор; 2 – эмиттер; 3 – токоввод эмиттера; 4 – токовывод коллектора;
 5 – резервуар с цезием; 6 – охлаждающие ребра; 7 – изолятор;
 8 – фитиль тепловой трубы

На рисунке 2.14 приведена схема ТЭП, предназначенного для работы на природном топливе. В этом варианте тепло от камеры сгорания передается эмиттеру тепловой трубкой, а с помощью теплообменника осуществляется предварительный подогрев воздуха теплом, отводимым с коллектора. Последовательно-параллельное соединение 12 таких ТЭП позволяет образовать один блок, электрической мощностью 1 кВт с КПД 13 %. Объем одного блока – 0,04 м³.

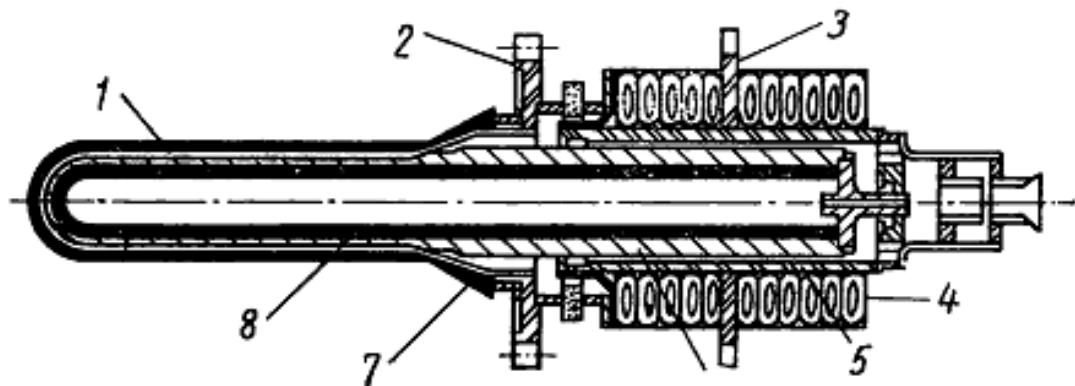


Рисунок 2.14 – Схема ТЭП с тепловой трубкой генератора, работающего на природном топливе: 1 – полость, заполненная инертным газом; 2 – токоввод эмиттера; 3 – токовывод коллектора; 4 – радиатор; 5 – коллектор; 6 – эмиттер; 7 – защитная оболочка (керамика); 8 – тепловая трубка

Масса энергоустановки, составленная из трех блоков, низковольтного преобразователя, регулятора напряжения и системы получения тепловой энергии с баками горючего, равна примерно 66 кг. Эта ЭУ рассчитана на получение постоянного или переменного тока частотой 50-60 или 400 Гц при стандартном напряжении 28 В и общем КПД всей установки 6 %.

2.12.3. Тепловые трубы

Тепловая трубка (heat pipe) – элемент системы охлаждения, принцип работы которого основан на том, что в закрытых трубках из теплопроводящего металла (например, меди) находится легкокипящая жидкость. Перенос тепла происходит за счёт того, что жидкость испаряется на горячем конце трубы, поглощая теплоту испарения, и конденсируется на холодном, откуда перемещается обратно на горячий конец.

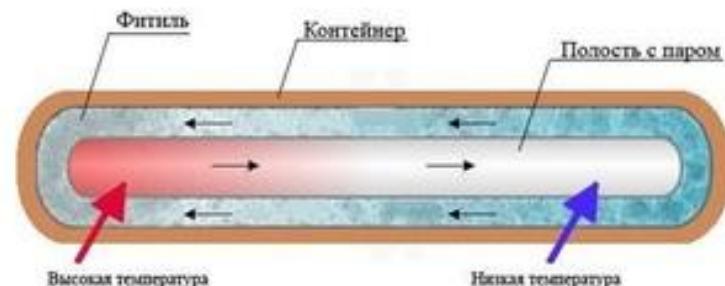
Таким образом, тепловая трубка – это устройство, позволяющее переносить большее количество тепла с эффективной теплопроводностью, в тысячу раз большей теплопроводности металлического стержня тех же размеров.

Тепловые трубы бывают двух видов: *гладкостенные и с пористым покрытием изнутри*. В гладкостенных трубках сконденсировавшаяся жидкость возвращается в зону испарения под действием исключительно силы тяжести – иными словами, такая трубка будет работать только в положении, когда зона конденсации находится выше зоны испарения, а жидкость имеет возможность стекать в зону испарения. Тепловые трубы с наполнителем (фитилями, керамикой и т. п.) могут работать практически в любом положении, поскольку жидкость возвращается в зону испарения по его порам под действием капиллярных сил, а сила тяжести в этом процессе играет незначительную роль.

Материалы и хладагенты для тепловых трубок выбираются в зависимости от условий применения: от жидкого гелия для сверхнизких температур до ртути и даже индия для высокотемпературных применений. Однако большинство современных трубок в качестве рабочей жидкости используют аммиак, воду, метанол и этанол.

Основной принцип работы тепловых трубок с использованием гравитации (т. н. двухфазные термосифоны) датируется веком пара. Принципиальная схема тепловой трубы изображена на рисунке 2.15.

Современные концепции с использованием капиллярного эффекта в тепловых трубках предложены R.S. Gaugler из *General Motors* в 1942 г. Преимущества капиллярных систем были также независимо проработаны и продемонстрированы Джорджом Грувером (*George Grover*) в 1963 году и впоследствии опубликованы в *Journal of Applied Physics*.



Термический цикл тепловой трубы:

1. Рабочая жидкость испаряется, поглощая тепловую энергию;
2. Пар перемещается вдоль полости в конец с более низкой температурой;
3. Пар конденсируется обратно в жидкость отдавая перенесённую тепловую энергию;
4. Рабочая жидкость по фитилю течёт обратно в конец с высокой температурой.

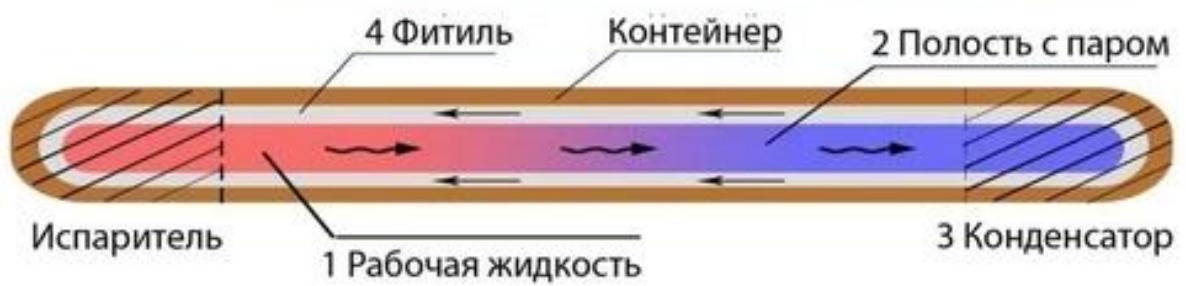
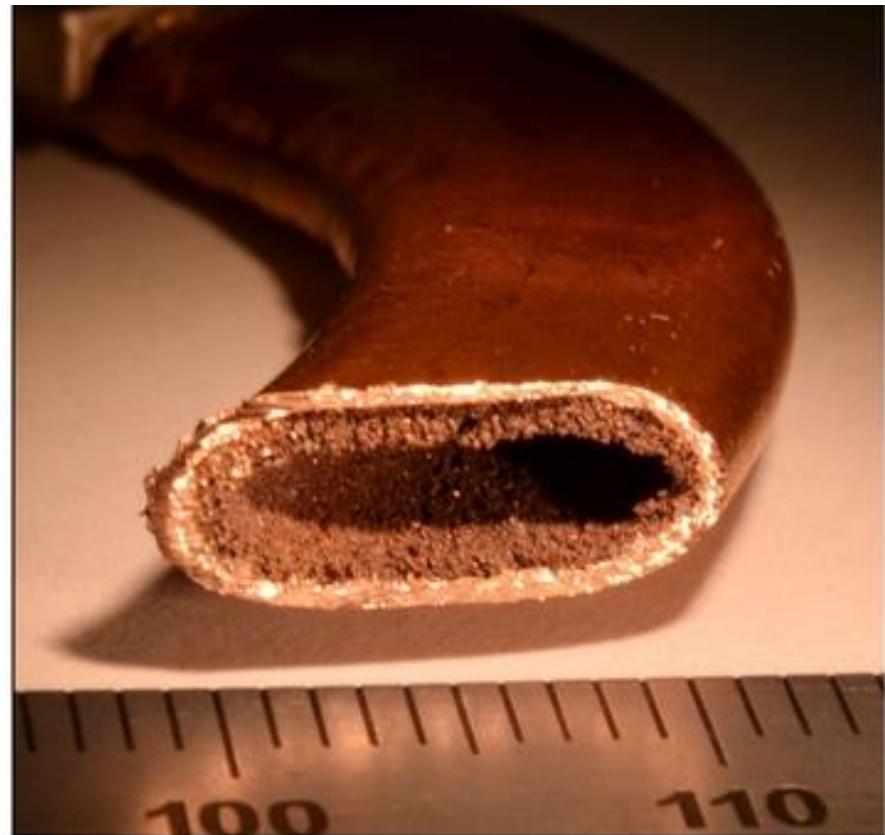


Рисунок 2.15 – Принципиальная схема работы тепловой трубы

Сейчас широко используются в современных компьютерных системах, для охлаждения ЦПУ, чипсетов и т. п. в компьютерах и ноутбуках, являясь, наряду с испарительными камерами и СЖО, одним из наиболее эффективных методов теплопереноса от компактного источника тепла к радиатору с развитой поверхностью. Иногда также применяются в составе смартфонов для перераспределения тепла.

Также тепловые трубки используются в мощных светодиодных лампах. Широко применяются в космической технике. Применяются в солнечной энергетике, для повышения эффективности нагрева воды в солнечных коллекторах.

Имеют узкий эффективный диапазон использования. При превышении расчетной температуры вся охлаждающая жидкость может перейти в пар, что приведет к катастрофическому снижению теплопроводности трубы (до 1/80). И, наоборот, при недостаточной температуре жидкость плохо испаряется.

Тепловые трубки имеют большой диапазон рабочих температур, скорость передачи тепла превышает скорость звука, и имеют ресурс работы более 20 000 часов, что их делает высокоэффективной и надежной технической системой.

Внутри находится рабочая жидкость – вода, и фитиль – несколько слоев из тонкой проволоки либо специально спеченная керамическая крошка. Для того, чтобы вода закипала при более низких температурах, из тепловых трубок откачен воздух.

Современные тепловые трубы, которые используются для охлаждения компьютерной техники, заправлены следующим составом: *water (90 %) some mixes, such as nitrogen (0,3 %), ammonia (7 %) and aldehyde HC 7 (2,7 %)*, по данным производителя.

Принцип работы тепловой трубы. Тепловая энергия от нагреваемого участка трубы – испарителя переносится к охлаждаемому концу трубы – конденсатору в виде внутренней энергии (теплоты испарения) [12]. Поры капиллярной системы заполнены жидкостью. При нагревании испарительного участка трубы и охлаждении конденсатора температура жидкости в испарителе поддерживается более высокой, чем в конденсаторе. В соответствии с этим давление насыщенных паров в испарителе p_2 больше, чем давление паров в конденсаторе p_1 . Под действием перепада давления $\Delta p_{\text{п}} = p_2 - p_1$ пар перемещается в охлаждаемый конец трубы, где происходит конденсация пара и выделение теплоты испарения. Теплота, выделившаяся в конденсаторе, отводится теплопроводностью через фитиль и стенки наружу. Сконденсированная жидкость поступает в поры фитиля и под действием капиллярных сил возвращается в испаритель. Испарение жидкости в нагреваемом участке трубы меняет форму мениска в испарителе. Радиус мениска r_2 больше или равен наибольшему радиусу поры в капиллярной системе. В результате в установившемся режиме давление в приграничном слое жидкости будет равно $p_2 - (2\gamma/r_2)$, где γ – поверхностное натяжение. В конденсаторе соответствующее давление равно $p_1 - (2\gamma/r_1)$. Разность давления в жидкости равна $\Delta p_{\text{ж}} = 2\gamma[(1/r_2) - (1/r_1)] - \Delta p_{\text{п}}$. (* – при

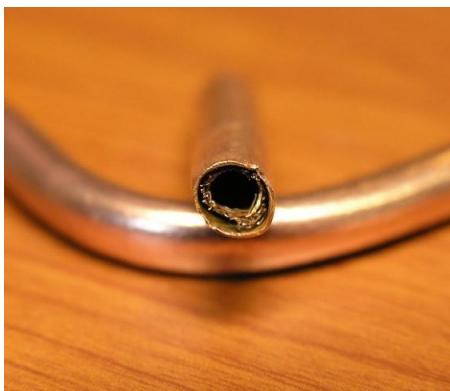
горизонтальном расположении тепловой трубы. В противном случае необходимо учесть силу тяжести).



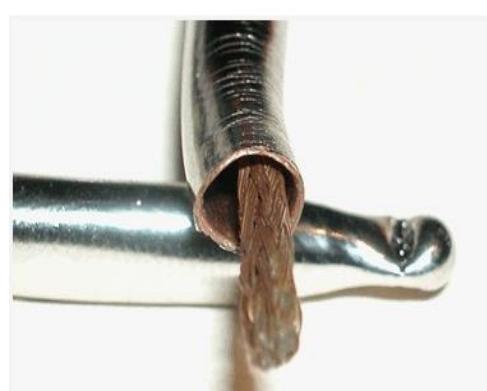
1



2



3



4

Рисунок 2.16 – Образцы фитиля тепловой трубы: 1 – порошковое напыление; 2 – фитиль в виде «желобков» на внутренней стороне трубы; 3 – многослойная металлическая сетка; 4 – фитиль из обычной медной проволоки

При выборе достаточно малых размеров пор разность давлений в жидкости можно сделать положительной, т. е. направленной от конденсатора к испарителю. Под действием перепада давления жидкость перемещается из конденсатора в испаритель, преодолевая сопротивление сил вязкости. В испарителе снова происходит испарение жидкости, и цикл продолжается.

Конструкция капиллярной системы может быть различной. На рисунках 2.16 и 2.17 показаны некоторые возможные формы капилляров.

Конструкция капиллярной системы оказывает большое влияние на максимальный тепловой поток, передаваемый трубкой. Кроме того, имеется целый ряд факторов, ограничивающих передаваемый поток тепла:

- скорость движения пара, достигающая звуковой;
- увлечение жидкости паром;
- скорость перемещения жидкости по капиллярной системе;
- перегрев жидкости в борах;
- вскипание жидкости.

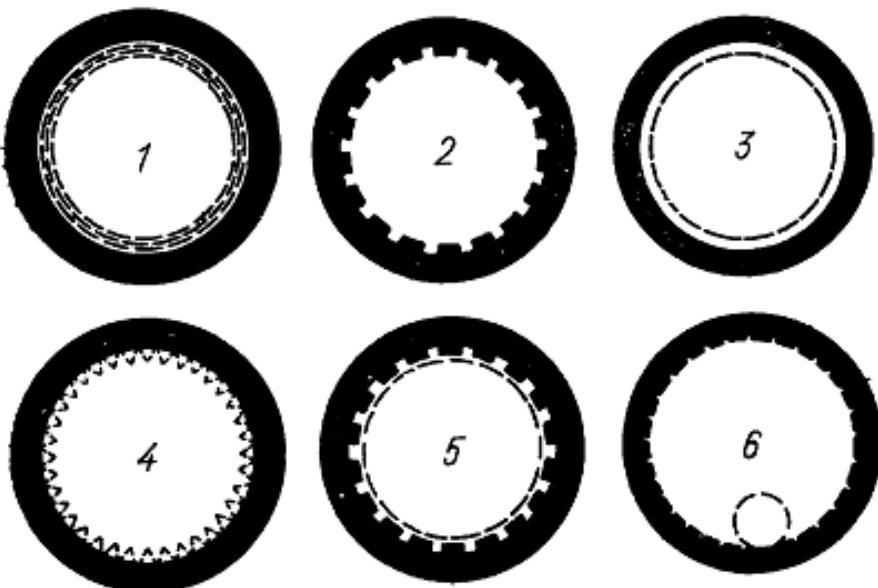


Рисунок 2.17 – Варианты конструкции капиллярной системы тепловой трубы:
 1 – многослойная сетка с малыми ячейками, плотно прилегающая к внутренней поверхности трубы; 2 – открытые каналы в стенке трубы; 3 – сетка на небольшом расстоянии от трубы, образующая кольцевой канал для жидкости; 4 – гофрированный экран, образующий со стенкой трубы продольные каналы треугольной формы; 5 – каналы в стенке трубы, закрытые экраном; 6 – комбинация трубок для основного потока жидкости с многослойным экраном

В таблице 2.7 (с номера 1 по 14) приведены результаты ресурсных испытаний различных низкотемпературных трубок [12], которые в ходе испытаний не обнаружили ухудшения характеристик. В этой же таблице приведены результаты для высокотемпературных трубок (с номера 15 по 20).

Таблица 2.7 – Результаты ресурсных испытаний тепловых трубок [12]

№ п/п	Рабочее тело	Материал трубы	Рабочая температура, °C	Передаваемая мощность, Вт	Ресурс, ч
1	Вода	Медь	150	190	9700
2	-"-	-"-	100	250	6900
3	-"-	-"-	80	40	8300
4	Ацетон	Алюминий	110	70	1000
5	-"-	Сталь 304	87	30	2200
6	Ртуть	-"-	340	360	16900
7	Калий*	Никель	600	1750	24500
8	-"-	-"-	600	1200	10000
9	-"-	-"-	600	1750	6000
10	Натрий	Хастеллой	715	200	20000
11	-"-	-"-	715	200	8000
12	-"-	Сталь 316	771	300	4000
13	-"-	Никель	800	200	8200

№ п/п	Рабочее тело	Материал трубки	Рабочая температура, °C	Передаваемая мощность, Вт	Ресурс, ч
14	-"-	Сталь 304	800	300	7200
15	Литий	TZM*	1500	2000	10400
16	-"-	-"-	1500	2000	9800
17	-"-	-"-	1560	2875	4600
18	-"-	Деоксидированный Nb-1%Zr	1500	115	1000
19	Литий-13 % кальция	Nb-1%Zr	1500	115	1000
20	Литий	SGS-Ta	1600	170	1000

*— газоуправляемая тепловая трубка

Проблемы совместимости материалов в диапазоне рабочих температур 1500–2200 К значительно сложнее. Предварительные результаты показывают, что в диапазоне из всех возможных рабочих жидкостей, имеющих приемлемое давление паров, литий должен обеспечить наибольшее значение плотности осевого потока тепла – около 10 кВт/см².

Основные достигнутые характеристики современных тепловых трубок приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Основные достигнутые характеристики современных тепловых трубок

Характеристики тепловых трубок	Достигнутые параметры
Рабочий диапазон температур, К	4 – 2300
Скорость теплопередачи	Звуковой барьер
Мощность теплопередачи, кВт/см ²	До 20
Ресурс работы, ч	20000
Используемые вещества в жидкой фазе:	Гелий (−271 ÷ −269 °C); Аммиак (−60 ÷ +100 °C); Фреон (−40 ÷ +120 °C); Ацетон (0 ÷ +120 °C); Вода (+30 ÷ +200 °C); Ртуть (+250 ÷ +650 °C).

2.12.4. Использование ТЭП для надстройки блоков тепловых и атомных электростанций

За счет увеличения единичной мощности (до 1 ГВт), повышения давления (до 250 кг/см²) и температуры (до 700 – 800 К) рабочего тела, а также некоторых других мер достигнуты КПД паротурбинных установок 40–44 %. В 50-х годах XX века началось внедрение газотурбинных установок, работающих при более высоких температурах. Но даже лучшие из них – газовые турбины с охлаждаемыми элементами – в настоящее время могут работать при температуре до 1300 К с КПД 35 – 42 %. Практически достигнут предел в повышении эффективности использования тепловой энергии топлива за счет

повышения температуры паротурбинного цикла из-за технологических трудностей, возникающих при уже достигнутых давлениях и температурах. В то же время температура горения топлива составляет примерно 2000 К. Это значит, что при паротурбинном цикле остается недоступным обширный высокотемпературный интервал, который в принципе мог бы быть еще использован при сжигании топлива [13].

Существенно увеличить КПД преобразования тепловой энергии в электрическую можно при дополнении паротурбинных установок высокотемпературными надстройками (ТЭН). Предлагается использовать в качестве такой надстройки ТЭП.

Схема потоков тепловой и электрической энергии в тепловой машине с высокотемпературной надстройкой изображена на рисунке 2.18. Часть ($\xi \cdot Q$) подводимого тепла Q направляется в высокотемпературную надстройку (на катод ТЭП). Если КПД ТЭП равен η_T , то ТЭП дает полезную электрическую мощность $\eta_T \cdot \xi \cdot Q$.

Оставшееся тепло $(1 - \eta_T \cdot \xi)Q$ преобразуется в электроэнергию с КПД парового цикла η_{Π} , производя полезную мощность $\eta_{\Pi}(1 - \eta_T \cdot \xi)Q$. В холодильник сбрасывается тепло $(1 - \eta_{\Pi})(1 - \eta_T \cdot \xi)Q$. Отсюда следует выражение для полного КПД такой схемы:

$$\eta = \eta_{\Pi} + \xi \cdot \eta_T(1 - \eta_{\Pi}). \quad (2.56)$$

В таблице 2.9 приведены предварительные оценки и сравнение характеристик тепловой электростанции (ТЭС) и ТЭС+ТЭН.

Таблица 2.9 – Оценка и сравнение характеристик тепловой электростанции (ТЭС) и ТЭС+ТЭН [13]

Характеристика	ТЭС	ТЭС+ТЭН	Характеристика	ТЭС	ТЭС+ТЭН
Тепловая мощность, МВт	2000	2000	Мощность на вспомогательные нужды, МВт	30	30
Электрическая мощность ТЭН, МВт	-	329	Выходная мощность, МВт нетто	821	988
Электрическая мощность паровой турбины, МВт	851	689	КПД, %	40	48,4
Суммарная мощность, МВт	851	1018	Капитальная стоимость на 1 кВт (относительно ТЭС)	1	1,25

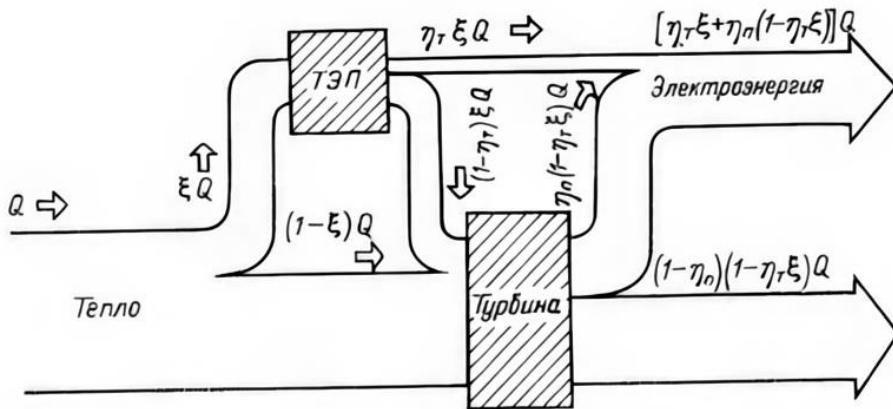


Рисунок 2.18 – Схема потоков тепловой и электрической энергии в тепловой машине с высокотемпературной надстройкой

При пропускании всего потока тепла ТЭН и повышении КПД ТЭП в будущем совмещенные термоэмиссионный и паротурбинный циклы могут иметь общий КПД 50 % и более. Основанием для этого служит постепенное улучшение характеристик ТЭП, в частности, увеличение КПД и ресурса вследствие уменьшения потерь в межэлектродном пространстве и снижения работы выхода анода. Сблизились также и тепловые условия в связи разработкой низкотемпературных ТЭП. Температура катода хорошо соответствует температуре горения топлива; температура анод близка к верхней температуре парового цикла.

Таким образом, срабатываемое с помощью ТЭП тепло попадает в свободный пока диапазон температур, где не работают паровые машины

Основные проблемы создания ТЭН. Современный уровень лабораторных исследований ТЭП указывает на принципиальную осуществимость ТЭН. Тем не менее, для того, чтобы электростанции с ТЭН стали технически и экономически обоснованной реальностью, требуется решение ряда физических и технологических задач:

1. Должен быть достигнут определенный прогресс на пути совершенствования самого ТЭП. В таблице 2.10 приведены этапы работ и требуемые на каждом из них характеристические параметры ТЭП. Конечным итогом должно стать создание элементарного ТЭП с указанными в последнем столбце таблицы значениями КПД, ресурса и температур.

2. Должна быть решена техническая задача разработки жаростойких материалов для защиты элементов конструкции надстройки, находящихся в топке (катода ТЭП или тепловых труб), от химического воздействия продуктов сгорания, а также от их проникновения в межэлектродное пространство ТЭП или внутрь тепловой трубы. Возможно, это будут дисилициды молибдена, вольфрама, графит, окислы бериллия и алюминия, нитрит бора, карбид кремния и хромоникелевые сплавы.

К настоящему времени испытания этих материалов показали, что достаточно надежная и длительная защита ТЭП до температуры 1500 К

обеспечивается с помощью хромоникелевых сплавов *BX* и *Inconel* (52 % *Ni*; 48 % *Cr*). Успешно испытана также защитная система (*SiC – C – W*), работавшая более 2000 ч при температуре 1675 К.

Таблица 2.10 – Этапы работ и требуемые на каждом из них характерные параметры ТЭП [13]

Характеристика	Современное состояние	Вариант демонстрируемой модели	Опытно-промышленный вариант	Промышленный вариант
Температура катода, °C	1000	900-1000	800-1000	750-1000
Температура коллектора, °C	600-700	500-600	400-650	300-650
Удельная мощность, Вт/см ²	4-5	4-5	5-10	5-10
Ресурс, 10 ³ ч	1-2	1-5	5-10	20 и более
КПД, %	12-13	12-15	18-20	20-22

Примыкает к рассмотренной проблеме и задача обеспечения высокого уровня вакуумной технологии. Дело в том, что в отличие от существующих ТЭП, где газовый состав поддерживается постоянным благодаря его непрерывному обновлению, такой подход в ТЭН, которая должны быть автономна в течение длительного времени, невозможен. Здесь решение лежит через внедрение новых для ТЭП технологических операций, в том числе вакуумной сборки конструкций.

Наконец, необходимо учитывать экономическую сторону внедрения ТЭН в большую энергетику. Пока стоимость создаваемых элементов ТЭН чрезвычайно велика. Это связано с применением дорогостоящих металлов для электродов, материалов для защиты, с наличием сложных технологических операций. Некоторые авторы утверждают [11], что стоимость 1 кВт установленной мощности ТЭН составляет 300 – 600 долл. США в зависимости от конкретного варианта. Удешевление термоэмиссионных модулей и ТЭН в целом возможно на пути более рационального использования тугоплавких металлов и других дорогостоящих материалов, автоматизации и, безусловно, серийного производства модулей. Немаловажный положительный фактор в пользу создания ТЭН – относительно невысокая стоимость разработки в силу ее модульности. То есть возможность применять полномасштабный ТЭН, состоящий из множества скоммутированных элементов. В пользу ТЭН говорит и возможность их размещения в существующих котельных агрегатах лишь при незначительной реконструкции последних. Вместе с тем, безусловно, после создания демонстрационной модели ТЭН потребуется более детальный технико-экономический анализ проблемы и выбор параметров базовой энергоустановки.

Проекты ТЭН. Аналогично космическим реакторам-преобразователям рассматриваются два варианта ТЭН: *встроенный и выносной*.

В первом случае термоэмиссионные модули расположены внутри топки, во втором – вне.

Во встроенном варианте ТЭН представляет собой панель, набранную из термоэмиссионных модулей, катоды которых обращены к факелу плазмы, а аноды – к парогенератору. Согласно уравнению (2.56), чем больше ξ , т. е. чем большая часть теплового потока перехватывается ТЭН, тем больше суммарный КПД установки. Это значит, что панелями из ТЭП целесообразно покрывать максимально большую внутреннюю поверхность топки. Главными проблемами этого варианта являются:

- 1) защита катода от химически активной среды топки;
- 2) необходимость подогрева воздуха с целью увеличения плотности потока тепла от факела к ТЭН (и, соответственно, доли тепла, проходящего через ТЭН);
- 3) шлакование в топке, которое может привести, с одной стороны, к большей теплоизоляции рабочей поверхности ТЭН, а с другой – к замыканию модулей ТЭН;
- 4) уменьшение теплового сопротивления между анодной стороной панели ТЭН и парогенератором.

В таблице 2.11 представлены характеристики ТЭС и разрабатываемой ТЭС с ТЭН с учетом реконструкции топки.

В выносном варианте многие проблемы, присущие встроенному варианту, решаются легче или упрощаются. Согласно схеме выносного варианта, тепло топки воспринимается высокотемпературными тепловыми трубками и передается ими ТЭН и парогенератору внутри котельного агрегата, так как необходимую плотность потока тепловой энергии на катоды можно обеспечить, используя трансформирующее свойство тепловых трубок. Менее острой становится проблема шлакования. Упрощается задача создания антикоррозионной и газопроницаемой защиты, которая в данном случае требуется не катодам ТЭП, а тепловым трубкам.

Таблица 2.11 – Характеристики ТЭС и разрабатываемой ТЭС с ТЭН с учетом реконструкции топки [13]

Характеристика	ТЭС	ТЭН+ТЭС с реконструированной топкой	ТЭН+ТЭС с новой топкой
Мощность ТЭН, МВт	-	155	300
Мощность паротурбинного цикла, МВт	800	758	500
Суммарная мощность, МВт	800	913	800
Расход топлива, г у.т./(кВт·ч)	328	298	260
КПД, %	37,4	41,2	47,2

Хотя использование тепловых трубок и дает ряд преимуществ, тем не менее включение в конструкцию дополнительных элементов приводит к усложнению и удорожанию надстройки. Сами тепловые трубы также могут

потребовать дополнительной доработки применительно к условиям задачи. В результате даже весьма предварительная оценка стоимости 1 кВт установленной мощности ТЭН дает для встроенной схемы 300 долл./кВт, в выносной – почти вдвое больше – 580 долл./кВт [13].

ТЭН к атомным электростанциям. Широкое применение ТЭН в большой энергетике будет целесообразно только при решении задачи создания ТЭП с барьерным индексом 1эВ и ниже. При этом оказывается экономически обоснованной ТЭН не только к тепловым электростанциям, но и к атомным, вплоть до полного замещения паротурбинного цикла. Это относится к высокотемпературным газовым реакторам, тепло которых (температура газа на выходе из активной зоны 1500 – 1600 К) может быть использовано для получения электроэнергии и во многих технологических процессах в металлургии, химии, энергетике. Аналогично ТЭН может быть применена в реакторе на быстрых нейтронах, служащем для производства электроэнергии, ядерного топлива и для теплоснабжения.

В настоящее время предложены проекты транспортабельных термоэмиссионных АЭС мощностью до нескольких мегаватт для использования в удаленных районах в автоматическом режиме аналогично космическим ядерным энергетическим установкам. Из-за большой топливной составляющей в стоимости электроэнергии, производимой в таких районах на обычных станциях, применение АЭС может быть выгодным, даже несмотря на высокую стоимость её сооружения. В связи с быстрыми темпами и успехами в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу есть предложения по использованию ТЭП в сочетании и с этим источником тепла. В частности, предлагается поместить ТЭН между нейтронной защитой и высокотемпературным бланкетом термоядерных реакторов [14, 15].

2.12.5. Ядерные ЭУ электрической мощностью 5 – 10 МВт

Термоэмиссионные ЯЭУ электрической мощностью более 5 МВт могут быть созданы на основе принципиальных технических решений по ЯЭУ МБ «Геркулес» (рисунок 2.19) мощностью 500–600 кВт [16], а именно:

- применение термоэмиссионного реактора-преобразователя (ТРП) на быстрых нейтронах с использованием легированного монокристаллического вольфрама в качестве материала эмиттерных оболочек термоэмиссионных электрогенерирующих каналов (ЭГК);
- применение высокотемпературной системы охлаждения с расплавленным литием в качестве теплоносителя;
- отбросная теплота термодинамического цикла отводится через поверхность холодильника-излучателя (ХИ), которая формируется из ниобиевых тепловых труб, чья зона испарения омывается литием в коллекторах-теплообменниках;

— во всей конструкции ЯЭУ, включая корпуса ЭГК и электрогенерирующих пакетов (ЭГП), конструкции реактора и системы охлаждения, используется единый, разработанный РКК «Энергия», конструкционный материал — ниобиевый сплав $NbZrC$ (сплав ниобий –1% цирконий –0,1 % углерод), допускающий значительно более высокие рабочие температуры, чем жаропрочные стали, что позволяет минимизировать габариты и массу ЯЭУ;

— лучевой принцип компоновки ЯЭУ с использованием теневой радиационной защиты;

— одноконтурная принципиальная схема ядерно-энергетической установки.

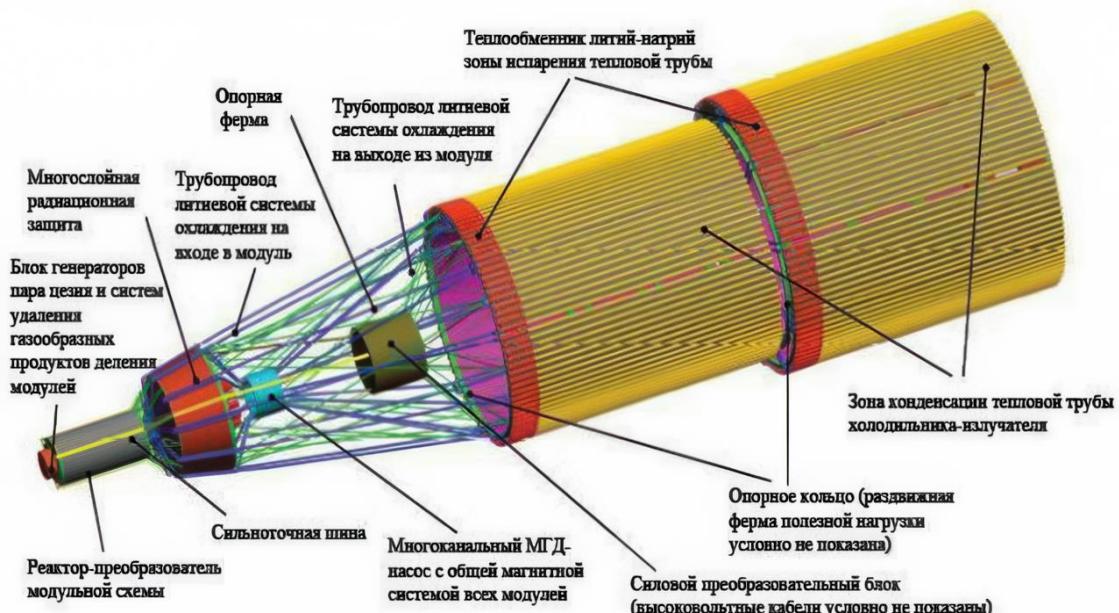
Однако для таких больших мощностей требуется существенное улучшение, относительно ЯЭУ «Геркулес», удельных характеристик. Прежде всего:

— увеличение плотности электрической мощности w , снимаемой с поверхности эмиттера ЭГК;

— повышение температуры теплоносителя, а следовательно, и температуры T_k коллектора ЭГК;

— использование новых решений в конструкции ХИ и некоторых других агрегатов.

Это делает невозможным прямой перенос конструкционных решений по ЯЭУ «Геркулес» на ЯЭУ данного диапазона мощности. В частности, нецелесообразно использование в составе ТРП мультимегаваттной ЯЭУ типовых ЭГП от ЯЭУ «Геркулес».



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

Рисунок 2.19 – Космическая ядерная ЭУ межорбитального буксира (МБ) «Геркулес» мощностью 600 кВт

В рамках ряда НИР, связанных с проектно-концептуальными исследованиями энерговигательного обеспечения марсианской экспедиции, РКК «Энергия» в развитие работ по ЯЭУ «Геркулес» выполнила проектные проработки пяти вариантов ЯЭУ электрической мощностью 5–10 МВт. Условно они обозначены по количеству ЭГП (модулей) термоэмиссионного реактора.

При выполнении проектных исследований был предложен, проработан и принят ряд новых технических решений, в частности:

- пятислойный коллекторный пакет в электрогенерирующих каналах;
- комбинированная электрическая схема высоковольтной ЯЭУ;
- применение автоматического коммутирующего устройства с целью изменения выходного напряжения ЯЭУ;
- применение пусковой системы на основе литиевых тепловых трубок.

Предполагалось, что все радиационно-чувствительные и не температуростойкие элементы системы электроснабжения (СЭС), а также агрегаты и системы информационно-управляющей системы (ИУС) компонуются в приборно-агрегатном отсеке КА.

Кратко рассмотрим особенности основных систем мультимегаваттных ЯЭУ [16].

Термоэмиссионный электрогенерирующий канал (ЭГК). Все варианты ЯЭУ мультимегаваттной мощности имеют унифицированный ЭГК Ø13,5 мм с пятислойным коллекторным пакетом, что позволяет повысить выходное напряжение ТРП относительно ЯЭУ «Геркулес». В двух вариантах используется укороченный вариант ЭГК (варианты ЯЭУ с ТРП-19 и ТРП-7). В качестве эмиттерного материала выбран монокристаллический сплав вольфрама. Ниобиевый коллектор имеет вольфрамовое покрытие.

С точки зрения удельных энергетических характеристик рассматриваются два типа ТРП. *Первый тип* (ТРП-37) имеет электрическую мощность 5 МВт, ресурс до 1,5 лет и объем активной зоны ~665 л. Основные технические характеристики этого ТРП базируются на достигнутом и обоснованном к настоящему времени уровне принципиальных характеристик и технологии ТРП ЯЭУ «Геркулес».

Второй тип реакторов электрической мощностью 5 (ТРП-19, ТРП-7), 7,5 (ТРП-27) и 10 МВт (ТРП-12) с ресурсом до 1,5 лет. Их характеристики базируются на перспективных разработках, имеющих теоретическое и некоторое экспериментальное обоснования. Отдельные параметры достигнуты также при стендовой и реакторной отработках экспериментальных узлов и систем.

Применительно к проектам ТРП повышенной удельной мощности ($>10 \text{ Вт}/\text{см}^2$) в реакторе ВВР-М был испытан ЭГК при плотности электрической мощности до $14 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Результаты: в оптимальных точках (при напряжении на элементе ~1 В) при $\omega = 11\text{--}13 \text{ Вт}/\text{см}^2$ КПД составил 14 %. При рабочих напряжениях 0,5 и 0,75 В на элемент КПД – 9,5 и 11,5 %, соответственно. Геометрические и энергетические характеристики термоэмиссионных ЭГК рассматриваемых вариантов ЯЭУ приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Характеристики ЭГК мультиmegаваттных ЯЭУ с ТЭП [16]

Индекс ЯЭУ	ТРП -37	ТРП -12	ТРП -19	ТРП -27	ТРП -7
Наружный диаметр ЭГК, мм	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
Эмиссионная поверхность ЭГК, см ²	260,75	260,75	234,67	260,75	234,67
Загрузка ²³⁵ U, г	235,30	235,30	252,10	235,30	252,10
Доля ЭГЭ в ЭГК, отн. ед.	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Толщина коллекторного пакета, мм. В т. ч.:	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
– чехол (<i>NbZrC</i>)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
– «сухая» изоляция	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
– охранный электрод	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
– «мокрая» изоляция	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
– коллектор	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
МЭЗ в холодном состоянии, мм	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Диаметр эмиттера, мм	10	10	10	10	10
Толщина эмиттера, мм	1	1	1	1	1
Внутренний диаметр эмиттера, мм	8	8	8	8	8
Относительное содержание топлива (<i>UO₂</i>) в сердечнике	0,7	0,7	0,75	0,7	0,75
Средняя плотность электрической мощности с поверхности эмиттера, Вт/см ²	6,87	10,85	13,7	13,1	12,4

Второй тип реакторов электрической мощностью 5 (ТРП-19, ТРП-7), 7,5 (ТРП-27) и 10 МВт (ТРП-12) с ресурсом до 1,5 лет. Их характеристики базируются на перспективных разработках, имеющих теоретическое и некоторое экспериментальное обоснования. Отдельные параметры достигнуты также при стендовой и реакторной отработках экспериментальных узлов и систем.

Применительно к проектам ТРП повышенной удельной мощности (>10 Вт/см²) в реакторе ВВР-М был испытан ЭГК при плотности электрической мощности до 14 Вт/см². Результаты: в оптимальных точках (при напряжении на элементе ~1 В) при $\omega = 11\text{--}13$ Вт/см² КПД составил 14 %. При рабочих напряжениях 0,5 и 0,75 В на элемент КПД – 9,5 и 11,5 %, соответственно.

Геометрические и энергетические характеристики термоэмиссионных ЭГК рассматриваемых вариантов ЯЭУ приведены в таблице 2.12.

Термоэмиссионный реактор-преобразователь (ТРП). В качестве ТРП выбран реактор на быстрых нейтронах с замедляющим отражателем, активная зона которого набрана из ЭГП с коаксиальными ЭГК. Предусматривается система регулирования реактора, состоящая из поворотных цилиндров в боковом отражателе. По структуре он не отличается от ТРП ЯЭУ МБ «Геркулес» (рисунок 2.19).

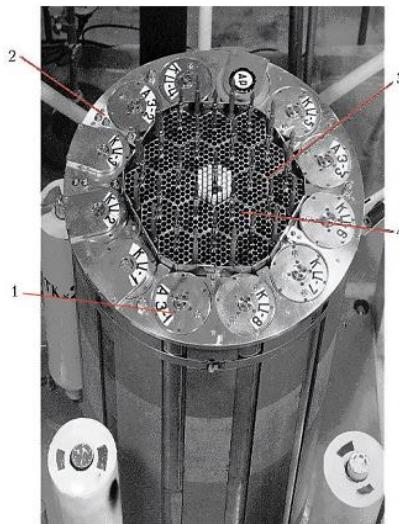


Рисунок 2.20 – Полномасштабный нейтронно-физический прототип термоэмиссионного реактора-преобразователя: 1 – поворотный цилиндр системы управления и защиты; 2 – боковой отражатель; 3 – активная зона; 4 – модель ЭГП с 36-ю моделями ЭГК

Три варианта термоэмиссионного реактора-преобразователя (варианты ЯЭУ с ТРП-37, ТРП-19, ТРП-27) выполнены на основе унифицированного для рассматриваемых установок электрогенерирующих пакетов с наружным размером «под ключ» 144 мм и унифицированными размерами органов регулирования. Данные варианты ТРП выполнены для ЯЭУ изопотенциальной схемы с напряжением на клеммах ЯЭУ 220 В. Два варианта ЯЭУ (с ТРП-7 и ТРП-12 электрической мощностью 5 и 10 МВт, соответственно) выполнены по комбинированной схеме на рабочее напряжение 1–2 кВ.

Все модули электрически изолированы друг от друга.

Предложено выполнить, в зависимости от требуемых характеристик тока потребителя, стационарную коммутацию внутри каждого модуля с возможностью перекоммутации на клеммах модулей с тем, чтобы обеспечить необходимые параметры тока потребителю.

В ТРП данных ЯЭУ использовались ЭГП большего размера. ЯЭУ разбивается на изопотенциальные модули, содержащие по одному ЭГП. С каждого модуля снимается электрическая мощность порядка 800 кВт.

Основные технические характеристики ЭГП термоэмиссионного реактора рассматриваемых вариантов ЯЭУ приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Характеристики электрогенерирующих пакетов (ЭГП) [16]

Индекс ЯЭУ	ТРП -37	ТРП -12	ТРП -19	ТРП -27	ТРП -7
Число ЭГК в ЭГП*	80+(2)	324+(7)	90+(1)	89+(2)	270+(1)
Наружный размер ЭГП под «ключ», мм	144	265,2	144	144	240,6
Внутренний размер ЭГП под «ключ», мм	138	259	138	138	234,4
Толщина корпуса пакета, мм	3	3+0,1Al ₂ O ₃	3	3	3+0,1Al ₂ O ₃
Эмиссионная поверхность, реализуемая в ЭГП, м ²	2,321	8,448	2,112	2,321	6,336
Загрузка ²³⁵ U в ЭГП, кг	20,9	76,23	22,69	20,94	68,07

Примечание * – в скобках указано число вынутых из ЭГП электрогенерирующих каналов (ЭГК), место которых занято под тепловые трубы пусковой системы и стержни безопасности

Основные технические характеристики ТРП рассматриваемых вариантов ЯЭУ приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Характеристики термоэмиссионных реакторов-преобразователей (ТРП) [16]

Индекс ЯЭУ	ТРП -37	ТРП -12	ТРП -19	ТРП -27	ТРП -7
Наружный диаметр ТРП, мм	1260	1360	956	1120	976
Высота активной зоны, мм	1000	1000	900	1000	900
Диаметр активной зоны (эфф.), мм	920	976,3	658	786	672,6
Объем активной зоны, л	664,76	748,6	306	485	320
Загрузка ²³⁵ U, кг	774,8	914,8	431,1	565,4	476,5
Эмиссионная поверхность, м ²	85,9	101,4	40,1	62,7	44,35
Объемная плотность электрической мощности активной зоны, кВт/л	8,9	14,7	18	16,9	17,2
Количество РЦ	12	12	12	12	12
Диаметр РЦ, мм	144	120	144	144	120
Количество КЦ	6	12	6	3	6
Диаметр КЦ, мм	192	192	120	192	192
Количество ЭГП в ТРП	37	12	19	27	7
Толщина межпакетной изоляции, мм	-	3(Al ₂ O ₃)	-	-	3(Al ₂ O ₃)

Рассматривались два принципиальных варианта компоновки мульти megаваттных ядерно-энергетических установок.

В первом варианте холодильник-излучатель имеет коллекторы-теплообменники, размещенные на диаметрах 2,5 и 5,5 м (максимально допустимый габарит ЯЭУ в стартовом положении). После вывода ЯЭУ на орбиту запуска происходит раздвижение панелей ХИ в пределах угла конуса тени РЗ. Объем конуса между РЗ и ХИ занят агрегатами и элементами системы электроснабжения, блоком электромагнитных насосов, силовым преобразовательным блоком. Второй вариант отличается от первого тем, что габариты ЯЭУ не вписываются в грузовой транспортный контейнер, что требует использования раскладывающегося ХИ (рисунок 2.21).

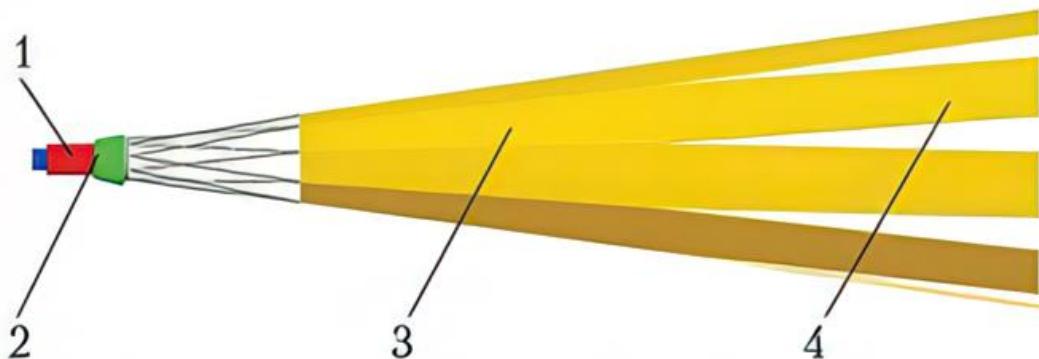


Рисунок 2.21 – Ядерная энергетическая установка с раскладывающимся после выведения в космос холодильником-излучателем (ХИ): 1 – термоэмиссионный реактор-преобразователь; 2 – радиационная защита; 3 – жесткая секция ХИ; 4 – разворачивающаяся из цилиндрической конфигурации секция ХИ

2.12.6. Реакторы с термоэмиссионными преобразователями

Основной период интенсивного развития направления прямого преобразования приходится на 1960–1980 гг., когда осуществлялись амбициозные проекты ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для энергоснабжения космических аппаратов, выводимых на низкие орбиты для ведения радиолокационной разведки. Всего было выведено два аппарата с ЯЭУ на основе термоэмиссионного реактора преобразователя (ТРП) «ТОПАЗ» (рисунки 2.22 и 2.23) и 32 ЯЭУ с термоэлектрическим электрогенератором «БУК» [17].



Рисунок 2.22 – Общий вид установки ТРП «ТОПАЗ»

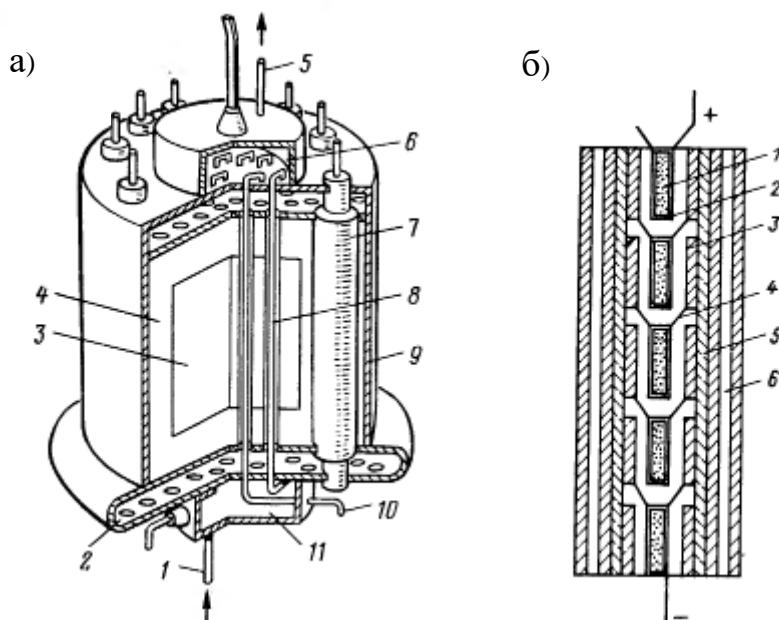


Рисунок 2.23 – Термоэмиссионный реактор-преобразователь «ТОПАЗ»:

a) – термоэмиссионный реактор-преобразователь: 1 – вход цезия; 2 – теплоноситель; 3 – замедлитель; 4 – отражатель; 5 – выход цезия; 6 – коммутационная камера; 7 – поворотный цилиндр; 8 – электрогенерирующий канал; 9 – корпус реактора; 10 – токовывод; 11 – коммутационная камера; *б)* – схема электрогенерирующего канала (ЭГК) термоэмиссионного реактора-преобразователя: 1 – ядерное горючее; 2 – катод; 3 – анод; 4 – последовательное металлическое соединение катода с анодом; 5 – изоляция; 6 – теплоноситель

Последующие работы в этом направлении ввиду отсутствия должного финансирования не были доведены до стадии лётно-космических испытаний, но поиски оптимальных форм ТРП и его систем продолжаются по настоящее время. С момента разработки ТРП «ТОПАЗ» было предложено несколько

принципиально отличных конструктивно-компоновочных решений, направленных на увеличение рабочего ресурса ТРП за счет разнесения в пространстве оболочек ТВЭЛов (ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент в ЯЭУ) и эмиттеров термоэмиссионного преобразователя (ТЭП). Такие технические решения исключают влияние деформации ТВЭЛов вследствие распускания топлива на величину межэлектродного зазора ТЭП, ведущего к короткому замыканию и выходу ТРП из строя.

Целью работы является сравнение технических характеристик ТРП при различных вариантах исполнения, отличающихся по способу передачи тепла от топлива к эмиттерам термоэмиссионного преобразователя (кондуктивный, излучением или испарительно-конденсационный). Охлаждение коллекторов ЭГК во всех вариантах осуществляется конвекцией жидкокометаллического теплоносителя (ЖМТ).

Конструктивные формы реакторов преобразователей

Конструктивно-компоновочные схемы вариантов исполнения ТРП представлены на рисунке 2.23. Они соответствуют четырём вариантам переноса тепла от ТВЭЛов к эмиттерам электрогенерирующих каналов (ЭГК):

- традиционная кондуктивная (оболочка ТВЭЛА несет функцию эмиттера термоэмиссионного преобразователя) [3, 4];
- теплотрубная с раздельным размещением тепловых труб (ТТ) и ТВЭЛОв в высокотеплопроводной матрице (испарительная) [5, 6];
- теплотрубная с размещением ТТ в полости ТВЭЛОв или непосредственно на их стенке (испарительная) [7, 8];
- с размещением ТВЭЛОв и ЭГК в паровой камере (испарительная) [9, 10].

Рассмотрим особенности приведенных конструктивно-компоновочных схем.

Традиционная схема (рисунок 2.23, а) с кондуктивным переносом тепла от топлива к эмиттирующей поверхности через чехол ТВЭЛА (оболочка ТВЭЛА несет функцию эмиттера ТЭП). В данном типе ТРП реализована концепция внутризонного размещения ТЭП. ТВЭЛ является составной частью ЭГК.

Вследствие совмещения функций конструктивных элементов достигается высокая компактность ТРП при низкой удельной массе. ЭГК размещены между трубными досками в герметичном корпусе, заполненном ЖМТ, подводимым по напорному патрубку и отводимым через сливной (по типу кожухотрубного теплообменника).

За трубными досками размещены коммутационные камеры, в которых размещены токоподводы ЭГК и отводы цезиевой системы. Снаружи корпуса активная зона окружена отражателем. Было разработано два варианта ТРП такого типа – с одноэлементным ЭГК (ТРП «ЕНИСЕЙ» рисунок 2.24 [4]) и многоэлементным ЭГК (ТРП «ТОПАЗ» [3]). Одноэлементный ЭГК позволяет организовать отвод газообразных продуктов деления (ГПД) минуя межэлектродный зазор (МЭЗ), многоэлементный обеспечивает большее выходное напряжение за счет последовательно включенных ТЭП.

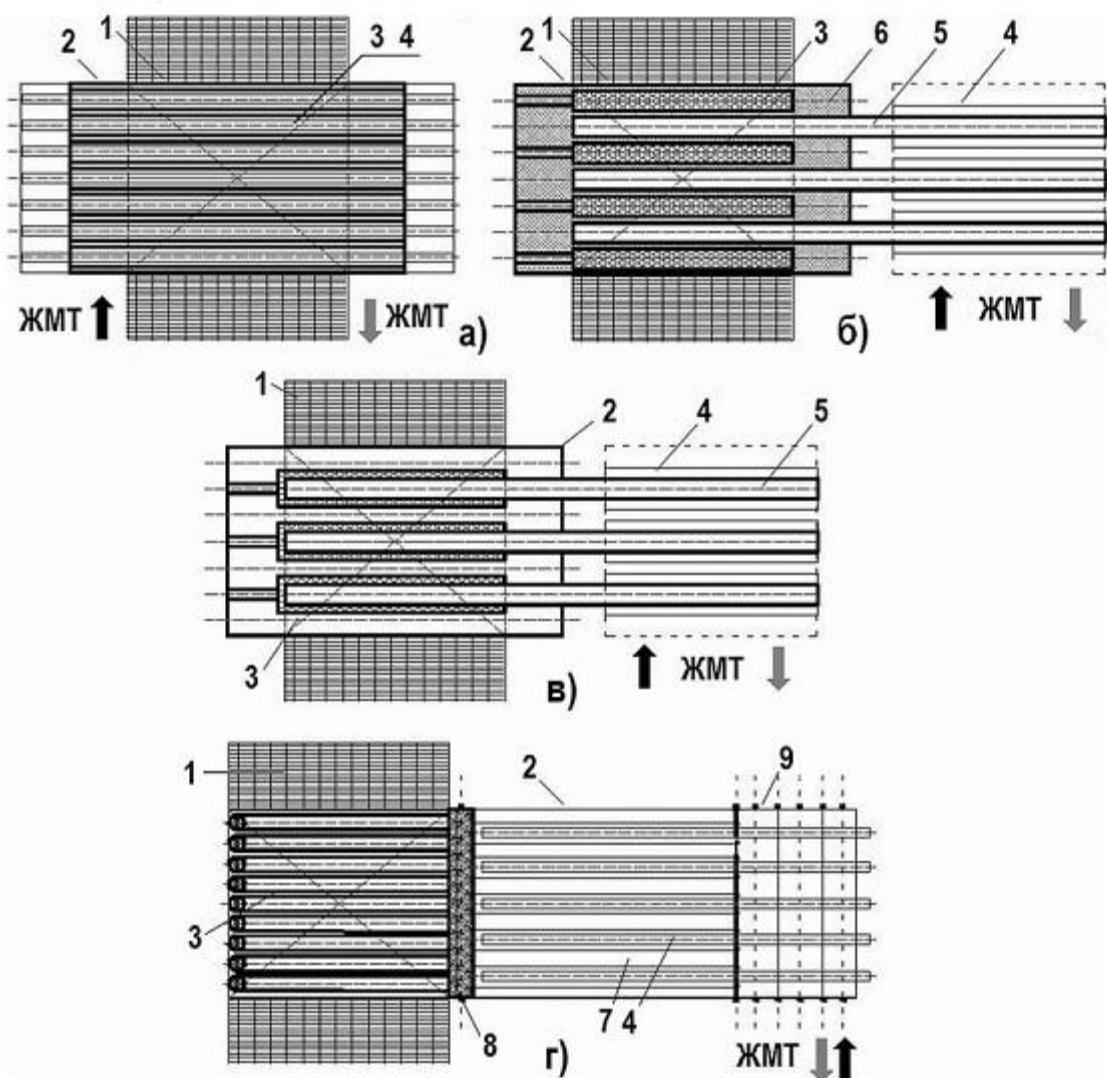


Рисунок 2.24 – Конструктивно-компоновочные схемы вариантов исполнения ТРП: а – типа «ТОПАЗ»; б – типа «SAFE300»; в – типа «ЭЛЬБРУС»; г – по принципу паровой камеры. Обозначения: 1 – отражатель; 2 – корпус реактора; 3 – ТВЭЛы; 4 – ЭГК; 5 – тепловая труба; 6 – высокотеплопроводная матрица; 7 – паровая камера; 8 – сотовая перегородка из капеллярно-пористого материала; 9 – блок коллекторов и коммутационных камер

Теплотрубная конструкция с раздельным размещением ТТ и ТВЭЛОв в высокотеплопроводной матрице [5, 6] первоначально была предложена для ТРП на основе двигателя Стирлинга «SAFE300» с последующей заменой на термоэлектрический преобразователь, и только затем ввиду низкого КПД термоэлектрического преобразователя был рассмотрен вариант с ТЭП (рисунок 2.24, б). Конструкция реактора обеспечивает устойчивый теплоотвод от каждого ТВЭЛА при выходе из строя части ТТ за счет перераспределения теплового потока от оболочек ТВЭЛОв по высокотеплопроводной матрице к действующим ТТ.

Тепловой контакт между матрицей, ТВЭЛами и ТТ предполагалось обеспечить пайкой, что приемлемо для исходного варианта с двигателем Стирлинга, однако переход к ТЭП, сопровождающийся существенным ростом рабочей температуры, в настоящее время недостаточно технологически проработан, и устойчивость по отношению к термомеханическим нагрузкам требует обоснования.

Теплотрубная конструкция ТР с размещением ТТ в полости ТВЭЛов или непосредственно на их стенке (испарительная) была предложена в проекте «Эльбрус» (рисунок 2.24, в) [7, 8]. Активная зона ТРП набрана из кольцевых ТВЭЛов, размещенных на внешней поверхности литиевых ТТ, которые отводят тепло к сборке ЭГК, размещенной вне активной зоны реактора. ТЭП размещены на поверхности ТТ, эмиттеры ТЭП отделены от корпусов ТТ слоем высокотемпературной электроизоляции. Конструкция обеспечивает термомеханическую связь оболочек ТВЭЛов и эмиттеров ТЭП.

Предполагается, что при распухании топлива в ТВЭЛАх оно перемещается только наружу, не нагружая стенку ТТ.

Конструкция ТРП с теплопередачей тепла от ТВЭЛов к ЭГК по принципу паровой камеры [9, 10] в рамках разрабатываемой концепции в наибольшей степени обеспечивает термомеханическую связь между ТВЭЛами и ЭГК (рисунок 2.24, г). Она включает в себя две сборки, размещенные в герметичном корпусе – активную зону, набранную из ТВЭЛов с капиллярной структурой на поверхности, образующую зону испарения, и зону конденсации, сформированную из сборки ЭГК, внешняя поверхность которых также покрыта капиллярной структурой. Капиллярные структуры ТВЭЛов и ЭГК соединены между собой капиллярной структурой для возврата конденсата ЖМТ. ТВЭЛы крепятся на одном торце корпуса, ЭГК – на другом, что обеспечивает доступ к ним для отвода ГПД (от ТВЭЛов), а также подключение к цезиевой системе, соединение с токонесущими шинами и подвод (отвод) ЖМТ для охлаждения коллекторов (в ЭГК).

Технологические и технические особенности вариантов исполнения ТРП

Каждый из приведенных вариантов исполнения ТРП обладает как достоинствами, так и недостатками. Отметим основные из них по каждому из вариантов [11].

Для наглядности характеристики вариантов исполнения сведены в таблицу 2.15.

Для традиционного исполнения (рисунок 2.24, а).

Достоинства:

- технологическая отработанность конструкции, включая ЛКИ;
- минимальные габариты ТРП;
- максимальная локализация области высокой температуры (ограничена пределами оболочки ТВЭЛА);
- плотная активная зона (важно при рассмотрении аварий с затоплением ТРП);

- размещение электроизоляции в холодных зонах (вне активной зоны или на коллекторных электродах).

Недостатки:

- вследствие неравномерности тепловыделения по объему реактора невозможно обеспечить оптимальные параметры преобразования для всех ТЭП и, как следствие, КПД ЯЭУ, как правило, в два раза ниже максимального электродного;
- затрудненный отвод ГПД из ТВЭЛОв, результат – загрязнение цезиевой плазмы в МЭЗ ГПД, снижающее ресурс и эффективность ТЭП;
- ограничение ресурса вследствие распухания топлива и деформация оболочек ТВЭЛОв, являющихся по совместительству эмиттерами ТЭП, вплоть до перекрытия МЭЗ;
- ЭГК включает в себя ТВЭЛы и ТЭП, т. е. содержит делящийся материал, что значительно усложняет его изготовление;
- охлаждение активной зоны производится конвекцией ЖМТ, что ужесточает требования как к чистоте теплоносителя, так и к выбору конструкционных материалов.

Оставшиеся три варианта конструктивного исполнения разрабатывались для устранения отмеченных недостатков, при этом неизбежно появлялись новые, свойственные именно данной конструкции.

Таблица 2.15 – Сравнение характеристик ТРП [11]

Тип РП	Традиционный	Теплотрубный (ТВЭЛы и ТТ в матрице)	Теплотрубный (ТВЭЛы внутри ТТ)	Паровая камера
Габариты	Минимальные	Максимальные	максимальные	Средние
Масса	Средняя	Максимальная	Средняя	Минимальная
Количество конструкционного материала в а.з.	Максимальное	Среднее	Среднее	Минимальное
Плотность а.з. по топливу	Средняя	Средняя	Средняя	Максимальная
Загрузка по U-235 и обогащение	Максимальные	Средние	Средние	Минимальные
Ресурс по топливу	Уменьшенный	Уменьшенный	Средний	Максимальный
Локализация зоны высокой температуры	Максимальная	Средняя	Средняя	Минимальная
Выравнивание температуры и плотности теплового потока в ТЭП	Отсутствует	По высоте	По высоте	По высоте и радиусу
Отвод ГПД	Затруднен	Доступен	Доступен	Доступен
Технология изготовления	Освоена	Нуждается в доработке	Нуждается в доработке	Нуждается в доработке

Теплотрубная конструкция с раздельным размещением ТТ и ТВЭЛОв в высокотеплопроводной матрице (рисунок 2.24, б) обладает теми же достоинствами, что и традиционный вариант. Дополнительное преимущество – продолжение работы при прекращении охлаждения коллекторов одного из ЭГК. Недостаток – корпуса всех ЭГК заземлены на матрицу, что значительно увеличивает требования к устойчивости высокотемпературной изоляции корпуса ЭГК к пробою.

Теплотрубная конструкция ТРП с размещением ТТ в полости ТВЭЛОв (рисунок 2.24, в) позволяет устранить неравномерность тепловыделения по высоте и полностью выровнять плотность теплового потока на эмиттерах преобразователя изменением длины ТЭП в зависимости от расстояния до центральной оси. Недостаток конструкции – «рыхлая» активная зона и наличие высокотемпературной электрической изоляции между корпусом ТТ и эмиттерами, высокая температура теплоносителя ТТ и, следовательно, повышенные требования к материалам оболочки ТВЭЛОв и корпуса ТТ.

Конструкция ТРП с теплопередачей тепла от ТВЭЛОв к ЭГК по принципу паровой камеры (рисунок 2.24, г), разработанная в рамках предлагаемой концепции, обеспечивает максимальные преимущества по отношению к остальным вариантам исполнения:

- возможность раздельной отработки узлов ТВЭЛОв и ЭГК;
- возможность изготовления ЭГК без делящихся материалов;
- упрощенное изготовление ТВЭЛОв;
- трансформация плотности теплового потока при передаче тепла от ТВЭЛОв к ЭГК (независимо от распределения плотности теплового потока по поверхностям ТВЭЛОв по объему активной зоны обеспечивается постоянная плотность теплового потока на поверхности всех ЭГК; величина плотности теплового потока определяется интегральными характеристиками – тепловой мощностью реактора и суммарной обогреваемой поверхностью ЭГК);
- возможность оптимизации ЭГК по плотности теплового потока при заданной температуре;
- простое решение проблемы отвода ГПД (предполагается использование одноэлементных ТВЭЛОв с отводом газообразных продуктов деления через элементы крепления ТВЭЛОв);
- возможность использования в конструкции ТВЭЛОв и ЭГК тугоплавких сплавов, освоенных промышленностью;
- возможность изготовления по технологии, освоенной промышленностью;
- снижение доли конструкционных материалов в активной зоне;
- увеличение рабочего ресурса;
- увеличение надежности вследствие использования параллельных схем включения ТВЭЛОв для генерации пара рабочего тела и его конденсации в ЭГК.

Основные недостатки – те же, что и у теплотрубных вариантов плюс низкая локализация высокотемпературной области – зона высокой температуры занимает всё внутрикорпусное пространство и сам корпус реактора.

Конструктивные формы реактора-преобразователя

В рамках рассматриваемой концепции была выполнена разработка конструкции ТРП и получены расчетные оценки [11]. Конструкция ТРП показана на рисунках 2.25 и 2.26. ТРП содержит два функциональных блока – собственно реактор и термоэмиссионный преобразователь, разделенные капиллярно-пористой проставкой и размещенные в общем герметичном корпусе.

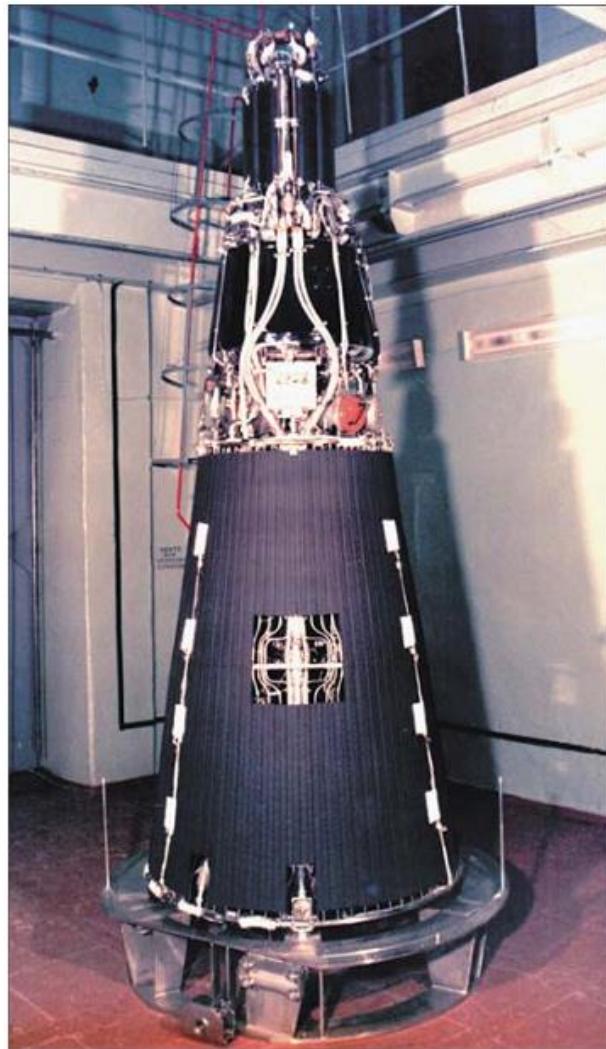


Рисунок 2.25 – Космическая ядерная энергоустановка «ЕНИСЕЙ»

Активная зона реактора набрана из 186-ти ТВЭЛов, расположенных в правильной шестигранной решетке. В центре активной зоны находится стержень безопасности. ТВЭЛ включает в себя топливо из высокообогащенного диоксида урана, торцевого отражателя из бериллия и корпуса из молибдена, на внутреннюю поверхность которого нанесен тонкий слой выгорающего поглотителя – окиси гадолиния Gd_2O_3 .

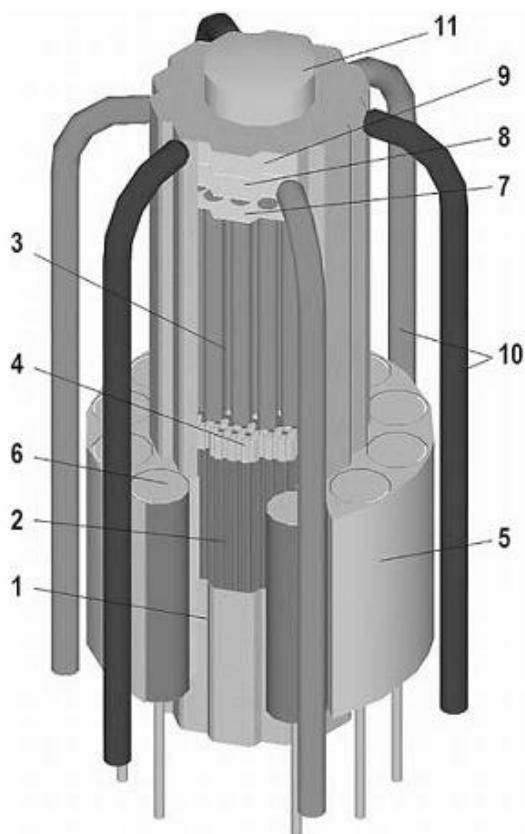


Рисунок 2.26 – Общий вид ТРП: 1 – герметичный корпус; 2 – ТВЭЛы активной зоны; 3 – термоэмиссионные генераторы; 4 – капиллярно-пористая проставка; 5 – отражатель; 6 – поворотные барабаны СУЗ; 7 – коммутационная камера; 8 – сливной коллектор; 9 – напорный коллектор; 10 – трубопроводы системы охлаждения; 11 – цезиевая система

Между топливом и торцевым отражателем расположена проставка из молибдена. На внешней поверхности корпуса ТВЭЛа сформирована капиллярно-пористая структура, заполненная ЖМТ – литием. Свободное пространство активной зоны в рабочем состоянии реактора заполнено парами лития.

Активная зона заключена в корпус из молибдена, на внешней стороне которого нанесен тонкий слой выгорающего поглотителя. Корпус отделен от отражателя пространством толщиной 2 мм, в котором располагается термовакуумная теплоизоляция.

Отражатель из бериллия толщиной 14 см включает в себя 12 поворотных органов регулирования мощности реактора с серповидными вставками из поглощающего материала – карбида бора B_4C .

Блок термоэмиссионных преобразователей набран из 36-ти цилиндрических электрогенерирующих каналов, расположенных в правильной шестигранной решетке. На внешней поверхности электрогенерирующих каналов сформирована капиллярно-пористая структура, заполненная ЖМТ.

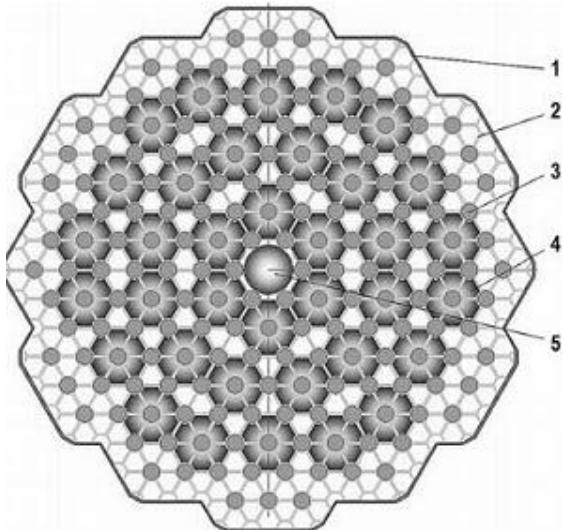


Рисунок 2.27 – Вид на капиллярно-пористую проставку со стороны активной зоны: 1 – корпус реактора; 2 – капиллярно-пористая проставка; 3 – ТВЭЛ; 4 – модуль термоэмиссионного генератора; 5 – стержень АЗ

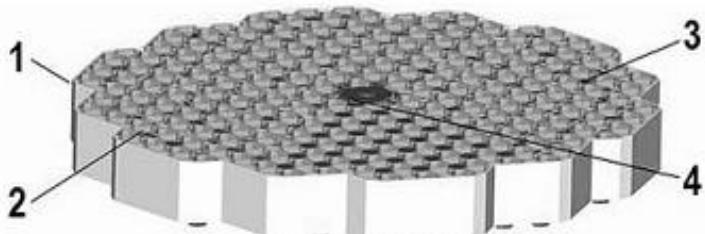


Рисунок 2.28 – Сечение капиллярно-пористой проставки по хвостовикам ТВЭЛОв: 1 – корпус реактора; 2 – капиллярно-пористая проставка; 3 – ТВЭЛ; 4 – стержень АЗ

Капиллярно-пористая проставка выполнена из металловолокнистого материала (спеченный «войлок» из молибденовых волокон) в виде сотовой структуры с гнездами для плотной посадки хвостовиков ТВЭЛОв и электрогенерирующих каналов. Вид на капиллярно-пористую проставку со стороны активной зоны представлен на рисунке 2.27, а ее сечение по хвостовикам ТВЭЛОв – на рисунке 2.28. Назначение капиллярно-пористой проставки – транспорт ЖМТ в конденсированном виде с поверхности электрогенерирующих каналов на поверхность ТВЭЛОв под действием капиллярных сил. Для пропуска газообразного ЖМТ через капиллярно-пористую проставку в её теле выполнены треугольные каналы.

Кроме того, с целью улучшения теплогидравлических характеристик электрогенерирующие каналы сгруппированы по центру корпуса, что открывает кольцевое пространство между пакетом электрогенерирующих каналов и корпусом для пропуска пара теплоносителя в районе капиллярно-пористой проставки.

Основные теплогидравлические характеристики ТРП указаны в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Основные теплогидравлические характеристики ТРП [11]

Параметр	Величина
Мощность реактора тепловая, кВт	1000
Мощность реактора электрическая, кВт	150
Температура пара лития максимальная, К	1800
Число ТВЭЛОв, шт.	186
Число ЭГК, шт.	36
Мощность ТВЭЛОв, кВт	8,06
Мощность ЭГК тепловая/электрическая, кВт	28/4,2
Число паровых каналов в а.з.	420
Число паровых каналов в блоке ЭГК	168
Энергонапряженность паровых каналов ТВЭЛОв, кВт/см ²	2,10
Энергонапряженность паровых каналов ЭГК, кВт/см ²	5,25

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 2

1. На чем основана работа ТЭП?
2. Чем характеризуется термоэлектронная эмиссия?
3. Что определяет формула Ричардсона–Дэшмана?
4. В каком диапазоне для большинства металлов лежат значения истинной работы выхода?
5. В чем заключается принцип работы термоэмиссионных преобразователей?
6. Какой диод называется идеальным?
7. Опишите различные участки ВАХ идеального диода.
8. Чему равен коэффициент полезного действия диода?
9. Что называют степенью черноты и эффективной степенью черноты?
10. Опишите два способа введения положительных ионов в ТЭП.
11. Что называют коэффициентом поверхностной ионизации?
12. Что такое степень ионизации?
13. Что такое чистый эмиттер?
14. Что позволяет использование явления адсорбции в ТЭП?
15. Какой газ используется для адсорбции и почему?
16. На какие типы делятся ТЭП по типу источника тепловой энергии?
17. Приведите классификацию режимов работы ТЭП.
18. Из чего состоят эмиттерный и коллекторный узлы ТЭП?
19. В чем состоит основная цель термоэмиссионных преобразований энергии?
20. Какие важнейшие проблемы при разработке реального ТЭП?
21. Какие требования к материалам ТЭП?
22. Какие показатели определяются при расчете термоэмиссионного преобразователя?
23. Какие есть методы борьбы с пространственным зарядом?
Перечислите ЭУ малой мощности с ТЭП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К РАЗДЕЛУ 2

1. Владимиров, Г. Г. Физическая электроника. Часть I. Термоэлектронная эмиссия: учебно-методическое пособие / Г. Г. Владимиров. – СПб: СПбГУ. – 2007. – 187 с.
2. Разор, Н. С. Термоэмиссионный преобразователь с парами цезия. I. Ограничения, накладываемые процессом эмиссии / Н. С. Разор // Термоэмиссионное преобразование энергии: пер. с англ. / под ред. В. Н. Артамкина и Б. А. Ушакова. – Москва: Атомиздат, 1965. – Т. 2. – С.167.
3. Грязнов, Г. М. ТОПАЗ-1 — советская космическая ЯЭУ / Г. М. Грязнов, В. Я. Пупко // Природа. – 1991. – № 10. – С. 29–36.
4. Кухаркин, Н. Е. Энергоресурсные характеристики одноэлементных ЭГК, прошедшие ядерно-энергетические испытания в составе реакторных блоков установки Топаз-2 / Н. Е. Кухаркин, Ю. А. Нечаев, В. Н. Самоделов, И. М. Хазанович // Ядерная энергетика в космосе: сб. докл. V Междунар. конф. – Подольск, 1999.
5. Забудько, А. Н. Концептуальная разработка космической ядерной энергетической установки с реактором типа SAFE300 и термоэлектрическими преобразователями энергии / А. Н. Забудько, В. И. Ярыгин, М. К. Овчаренко // Труды Международного конгресса по усовершенствованным ядерным энергетическим установкам (ICAPP'03). – Кордова, Испания, 2003. – С. 314.
6. Зродников, А. В. Низкотемпературная термоэмиссия в космических ядерных энергетических установках с быстрым реактором типа SAFE / А. В. Зродников, В. И. Ярыгин, Г. Э. Лазаренко, А. Н. Забудько, М. К. Овчаренко, А. П. Пышко, В. С. Миронов, Р. В. Кузнецов // Труды Международного конгресса по усовершенствованным ядерным энергетическим установкам (ICAPP 2007). – Сан-Диего, Калифорния, США, 2007. – С. 89.
7. Овчаренко, М. К. Концепция долгоресурсной ЯЭУ «Эльбрус-400/200» с эффективными низкотемпературными термоэмиссионными преобразователями, вынесенными из активной зоны / М. К. Овчаренко, А. Н. Забудько, В. И. Ионкин, Г. Э. Лазаренко, А. С. Михеев, А. П. Пышко, В. И. Ярыгин // Ядерная энергетика в космосе–2005: труды Междунар. конф. – Москва; Подольск, 2005. – Т. 1. – С. 144–149.
8. Овчаренко М. К. Концепция космической ЯЭУ с внешним расположением топлива / М. К. Овчаренко, А. К. Альмамбетов, Е. Г. Виноградов [и др.] // Ядерная энергетика в космосе 2005: труды Междунар. конф. – Москва; Подольск, 2005. – Т. 1. – С. 240–246.
9. Fiebelmann Peter. Nuclear Reactor, Патент Великобритании. – № 1149946, 1966.
10. Алексеев П. А., Лазаренко Г. Э., Линник В. А., Пышко А. П. Реактор-преобразователь. Патент РФ. – № 2724919, 2021.
11. Алексеев, П. А. Концепция термоэмиссионного реактора-преобразователя с испарительным переносом тепла / П. А. Алексеев, Г. Э.

Лазаренко, В. А. Линник, А. П. Пышко // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 118–129.

12. Ушаков, Б. А. Основы термоэмиссионного преобразования энергии / Б. А. Ушаков, В. Д. Никитин, И. Я. Емельянов. – Москва: Атомиздат, 1974. – 288 с.
13. Стаханов, И. П. Физика термоэмиссионного преобразователя / И. П. Стаханов, В. Е. Черковец. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
14. Злобин, В. Г. Энергетические установки автономных источников энергии. Атомные электростанции и термоядерные установки. Часть 1. Термоядерные установки: учебное пособие / В. Г. Злобин. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – 97 с.
15. Злобин, В. Г. Энергетические установки автономных источников энергии. Атомные электростанции и термоядерные установки. Часть 2. Атомные электростанции: учебное пособие / В. Г. Злобин. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. – 183 с.
16. Синявский, В. В. Проектные исследования термоэмиссионных ядерно-энергетических установок, созданных по литий-ниобиевой технологии, электрической мощностью 5–10 МВт / В. В. Синявский // Космическая техника и технологии. — 2016. — № 4(15). — С. 31–42.
17. Кайбышев, В. З. Термоэмиссия в космических ядерных энергоустановках / В. З. Кайбышев // Энергия: экономика, техника, экология. – 2018. – № 4. – С. 13–21.

РАЗДЕЛ 3. ОСМОТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Здесь речь пойдет о привычном явлении, с которым мы в течение всей жизни сосуществуем рядом. Многие ли знают, за счет каких процессов соки в деревьях поднимаются на значительную высоту? Для секвойи она составляет более 100 м. Происходит эта транспортировка соков в зону фотосинтеза за счет работы физического эффекта – *осмоса*. Заключается он в простом явлении: в двух растворах разной концентрации, помещенных в сосуд с полупроницаемой (проницаемой только для молекул растворителя) мембраной, спустя некоторое время появляется разность уровней. В дословном переводе с греческого языка *осмос* – это *толчок, давление*.

А теперь от живой природы вернемся к технике. Если в сосуд с перегородкой поместить морскую и пресную воду, то за счет разной концентрации растворенных солей появляется *осмотическое давление* и уровень морской воды поднимется. Молекулы воды перемещаются из зоны высокой их концентрации в зону раствора, где примесей больше, а молекул воды меньше.

Перепад в уровнях воды дальше используется обычным образом: это знакомая работа гидроэлектростанций. Вопрос только состоит в том, *насколько эффект осмоса пригоден для промышленного применения?* Расчеты показывают, что при солености морской воды 35 г/литр за счет явления осмоса создается перепад давления 2 389 464 Паскаля или около 24 атмосфер. На практике это эквивалентно плотине высотой 240 метров.

Но кроме давления еще очень важной характеристикой является селективность мембран и их проницаемость. Ведь турбины вырабатывают энергию не от перепада давления, а благодаря расходу воды. Вот здесь, до недавнего времени, существовали очень серьезные трудности. Подходящая осмотическая мембрана должна выдерживать давление, превышающее в 20 раз давление в привычном водопроводе. При этом иметь высокую пористость, но задерживать молекулы солей. Сочетание противоречивых требований долго не позволяло использовать осмос в промышленных целях.

При решении задач орошения воды была изобретена *мембрана Лоэба*, которая выдерживала колоссальное давление и задерживала минеральные соли и частицы до 5 микрон. Применить мембранны *Лоэба* для прямого осмоса (выработка электроэнергии) долго не удавалось, т. к. они были чрезвычайно дороги, капризны в эксплуатации и обладали низкой проницаемостью.

Прорыв в использовании осмотических мембран наступил в конце 80-х годов, когда норвежские ученые *Торлейф Хольт* и *Тор Торсен* предложили использовать *модифицированную полиэтиленовую пленку на керамической основе*. Совершенствование структуры дешевого полиэтилена позволило создать конструкцию спиральных мембран, пригодных для использования в производстве осмотической энергии. Для проверки технологии получения энергии от эффекта осмоса в 2009 году была построена и запущена первая в мире экспериментальная осмотическая электростанция.

Цель постройки станции: отработка технологии и испытание в реальных условиях материалов для мембран, что открывает путь к созданию значительно более мощных сооружений.

Коммерческая привлекательность станций начинается с эффективности съема мощности более 5 Вт с квадратного метра мембран. На норвежской станции в *Тофте* это значение едва превышает 1 Вт/м². Но уже сегодня испытываются мембранные с эффективностью 2,4 Вт/м², а далее ожидается достижение рентабельного значения 5 Вт/м².

3.1. Физико-химические процессы на осмотической станции

Сложные химические системы могут быть получены из чистых химических веществ в результате дробления и перемешивания исходных фаз (диспергирования). Но даже при отсутствии целенаправленного диспергирования, при возникновении контакта веществ друг с другом неизбежно протекают процессы их смешения, приводящие к образованию дисперсных систем. Это – принципиальное следствие *Второго Начала термодинамики*, поскольку общая энтропия при смешении растет.

Дисперсные системы – это системы, состоящие из сплошной среды (называемой дисперсионной средой) с распределенным в ней веществом (дисперсной фазой), которое состоит из отдельных частиц с большой удельной поверхностью.

В случае, когда распределенная фаза диспергирована до молекулярно-ионного состояния, дисперсная система становится *истинным раствором*.

Растворы – это гомогенные системы переменного состава, образованные не менее чем двумя компонентами.

В случае истинных растворов дисперсионная среда называется *растворителем*, а доведенная до предельной степени дробления дисперсная фаза называется *растворенным веществом*.

Учитывая важнейшее практическое значение жидких растворов, рассмотрим их более подробно.

Растворителем в них является тот компонент, который находится в жидкой фазе и, как правило, превалирует количественно. (Но есть и исключения – например, в 100 граммах воды при 10°C может раствориться 150 граммов аммиачной селитры).

Процесс растворения твердого тела в жидкости является результатом явления *сольватации* – взаимодействия молекул растворителя с частицами растворяемого вещества. В результате этого взаимодействия возникают *сольваты* – образования молекулярных размеров, представляющие собой ассоциаты частиц растворяемого вещества (*A*) с молекулами растворителя (*R*):

$$n \cdot R + A = A \cdot n \cdot R. \quad (3.1)$$

В случае, когда растворителем является вода, процесс называется *гидратацией*, а ассоциаты – *гидратами*.

Процесс сольватации может приводить к распаду молекул растворяемого вещества на заряженные частицы. В таких случаях говорят, что происходит электролитическая диссоциация – распад растворенного вещества на ионы. Полученный раствор называется электролитом.

Классификация растворов. По количеству компонентов растворы бывают *бинарными и многокомпонентными*.

Состав раствора количественно характеризуется множеством показателей. Вот некоторые из наиболее важных:

A. Концентрации (размерные величины):

1. *Молярная концентрация (молярность)* – количество молей растворенного вещества в литре раствора, [моль/л];

2. *Массовая концентрация* – масса растворенного вещества в литре раствора, [г/л];

3. *Молярная концентрация (моляльность)* – количество молей растворенного вещества в 1000 граммах растворителя, [моль/1000 г р-рителя]

4. *Нормальная концентрация (нормальность)* – количество молей химического эквивалента растворенного вещества в литре раствора, [моль-экв/л];

B. Доли (безразмерные величины):

1. *Мольная доля* – отношение числа молей растворенного компонента к общему числу молей раствора.

2. *Массовая доля* – отношение массы растворенного компонента к общей массе раствора.

3. *Объемная доля* (для смесей газов и растворов жидкость-жидкость) – отношение объема растворенного компонента к сумме объемов растворителя и растворенного вещества до начала процесса растворения.

Доли могут быть выражены и в процентах.

Важной характеристикой раствора является предельное количество растворяющегося в нем вещества. Эта характеристика называется *растворимостью* данного вещества в данном растворителе.

Эта величина измеряется в граммах растворенного вещества на 100 г растворителя. Она изменяется в очень широких пределах. Например, растворимость ртути в воде ничтожна – $5 \cdot 10^{-8}$ г/100г H_2O , а растворимость иодида цинка – ZnI_2 – даже при 0 °C составляет 430 г/100г H_2O , т. е. масса растворенного вещества более чем вчетверо превышает массу растворителя!).

Чем более похожи по характеру и энергетике химических связей растворитель и растворяемое вещество, тем растворимость, как правило, больше. Это утверждение обобщается правилом, известным ещё с «алхимических времен» – «подобное растворяется в подобном».

Если содержание растворенного вещества в растворе меньше растворимости, то раствор называется *ненасыщенным*, если равно – *насыщенным*, а если больше, то – *пересыщенным*.

Последний тип растворов является термодинамически неустойчивым и, как правило, из него легко выделяется в осадок излишek растворенного вещества. Но из этого правила есть и исключения – например, сахарный сироп.

Энергетика образования растворов. С точки зрения термодинамики, образование раствора является самопроизвольным процессом, неизбежно протекающим при контакте фаз. Энергетической характеристикой процесса растворения является изменение энергии *Гиббса* в ходе этого процесса:

$$\Delta G_s = \Delta H_s - T\Delta S_s, \quad (3.2)$$

где индекс *s* свидетельствует о том, что рассматривается процесс растворения (*solution*).

Энталпия растворения ΔH_s может быть как положительной, так и отрицательной. Это связано с тем, что при растворении происходят два процесса – эндотермический процесс разрушения связей в растворяющем веществе и экзотермический процесс образования сольватов.

И на практике мы встречаемся и со случаями, когда при растворении выделяется много тепла (например, при растворении серной кислоты в воде), и когда много тепла поглощается (например, при растворении роданида аммония NH_4CNS).

Что же касается ΔS_s , то изменение энтропии при образовании 1 моля идеального раствора данного состава определяется из соотношения:

$$\Delta S_s = - \sum_{k=1}^{k=n} R X_k \ln X_k, \quad (3.3)$$

где X_k – мольная доля k компонента в растворе.

Поскольку при начале процесса растворения компонента k $X_k = 0$, то в первый момент ΔS_s очень велико (много больше нуля).

При этом $\Delta G_s < 0$ при любом значении ΔH_s .

Отсюда следует важный вывод – абсолютно нерастворимых веществ нет.

Однако на практике мы встречаемся с системами, в которых процесс растворения завершается (т. е. приходит к равновесию) и ΔG_s становится равной нулю при очень низких концентрациях (например, ртуть в воде, бензол в воде).

Важно также понимать, что ΔH_s не является величиной постоянной для системы «растворитель – раствор», а зависит от текущей концентрации раствора и количества добавляемого в систему растворяемого компонента.

Понятие об идеальных растворах. Во многих практических случаях в качестве термодинамической модели можно использовать представление об идеальном растворе. *Идеальный раствор* – это раствор, при образовании которого не изменяется внутренняя энергия системы (ΔU_s),

растворение не сопровождается тепловым эффектом ($\Delta H_s = 0$) и остается постоянным объём системы ($\Delta V_s = 0$).

Эта модель является полной аналогией модели идеального газа. И, также, как модель идеального газа, хорошо описывает газы при не очень высоких давлениях, она хорошо описывает свойства не очень концентрированных растворов твердых и жидкких веществ.

Для газов, объем которых при переходе в раствор значительно уменьшается (имеется в виду объем чистого газа и объем раствора, содержащего то же количество компонента), зависимость растворимости от давления характеризуется законом Генри:

$$P_k = K_k X_k, \quad (3.4)$$

где P_k – парциальное давление k -го газообразного компонента, находящегося над раствором, K_k – константа Генри для этого компонента.

Влияние температуры на процесс растворения имеет сложный характер и зависит от знака теплового эффекта процесса растворения. Для экзотермического процесса растворения газов (в этом случае не нужно разрушать кристаллическую решетку и определяющий вклад в энталпию растворения вносят процессы сольватации) с ростом температуры по принципу *Ле-Шателье* растворимость уменьшается. Для твердых тел возможно как увеличение, так и уменьшение растворимости с ростом температуры.

Закон Рауля для неэлектролитов. У идеальных растворов (как и у идеальных газов) некоторые свойства не зависят от природы растворенного вещества. Такие свойства получили название *коллигативных* (общих) свойств растворов.

Одним из важнейших коллигативных свойств идеальных растворов является давление насыщенного пара растворителя над раствором. Вследствие того, что при растворении нелетучего компонента в поверхностном слое жидкости концентрация молекул растворителя уменьшается, уменьшается и давление её пара P по сравнению с давлением насыщенного пара над чистым растворителем P_0 .

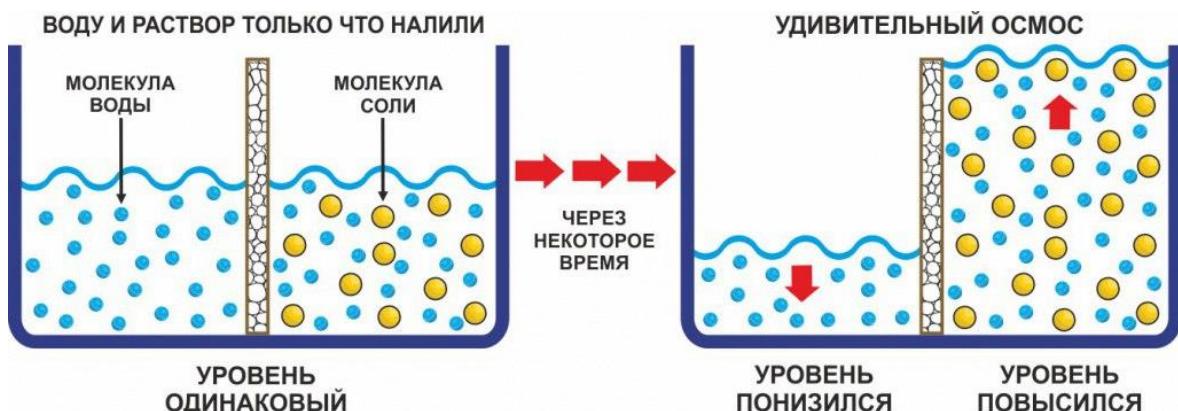


Рисунок 3.1 – К вопросу о коллигативных (общих) свойствах растворов

Количественно это выражается Законом Рауля:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = X_k, \quad (3.5)$$

где $\Delta P = P_0 - P$, а X_k – мольная доля растворенного вещества.

Закон Рауля гласит: *отношение понижения давления пара растворителя над раствором нелетучего вещества к давлению пара чистого растворителя равно мольной доле растворенного вещества.*

Проанализируем следствия из закона Рауля, определяющие изменение свойств растворов нелетучих компонентов по сравнению со свойствами чистого растворителя.

Вот как отразится закон Рауля на фазовой диаграмме самого распространенного растворителя – воды:

A. Фазовая диаграмма чистой воды.

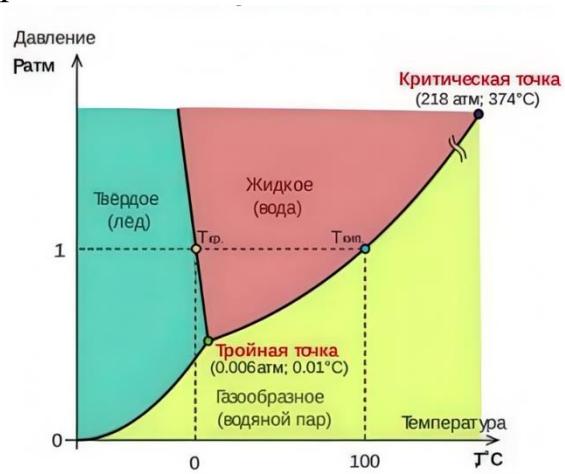


Рисунок 3.2 – Фазовая диаграмма чистой воды

Б. Изменение фазовой диаграммы воды при растворении в ней нелетучего компонента.

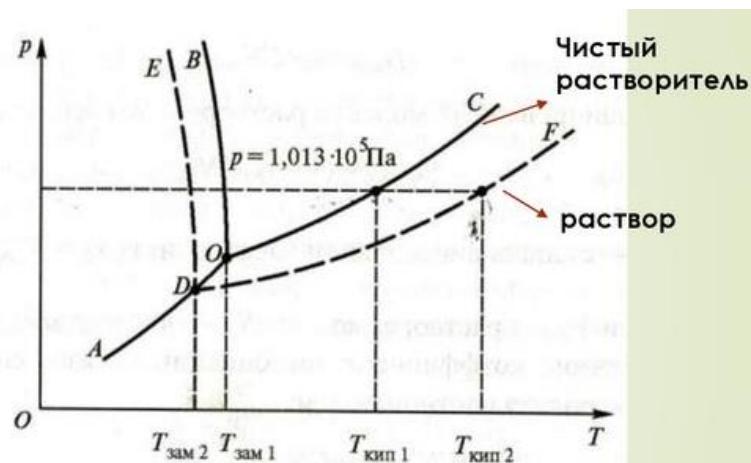


Рисунок 3.3 – Фазовая диаграмма чистого растворителя (сплошная линия) и раствора (пунктирная линия):

Примечание: AO – линия равновесия меди чистым твердым растворителем и его паром; OC – линия равновесия между чистым жидким растворителем; DF – зависимость давления насыщенного пара над раствором нелетучего вещества от температуры; DE – линия равновесия между чистым твердым растворителем и раствором данного состава; O – тройная точка (равновесие между твердым, жидким и парообразным растворителем); $T_{\text{кип}1}$ – температура кипения чистого растворителя при атмосферном давлении; $T_{\text{кип}2}$ – температура кипения раствора данного состава; $T_{\text{зам}1}$ – температура замерзания чистого растворителя; $T_{\text{зам}2}$ – температура замерзания раствора данного состава

Следствиями Закона Рауля являются повышение температуры кипения раствора по сравнению с температурой кипения чистого растворителя ($\Delta T_{\text{кип.}} = T_{\text{кип}2} - T_{\text{кип}1}$) и понижение температуры кристаллизации растворителя из раствора по сравнению с температурой кристаллизации чистого растворителя ($\Delta T_{\text{крист.}} = T_{\text{зам}2} - T_{\text{зам}1}$).

Количественно эти следствия описываются так:

$$\Delta T_{\text{кип.}} = E_{\text{кип}} C_m; \quad (3.6)$$

$$\Delta T_{\text{крист.}} = K_{\text{зам}} C_m, \quad (3.7)$$

где $E_{\text{кип}}$ – эбулиоскопическая постоянная растворителя (для воды – $E_{\text{кип}} = 0,584$, а для этилбромида – 6,43!); $K_{\text{зам}}$ – криоскопическая постоянная растворителя (для воды – $K_{\text{зам}} = 1,85$, а для камфоры – 40!); C_m – молярная концентрация раствора.

Подчеркнем, что эти соотношения правильно описывают явления только для растворов, не проводящих электрический ток, т. е. для растворов неэлектролитов.

Понятие об осмосе. Еще одно проявление коллигативных свойств растворов – явление осмоса. *Оsmos* – это диффузия растворителя через полупроницаемую мембрану, разделяющую два раствора различной концентрации, из менее концентрированного в более концентрированный.

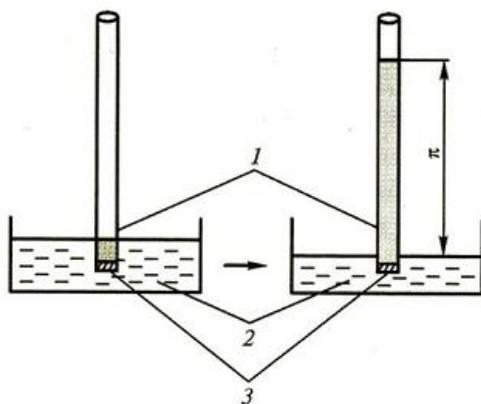


Рисунок 3.4 – Схема осмоса: 1 – раствор; 2 – растворитель; 3 – полупроницаемая мембрана

Причина осмоса состоит во Втором законе термодинамики. Энтропия чистого растворителя S_{s0} , а растворителя в растворе $S_{ss} = S_{s0} - R \cdot \ln X_s$.

Энтропия в растворе больше. Вот почему Второй закон «гонит» растворитель из области меньшей концентрации раствора (там больше растворителя!) в область большей концентрации. При этом в области большей концентрации возникает *осмотическое давление* π , кПа, равное, по уравнению *Вант-Гоффа*:

$$\pi = C_m \cdot R \cdot T, \quad (3.8)$$

где π равно избыточному внешнему давлению, которое следует приложить со стороны раствора, чтобы прекратить процесс, то есть создать условия осмотического равновесия; C_m – текущая молярная концентрация раствора, моль/л; R – универсальная газовая постоянная [8,31 Дж/(моль·К)]; T – температура, К. Это уравнение – полный аналог уравнения *Клапейрона-Менделеева* для идеальных газов.

Численное значение осмотического давления молярного раствора может достигать более 200 метров водяного столба. Также, как и в случае следствий из Закона Рауля, уравнение *Вант-Гоффа* в этой форме справедливо только для неэлектропроводных растворов.

Для растворов электролитов Закон *Вант-Гоффа* имеет вид:

$$\pi = i \cdot C_m \cdot R \cdot T, \text{ кПа} \quad (3.9)$$

где i – *изотонический коэффициент* (безразмерный параметр, характеризующий поведение вещества в растворе. Он численно равен отношению значения некоторого коллигативного свойства раствора данного вещества к значению того же коллигативного свойства неэлектролита той же концентрации при неизменных прочих параметрах системы).

Таким образом, если разделить соленую и пресную воду полупроницаемой мембраной, которая пропускает воду, но не пропускает соль, пресная вода будет проникать в более высокую по плотности соленую воду. Пресная речная вода стремится растворять соленую, океанскую. Возникающее при этом давление создает водный поток, который вращает лопасти турбины.

Например, Япония – островная страна, со всех сторон окруженная океаном, в который впадают ее многочисленные реки; они текут постоянно, делая процесс выработки электроэнергии непрерывным. Производство практически безвредно, а значит, электростанции можно строить прямо на окраинах городов. В отличие от других способов получать гидроэнергию, осмотический не нуждается в перепаде высот – такая станция может работать и на равнине.

Главное – географические условия, при которых происходит смешение пресной и соленой воды. Так как Япония окружена морем и покрыта горами, с

которых стекает множество рек, устанавливать осмотические электростанции можно во всех точках страны, где реки впадают в океан. Подобные станции могли бы вырабатывать от 5 до 6 миллионов кВт энергии. Как утверждает профессор Токийского технического университета Акихико Таниока [1], такой же объем энергии вырабатывают 5–6 атомных электростанций.

3.2. История применения осмоса в электроэнергетике

В отличие от традиционных источников электроэнергии альтернативные способы её получения пока распространены не так широко, но имеют преимущества в относительно меньшем экологическом ущербе и использовании возобновляемых источников.

Изучение альтернативных источников энергии, таких как, например, солнечная, волновая, геотермальная, ветровая и другие, является наиболее перспективным в настоящее время. По мере развития науки и техники появляются новые альтернативные источники. Одним из таких источников является прототип электростанции, работающей по принципу осмоса. Данный прототип заработал 24 ноября 2009 года к югу от столицы Норвегии г. Осло в г. *Тофте*.

Ещё во второй половине XX века появилась идея использовать осмос в качестве альтернативного источника энергии, но уровень развития технологий тогда не позволял создать мембранные – важнейшие элементы нового альтернативного источника – с достаточной пропускной способностью. Подсчитано, что для выгодного использования энергии осмоса требуется эффективность мембранные не ниже $5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [5]. В настоящее время анализируются способы повышения пропускной способности мембран, в том числе использование новых материалов. Прототип рядом со столицей Норвегии является первым в мире преобразователем солевой энергии в электрическую. Мощность этой электростанции – 5 кВт. Дальнейшее повышение мощности подобных электростанций возможно с помощью изменения материала мембран. На норвежской ОЭС использована спиральная мембра из модифицированной полиэтиленовой плёнки на керамической основе. Перспективными материалами для мембран являются углеродные нанотрубки и ещё более эффективные графеновые плёнки.

Оsmотическая электростанция (ОЭС) – это гидроэлектростанция, работающая по принципу диффузии пресной и соленой воды через полупроницаемую мембрану (проницаемую только для молекул растворителя), т. е. на эффекте осмоса (рисунок 3.5).

Осмос – это процесс одностороннего проникновения молекул растворителя (чистой воды в случае ОЭС) через полупроницаемую мембрану из раствора с меньшей концентрацией (пресной воды) в раствор с большей концентрацией (соленую воду).

Если в сосуд с полупроницаемой мембраной M (рисунок 3.6), которая пропускает только воду, поместить морскую и пресную воду, то за счет разной концентрации растворенных солей появляется осмотическое давление и уровень морской воды поднимется. Как известно, концентрация солей в морской воде больше, чем в пресной воде. Молекулы пресной воды стремятся туда, где концентрация соли больше, именно поэтому в части сосуда W_2 с морской водой объем жидкости увеличивается (рисунок 3.6). Мембрана задерживает соли. В отсеке с морской водой будет создаваться избыточное давление P , которое обусловлено непрерывным потоком через мембрану пресной воды в сторону солёной.

Перемещение молекул воды заканчивается, когда концентрация раствора в двух отсеках станет равной.

На схематичных чертежах осмотическую мембрану изображают в виде тонкой стенки. В действительности она представляет собой рулон, заключенный в цилиндрический корпус (рисунок 3.7). В его многослойной структуре чередуются слои пресной и соленой воды. На поперечном разрезе указаны потоки воды внутри осмотического цилиндра. Чем больше таких модулей установят на станции, тем выше станет пропускная способность системы, повысится избыточное давление, а, следовательно, и энергии она сможет вырабатывать также больше.

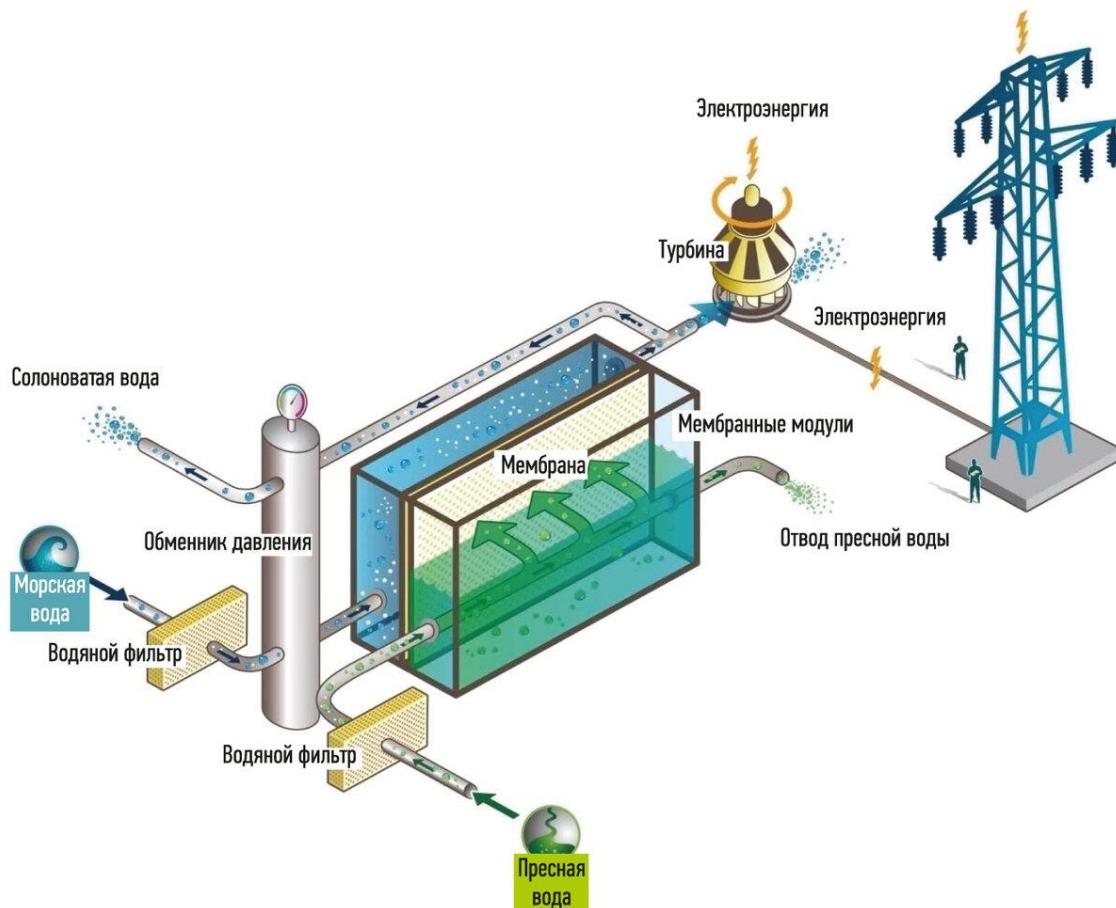


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема работы осмотической электростанции

Отводимая вода из резервуара с морской водой приводит в действие гидротурбину, вырабатывающую электрическую энергию. Сила давления зависит от площади мембраны. Расчеты показывают [4], что при концентрации солей в морской воде 35 г/литр за счет явления осмоса создается давление $2,4 \cdot 10^6$ Па или около 24 атм. На практике это эквивалентно плотине высотой 240 метров.

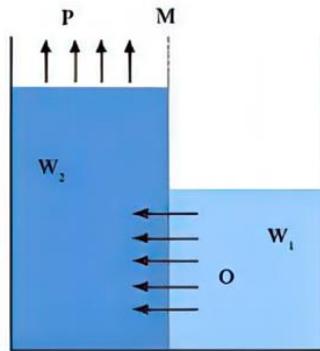
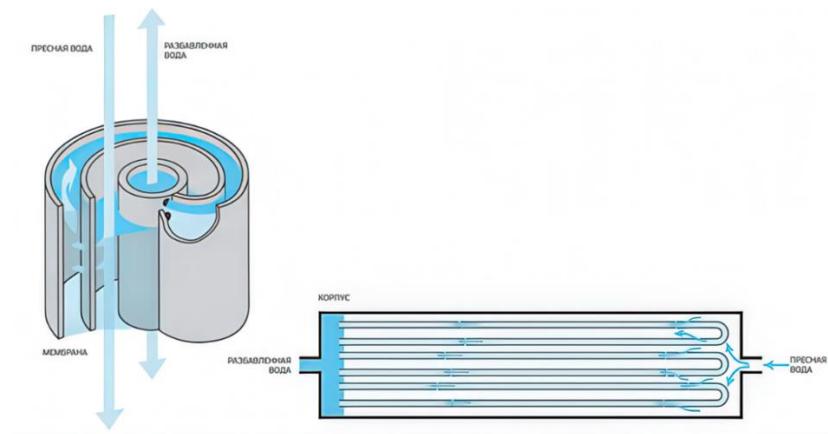


Рисунок 3.6 – Принцип создания избыточного давления в ОЭС



Осмотическая мембрана

СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

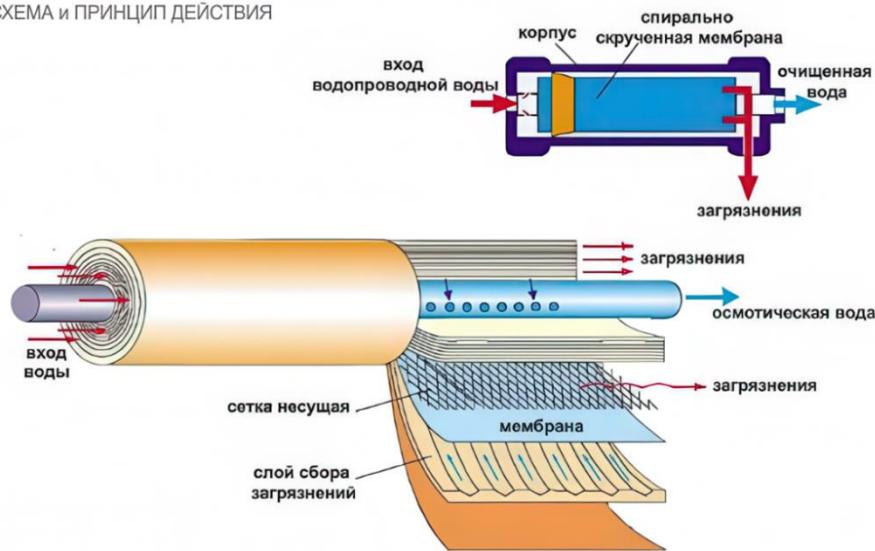


Рисунок 3.7 – Осмотическая мембрана: схема и принцип действия

3.3. Преимущества и недостатки осмотической электростанции

Важной характеристикой является селективность мембран и их проницаемость. Турины вырабатывают механическую энергию по большей части не от перепада давления, а именно благодаря расходу воды.

Подходящая осмотическая мембрана должна выдерживать большое давление, иметь высокую пористость, но при этом задерживать молекулы солей.

Прототип ОЭС принадлежит крупной энергетической норвежской компании *Statkraft*. Она получила государственный грант и, затратив более 20 млн долларов, стала новатором в созданном виде энергетики. Построенная осмотическая электростанция на текущий момент должна вырабатывать около 4÷5 кВт мощности [5].

Норвежская электростанция расположена у устья реки, впадающей в Северное море. Морскую и речную воду подают в осмотические цилиндры. В отсеке с солёной водой осмос создаёт давление, эквивалентное водяному столбу высотой 120 метров. Поток идёт на турбину, врачающую генератор.

Если вычесть ту энергию, что идёт на насосы, подающие пресную и морскую воду, то получается, что опытная станция создаёт очень мало энергии (в пределах 5 кВт). Планируется повысить мощность до 10 киловатт, а потом создать ещё одну опытную станцию, вырабатывающую до одного мегаватта энергии.

Самоокупаемость станции начинается с эффективности выработки более 5 Вт с квадратного метра полупроницаемых мембран [5].

На норвежской станции в г. Тофте (рисунок 3.8) это значение едва превышает 1 Вт/м².



Рисунок 3.8 – Норвежская ОЭС *Statkraft* в г. Тофте

Работая с материалами на основе углеродных нанотрубок, французские ученые из Национального центра научных исследований получили на образцах эффективность съема энергии осмоса около $4000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Это значение является рентабельным и превышает показатели многих традиционных источников энергии.

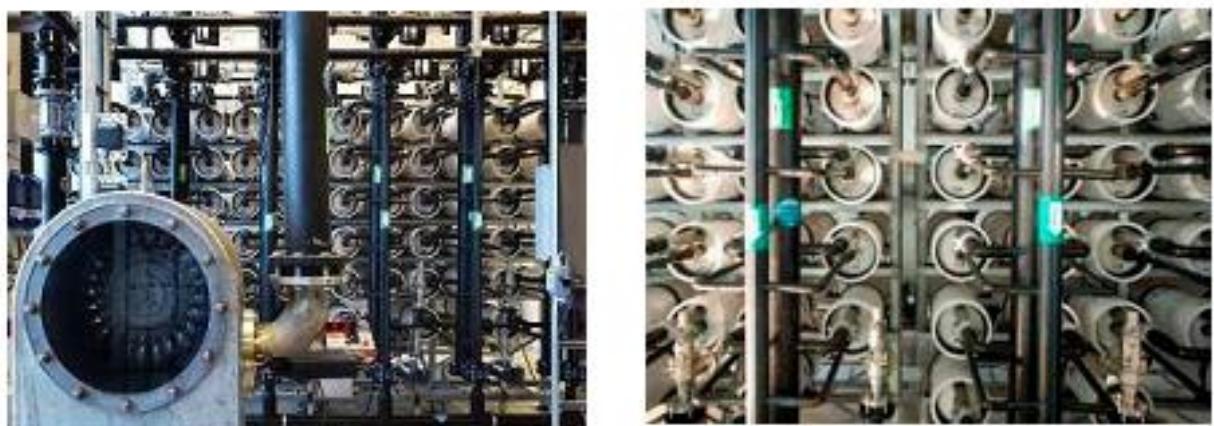


Рисунок 3.9 – Камера с мембранами в осмотической электростанции *Statkraft* в г. *Тофте* Норвегия

Как указывалось выше, большие перспективы обещает применение графеновых пленок.

Мембрана толщиной в один атомный слой становится полностью проницаема для молекул воды, задерживая при этом любые другие примеси. Эффективность такого материала может превышать 10 кВт/м² [5].

Если удастся в течение ближайшего десятилетия решить проблему мембран для осмотических станций, то новый источник энергии займет ведущее место в обеспечении человечества экологически чистыми энергоносителями. В отличие от энергии ветра и солнца, установки прямого осмоса могут работать круглые сутки и не зависят от погодных условий.

В дальнейшем процессе разработки данных электростанций предстоит решить массу проблем. Например, нужно будет найти способ уничтожения бактерий, загрязняющих фильтры. Даже несмотря на предварительную очистку пресной и морской воды, вредоносные микроорганизмы могут заселить все участки системы и тем самым нарушить её работу (рисунок 3.9).

По оценкам *Statkraft*, занимающейся разработкой и созданием установок, вырабатывающих возобновляемую энергию, общемировой годовой потенциал осмотической энергии составляет 1600–1700 ТВт·ч.

Эта мощность составляет 10 % всего мирового потребления энергии и 50 % энергопотребления Европы.

Ещё одним способом выработки электроэнергии на осмотической электростанции является использование только соленой (морской) воды.

Иными словами, при наличии высокоэффективных мембран можно использовать энергию глубин океана. Дело в том, что степень концентрации солей в воде зависит от глубины.

Осмотическая электростанция по эффективности находится ниже солнечных батарей, ветрогенераторов, биотопливных станций, но выше приливных гидроэлектростанций.

Преимущества осмотической электростанции следующие.

1. Игнорирование климатических условий – ветра и солнца. Это выгодно отличает осмотическую от солнечной, ветровой или приливной электростанций.

2. Не угрожает парниковыми газами, не создаёт выброса токсичных веществ, что позволяет устанавливать её даже в черте города без ущерба его жителям.

3. Ресурсы, затраченные на работу электростанции возобновляемы.

4. Дешёвое сырьё.

5. Производит постоянное предсказуемое количество энергии.

6. Станции не нужно строить на отдельных специальных площадках, так как они не создают вредные выбросы. К примеру, можно оборудовать неиспользуемые помещения существующих предприятий (например, первая станция в Норвегии расположена на пустующем складе деревоперерабатывающего завода).

Недостаток осмотической электростанции заключается в том, что её возможно использовать лишь на морских побережьях. Невозможность повсеместного её использования объясняется отсутствием одновременно в

одном месте и солёной и пресной воды, но этот недостаток можно не учитывать, если создать высокоэффективные мембранные, с помощью которых можно будет использовать градиент солености глубин океана.

К недостаткам, которые вызваны недоработкой проекта, относятся:

- 1) небольшая мощность установок (около 2–5 кВт);
- 2) потребность очистки мембран от забивающих микропоры органических остатков, несмотря на забор морской воды с глубины более 35 м;
- 3) сохранность безопасности флоры и фауны (например, сооружение рыбопропускных каналов).

Перспектива развития таких электростанций рассматривается, главным образом, в Японии и России.

В Японии налажено производство необходимого оборудования. Здесь осуществляется выпуск осмотических мембран до 70 % от мирового объёма [2]. Также важную роль играет географическое положение государства – острова со всех сторон омываются водами океана, в который впадает большое количество рек.

3.4. Перспективы использования ОЭС в России

Перспективы использования ОЭС в России обусловлены хорошо развитой речной сетью и водным побережьем, протяженностью почти 60 тыс. км. По подсчетам специалистов [3], при впадении Волги в Каспийское море можно получить в год около 15 млрд кВт·ч, Днепра в Черное море – 10 млрд кВт·ч, Амура в Татарский пролив – 12 млрд кВт·ч. В 1999 году был получен российский патент [7] на осмотическую силовую установку, напрямую преобразовывающую осмотическое давление в механическую работу, которая может быть использована для производства электрической энергии. Установка (рисунок 3.10) содержит корпус, разделенный полупроницаемой перегородкой 1 на пресный отсек 3, отдающий растворитель, и соленый отсек, принимающий растворитель. К данным отсекам трактами 7 и 5 подвода подключены соответственно источники раствора и растворителя, причем отсек раствора снабжен трактом 10 отвода отработанного раствора. Полупроницаемая перегородка выполнена в виде подвижного поршня, являющегося движущимся рабочим элементом силовой установки. Установка имеет простую конструкцию и позволяет осуществить прямое преобразование энергии осмоса.

Другой российский патент [8] содержит несколько вариантов производства электроэнергии посредством использования осмотического давления. Один из данных вариантов представлен на рисунок 3.11.

Группа изобретений, описываемых этим патентом, относится к области выработки электроэнергии по технологии ограниченного давлением осмоса в замкнутом контуре посредством последовательности с периодической загрузкой или посредством непрерывной последовательности с использованием двух секций. Одна из секций представляет собой вышедший из взаимодействия

боковой трубопровод, в котором происходит замена разбавленного концентрата с высокой минерализацией (морской воды) на свежий раствор.

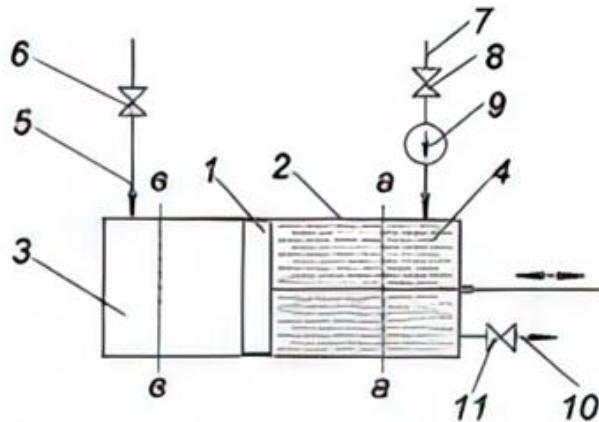


Рисунок 3.10 – Осмотическая силовая установка (патент RU 2176031 C2)

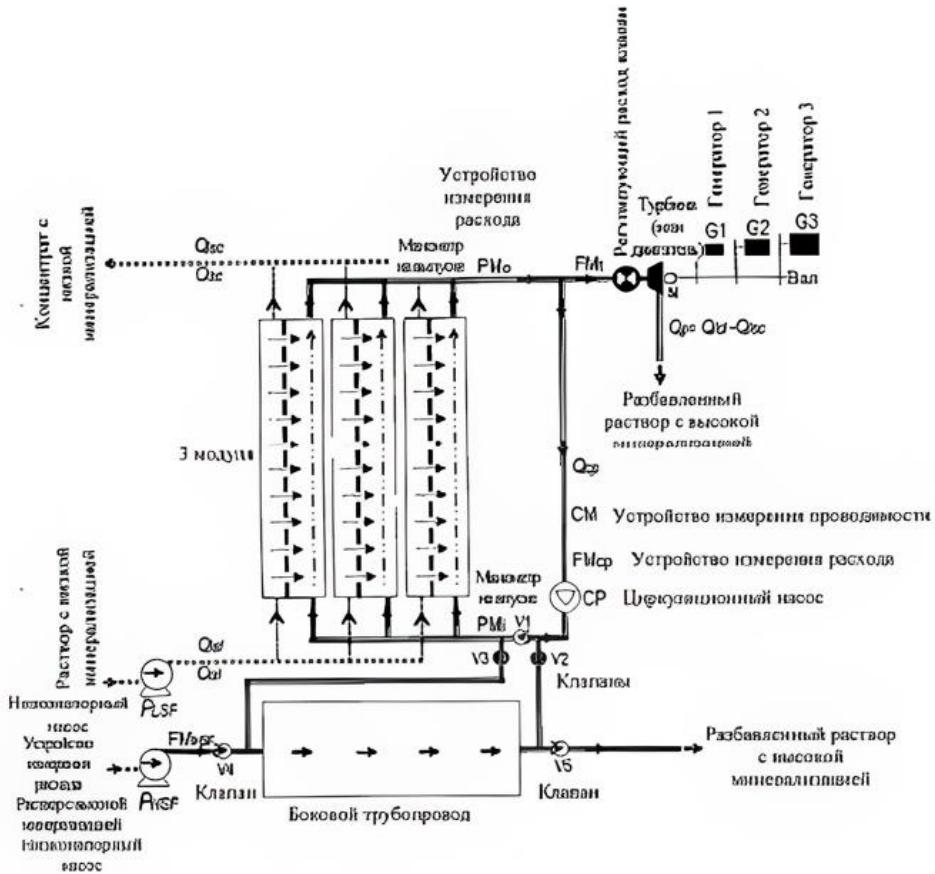


Рисунок 3.11 – Одна из схем выработки электрической энергии на осмотической станции (патент RU 2613768 C2)

Другая секция представляет собой устройство с замкнутым контуром с тремя соединенными параллельно модулями, куда непрерывно поступает раствор с низкой минерализацией (пресная вода) и где часть разбавленного концентрата с высокой минерализацией претерпевает рециркуляцию через модули.

Другая часть установки использована для выработки электроэнергии посредством турбины и трех электрогенераторов. Периодическое подключение бокового трубопровода с раствором с высокой минерализацией в замкнутый контур дают возможность замены сжатого разбавленного концентрата с высокой минерализацией на свежий раствор без остановки процесса выработки электроэнергии.

Оsmотические электростанции способны работать круглосуточно, независимо от климатических условий, что выгодно отличает их от других видов альтернативных источников энергии, таких как ветряные, солнечные, приливные электростанции.

Если удастся решить проблему разработки высокоэффективных мембран для осмотических станций, то новый источник энергии займет важнейшее место в обеспечении электрической энергией районов мира, расположенных на морских побережьях.

Мировой резерв энергии осмоса огромен – ежегодный сброс пресных речных вод составляет более 3700 кубических километров. Если удастся использовать только 10 % этого объема, то можно вырабатывать более 1,5 ТВт/часов электрической энергии [5], т. е. около 50 % европейского потребления.

Но не только этот источник может помочь решить энергетическую проблему. При наличии высокоэффективных мембран можно использовать энергию глубин океана. Дело в том, что соленость воды зависит от температуры, а она на разных глубинах разная.

Используя температурные градиенты солености, можно не привязываться к устьям рек в строительстве станций, а просто размещать их в акватории океанов. Но это уже задача отдаленного будущего. Хотя практика показывает, что делать прогнозы в технике – это неблагодарное занятие. И будущее уже завтра может постучаться в нашу действительность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 3

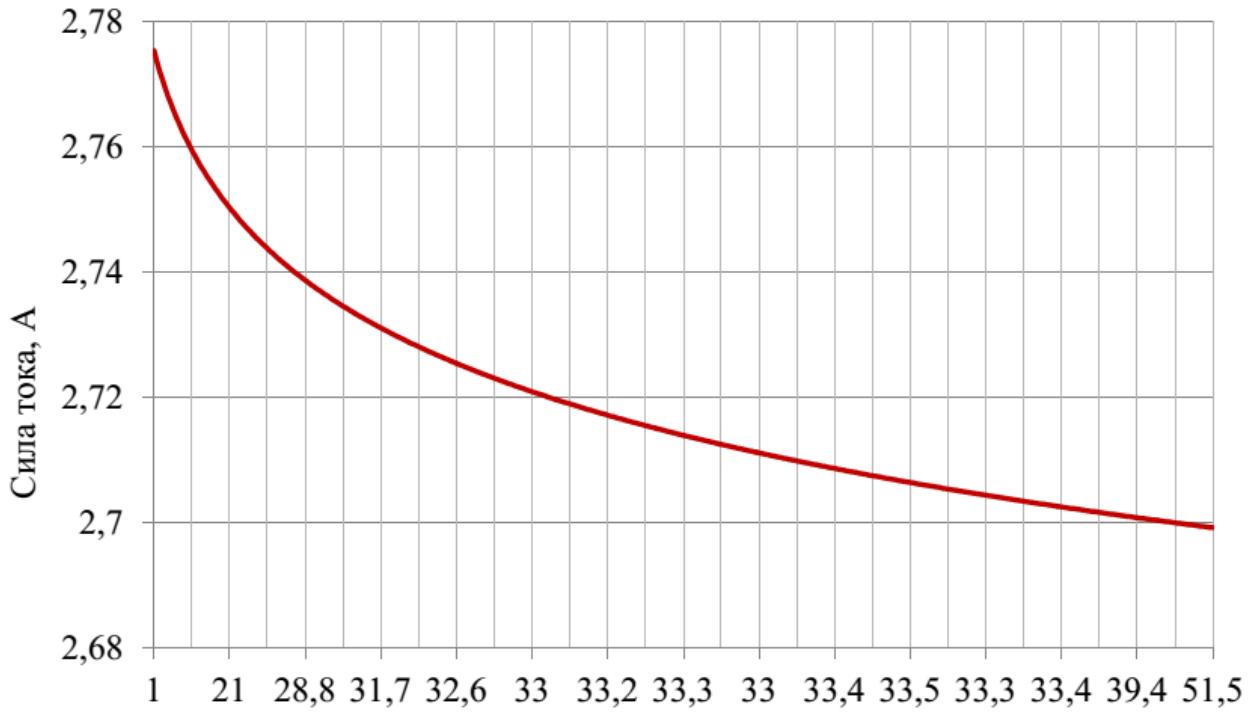
1. В чем заключается физический эффект осмоса в природе?
2. Насколько эффект осмоса пригоден для промышленного применения?
3. Что такое мембрана Лоэба?
4. Какой материал мембранны для осмоса предложили норвежские ученые *Торлейф Хольт и Тор Торсен*?
5. Что такое дисперсные системы?
6. Дайте определение растворам.
7. Явление сольватации – что это?
8. Какими показателями характеризуются растворы?
9. Что называют энергетической характеристикой процесса растворения или изменение энергии Гиббса в ходе процесса растворения?
10. Поясните понятие «идеальный раствор».

11. Каким уравнением характеризуется зависимость растворимости от давления?
12. Каким уравнением оценивается влияние температуры на процесс растворения?
13. Сформулируйте закон *Рауля* для неэлектролитов.
14. Что такое осмотическое давление, и по какому уравнению это давление определяется?
15. Принцип работы осмотической электростанции?
16. Преимущества и недостатки осмотической электростанции?
17. Принцип работы осмотической силовой установки (патент RU 2176031 C2)?
18. Оцените возможность использования вариантов схемы выработки электрической энергии на осмотической станции (патент RU 2613768 C2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК К РАЗДЕЛУ 3

1. Исидзэ, М. Осмос: японская энергетика будущего / М. Исидзэ // Наука и технологии: JPN05. – 2012. – С. 12–13.
2. Хисматуллина, И. З. Перспективы развития осмотических электростанций / И. З. Хисматуллина, А. Г. Закирзаков // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – 2017. – С. 4.
3. Волшаник, В. В. Потенциальная мощность осмотической электростанции Волга — Каспий / В. В. Волшаник, Б. Д. Бабаев // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 9. – С. 36.
4. Чаженгина, Е. А. Коллигативные свойства растворов: методические указания для студентов технических специальностей / Е. А. Чаженгина, Е. Я. Ханина. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2017. – 21 с.
5. Осмотическая электростанция: чистая энергия соленой воды [Электронный ресурс]. URL: <http://electrik.info/main/fakty/699-osmoticheskaya-elektrostanciya-chistaya-energiya-solenoy-vody.html> (дата обращения: 07.10.2019).
6. Санников В. Соленый киловатт: осмос // Популярная механика [Электронный ресурс]. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/11203-solenyy-kilovatt-osmos/#part1> (дата обращения: 21.10.2019).
7. Патент на изобретение «Осмотическая силовая установка». № RU 2176031 C2 МПК F03G 7/00(2001.11). F03B 17/00(2001.11).
8. Патент на изобретение «Устройство и способ выработки энергоэнергии посредством ограниченного давлением осмоса (варианты)» №RU 2613768 C2 МПК F04B 17/00(2017.03). F15B 15/18(2017.03). F03G 7/04(2017.03).

ПРИЛОЖЕНИЕ



Перепад температур между горячей и холодной стороной ТЭГ, °С

Рисунок П.1.1 – Зависимость силы тока в нагревательной спирали ТЭГ от разницы температур между его горячей и холодной сторонами при напряжении питания 11,85 В

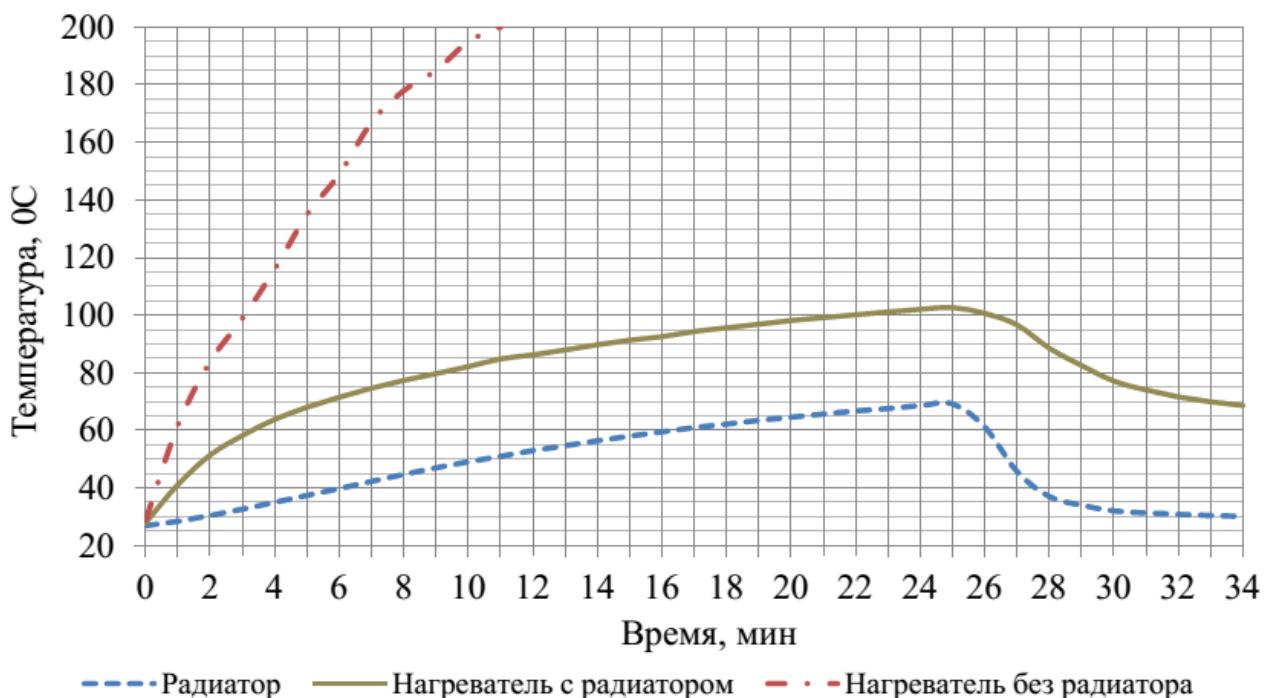


Рисунок П.1.2 – Зависимость температуры горячей стороны ТЭГ от времени нагрева с радиатором на холодной стороне и без него соответственно (после 25 минут нагрева включен охладитель радиатора)

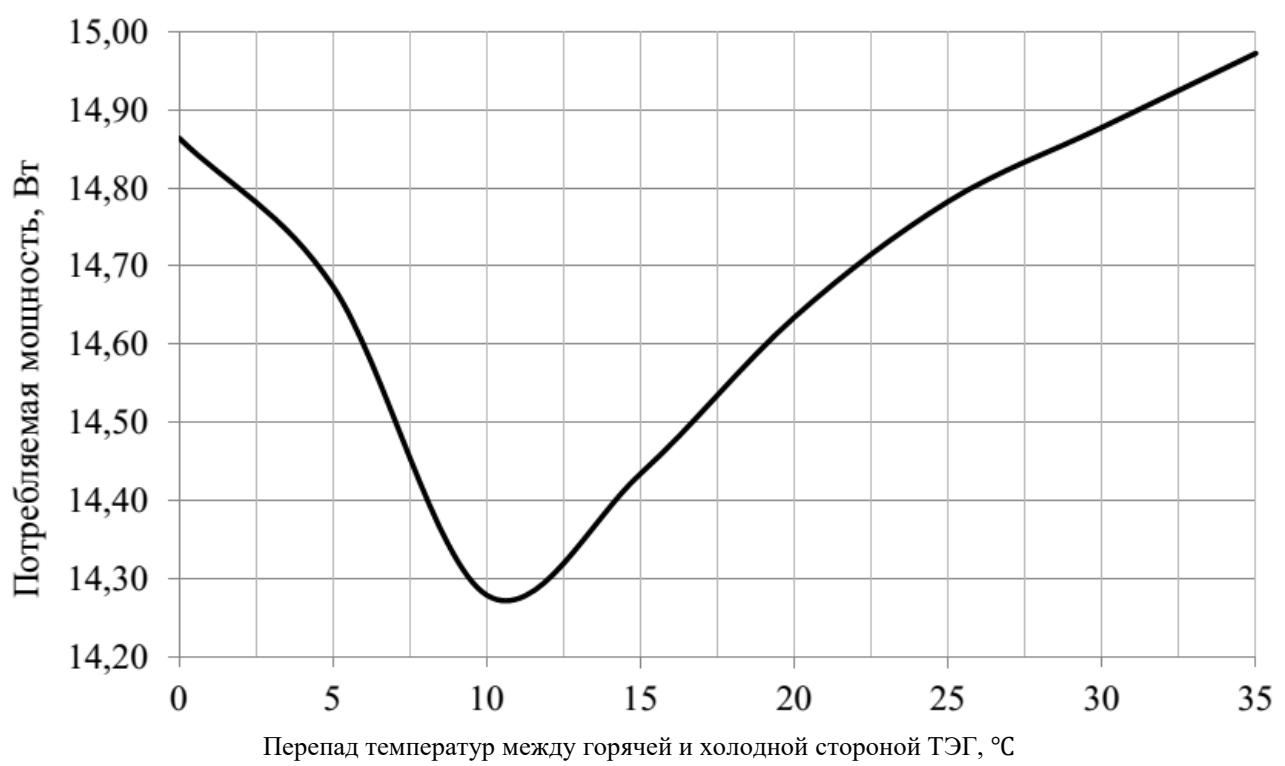


Рисунок П.1.3 – Зависимость мощности потребляемой элементом *Пельтье* от разницы температур между его горячей и холодной сторонами при напряжении питания 12 В

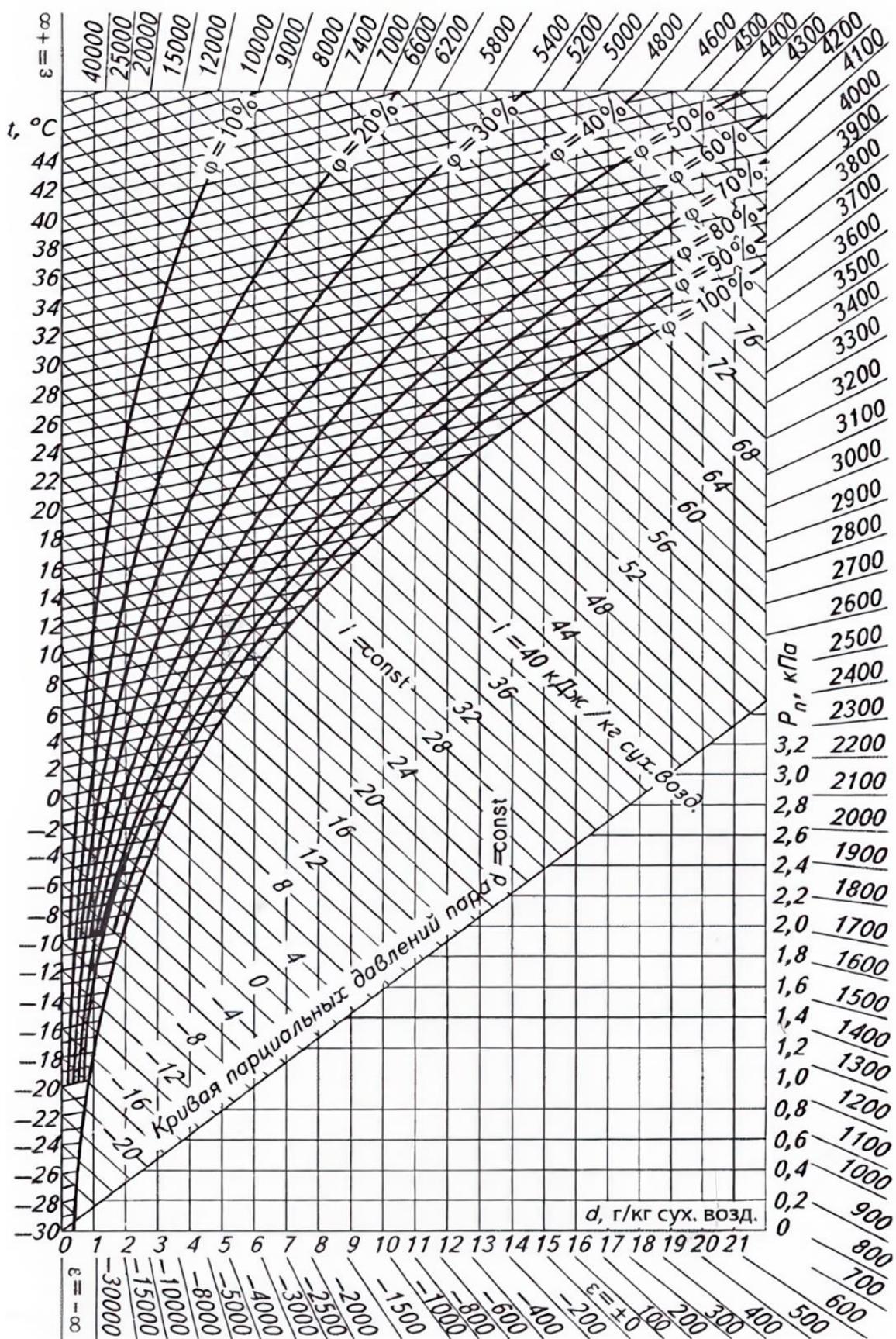


Рисунок П.1.4 –(h) i - d – диаграмма влажного воздуха ($P_0=760$ мм рт. ст.)

Учебное издание

Злобин Владимир Германович

**Термоэлектрические генераторы
и термоэмиссионные преобразователи**

Учебное пособие

Редактор и корректор Е. О. Тарновская
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа:http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 22.10.2025 г. Рег. № 5233/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.