

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Баламирзоев Назим Диодинович  
Должность: И.о. ректора  
Дата подписания: 21.08.2023 14:20:04  
Уникальный программный ключ:  
2a04bb882d7edb7f479cb266eb4aaaaedebee849

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**ФГБОУ ВО**

**«Дагестанский государственный технический университет»**



**Кафедра теоретической и общей электротехники**

**КУРС ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ПРИБОРЫ»**

Махачкала 2020

Курс лекций подготовлен на кафедре «Теоретическая и общая электротехника».

Приводятся основные теоретические положения по термоэлектрическим эффектам, работе термоэлектрических преобразователей энергии в режимах охлаждения, нагрева и генерации электрической энергии, сведения в области термоэлектрического материаловедения, технологии изготовления стандартных термоэлектрических модулей, области применения термоэлектрического охлаждения, нагрева и получения электрической энергии.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Термоэлектрические эффекты .....	5
Термоэлектрические материалы.....	8
Технология получения термоэлектрических материалов.....	12
Работа термоэлектрического преобразователя в режиме охлаждения .....	20
Работа термоэлектрического преобразователя в режиме нагрева .....	25
Работа термоэлектрического преобразователя в режиме генератора электрической энергии .....	26
Специальные режимы работы термоэлектрических преобразователей.....	30
Технология изготовления термоэлектрических модулей .....	33
Конструкции термоэлектрических охлаждающих и нагревательных устройств.....	47
Конструкции термоэлектрических генераторов электрической энергии .....	61
Применение термоэлектрического охлаждения и нагрева .....	76
Применение термоэлектрической генерации электрической энергии.....	89
Применение термоэлектрических преобразователей для измерения физических величин .....	90
Литература.....	97

## **ВВЕДЕНИЕ**

Термоэлектрическое приборостроение является одной из наиболее быстро развивающихся отраслей народного хозяйства как у нас в стране, так и за рубежом. Теория энергетического применения термоэлектрических явлений, созданная в результате известных работ академика А.Ф. Иоффе и его сотрудников, открыла широкие возможности для использования полупроводниковых термоэлектрических преобразователей в различных областях техники. В течение последнего десятилетия среднегодовой прирост мирового производства термоэлектрических охлаждающих модулей составляет 15-25%. Столь высокие и устойчивые темпы роста свойственны разве что таким высокотехнологичным продуктам, как компьютерная техника и программное обеспечение. За последние десятилетия эта отрасль получила особенно значительное развитие, поскольку появилась реальная возможность создавать малогабаритные устройства для регулирования температурных режимов функционирования различной аппаратуры, обеспечивать получение локальных очагов холода, интенсифицировать процессы теплопередачи в сложных конструкциях, получать электрическую энергию различными альтернативными методами.

Главной причиной, вызвавшей всплеск интереса к термоэлектрическому преобразованию энергии, является абсолютная экологическая чистота этого метода преобразования энергии, в отличие от традиционного парокомпрессионного. Данный фактор выдвигается на передний план благодаря осознанию мировым сообществом важности сохранения окружающей среды.

Для динамичного развития данной отрасли техники необходимо ее постоянное насыщение квалифицированными специалистами, обладающими знаниями в области теории и практики термоэлектрического преобразования энергии, термоэлектрического материаловедения и его приложения в различных областях. Данный курс лекций является как бы первой попыткой систематизирования знаний в сфере термоэлектрического преобразования энергии для эффективного изучения дисциплины «Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи и приборы», введенной в образовательный процесс в ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет».

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Теоретически и экспериментально установлены три термоэлектрических эффекта, возникающих на контактах разнородных проводниковых и полупроводниковых материалов: Зеебека, Пельтье, Томсона.

*Эффект Зеебека:* Данный эффект был открыт и исследован Зеебеком в 1821 году.

Если имеется разомкнутая цепь состоящая из двух проводников (полупроводников) А и В (рис.1), и при этом один из контактов имеет температуру  $T_1$ , а другой температуру  $T_0$ , причем  $T_1 > T_0$ , то на концах цепи, имеющих температуру  $T$  возникает разность потенциалов, называемая термоэлектродвижущей силой  $E$ , которая равна

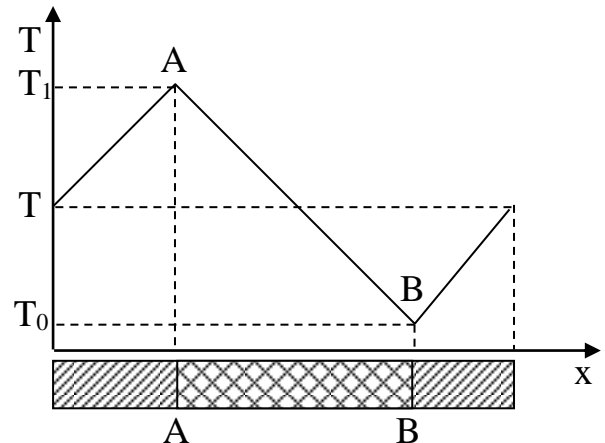


Рис.1. Распределение температуры в контактах.

$$E = \int_{T_0}^{T_1} \alpha dT \quad (1)$$

где  $\alpha = \alpha(T)$  – так называемый дифференциальный коэффициент термо-э.д.с., зависящий только от разности температур спаев и материалов термоэлемента (цепи, состоящей из двух спаянных проводников или полупроводников). Коэффициент термо-э.д.с. термоэлемента получается как разность величин, называемых в теории термоэлектричества абсолютными коэффициентами термо-э.д.с. проводниковой (полупроводниковой) пары  $\alpha'$  и  $\alpha''$ , причем  $\alpha = \alpha'' - \alpha'$ .

Качественно это явление можно объяснить увеличением числа свободных носителей (в случае полупроводников) и энергии носителей с увеличением температуры. Если вдоль проводника существует перепад температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном. В результате возникает поток носителей от горячего конца к холодному и на последнем накапливается заряд, соответствующий заряду носите-

лей. Процесс накопления заряда будет продолжаться до тех пор, пока электрическое (кулоновское) поле, возникающее в ветви не достигнет такого значения, когда кулоновские силы, действующие на носителей тока не уравновесят диффузионные силы, обусловленные градиентом температуры, создающие поток носителей тока от горячего конца ветви термоэлемента к его холодному концу. Сумма таких разностей потенциалов в цепи дает одну составляющую термо-э.д.с. Вторая составляющая – контактная разность потенциалов. Если оба спая термоэлемента находятся при одинаковой температуре, то контактные разности потенциалов равны и направлены в противоположные стороны. Таким образом, при одинаковых температурах спаев контактные разности потенциалов взаимно компенсируют друг друга. Если же температуры спаев различны, то контактная разность потенциалов дает свой вклад в термо-э.д.с.

Явление Зеебека проявляется почти во всех известных материалах: электролитах, расплавах, кристаллах. Зависимость термо-э.д.с. от температуры исследована достаточно хорошо в широком интервале температур вплоть до абсолютного нуля.

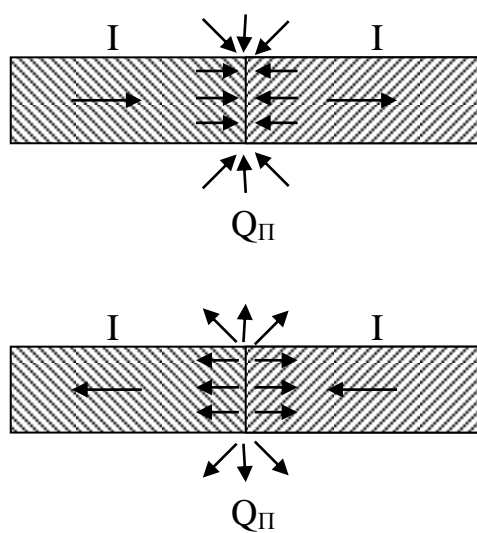


Рис.2. Поглощение и выделение тепла в контакте.

Замыкание термоэлектрической цепи приводит к появлению тока. Прохождение тока в цепи сопровождается рядом тепловых эффектов.

*Эффект Пельтье.* Этот эффект, обнаруженный в начале тридцатых годов 18-го столетия был правильно истолкован в работах Ленца в 1838 году. Суть эффекта заключается в следующем: при протекании тока  $I$  через контакт двух разнородных проводников или полупроводников в зависимости от направления тока за единицу времени на контакте выделяется или поглощается некоторое количество теплоты  $Q_P$ , называемое теплотой Пельтье.

Было установлено, что теплота Пельтье  $Q_{\text{П}}$  прямо пропорционально силе тока  $I$ :

$$Q_{\text{П}} = \Pi I, \quad (2)$$

где  $\Pi$  – так называемый коэффициент Пельтье. Вектор плотности  $q$  теплового потока на контакте пропорционален вектору плотности тока, т. е.  $q = \Pi j$ .

Установлено, что если ток, текущий через спай совпадает с контактной разностью потенциалов, то тепло Пельтье поглощается, при обратном же направлении тока происходит выделение теплоты.

Причина появления эффекта Пельтье заключается в том, что протекание тока в цепи обусловлен направленным движением (подвижностью) электронов или дырок из одного материала в другой, причем равновесная энергия электронов и дырок в этих материалах различна и носители, пришедшие из материала I через контакт, имеют избыток энергии по сравнению с энергией носителей во II материале (см. рис.2, а). Этот избыток энергии отдается атомам решетки II материала при первых же актах столкновения, и в результате температура контакта соответственно растет. Если же ток направлен от материала II, где энергия носителей меньше, чем их энергия в I материале, то носители заряда переходя через контакт в II материал, восполняют недостаток своей энергии за счет энергии кристаллической решетки II материала при первых же актах столкновения с атомами..

Явление Пельтье является поверхностным, т.к. носители тока успевают обмениваться энергией с кристаллической решеткой при первых же актах столкновения на расстояниях нескольких длин их свободного пробега. Явление Пельтье является обратным явлению Зеебека.

Так же как и эффект Зеебека, явление Пельтье обнаруживается у самых различных материалов, причем коэффициент Пельтье сложным образом зависит от температуры.

*Эффект Томсона.* В отличие от рассмотренных выше эффектов это явление бы-

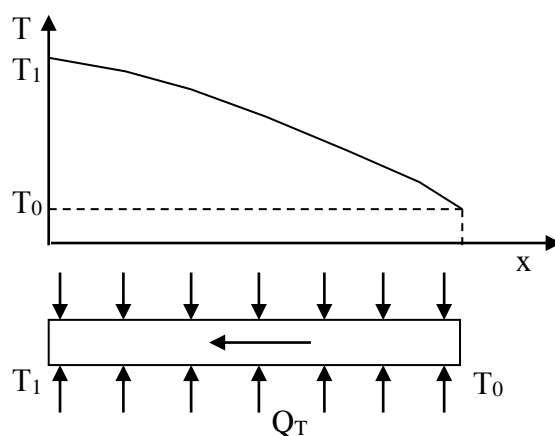


Рис.3. Распределение тепла вдоль проводника.

ло сначала предсказано теоретически, и лишь в 1856 году обнаружено на практике Томсоном. Это явление наблюдается при протекании тока через проводник с градиентом температуры (полупроводник). При этом на отрезке вещества с температурами  $T_0$  и  $T_1$  ежесекундно поглощается количество тепла

$$Q_T = I \int_{T_0}^{T_1} \tau dT. \quad (3)$$

Величина  $\tau$  носит название коэффициента Томсона. Коэффициент Томсона зависит от температуры и может быть как положительным так и отрицательным. Поглощение или выделение теплоты Томсона объясняется тем, что, носители заряда переходя из более горячей (с большей энергией) части вещества в более холодную, передают избыточную энергию атомам кристаллической решетки, что вызывает нагрев проводника (полупроводника). При обратном направлении тока электроны (дырки) пополняют свою недостающую энергию за счет энергии окружающих атомов, что в конечном итоге сопровождается поглощением теплоты. Явление Томсона является столь же общим свойством всех проводников электричества, как и предыдущие два эффекта. Как следует из изложенного эффект Томсона является объемным эффектом, тогда как эффекта Зеебека и Пельтье поверхностными.

Коэффициенты Томсона, Зеебека и Пельтье связаны между собой соотношением:

$$d\alpha/dT = (1/T)(\tau_2 - \tau_1), \quad \Pi = \alpha\Delta T \quad (4)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - соответственно коэффициенты Томсона первой и второй ветвей термопары (см. рис.2).

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Материалы для термоэлектрических преобразователей принято называть термоэлектриками (по аналогии с пьезоэлектриками, сегнетоэлектриками и т. п.). Термоэлектрики характеризуются добротностью  $Z$ . Данный параметр опре-



деляется физическими свойствами материала - его коэффициентами электропроводности  $\sigma$ , теплопроводности  $K$  и термоЭДС  $\alpha$ .

$$Z = \sigma \alpha^2 / K$$

Важнейшей энергетической характеристикой любой холодильной машины является ее холодильный коэффициент  $e=Q_c/A$ , где  $Q_c$  - холодопроизводительность;  $A$  - затраченная работа. Можно показать, что холодильный коэффициент термоэлектрической холодильной машины определяется добротностью термоэлектрика  $Z$ , причем холодильный коэффициент стремится к своему максимальному значению  $\varepsilon$  Карно при  $Z \rightarrow \infty$ . Здесь  $\varepsilon$  Карно - холодильный коэффициент идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно. Поэтому основная задача термоэлектрического материаловедения - это повышение добротности термоэлектриков.

В настоящее время принято классифицировать термоэлектрические материалы по температурным областям их применения на низко-, средне- и высокотемпературные.

*Низкотемпературные материалы.* К низкотемпературным материалам относятся полупроводники, обладающие высокой добротностью и хорошими технологическими свойствами в интервале температур 0 - 350° С.

Давно известно соединение  $ZnSb$ , обладающее высокой добротностью и нашедшее применение в ряде газовых и солнечных термоэлектродгенераторов. Наиболее эффективный температурный интервал использования  $ZnSb$  200-500° С, в котором средняя добротность  $0,5 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ , и к. п. д. равен 3%.

Более эффективные низкотемпературные материалы - твердые растворы на основе  $Bi_2Te_3$ . Термоэлектрические свойства  $Bi_2Te_3$  изучались достаточно подробно, и было показано, что это соединение обладает достаточным значением добротности. Но еще более эффективны квазибинарные твердые растворы на основе  $Bi_2Te_3$ . Твердый раствор  $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$  с 20-30 мол. %  $Bi_2Te_3$  имеет максимальную добротность  $3,3 \cdot 10^{-3} K^{-1}$  при комнатной температуре. Лучший низкотемпературный материал n-типа - квазибинарный твердый раствор  $Bi_2Te_3-$

$\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Наиболее эффективный температурный интервал –  $250\text{-}570^\circ \text{K}$ , в котором средняя добротность равна  $1,8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , к. п. д.  $\sim 11\%$ .

*Среднетемпературные материалы.* Эффективных среднетемпературных материалов насчитывается больше, чем низкотемпературных. К ним относятся  $\text{PbS}$  (n-тип),  $\text{PbSe}$  (p- и n-типы),  $\text{PbTe}$  (p- и n-типы),  $\text{GeTe}$  (p-тип),  $\text{SnTe}$  (p-тип),  $\text{AgSbTe}_2$  (p-тип) и твердые растворы на их основе. Высокие результаты получены при легировании  $\text{GeTe}$  соединением  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  до 5 мол. % и  $\text{AgSbTe}_2$  до 10 мол. %, что дает добротность до  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$  при  $500^\circ \text{C}$ . Соединение  $\text{PbTe}$  n-типа обладает высокой добротностью при легировании его соединением  $\text{PbI}_2$ . Среднее значение его добротности в интервале температур  $350\text{-}650^\circ \text{C}$  достигает  $1,6 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , к.п.д.  $\sim 7\%$ .

*Высокотемпературные материалы.* Высокотемпературные термоэлектрические материалы включают в себя большой класс веществ, но ввиду особых трудностей работы с ними большинство их плохо изучено. Это - силициды переходных металлов, систематическое изучение которых началось лишь в последние годы и уже получены соединения  $\text{FeSi}$  и  $\text{CoSi}$  с максимальной добротностью  $0,8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , халькогениды редкоземельных металлов. Следует назвать еще  $\text{CeS}$ ,  $\text{MnTe}$  и  $\text{InAs}$ , добротность которых составляет  $0,9 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$  при  $1000^\circ \text{C}$ .

В настоящее время наиболее изучена и применяется в термоэлектродгенераторах система  $\text{Ge-Si}$ , образующая непрерывный ряд твердых растворов. Легированием  $\text{GeSi}$  элементами V группы получается проводимость p-типа, а элементами III группы - n-типа. Существуют различные взгляды на выбор оптимального состава этой системы. По одним данным, большой добротностью обладают сплавы с содержанием  $\sim 80$  мол. %  $\text{Si}$ . Максимальная добротность их достигает у p-типа  $0,7 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ , n-типа  $0,9 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ .

Несмотря на активные исследования различных научных центров и лабораторий по созданию термоэлектриков с высокой добротностью, до настоящего времени не удавалось добиться существенных успехов на этом пути. Начиная с 50-х годов XX века, добротность термоэлектриков удалось повысить не более

чем на 30 %. Только за последние несколько лет произошел определенный прорыв в этом направлении.

Исследования по созданию и поиску материалов с высокой добротностью ведутся в последнее время по трем направлениям:

1. Создание функционально неоднородных термоэлектриков, т. е. материалов, в которых для увеличения их добротности целенаправленно формируется пространственная неоднородность.
2. Исследование так называемых скуттерудитов - материалов со структурой минерала  $\text{CoAs}_3$ . В частности, изучение таких материалов, как  $\text{CoAs}_3$ ,  $\text{RbAs}_3$ ,  $\text{CoSb}_3$ ,  $\text{RhSb}_3$  и  $\text{IrSb}_3$ , показало перспективность их использования в качестве термоэлектриков.
3. Исследование сверхрешеток с квантовыми ямами (Quantum-Well Superlattice - QWSL), структур с квантовыми нитями и квантовыми точками дало очень важные результаты. Понятие «квантовая яма» используется для обозначения области термоэлектрика, в которой средняя потенциальная энергия носителей заряда ниже, чем вне ее. Создавая чередование квантовых ям (например, путем послойного напыления материала), можно образовать периодическую структуру QWSL.

Определенные успехи были достигнуты в последние годы по всем трем перечисленным направлениям. Но наибольший успех был получен в исследовании квантовых сверхрешеток, в которых, по-видимому, удалось добиться увеличения термоэлектрической добротности сразу в несколько раз по сравнению с исходными материалами. Так, предложен термоэлектрик, у которого безразмерное произведение  $ZT$  достигает значения 2,4 при комнатных температурах, в то время как для лучших традиционных материалов  $ZT < 1$ .

По-видимому, можно ожидать появления новых эффективных термоэлектрических материалов в промышленности через 7-10

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### *Общие принципы*

Стоимость полупроводниковых термоэлектрических материалов составляет заметную часть в себестоимости термоэлектрических модулей, поэтому большинство крупных производителей термоэлектрических модулей сами выращивают термоэлектрические материалы. Для того чтобы успешно конкурировать на рынке, важно получать материалы достаточно высокого качества, но чем лучше качество термоэлектрического материала, тем выше его цена. Таким образом, все технологии, которые используются в настоящее время для получения термоэлектрических материалов, являются компромиссными между качеством и себестоимостью.

Данное обстоятельство определяется следующими положениями.

Во-первых, все термоэлектрики - это соединения, которые относятся к классу так называемых бертоллидов, - соединениям, не имеющим фиксированного состава. Их анионно-катионное отношение может изменяться в некоторых пределах, при этом будет изменяться и концентрация носителей заряда, что приведет к ее отличию от оптимальной концентрации носителей. Температура кристаллизации (плавления) часто не соответствует стехиометрическому или оптимальному составу. Поэтому необходимо принимать определенные меры для того, чтобы вырастить кристалл нужного состава.

Во-вторых, термоэлектрические материалы обладают ярко выраженной анизотропией как электрических, так и механических свойств. При выращивании кристалла большого диаметра внутри него возникают значительные термические напряжения, приводящие к появлению трещин. Чтобы этого избежать, необходимо усложнять процесс выращивания таких кристаллов, что делает их производство нерентабельным. Поэтому диаметр кристаллов обычно находится в пределах 30-40 мм.

В-третьих, термоэлектрические материалы являются многокомпонентными твердыми растворами. Каждый компонент имеет свой коэффициент распределения, и поэтому в выращенном кристалле электрические свойства изменяются по длине, если не принимать специальных мер.

Поэтому при получении термоэлектрических материалов следует принимать определенные меры, учитывающие вышеперечисленные положения.

### ***Исходные компоненты***

Для выращивания качественных кристаллов или направленных поликристаллов термоэлектрических материалов необходимо иметь достаточно чистые исходные компоненты - висмут, сурьму, селен, теллур. Если селен выпускают достаточно чистым, то с теллуrom, сурьмой и висмутом возникают определенные сложности, особенно с теллуrom. Одни производители предпочитают более грязный, но относительно дешевый теллур, другие - более чистый, который стоит намного дороже. Поэтому некоторые производители самостоятельно производят доочистку исходного теллура. Возгонка является эффективным способом очистки Te от многих примесей. По такому же принципу очищают и сурьму. Возгонка Sb, как известно, является малоэффективной при очистке от свинца и мышьяка. И если мышьяк как примесь практически не оказывает влияния на изменение свойств материала, то свинец является донором. Поэтому процесс возгонки Sb должен быть организован таким образом, чтобы можно было использовать небольшие различия в физических свойствах Sb, As и Pb. Очистка висмута обычно ограничивается стандартной процедурой, хорошо описанной в научно-технической литературе, - фильтрацией расплава Bi для очистки от оксидов, которые всегда присутствуют в металлическом висмуте.

### ***Выращивание кристаллов термоэлектрических материалов***

Для получения термоэлектрических материалов подходит любой способ выращивания кристалла. Необходимо лишь довести его до некоторой степени совершенства применительно к используемому материалу. Каждый из способов получения имеет свои достоинства и недостатки, поэтому безоговорочно предпочесть один способ другому невозможно.

### *Метод вертикальной зонной плавки.*

В настоящее время - это самый распространенный метод. При его использовании не стремятся вырастить монокристалл, а ограничиваются выращиванием сроска направленных кристаллов. Метод достаточно прост. В специальную ампулу из кварцевого или тугоплавкого стекла помещается термоэлектрический материал, и в ней он проходит температурные зоны (ступени) выращивания снизу вверх при движении ампулы в вертикальном направлении. Таким образом, именно в нижней части ампулы растут направленные кристаллы (рис. 4).

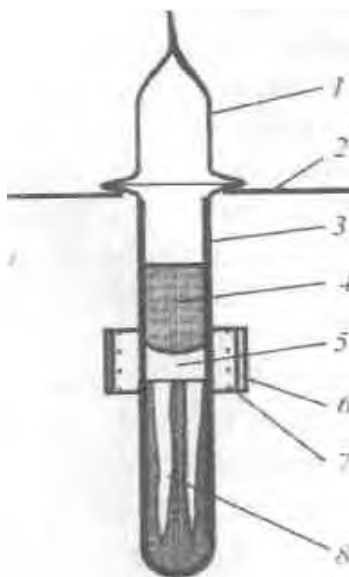


Рис. 4. Вертикальная зонная плавка: 1 - ампула; 2 - подставка; 3 - чернение; 4 - исходный термоэлектрический материал; 5 - расплавленная зона; 6 - нагреватель; 7 - спираль нагревателя; 8 - кристалл

Предварительная подготовка ампул заключается в отложении на ее внутренних стенках пиролитического графита для предотвращения химического взаимодействия расплавленного термоэлектрического материала с кварцем. Скорость выращивания для материала и-типа составляет обычно около 0,1 мм/мин. Для материала р-типа возможна несколько большая скорость. Значение градиента температур на фронте кристаллизации составляет 100-150 град/см.

Ширину расплавленной зоны в классическом методе зонной плавки обычно делают малой. Однако иногда идут и на увеличение ширины расплавленной зо-

ны, так как в этом случае распределение свойств по слитку оказывается более равномерным.

Основное преимущество метода, которое и привело к его широкому использованию, заключается в том, что одновременно в работе может находиться большое количество ампул (рис.5). Данный метод является весьма производительным. Нагреватели (или группы нагревателей) обычно питаются последовательно. Температура нагревателей регулируется (обычно термопарой), находящимся в свободном от ампул нагревателе, который является имитатором условий нагрева в рабочих ампулах. Кроме того, оборудование для данного метода сравнительно дешевое и очень компактное, а сам процесс выращивания не требует активного участия человека.

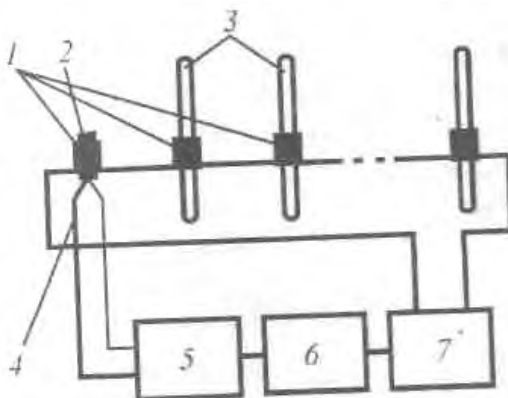


Рис.5. Установка для зонной плавки: 1 - спирали нагревателя; 2 - имитатор; 3 - ампулы; 4 - регулирующая термопара; 5,6,7 - блоки питания и регулирования температуры, соответственно

Существенный недостаток метода заключается в том, что приходится использовать дорогостоящие кварцевые ампулы. Для снижения затрат идут на повторное использование ампул после их травления и тщательной промывки с целью удаления остатков термоэлектрического материала от предыдущей плавки.

При аварийном повреждении ампулы термоэлектрический материал превращается в брак. Более того, расплав, попадая на нагревательные элементы печи, может вывести из строя всю систему, поэтому конструктивно должна быть предусмотрена система аварийного выключения любого из нагревателей.

Выращенный кристалл обрезают сверху и снизу. В современном производстве эти обрезки используются вторично. Выращенные слитки с удаленными концами поступают на контроль термоэлектрических свойств. При этом ограничиваются измерением термоЭДС  $\alpha$  и электропроводности  $\sigma$ . Разбраковка по качеству обычно осуществляется по величине  $\alpha^2\sigma$ . На практике всегда имеется некоторый разброс в электрических свойствах слитков. Для дальнейшего использования формируются наборы слитков, обеспечивающие необходимые средние значения электрических параметров.

Методом зонной плавки получают слитки с термоэлектрической эффективностью  $Z$  до  $3,0 \cdot 10^{-3}$  -  $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

*Метод Чохральского (метод вытягивания из расплава).*

Данный метод широко применяется в современной электронике для выращивания кристаллов большого диаметра: Si, GaAs и др.

Схема метода приведена на рис. 6. В тигле 2 находится расплав термоэлектрического материала. Для защиты от испарения над ним имеется слой флюса 3 из борного ангидрида. Сам тигель находится в специальном держателе 6, который вращается вместе с тиглем. Необходимая температура в тигле поддерживается графитовым нагревателем 5. Из расплава термоэлектрического материала вытягивается на затравку кристалл. Держатель, в котором закреплена затравка, поднимается вверх с необходимой скоростью и одновременно вращается в сторону, противоположную направлению вращения тигля. Все перечисленные элементы находятся в герметичной камере, которая вакуумируется, а затем заполняется инертным газом. Для увеличения однородности свойств выращиваемого кристалла используют добавочные устройства.



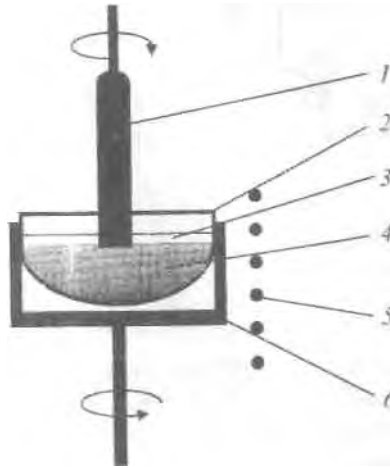


Рис. 6. Метод Чохральского: 1 - выращиваемый слиток; 2 - тигель; 3 - расплав защитного флюса; 4 - расплав термоэлектрического материала; 5 - нагреватель; 6 - держатель тигля

Это может быть плавающий тигель с узким отверстием, через которое он со-общается с основной массой расплава. Вытягивание кристалла ведут из небольшой ванны, имеющейся в плавающем тигле. Такой метод вытягивания приводит к установлению стабильного состава расплава в плавающем тигле. Используется также независимая подпитка примесью, которой расплав обедняется в процессе выращивания.

Вытягивают кристаллы диаметром до 50 мм. Таким способом выращивают самые совершенные кристаллы термоэлектрических материалов, которые имеют и самые лучшие термоэлектрические свойства. Совершенство выращенных кристаллов приводит к тому, что они легко раскалываются по плоскостям спаянности. Обычно это происходит при резке материала на ветви, приводя к высокому проценту брака. Другим недостатком метода является высокая стоимость установки для выращивания и более низкая производительность по сравнению с методом вертикальной зонной плавки. Поэтому данный метод может быть рекомендован лишь в тех случаях, когда требуется получать уникальные кристаллы для использования в термоэлектрических модулях с особыми свойствами.

#### *Метод экструзии*

В последнее время метод экструзии получает все более широкое распространение. Суть метода поясняет рис.7. В матрицу 2 специальной пресс-формы, которая прогрета до температур порядка  $T_3 = 0,8T_{пл}$ , помещается

термоэлектрический материал 4. Материал закрывают пуансоном 1, к которому прикладывают давление. Под давлением начинается вытекание материала через фильеру 5. Таким методом получают поликристалл, имеющий выраженную текстуру. Практически это осуществляют следующим образом. Вначале в холодной или слегка подогретой пресс-форме изготавливают таблетки термоэлектрического материала, из которых затем осуществляется экструзия. Затем эту таблетку покрывают слоем аквадага (раствором коллоидального графита в воде). Это делают для того, чтобы избежать прилипания термоэлектрического материала к стенкам горячей пресс-формы. Далее таблетку помещают в нагретую матрицу.

При экструзии получают стержни материала диаметром до 20-25 мм. Температуры пресс-формы для состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  составляют около  $370\text{-}410^\circ\text{C}$ . Скорость движения пуансона - около 1-2 мм/мин. Давление - 20-30 т/см.

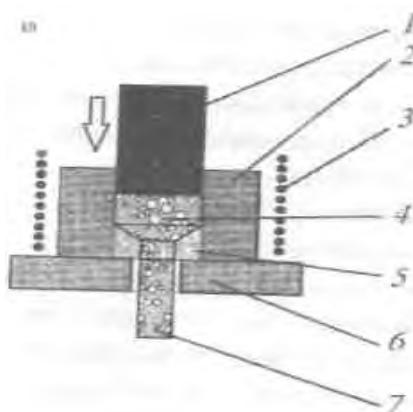


Рис. 7. Принципиальная схема экструзии термоэлектрического материала: 1 - пуансон; 2 - матрица; 3 - нагреватель; 4 - экструдированный материал; 5 - фильера; 6 - подставка; 7 - экструдированный материал

Основное преимущество метода заключается в его простоте. Другое преимущество - практически полное использование материала. Эффективность материалов р-типа, получаемых таким методом, также достаточно высока (до  $Z = 3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ). Полученные стержни отличаются высокой механической прочностью.

Недостаток метода в том, что с его помощью получают эффективные материалы только р-типа. Термоэлектрическая эффективность материалов п-типа

заметно ниже (не более  $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ). Однако для большинства приложений сочетание хорошего материала р-типа с посредственным материалом n-типа оказывается вполне допустимым.

*Кристаллизация в узких щелях.*

При использовании данного метода расплав термоэлектрического материала заливают между двумя узкими пластинами из графита, вдоль которых создают градиент температур. Метод хорош тем, что дает возможность использовать одновременно большое количество щелевых прослоек между графитовыми пластинами и тем самым одновременно получать большое количество пластин термоэлектрического материала (рис.8). Заливка расплава термоэлектрического материала в графитовое приспособление может проходить на воздухе. Окисление материала предотвращает графит, создающий восстановительную среду. Метод выращивания очень производителен, прост и не требует больших трудовых затрат.

Недостаток метода - значительное количество брака, так как кристаллизация происходит неуправляемо. Поэтому возможна большая отбраковка. Однако это компенсируется легкостью повторного использования материала. Другим недостатком является то, что антидиффузионные прослойки приходится наносить не на пластины, а на ветви термоэлектрического материала, что является более трудоемким процессом.



Рис. 8. Принципиальная схема ячейки для получения термоэлектрических материалов методом кристаллизации в узких щелях: 1 - корпус; 2 - графитовые пластины; 3 - графитовые прокладки

Перечисленные методы далеко не исчерпывают список всех возможных способов получения термоэлектрических материалов. Но на сегодняшний день они являются наиболее распространенными при производстве термоэлектрических модулей.

## РАБОТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

При всем разнообразии конструкций общим признаком всех охлаждающих термоэлектрических устройств является наличие в них термоэлектрических батарей, состоящих из ряда последовательно соединенных термоэлементов. Конструктивно такие термоэлементы выполняются из двух полупроводниковых ветвей, одна из которых обладает электронной, а другая - дырочной проводимостью, соединенных между собой посредством металлических (обычно медных) коммутационных пластин (контакты коммутационных пластин с ветвями термоэлемента носят названия спаев) (рис.9).

Если через термоэлектрическую батарею пропустить электрический ток, то на одних спаях будет выделяться теплота Пельтье, а на других поглощаться. Если спаи термоэлементов, на которых выделяется теплота Пельтье, поддерживать при постоянной температуре  $T_0$ , то другие спаи будут охлаждаться до такой температуры  $T$ , при которой сумма теплот, поступающих в них за единицу времени из окружающей среды  $Q_0$ , за счет теплопроводности материалов ветвей  $\lambda$ , и половины за счет эффекта Джоуля  $Q_{дж}/2$ , не станет равной поглощающейся в них теплоте Пельтье  $Q_n$ . Это условие для стационарного процесса может быть записано в виде:

$$Q_n = Q_0 + Q_\lambda + Q_{дж}/2 \quad (5)$$

где -  $Q_n = \Pi$ ,  $Q_\lambda = (\lambda_1 S_1/L_1 + \lambda_2 S_2/L_2) (T_0 - T)$ ,  $Q_{дж}/2 = I^2 R/2$ ;  $L_1, L_2$  - длина ветвей термоэлемента;  $R, S_1, S_2$  - соответственно сопротивление и сечение ветвей батареи термоэлементов (ТЭ).

Подставляя значения  $Q_n, Q_\lambda, Q_{дж}$  в равенство (5), получаем выражение для разности температур  $\Delta T$ , которая возникает в холодильном устройстве при прохождении тока  $I$  в установившемся режиме:

$$\Delta T = T_0 - T(\Pi - I^2 R/2 - Q_0)/(\lambda_1 S_1/L_1 + \lambda_2 S_2/L_2) \quad (6)$$

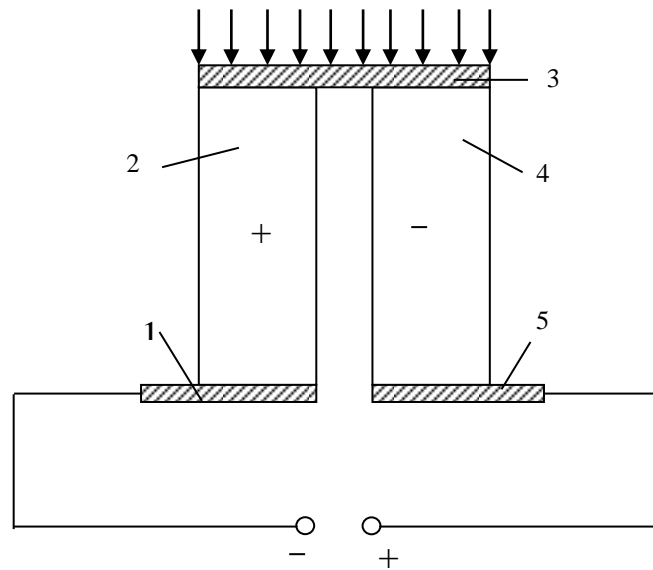


Рис.9. Схема полупроводникового термоэлемента (1, 5 – горячие спаи, 2, 4 – ветви термоэлемента, 3 – холодный спай)

откуда видно, что разность температур зависит от силы тока, геометрических размеров и термоэлектрических параметров  $\Pi$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  ветвей термоэлектрического модуля. Как видно из соотношения 2, разность температур  $\Delta T$  будет максимальной при условии полной теплоизоляции ( $Q_0 = 0$ ) холодных спаев термоэлемента и силе тока  $I_{\text{опт}}$ :

$$I_{\text{опт}} = (\alpha_1 + \alpha_2)T/R, \quad \Delta T_{\text{макс}} = ZT^2/2 \quad (7)$$

При  $Q_0$  отличном от нуля

$$\Delta T = \Delta T_{\text{макс}} = -Q_0 / (\lambda_1 S_1 / L_1 + \lambda_2 S_2 / L_2) \quad (8)$$

Если построить зависимость  $\Delta T_{\text{макс}}$  от тока в цепи при нулевой тепловой нагрузке  $Q_0 = 0$ , то эта зависимость будет иметь вид, представленный на рис.10.

Из рис.10 ясно как экспериментально измерить  $\Delta T_{\text{макс}}$  и  $I_{\text{опт}}$  на термоэлектрическом модуле по зависимости разности температур от тока. Следует подчеркнуть, что эта зависимость не симметрично относительно прямой  $I = I_{\text{опт}}$  и не является параболой.

Теперь, если мы будем подавать на холодный конец цепи тепловую нагрузку, а ток будет фиксирован на уровне  $I = I_{\text{опт}}$ , то в зависимости от тепло-

вой нагрузки разность температур на концах ветви будет выглядеть так, как это показано на рис.11.

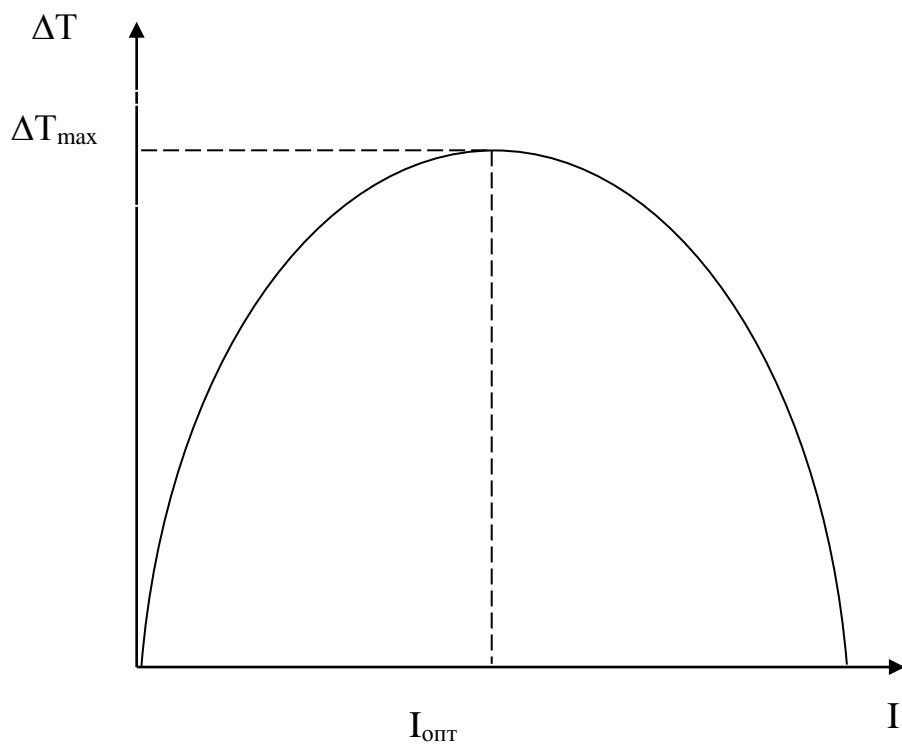


Рис. 10. Зависимость разности температур на концах ветви от тока (температура горячего сая фиксирована)

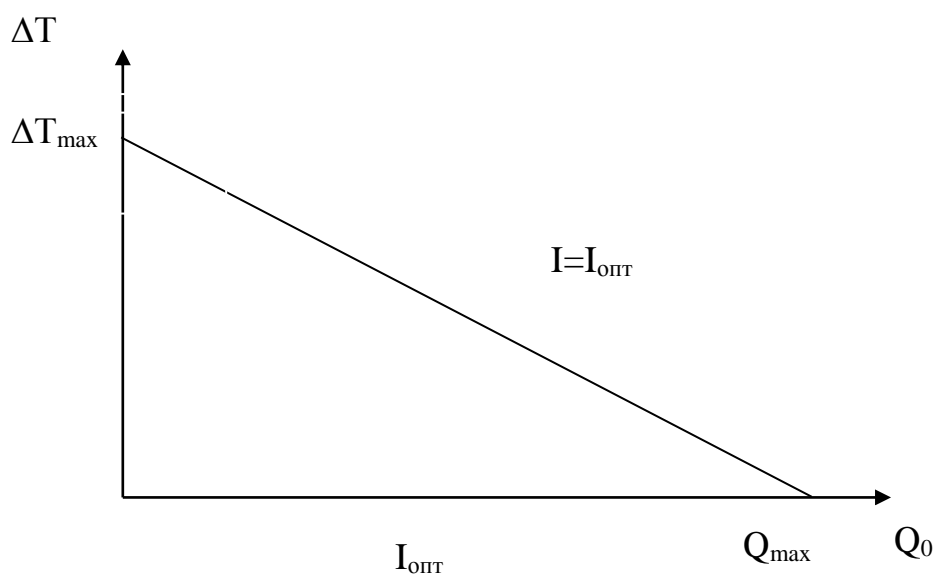


Рис.11. Зависимость разности температур на концах ветви от тепловой нагрузки при токе  $I = I_{\text{опт}}$

Это, так называемая, нагрузочная прямая. При  $Q_{\max} = 0$  имеем  $\Delta T = \Delta T_{\max}$ . При увеличении тепловой нагрузки  $\Delta T$  уменьшается, и, наконец, при некоторой нагрузке наступает ситуация, когда  $\Delta T = 0$ . Тепловая нагрузка для этого случая и есть  $Q_{\max}$ .

Если теперь рассмотреть работу термоэлектрического модуля, имеющего  $N_p$  термоэлементов и представляющего в электрическом смысле цепочку последовательно соединенных ветвей, то выражения для оптимальных значений напряжения  $U_{\text{опт}}$ , тока  $I_{\text{опт}}$  и тепловой нагрузки (холодопроизводительности)  $Q_{\max}$  имеют вид, представленный в таблице 1.

Таблица 1. Связь параметров модуля и термоэлектрического материала

Выражение параметров модуля через параметры термоэлектрического материала	Выражение параметров термоэлектрического материала через параметры модуля
$U_{\text{опт}} = 2N_p \alpha T$	$\alpha = \frac{U_{\text{опт}}}{2N_p T}$
$I_{\text{опт}} = \frac{\alpha(T - T_{\max})}{R}$	$R = \frac{U_{\text{опт}}}{I_{\text{опт}} 2N_p} \left( 1 - \frac{\Delta T_{\max}}{T} \right)$
$Q_{\max} = 2N_p k \Delta T_{\max} \left( \frac{T + \Delta T_{\max}}{T - \Delta T_{\max}} \right)$	$k = \frac{Q_{\max}}{2N_p \Delta T_{\max} \left( \frac{T + \Delta T_{\max}}{T - \Delta T_{\max}} \right)}$
$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} Z T_0^2$	$Z = \frac{2\Delta T_{\max}}{(T - \Delta T_{\max})^2}$

В таблице  $\alpha$  - коэффициент термо-э.д.с.,  $R$  – электрическое сопротивление,  $k$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности,  $Z$  – добротность,  $T_0$  – температура холодного спая.

### ***Каскадное охлаждение***

Представим, что величина  $Q_0$  достаточна для данных целей, однако величина  $\Delta T_{\text{раб}}$  для нужд потребителя недостаточна. Причем необходимо, чтобы  $\Delta T_{\text{раб}}$  было

даже выше  $\Delta T_{\max}$  (например, нужно получить  $T_x = -70$  °С, а батарея может обеспечить не ниже  $-50$  °С). В этом случае можно поместить одну термобатарею на другую (рис.12). Каскадирование - способ добиться того, чтобы  $\Delta T_{\text{раб}} > \Delta T_{\max}$ .

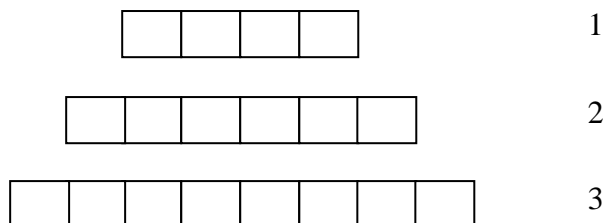


Рис.12. Каскадирование термоэлементов

Формулы (9) характеризуют энергетический баланс в многокаскадной термобатарее. Индексы 1-3 соответствуют номерам каскадов;  $W$ - электрическая мощность

$$Q_0 = Q_1, Q_{1-2} = Q_1 + W_1, Q_{2-3} = (Q_1 + W_1) + W_2. \quad (9)$$

Почему количество термоэлементов должно возрастать с увеличением номера модуля? Все дело в теплоте Джоуля. На горячем спае самой нижней термобатареи выделяется самое большое количество теплоты, поскольку теплота Джоуля суммируется, и каждый каскад вносит свой вклад. Каскадирование позволяет существенно увеличить  $\Delta T_{\text{раб}}$  каскада термобатарей. Так, если однокаскадная термобатарея сегодня не может обеспечить разности температур между спаями более 73 градусов, то 7-каскадная уже способна дать 145 градусов разности температур.

Если учесть, что холодильный коэффициент каскадной батареи равен

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{W_1 + W_2 + \dots + W_n} = \frac{Q_1}{W} \quad (10)$$

$$Q_{n+1} = W + Q_1 \quad (11)$$

то может быть получена следующая зависимость между холодильным коэффициентом батареи и холодильными коэффициентами каскадов:

$$1 + \frac{1}{\varepsilon_1} = \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_1}\right) \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2}\right) \dots \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_n}\right)$$



или

$$\varepsilon = \frac{1}{\prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_i}\right) - 1} \quad (12)$$

Анализ выражения (12) показывает, что для термобатареи, состоящей из  $n$  каскадов и имеющей перепад температур  $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_n$ , максимального значения холодильный коэффициент достигнет при условии  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_n = \varepsilon_0$ . В этом случае

$$\varepsilon = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\varepsilon_0}\right)^n - 1}$$

Таким образом, имеются два пути увеличения  $Q_0$ :

- последовательное соединение термоэлементов в батарею;
- каскадирование.

## **РАБОТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ НАГРЕВА**

Обратимость эффекта Пельтье по току позволяет использовать термоэлемент (термобатарею) и для целей подогрева. В этом случае на рабочем (горячем) спае будет уже два полезных эффекта - Пельтье и Джоуля - при одном «вредном» - теплопроводности, уводящей теплоту к холодному спаю. В этом случае равновесие наступит, когда эффекты Пельтье (нагрев) и Джоуля (нагрев) будут скомпенсированы теплопроводностью (охлаждение). Поскольку в этом случае  $|Q_x| = 1/2|Q_{\text{П}}|$ , вторая половина  $Q_{\text{П}}$ , равная  $1/2 Q_{\text{дж}}$  остается на горячем спае. Таким образом, в режиме  $\Delta T_{\text{max}}$  термоэлемент будет эквивалентен джоулеву нагревателю. Его энергетический параметр, называемый отопительным коэффициентом, будет равен единице (100%).

При  $\Delta T_{\text{раб}} < \Delta T_{\text{max}}$  термоэлектрический нагревательный тепловой насос будет экономичнее джоулевых нагревателей

$$K = 1 + \varepsilon_0.$$

При малой рабочей разности температур (10-20 К) отопительный коэффициент может достигать значений 2-3 и более.

## РАБОТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Теплоэнергетические полупроводниковые приборы, основанные на использовании термоэлектрических эффектов Зеебека, Пельтье и Томсона предназначенные для непосредственного преобразования теплоты в электричество и обратно, называются полупроводниковыми термоэлектрическими преобразователями энергии (ТЭГ), а устройство, содержащее два или более термоэлемента, термоэлектрической батареей модулем. Полупроводниковые термоэлектрические батареи используются в устройствах термоэлектрических генераторов и холодильников (еще их называют полупроводниковыми холодильниками). Термоэлектрический генератор (рис.13) состоит из блока термоэлементов электрически соединенных между собой и образующих термоэлектрическую батарею, нагревателя, обеспечивающего приток теплоты, к горячим спаям, и системы охлаждения холодных спаев, который в комплексе называется термоэлектрическим модулем. Положительные ветви термоэлементов изготавливаются из сплава сурьмы с цинком (ZnSb) или сплава сурьмы, теллура и висмута. Отрицательные ветви изготавливают либо из сплава висмута с сурьмой, либо из константановой проволоки. В настоящее время разработано и исследовано многочисленное количество других материалов для ветвей термоэлементов.

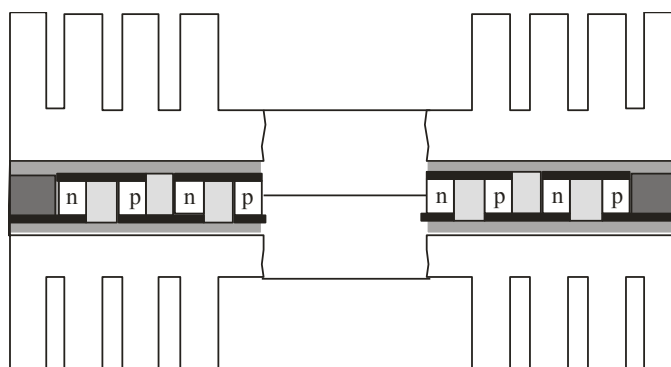


Рис.13. Схематическое изображение термоэлектрического модуля полупроводникового термоэлектрического генератора

Рассмотрим работу термоэлемента в режиме генерации электрической энергии. Классический термоэлемент состоит из двух ветвей, которые электрически с помощью коммутационных элементов соединены последовательно. Ветви изготовлены из термоэлектрического материала: один р-, а другой n-проводимости. Наличие ветвей разных типов проводимости позволяет складывать их термо-э.д.с. с помощью коммутационных элементов, припаиваемых непосредственно на ветви термоэлемента. К коммутационным элементам на холодном спае термоэлемента подсоединяется полезная нагрузка  $R$ .

Если теперь к горячему спаю подвести поток теплоты  $Q_T$  при температуре  $T_T$ , а от холодного спаю отвести поток тепла  $Q_X$  при температуре  $T_X$ , то под действием возникшего перепада температур на спаях термоэлемента  $\Delta T$ , согласно эффекта Зеебека, возникает термо-э.д.с.  $E_{TЭ}$ . В предположении независимости термоэлектрических свойств от температуры

$$E_{TЭ} = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T,$$

где  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  – абсолютные величины коэффициентов термо-э.д.с. ветвей р- и n-типов соответственно.

Под действием термо-э.д.с. по замкнутой цепи термоэлемента, включая полезную нагрузку  $R$ , течет ток  $I$ .

Внутреннее сопротивление термоэлемента  $r_{TЭ}$  определяется сопротивлениями ветвей соответственно  $r_p$  и  $r_n$ , коммутационными сопротивлениями спаев  $r_k$ :

$$r_{TЭ} = r_p + r_n + r_k.$$

Если выразить сопротивление коммутации в виде относительной величины

$$m = \frac{r_k}{r_p + r_n},$$

а величины сопротивлений ветвей – через их геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов, то

$$r_{TЭ} = \left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1 + m),$$

где  $\rho_p$  и  $\rho_n$  - удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно р- и n-типов;  $\ell$  - длина ветвей;  $S_p$  и  $S_n$  - площади поперечных сечений ветвей соответственно р- и n-типов.

Общее сопротивление термоэлектрической цепи равно  $r_{тэ}+R$ . Полезную нагрузку целесообразно представить в виде относительной величины  $M=R/r_{тэ}$ , которую будем называть относительной полезной нагрузкой. Таким образом, общее сопротивление цепи равно  $r_{тэ}(1+M)$ . Следовательно, согласно закону Ома, ток в цепи термобатареи

$$I = \frac{E_{тэ}}{(1+M)r_{тэ}},$$

а рабочее напряжение на нагрузке

$$U = \frac{M}{1+M} E_{тэ}.$$

Отсюда легко получить полезную электрическую мощность, вырабатываемую термобатареи:

$$W_{тэ} = UI = \frac{M}{(1+M)^2} \frac{E_{тэ}^2}{r_{тэ}} = \frac{M}{(1+M)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1+m)}.$$

Величина  $\frac{E_{тэ}^2}{r_{тэ}}$  представляет собой максимальную электрическую мощность, вырабатываемую в цепи термоэлемента, когда сопротивление этой цепи минимально, т. е.  $R = 0$ . Этот случай соответствует режиму короткого замыкания.

Величина  $\frac{M}{(1+M)^2}$  учитывает уменьшение электрической мощности за счет необратимых джоулевых потерь на внутреннем сопротивлении термоэлемента. Это второй источник необратимых потерь в реальной конструкции термоэлемента. Вместе с потерями теплоты, обусловленными конечной величиной теплопроводности термоэлектрических материалов, джоулевы потери составляют основные необратимые процессы в термоэлементе.

Вышеприведенные формулы дают возможность вычислить все электрические параметры термобатареи, если известны его размеры, свойства материалов и перепад температур на нем.

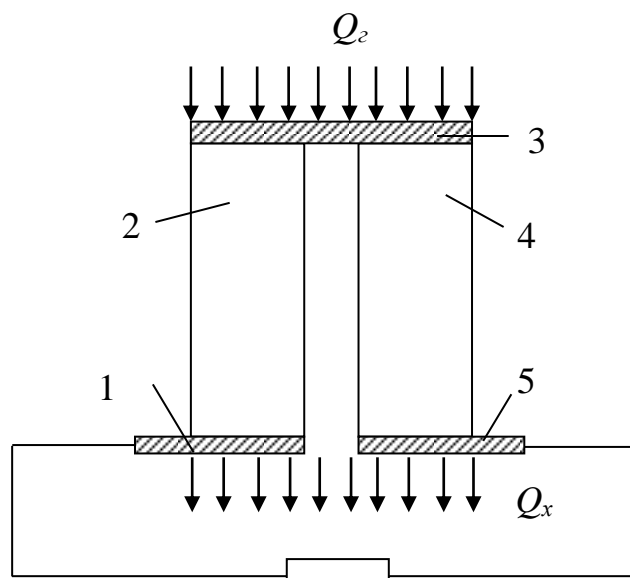


Рис.14. Схематический разрез ТЭ термоэлектрического генератора.

Основным параметром, характеризующим термоэлектрический генератор, является к.п.д. ( $\eta$ ) - отношение выходной полезной электрической мощности  $P$  к тепловой входной мощности

$$\eta = P / Q \quad (13)$$

К.п.д. термогенератора зависит от:

- 1) свойств, применяемых материалов (удельного сопротивления  $\rho$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , и коэффициента термо-э.д.с.  $a$ );
- 2) разности температур между горячими и холодными спаями термоэлементов  $\Delta T = (T_r - T_x)$ ;
- 3) отношения сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению  $r_{ТЭ}$  термоэлемента.

Максимальное значение к.п.д. термоэлемента из данных двух материалов определяется выражением:

$$\eta_{\max} = \frac{(T_1 + T_2)\sqrt{1 + ZT_{\text{cp}}} - 1}{T_2\sqrt{1 - ZT_{\text{cp}}} + (T_1 / T_2)} \quad (14)$$

где  $T_{\text{cp}} = (T_1 + T_2)/2$ ,  $Z = (a_1 + a_2)^2 / (\sqrt{\lambda_1 \rho_1} \sqrt{\lambda_2 \rho_2})$

Смысл параметра  $Z$  можно понять, исходя из следующих рассуждений. Термо-э.д.с.  $\varepsilon$  при разности температур  $\Delta T$  тем больше, чем больше коэффициент  $\alpha$ , а максимальная мощность на нагрузке пропорциональна величине  $\alpha^2 / \rho$ , что то же самое  $\alpha^2 / \sigma$ , где  $\sigma$  - удельная проводимость вещества. Разность температур ( $\Delta T = T_r - T_x$ ) определяется теплопроводностью ветвей термобатарей  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Чем меньше значение  $\lambda$  тем больше к.п.д. преобразователя.

Полупроводниковые термоэлементы имеют большую термо-э.д.с., чем термоэлементы из проводников, а теплопроводность полупроводников меньше, чем металлов. Поэтому термогенераторы из полупроводниковых материалов обладают сравнительно большим к.п.д. (10 - 15 %), проводниковые (0,1%). Они применяются для измерения температур и в качестве небольших источников питания. В настоящее время термоэлектрический генератор применяется в комбинации с изотопными источниками теплоты в космических аппаратах, автоматических метеостанциях, ретрансляционных станциях, указательных буйках, автоматических маяках и других областях науки и техники.

## **СПЕЦИАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Оба главных термоэлектрических эффекта (Пельтье и Зеебека), рассмотренные выше, имеют характерные физические особенности, которые послужили основой новых физико-математических моделей, подтвержденных экспериментально в виде специальных режимов работы охлаждающих и электрогенерирующих систем. Речь идет о нестационарных (импульсных) режимах работы термоэлементов Пельтье и Зеебека.

Рассмотрим кратко физическую картину нестационарного режима термоэлектрического охлаждения. Известно, что эффект Пельтье

имеет место на контакте разнородных проводников тока, т. е. это «эффект поверхности». Эффект Джоуля - это тепловой эффект в объеме проводника тока. Когда в тепловом балансе холодного спая термоэлемента мы записываем половину теплоты Джоуля, поступающей на спай, как отрицательный эффект мы имеем в виду достаточно длительное (в электронном масштабе) время, за которое порции джоулевой теплоты из центральных областей ветви термоэлемента достигнут холодного спая. В течение этого времени эффект Пельтье сохраняет свое «холодное» преимущество перед эффектом Джоуля. И если в этот момент времени через ветви термоэлемента пропустить ток выше  $I_{\max}$  ( $I_{\text{опт}}$ ), то может возникнуть эффект кратковременного охлаждения до уровня температур ниже максимально достигаемых в режиме  $I_{\max}$ . Более того, в конце этого временного промежутка можно дать еще большее значение тока и получить (уже на совсем короткое время) еще один «пик холода». Схематически такой режим представлен на рис.14. На рис.15, а представлен стационарный режим с переходом в нестационарный при подаче серии импульсов тока  $I > I_{\max}$ . На рис.15, б показан стационарный режим работы с переходом в нестационарный с экспоненциально возрастающим током.

Экспериментальные исследования, выполненные в 20-х годах XX века, показали возможность на короткое время (секунды и даже десятки секунд для термоэлементов с высотой ветвей 20-40 мм) достижения  $\Delta T > \Delta T_{\max}$ . При этом максимальные разности температур достигали 110-115° С, что сравнимо с возможностями трехкаскадных термобатарей, работающих в стационарном режиме. Последующий прогрев термоэлемента до температур 50-60 °С не влиял на его дальнейшее использование.

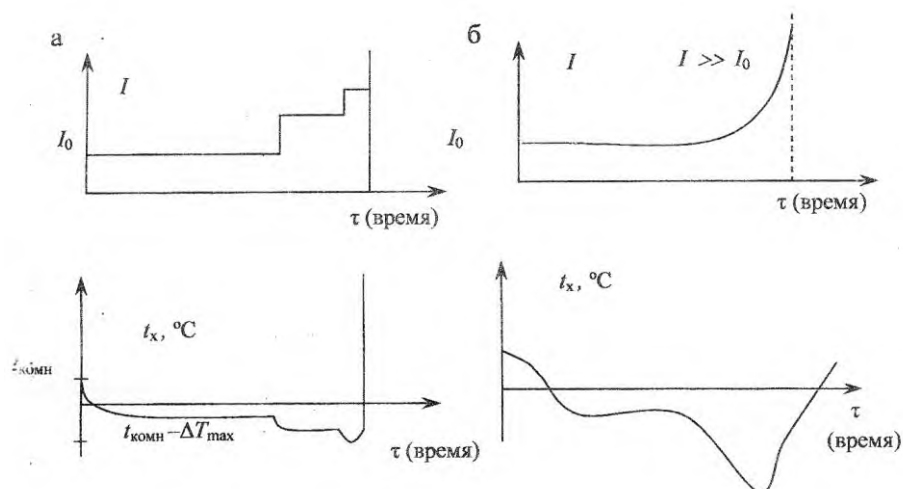


Рис. 15. Нестационарные режимы работы охлаждающего термоэлемента

Возможность применения ТЭГ в нестационарном режиме обусловлена тем, что величина электродвижущей силы, возникающей в ветвях ТЭГ, не зависит от формы градиента температур в ветвях, важна разность температур. При этом температура холодного спая может быть близка (пространственно) к температуре горячего спая. Поэтому, если на горячий спай ТЭГ подать мощный кратковременный тепловой импульс, необходимая термоэлектродвижущая сила возникает почти мгновенно и поддерживается постоянной в течение промежутка реального времени (вплоть до нескольких десятков секунд). При этом энергетические параметры ТЭГ могут оказаться даже выше, чем в стационарном режиме, так как большая часть его ветвей находится при температурах, близких к комнатным, где термоэлектрические параметры вещества имеют более высокие значения.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в 70-х годах, дали ряд интересных и разнообразных вариантов возможного использования термоэлектрического генератора в нестационарном режиме.

Следует, однако, отметить, что до настоящего времени нестационарные режимы термоэлектрических охладителей и термогенераторов не получили практического применения.



## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Бытует мнение, что самым главным в производстве модулей является качество полупроводникового материала. На самом деле в современном производстве термоэлектрических модулей одинаково важны и качество материала, и технология изготовления модулей, потому что плохая технология не в состоянии реализовать высокое качество полупроводникового материала.

Современная технология должна допускать механизацию сборки модулей, поскольку в конечном итоге для успешной конкуренции важны себестоимость производимых модулей и объем их производства.

На рис.16 представлено схематическое изображение модуля. Модуль состоит из двух плоских теплопереходов 4 и 6, которыми являются керамические пластины на основе  $Al_2O_3$ , реже  $AlN$ . С одной стороны теплоперехода имеются коммутирующие пластины (шины) 3, которые соединяют между собой ветви n- и p-типов 2, 1. Необходимая топология в расположении коммутирующих пластин получается либо фотолитографскими методами, либо офсетной печатью, приклейкой пластин к керамике теплопроводными клеями. Соединение шин с ветвями термоэлемента осуществляется пайкой. Выводные шины могут как выходить за габариты теплоперехода, так и размещаться на нем. К ним припаиваются выводные провода необходимой длины и сечения.

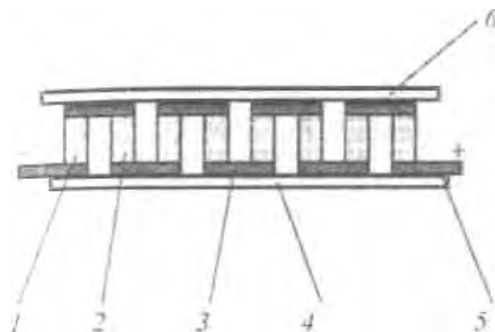


Рис. 16. Схематическое изображение модуля: 1 – ветвь n-типа; 2 – ветвь p-типа; 3 - коммутационная шина; 4 - нижний теплопереход; 5 - выводная шина; 6 - верхний теплопереход

У слаботочных модулей провода могут быть одножильными (из меди или никеля), а у сильноточных модулей - только многожильными из меди, чтобы обеспечить необходимую эластичность проводов.

### ***Теплопереходы***

Основные требования, предъявляемые к теплопереходу: высокая теплопроводность керамики, точность позиционирования рисунка и точность габаритов самого теплоперехода. Для подавляющего большинства модулей используется керамика на основе  $Al_2O_3$  (чаще всего с 96 %-ным содержанием  $Al_2O_3$ ), имеющая теплопроводность 26-28 Вт/(мК). В тех случаях, когда нужна более высокая теплопроводность, используют керамику из  $AlN$  с теплопроводностью около 200 Вт/(м·К). Ранее широкое распространение в СССР имели теплопереходы из оксида бериллия с теплопроводностью около 150 Вт/(м·К). Сейчас они не используются из-за дороговизны и вредного воздействия  $BeO$  на человеческий организм.

Останавливаться на том, как делаются теплопереходы и как на них наносится рисунок, не имеет смысла, потому что нет ни одной фирмы, производящей термоэлектрические модули, которая делала бы это сама. Все фирмы покупают готовые теплопереходы. Контроль готовых теплопереходов осуществляют по соответствию размеров и по адгезии металлического рисунка к керамике, которая должна быть не менее 2 кг/мм<sup>2</sup>.

### ***Коммутация ветвей термоэлемента***

Основной элемент технологии изготовления термоэлектрического модуля, который определяет его качество, - это технология коммутации ветвей термоэлемента. Если модуль 40х40 мм содержит 127 пар, то необходимо сделать свыше 500 паек одинаково высокого качества. Причем высокая термоэлектрическая эффективность материала проявляется в полной мере только при качественном выполнении этих паек.

Пайку чаще всего осуществляют соединениями, которые содержат элементы IV группы периодической системы Менделеева. Олово и свинец являются электрически активными примесями - акцепторами. С течением времени они диффундируют в термоэлектрический материал и ухудшают его свойства. Поэтому все-

гда встает задача уменьшения диффузии припоя в полупроводниковый материал ветви термоэлемента. Для этого между припоем и термоэлектрическим материалом располагают различные так называемые антидиффузионные прослойки (или покрытия), которые препятствуют диффузии химических элементов из припоя или из материала шин в полупроводник.

Исторически сложилось так, что вначале в качестве антидиффузионного покрытия использовался припой на основе висмута и сурьмы. Это висмут с добавкой 4-5 % сурьмы. Сурьма добавляется для того, чтобы увеличить прочность припоя и улучшить залуживаемость термоэлектрического материала. Температура плавления припоя -около 270° С (близка к температуре плавления висмута). В СССР большинство термоэлектрических модулей собиралось таким образом, что сначала на торец ветви наносился слой припоя висмут-сурьма, а уже на него - слой другого припоя (обычно олово-висмут) с температурой плавления 139° С. Такой метод пайки (двухприпойная технология) был хорош тем, что получался сравнительно толстый суммарный слой припоев, который разгружал полупроводниковый материал от механических напряжений. Данная технология пайки позволяла модулю выдерживать значительные механические нагрузки, большее количество циклов включения-выключения и т. д.

Недостатками способа являются:

1. Плохие антидиффузионные свойства. Это связано с тем, что висмут имеет низкую температуру плавления, а значит, связи в соединении непрочные. Следовательно, коэффициенты диффузии легирующей примеси сквозь висмут-сурьму достаточно высоки. Поэтому рабочие температуры горячего конца ветви для такого способа коммутации ограничены 80 °С.

2. Данная технология коммутации трудоемка, так как приходится использовать только ручную сборку, причем специалистами очень высокой квалификации, на обучение которых требуется затратить много времени. Даже использование припойных паст Bi-Sb не может значительно облегчить ситуацию.

Другой способ защиты материала термоэлемента - нанесение на торцы ветвей металлических антидиффузионных покрытий. Этот способ получил широ-

кое распространение как в России, так и на Западе. Через слой нанесенного металла диффузия элементов IV группы, или вообще легирующих примесей, идет сравнительно медленно, и рабочая температура горячего конца ветви может увеличиваться на 40-60 °С по сравнению с антидиффузионной прослойкой из Bi-Sb.

Основной материал для создания таких покрытий - никель, который хотя и не является самым лучшим, но достаточно надежно защищает термоэлектрический материал от проникновения инородных примесей.

Используются два способа нанесения никеля.

1. Нанесение химического никеля, когда с помощью химических реакций создается покрытие из металлического никеля на поверхности полупроводника. Это довольно простой способ, так как нет необходимости в подводе электрического тока, в обеспечении равенства плотности тока в отдельных пластинах и т. д. Однако качество нанесения химического никеля зависит от подготовки поверхности полупроводника, в особенности от качества ее отмывки от следов органических веществ, которые заметно ухудшают адгезию металла к полупроводнику. Поэтому процесс оказывается в конечном итоге довольно «капризным».

2. Гальванический никель. Для нанесения гальванического никеля также приходится готовить поверхность (в основном химическим травлением), что является достаточно простым процессом и не требует особой тщательности его проведения. В настоящее время гальванический способ нанесения никеля находит все более широкое распространение.

Что касается толщины наносимых слоев никеля, то надо иметь в виду, что при толщине менее 1,5 мкм никель может растворяться в припое при его нанесении. Обычно толщина металла составляет 3-5 мкм. Использование таких прослоек позволяет поднять рабочие температуры термоэлектрических охлаждающих модулей до 120-150 °С. При желании работать в области более высоких температур нужно либо увеличивать толщину антидиффузионного покрытия, либо использовать для него такие металлы, как Mo, W.

Существуют и другие способы нанесения антидиффузионного покрытия, например плазменным распылением. Этим способом можно получать толстые ан-

тидиффузионные покрытия, и он используется, в основном, для термогенераторов, где надо иметь особенно хорошую защиту от диффузии примесей из припоя и коммутационных пластин.

Наряду с хорошими антидиффузионными свойствами антидиффузионные покрытия должны еще иметь хорошую адгезию к термоэлектрическому материалу. Адгезию измеряют усилием отрыва покрытия, относя его к единице площади отрываемого покрытия. Припой висмут-сурьма обеспечивает величину адгезии на уровне прочности материала 2-3 кг/см<sup>2</sup>. Адгезия никелевого покрытия хуже. Причем она лучше к материалу и-типа, в котором нет выделений второй фазы, и хуже к материалу р-типа, где имеются отдельные включения второй фазы в виде эвтектики теллура. В специальной литературе указываются очень большие значения адгезии никелевых покрытий - до 2-3 кг/мм<sup>2</sup>. Однако эти цифры приводятся для больших площадей покрытия (порядка до 1 см<sup>2</sup>), на которых локальные изменения адгезии усредняются. Для площадей 1-2 мм<sup>2</sup> величина адгезии около 1 кг/мм<sup>2</sup> вполне приемлема.

Следует особенно подчеркнуть важность величины адгезии для свойств получаемого модуля, причем не только в плане механической прочности, но и в плане термоэлектрических свойств, так как плохая адгезия приводит к увеличению контактного сопротивления и: уменьшению величины  $Z$  модуля

### ***Технология изготовления ветвей термоэлектрических модулей***

Если антидиффузионное покрытие состоит из припоя Bi-Sb, то его проще наносить на ветви. Если же такое покрытие делается из никеля или другого материала, то проще сначала термоэлектрический материал разрезать на пластины (шайбы) и уже затем наносить на них покрытие. После этого пластины следует разрезать на ветви. Иногда поверх никелевого антидиффузионного покрытия наносят гальваническое олово для того, чтобы не окислялся никель, и для облегчения последующей пайки. Имея общие представления о методах коммутации ветвей термоэлементов, рассмотрим способы их изготовления резкой из слитков термоэлектрического материала.

#### *Электроэрозионная резка*

Исторически сложилось так, что в СССР ветви получали, главным образом, методом электроэрозионной резки (рис.17). Этот метод заключается в том, что на латунную, молибденовую или вольфрамовую проволоку 3 в воде, керосине или другой жидкости подается электрический ток в виде чередующихся импульсов. Между этой проволокой и разрезаемым образцом 1 существует искровой зазор, который отслеживается контролирующей системой. В результате проскакивания искры в момент импульса напряжения материал, который требуется разрезать, разрушается, а продукты эрозии удаляются струей жидкости 4.

Большинство электроэрозионных станков предназначено для резки прочных материалов, таких, как, например, сталь. Термоэлектрический материал, имеющий невысокую механическую прочность, нельзя резать на таких станках. Поэтому необходимо использовать станки, предназначенные для резки полупроводников, либо приспособливать существующие станки.

Иногда все же удается путем подбора режимов резания приспособить обычные станки для резки термоэлектрического материала, однако скорость резания у них оказывается меньше, чем у специализированных станков.

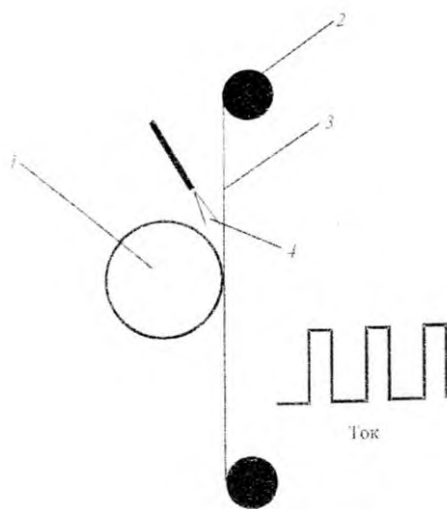


Рис.17. Принцип работы электроэрозионного станка: 1- разрезаемый образец; 2- твердосплавные направляющие; 3- режущая нить; 4- охлаждающая жидкость

Достоинство электроэрозионной резки состоит в том, что метод универсален, достаточно производителен, прост и гибок в переналадке. Для резки слитка термоэлектрического материала непосредственно на ветви данный способ не имеет себе равных, так как ветви получаются в процессе одной операции. Этот метод применяется и для резки слитков на пластины. Для указанной цели он хорош тем, что обеспечивает минимальные органические загрязнения на поверхности реза и хорошую структуру самой поверхности, поэтому при этом способе резки легче получить высокую адгезию антидиффузионного покрытия к термоэлектрическому материалу.

#### *Проволочная резка*

Схематически станок проволочной резки изображен на рис.18. Имеются четыре валика 1, 2, на которые нанесены с определенным шагом канавки, в которые укладывается стальная проволока 6. Два валика 1 являются ведущими, а два 2 - ведомыми. Эти валики осуществляют вращательное движение «вправо - влево», причем с преобладанием движения в какую-то одну сторону для того, чтобы происходила постоянная перемотка проволоки. Применяют проволоку стальную марки Ст80 диаметром 0,15-0,18 мм. Лучше использовать проволоку, покрытую гальваническим слоем латуни, для лучшего внедрения в нее абразива. Резка осуществляется абразивом, который в виде взвеси 3 подается в область резания. Размеры зерна -15-30 мкм. Разрезаемые детали 4 клеятся на столике 5. Применяют проволоку стальную марки Ст80 диаметром 0,15-0,18 мм. Лучше использовать проволоку, покрытую гальваническим слоем латуни, для лучшего внедрения в нее абразива. Резка осуществляется абразивом, который в виде взвеси 3 подается в область резания. Размеры зерна -15-30 мкм. Разрезаемые детали 4 клеятся на столике 5.

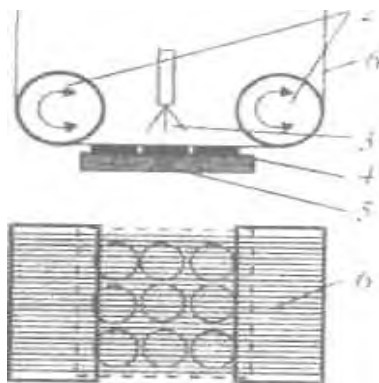


Рис.18. Схема станка проволочной резки: 1 - валики ведущие; 2 - валики ведомые; 3 - охлаждающая жидкость с абразивом; 4 - пластины или слитки полупроводникового материала; 5 - стол; 6 - проволока

Этот метод можно применять при резке слитков на пластины, а пластин - на ветви. Метод проволочной резки разрабатывался применительно к твердым материалам. Мягкие материалы, к которым относятся и термоэлектрические, резать сложнее, так как возникает проблема с попаданием абразива под проволоку. Если абразив не попадает или поступает плохо, то сама стальная нить начнет резать термоэлектрический материал, и рез получается неровный. Однако при правильно подобранных режимах метод оказывается удобным. Скорость резки во всех методах приблизительно одинаковая, однако одновременное выполнение большого количества резов делает этот метод очень производительным.

Недостатки метода состоят в следующем. Взвесь с абразивом постоянно попадает не только в область реза, но и на валики, которые, вращаясь в различные стороны, разбрызгивают взвесь в некоторой зоне около станка, загрязняя ее. Кроме того, перенастройка станка вязана с заменой валиков и перемоткой проволоки, что отнимает довольно много времени. Поэтому станки проволочной резки удобны в условиях массового производства, когда перестройка станков довольно редка. Недостатком метода является и относительно небольшой срок службы пластмассовых валиков и подшипников из-за постоянного воздействия на них абразива.

#### *Дисковая резка*

При этом способе резка осуществляется тонкими алмазными дисками, вращающимися с высокой скоростью (рис.19). Диаметр диска до 40 мм. Скорость



вращения около 20-40 тыс. об. мин. Толщина дисков 60-120 мкм. Этим методом удобно производить резку пластин термоэлектрического материала на ветви.

Метод достаточно производителен, удобен в перенастройке, но требуется очень тщательная подборка режимов, так как термоэлектрический материал довольно вязок, и при резке диск тянет за собой материал, при этом образуется заусенец, который портит внешний вид ветви. Подборка режима заключается в том, чтобы подобрать толщину и скорость вращения диска таким образом, чтобы получать минимальные по размерам заусеницы.

Приклейка ветвей осуществляется пичеином или полимерными смолами с добавлением абразивного порошка для защиты диска от засаливания.

К недостаткам метода следует отнести ограничения на толщину разрезаемых пластин и невозможность резки слитков на шайбы.

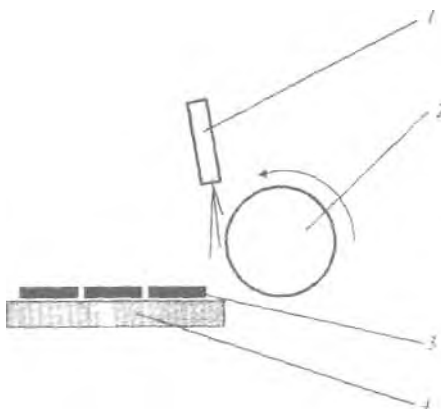


Рис.19. Дисковая резка: 1 - охлаждающая жидкость; 2 - алмазный диск толщиной 40-100 мкм; скорость вращения 20-40 тыс. об. мин; 3 - пластины; 4 - столик

### *Резка внутренней режущей кромкой*

Еще один способ резки - резка диском с внутренней режущей кромкой (рис.20), хотя неизвестно, применяется ли где-либо данный метод в России для резки термоэлектрического материала. В этом методе режущий диск 1 представляет собой кольцо из тонкой стали, на внутренней поверхности кольца имеется кромка, на которую нанесен алмазный режущий слой. Кольцо растягивается специальной системой болтов на шпинделе, вращающемся с высокой скоростью, и

внутренней частью диска режет материал. Метод широко применяется для резки пластин Si, GaAs и других из слитков.

При использовании двухприпойной технологии пайки ветвей Данный метод применим, но если на нарезанные шайбы термоэлектрического материала наносить металлическое антидиффузионное покрытие, то последнее, как правило, будет иметь плохую адгезию к материалу. Это связано с тем, что в процессе резки по всей плоскости реза образуется толстый нарушенный слой, который необходимо удалять либо механическим, либо химическим способом.

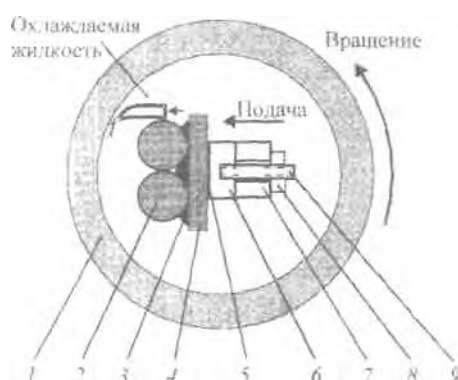


Рис.20. Резка внутренней режущей кромкой: 1 - диск с внутренней режущей кромкой; 2 - слитки; 3 - клей; 4 - стол; 5-9 - система крепления стола

### **Изготовление коммутационных шин**

Имеются два способа изготовления коммутационных шин.

1. Для изготовления слаботочных охладителей на металлизированную керамику наносят гальваническую медь. Затем методами фотолитографии получают нужную топологию рисунка. Такой процесс обеспечивает хороший внешний вид изготовленного модуля.
2. При изготовлении сильноточных охладителей коммутационные шины расплавляют по заранее полученному рисунку на керамике. Сами шины изготавливают рубкой из плющенки, которую получают либо прокаткой медной проволоки, либо протягиванием через фильеру. Для предотвращения диффузии меди в материал ветви шины покрывают гальваническим никелем толщиной около 3 мкм, и для облегчения пайки поверх никеля наносят оловянное покрытие

толщиной 3 мкм.

В случае пайки модуля паяльником требования к точности изготовления шин не высоки: допуски составляют  $\pm 0,05$ . При механизированной сборке и пайке паяльными пастами требования к допускам должны быть почти в два раза жестче.

### Пайка модулей

Используемые в настоящее время припои для пайки модулей даны в таблице 2.

Таблица 2. Припои, используемые для пайки термоэлектрических модулей

Марка припоя	Sn, % вес.	Pb, % вес.	Bi, % вес.	Sb, % вес.	In % вес.	Температура плавления, °С
ПОВи	Остальные	-	57	-	-	139
ПОС-61	59-61	Остальные	-	-	-	183
ПОСу-0,5	Остальные	-	-	0,5-1	-	212
ПОИн	Остальные	-	-	-	51	121
ПОСу	Остальные	-	-	4-5	-	240

При пайке по металлическому антидиффузионному покрытию можно использовать все припои, приведенные в таблице, в то время как при пайке с использованием двухприпойной технологии мы ограничены в выборе припоя, который кладется поверх Bi-Sb. Нельзя, например, применять обыкновенный припой олово - свинец, так как при сплавлении двух припоев образуется тройная эвтектика с температурой плавления  $95^{\circ}\text{C}$  (висмут - сурьма - свинец).

Флюс, применяемый для пайки, должен быть малоактивным и водосмываемым. Самый распространенный тип флюса - это 2,5 %-ный раствор нашатыря ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) в глицерине.

Все припои на спаиваемые поверхности наносят либо в виде пасты, либо в виде расплава паяльником. Пасты, используемые для пайки модулей, должны быть водосмываемыми.

### ***Принципы сборки модулей***

Для пайки ветви укладывают в колодцы в матрице из силиконовой резины или металла, который не смачивается припоем (например, титана). В последнем случае матрица может быть разборной. Примерный вид матрицы дан на рис.21. Силиконовая резина выдерживает температуру до 250 °С, что позволяет провести с ее помощью большое количество паек до ее разрушения. Кроме того, она обладает низкой теплопроводностью, что облегчает прогрев места пайки.

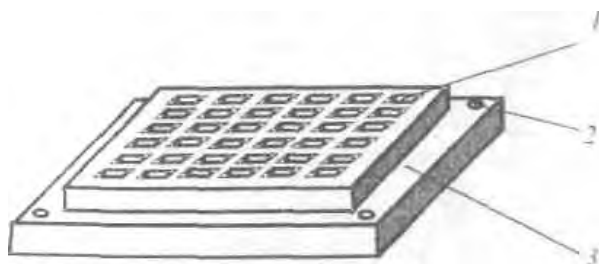


Рис.21. Сборочное приспособление - матрица: 1 - колодцы; 2 - отверстия для штифтов; 3 - матрица

Укладка ветвей при ручной сборке осуществляется пинцетом. Для сборки микромодулей такая технология является единственной. При сборке массовых модулей с ветвями сечением 1,4x1,4 мм или 1x1 мм<sup>2</sup> некоторые производители используют механизированную укладку ветвей.

Если при изготовлении модуля используются коммутационные шины из плющенко, то при ручной сборке их укладывают на теплопереходе, потом керамику нагревают до температуры плавления припоя, а шины точно ориентируются по рисунку силами поверхностного натяжения припоя.

При пайке модуля берут основание 4 (рис.22) со штифтами 3. На них надевают матрицу 2, в которую вставляют ветви термоэлектрического материала. Затем на штифты надевают направляющую для теплоперехода 1. В направляющую вставляют теплопереход с распаянными шинами. На теплопереход кладут горячий паяльник с жалом, соответствующим форме теплоперехода. После выдержки в течение необходимого для расплавления припоя времени паяльник снимают. Керамика с припаянными ветвями остывает в сборочном приспособлении под не-

большим прижимом. Затем полученный таким путем полумодуль вынимают из матрицы, кладут на основание в направляющей рамке, на штифты надевают еще одну направляющую рамку, в которую помещают другой теплопереход, который припаивают к ветвям уже описанным способом.



Рис. 22. Схема сборки модуля: 1 - направляющая рамка; 2 - матрица; 3 - направляющие штифты; 4 - основание

После сборки модуль промывают в проточной воде, а затем - в ультразвуковой ванне. Далее производят выравнивание модулей по высоте методом шлифовки.

### ***Шлифовка модулей***

Производители используют две системы шлифовки.

#### ***1. Шлифовка на плоскошлифовальном станке.***

На магнитном столе укладывают модули, заполняя ими весь стол. Плотное прижатие модулей к столу обеспечивается с помощью плоских металлических прокладок из магнитного материала (рис.23) в виде «ласточкиного хвоста», которые при включении магнитного поля плотно прижимают термоэлектрические модули к столу.

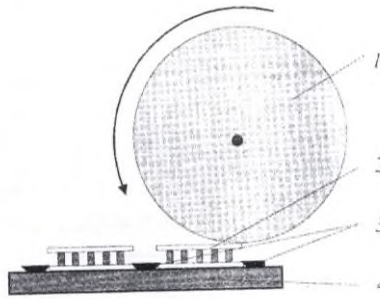


Рис. 23. Шлифовка модулей на плоскошлифовальном станке: 1 - алмазный диск; 2 - шлифуемые модули; 3 - металлические прокладки в виде «ласточкиного хвоста»; 4 - стол

Для шлифовки используется алмазный диск с органическим связующим и зерном 10-20 мкм. В качестве охлаждающей жидкости используется вода. Для уменьшения коррозионного действия в воду добавляют присадки в следующих пропорциях: тринатрийфосфат - 0,6 %, бура - 0,3 %, кальцинированная сода - 0,25 %, нитрат натрия - 0,1 %.

Шлифовку производят обычным для этого метода способом: сначала с одной стороны, а затем модули переворачивают и шлифуют с другой стороны. Сам метод прост и недорог. С его помощью легко шлифовать большие партии модулей, приводя их к одному размеру. Длительность цикла шлифовки обусловлена не длительностью процесса шлифования, а временем установки модулей на стол.

## *2. Шлифовка на станках двухсторонней шлифовки пластин полупроводниковых материалов.*

Станок (рис.24) состоит из двух чугунных планшайб 1, 4 диаметром 0,8x1,5 м, которые могут быть приведены во вращение в противоположных направлениях. Верхняя планшайба может подниматься для установки модулей. Между планшайбами помещаются сепараторы, в которых имеются колодцы для установки модулей. При вращении планшайб сепараторы также приводятся во вращательное движение. Шлифовка осуществляется за счет подачи взвеси абразивного материала в жидкости.

В качестве абразива используются микропорошки карбида кремния 15-30 мкм. Преимущество метода по сравнению со шлифовкой на плоскошлифовальном станке заключается в более быстром цикле шлифовки за счет более быстрой установки модулей и двухсторонней шлифовки. Недостатком метода является отсутствие прямого контроля за толщиной модуля. Процесс шлифовки до необходимой толщины задается длительностью процесса.

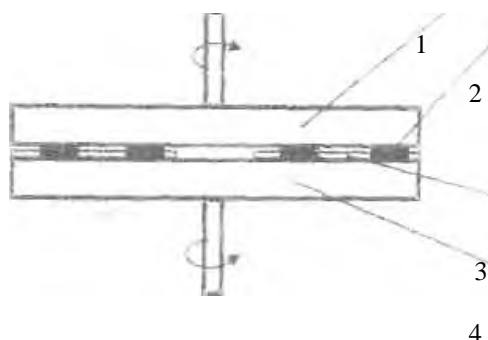


Рис.24. Шлифовка модулей на станке для двухсторонней шлифовки пластин: 1 - верхняя планшайба; 2 - модули; 3 - сепаратор; 4 - нижняя планшайба

После того как модуль собран и отшлифован, его вновь промывают. Далее к модулю припаивают провода, и он поступает на контрольные измерения.

## **КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Термоэлектрическое устройство состоит из трех основных узлов: собственно термоэлектрической батареи; системы теплоотвода от горячих спаев термобатареи; системы теплоподвода к холодным спаям термобатареи. Особенностью подобных устройств является непосредственный контакт горячих и холодных спаев термобатареи с системами теплоотвода и теплоподвода, что обуславливает тесную взаимозависимость термоэлектрических и теплотехнических характеристик и требует комплексного нахождения оптимальных конструктивных вариантов.

### ***Ветви термоэлементов.***

Основа любого термоэлектрического охлаждающего или нагревательного устройства — отдельные термоэлементы, соединяемые между собой по последовательной или параллельно-последовательной схеме. Отдельный (единичный) термоэлемент состоит из двух полупроводниковых ветвей, одна из которых обладает дырочной, а другая электронной проводимостью. Соединение ветвей в термоэлемент происходит посредством коммутационной пластины. Классификацию ветвей термоэлементов целесообразно проводить по форме их «токового» сечения. (Под «токовым» сечением подразумевается сечение, перпендикулярное направлению движения тока.) Практически формы ветвей и сечений могут быть любыми, но в настоящее время получили распространение ветви с прямоугольным, круглым, секторным и кольцевым сечениями площадью от 0,05 до 4 см<sup>2</sup>. Наиболее широко применяются ветви с прямоугольным сечением, технология изготовления которых хорошо освоена и не вызывает особых затруднений.

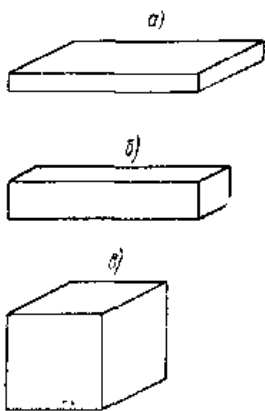


Рис.25. Ветви термоэлементов с прямоугольным сечением плоского типа (а), в форме параллелепипеда (б) и в форме куба.

На рис.25 показаны различные варианты выполнения ветвей с прямоугольным сечением: плоского типа, в форме параллелепипеда и куба. Выбор того или другого варианта обусловлен необходимостью обеспечить требования, касающиеся компактности, весогабаритных показателей, экономичности, допустимых величин тока и т. д. Применение ветвей с прямоугольным сечением ограничивает возможности конструктивного выполнения термобатарей, так как в этом случае обычно требуются плоские системы теплоотводов и теплоподводов, но позволяет получить высокую компактность за счет минимально возможных зазоров между ветвями.

Применение ветвей с круглым сечением плоского типа или в форме цилиндра не позволяет получить высоких значений коэффициента заполнения,



представляющего собой отношение площади всех полупроводниковых ветвей к общей площади термобатареи ( $\eta_{\text{зап}} = S/S_{\text{ТЭБ}}$ ). Это вызывает дополнительный тепловой поток от горячих спаев к холодным через изоляцию в зазорах между ветвями и уменьшает величину полезной холодопроизводительности термобатареи.

В ряде конструкций термоэлектрических устройств нашли применение ветви термоэлементов с кольцевым или секторным сечением. Несмотря на трудности технологического и конструктивного порядка применение кольцевых термоэлементов для судовых устройств следует признать наиболее перспективным, так как они позволяют использовать в качестве теплообменных поверхностей трубчатые элементы и получать компактные малогабаритные устройства.

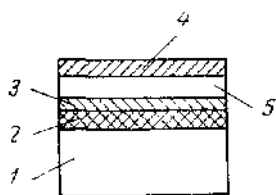


Рис.26. Ветвь с демпфирующей прокладкой, подготовленная к коммутации

1- полупроводник, 2 – специальный припой, 3, 4 – легкоплавкие припои, 5 – свинцовая пластина.

Для демпфирующих прокладок применяют свинцовые пластины толщиной 0,3-0,7 мм. Технология подготовки ветвей к коммутации в этом случае несколько усложняется. Ветвь термоэлемента залуживают специальным и легкоплавким припоем. Тем же легкоплавким припоем покрывают одну из сторон свинцовой пластины, другую ее сторону покрывают припоем, обладающим меньшей температурой

плавления. После этого пластину припаивают к ветви. На рис.26 показана подготовленная к коммутации ветвь термоэлемента с демпфирующей прокладкой.

Термоэлементы и коммутация. Под коммутацией обычно понимают соединение ветвей *p*- и *n*-типов с помощью коммутационной пластины в термоэлемент. Выбранная схема коммутации и сама коммутация должны обеспечивать:

- незначительное переходное электрическое сопротивление от одной ветви к другой;
- незначительное тепловое сопротивление от спаев к теплообменной поверхности;

- достаточную механическую прочность соединения; снятие или уменьшение тепловых, ударных, вибрационных и других нагрузок на ветви термоэлемента; технологичность сборки.

В качестве материала для коммутационных элементов в настоящее время применяют в основном медь, которая имеет высокую теплопроводность и низкое удельное электрическое сопротивление, а коммутацию производят методом непосредственной пайки коммутационных элементов к ветвям  $p$ - и  $n$ -типов с использованием легкоплавких припоев.

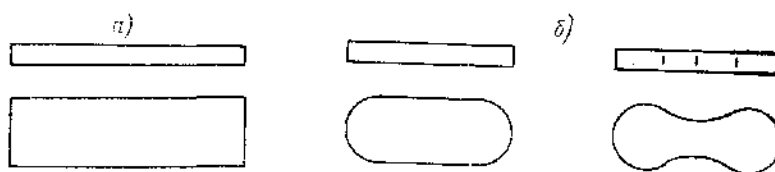


Рис.27. Коммутационная пластина для ветвей с прямоугольным (а) и с круглым (б) сечением.

Конструкция коммутационных элементов весьма разнообразна. Наиболее проста обычная медная пластина (рис.27), применяемая для коммутации ветвей с прямоугольным или круглым сечением. Предварительно коммутационная пластина залуживается тем же легкоплавким припоем, что и ветви термоэлементов. Подобная конструкция термоэлемента является жесткой и не устраняет в достаточной степени возникающих при работе механических напряжений. Чаще обычные медные пластины применяют со свинцовыми демпфирующими прокладками, которые, вследствие своей эластичности, разгружают ветви от напряжений. Конструкция термоэлемента с прокладками изображена на рис.28. При небольших перепадах температур иногда оказывается достаточным применение разрезных коммутационных пластин (рис.29), тонкая перемычка которых обладает упругостью и небольшим электрическим сопротивлением благодаря ее малой длине.

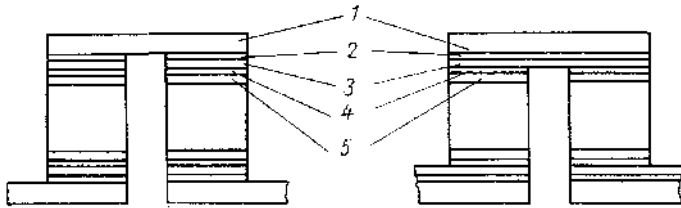


Рис.28. Термоэлемент с демпфирующей прокладкой  
1- коммутационная пластина, 2 и 4 – легкоплавкий припой, 3 – свинцовая прокладка, 5 – специальный припой.



Рис.29. Разрезная коммутационная пластина.

В ряде конструкций нашли применение компенсированные коммутационные пластины (рис.30, а) и пластины с различной длиной по холодной и горячей сторонам термоэлемента (рис.30, б). Обе конструкции требуют наличия увеличенных зазоров между ветвями термоэлементов, что приводит к росту величины теплового потока от горячих спаев к холодным через изоляцию и уменьшает полезную холодопроизводительность.

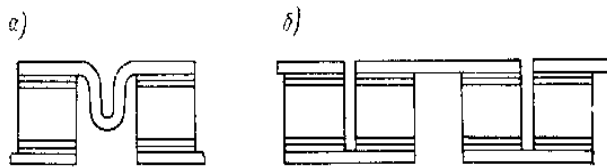


Рис.30. Термоэлемент с компенсированной коммутационной пластиной (а) и с коммутационными пластинами различной длины (б).

В термоэлектрических устройствах, предназначенных для охлаждения или нагрева воздуха, теплообменной поверхности часто придают функции коммутационного элемента. На рис.31 приведена конструкция, в которой коммутация осуществляется через ребра. Подобная схема позволяет в значительной степени разгрузить ветви термоэлементов от тепловых напряжений и упростить технологию сборки благодаря сокращению числа паяных соединений.

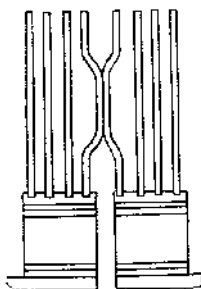


Рис.31. Термоэлемент с коммутацией через ребра

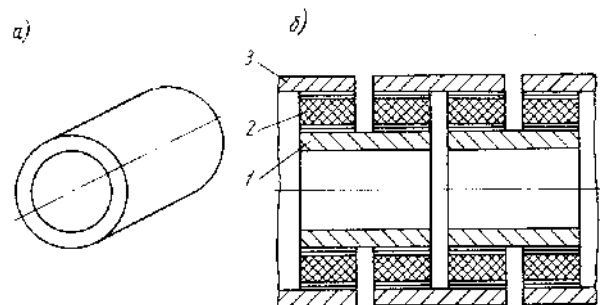


Рис.32. Трубочатый коммутационный элемент (а) и термоэлемент с кольцевыми ветвями (б).  
1- внутренний трубчатый коммутационный элемент, 2 – ветви с кольцевым сечением, 3 – внешний трубчатый коммутационный элемент.

Рассмотренные выше коммутационные элементы и схемы коммутации применяются для соединения ветвей с прямоугольным или круглым сечением. Ветви с кольцевым сечением соединяют в термоэлемент посредством трубчатых коммутационных элементов (рис.32). Подобная конструкция весьма перспективна, но требует проведения ряда мероприятий по обеспечению разгрузки ветвей термоэлементов от возникающих при работе напряжений вследствие большой разницы в коэффициентах линейного расширения материала полупроводника и коммутационного элемента. При необходимости как внешние, так и внутренние трубчатые коммутационные элементы могут быть оребрены.

Разобранные примеры не исчерпывают всех возможных конструктивных соединений ветвей в термоэлемент и типов коммутации. Наряду с широко распространенным способом коммутации — залуживанием специальными припоями, существует ряд других методов — диффузионное сращивание, жидкая или полужидкая коммутация, использование затвердевающих сплавов галлия с медью, никелем и другими металлами, метод прижимной коммутации и т. д. В термоэлектрических охлаждающих или нагревательных устройствах указанные типы коммутации применяются крайне редко.

### ***Электроизолирующие теплопереходы.***

Для изоляции токоведущих элементов термобатареи от теплообменных поверхностей применяют электроизолирующие прослойки (электроизолирующие теплопереходы). Название предопределено требованиями, которым должна удовлетворять прослойка - высокие изоляционные свойства и малое тепловое сопротивление. Первое требование обеспечивает надежность работы, а второе - низкие рабочие перепады температур и, следовательно, более высокое значение холодильного коэффициента.

Помимо того, электроизолирующий теплопереход должен быть механически прочным. Конструкция единичных (применяемых для изоляции одного термоэлемента) прослоек весьма разнообразна. Наиболее простым является теплопереход, состоящий из двух медных, оксидированных с одной стороны

пластин, склеенных между собой эпоксидным компаундом. В данном случае медные пластины выполняют функции коммутационных элементов. Слой оксидной пленки обычно не превышает 0,1-0,2 мк, и его механическая прочность невелика. Кроме того, слой эпоксидной смолы порядка 10-15 мк обладает достаточно высоким тепловым сопротивлением. При величине теплового потока в 1 Вт/см<sup>2</sup> перепад температур превышает 3,5°.

Улучшить механические и изоляционные свойства клеенных эпоксидным компаундом теплопереходов можно за счет применения кабельной бумаги толщиной 5—10 мк вместо оксидной пленки (рис.33). Для уменьшения теплового сопротивления надо поверхности медных пластин притирать, что значительно усложняет технологию их изготовления, но зато перепад температур не превышает 2,5°. В ряде устройств нашел применение теплопереход аналогичной конструкции, в котором одна из медных пластин заменена свинцовой.

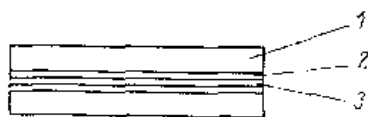


Рис.33. Электроизолирующий клееный теплопереход.  
1- медная пластина, 2 - эпоксидный компаунд, 3 – кабельная бумага.

Оригинальная конструкция гофрированного электроизолирующего теплоперехода приведена на рис.34. Две медные полосы из фольги толщиной 0,1-0,08 мкм с проложенной между ними прокладкой из кабельной бумаги толщиной 60-100 мкм гофрируются в специальном приспособлении, а затем прессуются и залуживаются с обеих сторон. К залуженному теплопереходу припаиваются коммутационные пластины. Для создания зазора между верхней и нижней фольгой последнюю берут на 2-3 мм уже. Благодаря большой поверхности теплопередачи рабочий перепад температур при тепловом потоке в 1 Вт/см<sup>2</sup> не превышает 1,5-2°.

К числу недостатков данной конструкции следует отнести большую высоту теплоперехода и гигроскопичность кабельной бумаги. Первое увеличивает габари-

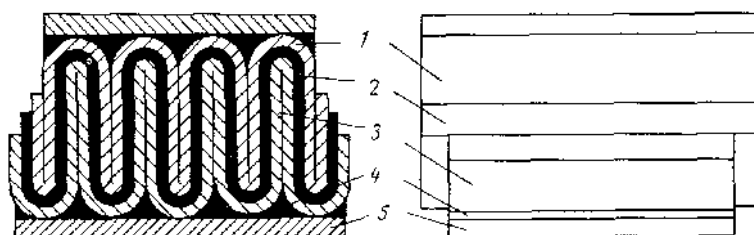


Рис.34. Электроизолирующий гофрированный теплопереход.  
1 и 3 – медная фольга, 2 – кабельная бумага, 4 – припой, 5 коммутационная пластина.

К числу недостатков данной конструкции следует отнести большую высоту теплоперехода и гигроскопичность кабельной бумаги. Первое увеличивает габари-

ты и вес термобатарей, что для ряда конструкций недопустимо, а второе препятствует применению теплоперехода во влажной атмосфере, в частности в термоэлектрических устройствах, предназначенных для охлаждения воздуха с его осушением. Заливка эластичными компаундами не всегда обеспечивает изоляцию кабельной бумаги от проникновения влаги. Применение в качестве прокладки фторопласта (ленты толщиной 40-100 мкм) приводит к росту теплового сопротивления.

Наиболее полно удовлетворяют всем требованиям керамические теплопереходы (рис.35), обладающие высокими электроизоляционными свойствами, хорошей теплопроводностью и механической прочностью. В качестве керамики применяют чаще всего алунд  $Al_2O_3$ , реже окись бериллия  $BeO$ , хотя теплопроводность последней значительно выше. Это объясняется чрезвычайно большой токсичностью окиси бериллия при ее обработке. Присоединение медных пластин производят либо путем пайки к предварительно металлизированной керамике, либо путем диффузионной сварки.

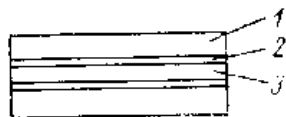


Рис.35. Керамический теплопереход.  
1 – коммутационная пластина, 2 – припой, 3 – керамика.

### ***Теплообменные поверхности.***

В судовых термоэлектрических охлаждающих или нагревательных устройствах используются два типа систем теплоподвода и теплоотвода - радиаторная (с принудительной или естественной циркуляцией воздуха) и жидкостная. Теплообменные поверхности должны обеспечивать минимально возможный перепад температур между теплоносителем и спаями термоэлементов за счет интенсивного теплообмена, развитой поверхности и небольшого теплового сопротивления.

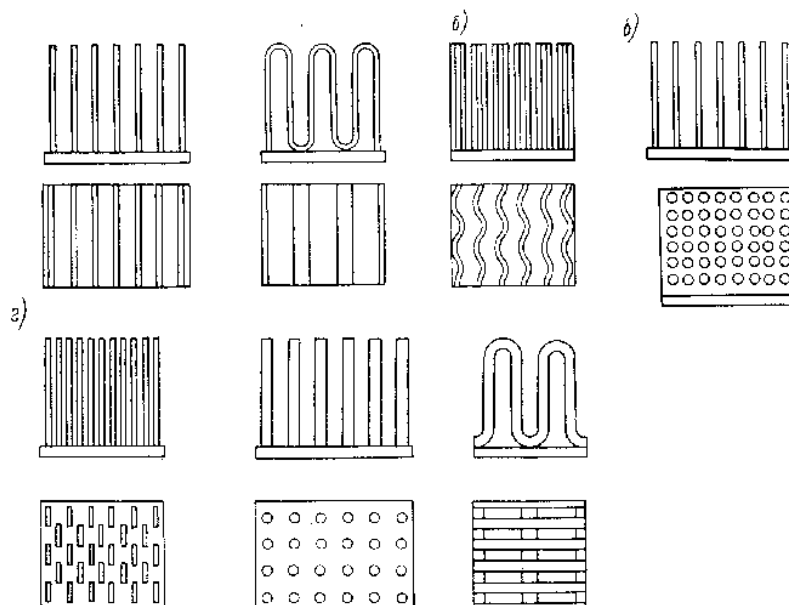


Рис.36. Пластинчато-ребристые поверхности.

Одновременно поверхности должны быть компактными и не нагружать значительно. Оребрение системы может выполняться как отдельно для каждого термоэлемента, так и для термобатареи в целом. В последнем случае требуется установка теплопереходов. Широкое распространение в термоэлектрических устройствах, предназначенных для тепло-влажностной обработки воздуха, получили пластинчато-ребристые поверхности с гладкими, волнистыми, перфорированными и стержневыми ребрами.

Данный тип оребрения позволяет сосредоточить в единице объема большую поверхность теплообмена и иметь практически любую необходимую геометрию ребер — толщину, высоту, длину, шаг и т. д.

Наиболее просты в конструктивном и технологическом отношении поверхности с гладкими ребрами (рис.36, а), у которых сечение каналов для прохода воздуха может быть прямоугольным, треугольным или со скругленными углами. Ребра могут изготавливаться отдельно или из одной ленты и припаиваться к основанию. Часто для уменьшения теплового сопротивления оребрения в основании фрезеруют специальные канавки, куда устанавливают, а потом припаивают ребра. С целью интенсификации теплообмена ребра изготавливают волнообразными (рис.36, б) или перфорируют (рис.36, в). Весьма высоким значе-

нием коэффициента теплоотдачи характеризуются пластинчато-стерженьковые поверхности (рис.36, г), у которых ребра могут иметь шахматное или коридорное расположение. К числу недостатков последнего типа оребрения следует отнести значительные величины коэффициентов аэродинамического сопротивления.

Пластинчато-ребристые поверхности применяются в основном в термобатареях плоского типа с термоэлементами прямоугольного или круглого сечения. Теплообменная поверхность по горячей стороне в этом случае обычно выполняется в виде плиты со сверленными или фрезерованными каналами для прохода воды. Выбор того или другого типа поверхности и геометрии ребер должен производиться в каждом конкретном случае с учетом многих факторов. К ним, прежде всего, следует отнести допустимые величины потерь напора, требования к весовым и габаритным показателям, технологичность изготовления и др. Стремление иметь развитую поверхность за счет увеличения высоты ребер и малого шага может привести к недопустимым нагрузкам на термоэлемент при вибрациях и ударных сотрясениях. С другой стороны, применение поверхностей с невысоким значением степени оребрения резко сказывается на энергетических затратах вследствие увеличения рабочих перепадов температур.

Пластинчато-ребристые поверхности другой конфигурации также находят применение в конструкциях термобатарей неплоского типа. Например, в термоэлектрических устройствах с теплоотводящей системой, выполненной в виде трубы (рис.37), на гранях которой монтируются термоэлементы, используется оребрение, показанное на рис.38.

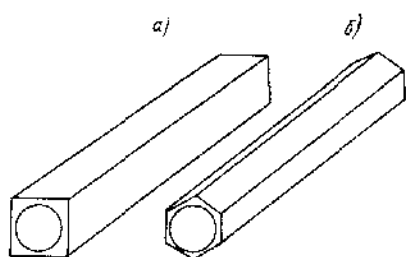


Рис.37. Теплоотводящие трубы с прямоугольным (а) и многогранным (б) сечением.

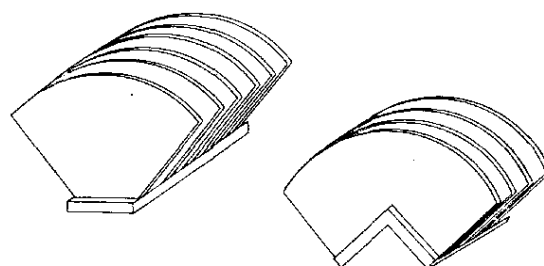


Рис.38. Оребрение для термобатарей плоского типа.



В подобных схемах для придания всей конструкции определенной жесткости и разгрузки термоэлементов от напряжений стали применять ребра с охватом всех термоэлементов по периметру. Такая конструкция оребрения, хотя и требует наличия теплопереходов по холодной стороне, зарекомендовала себя положительно в ряде устройств с довольно жесткими условиями эксплуатации. В кольцевых термоэлементах применяют обычные трубчатые (сребренные и неоребрённые) элементы. Краткое рассмотрение теплообменных поверхностей для термоэлектрических охлаждающих или нагревательных устройств безусловно не исчерпывает всех возможных вариантов их конструктивного выполнения и использования.

### ***Термоэлектрические батареи.***

Охлаждающие термоэлектрические устройства могут быть подразделены на три категории в зависимости от типа применяемого теплоносителя по холодной и горячей сторонам. К первой категории относят устройства, работающие по схеме воздух-вода. Воздух является теплоносителем, который подвергается необходимой тепловлажностной обработке, а вода отводит (в случае охлаждения воздуха) или подводит (в случае нагрева воздуха), то количество тепла, которое необходимо для определенного режима работы. По указанной схеме работают все автономные, магистральные, групповые, доводочные и местные кондиционеры, а также центральные агрегаты. Термоэлектрические устройства сочетают в единой конструкции принципы холодильного агрегата и теплообменного аппарата. Конструкция термоэлектрических батарей для кондиционеров может быть весьма разнообразной, но наиболее широко в настоящее время применяют плоский тип термобатарей с пластинчато-ребристой поверхностью для обработки воздуха. Принципиальная схема подобной конструкции приведена на рис.39.

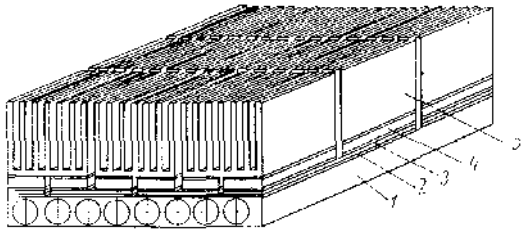


Рис.39. Термоэлектрическая батарея плоской конструкции.

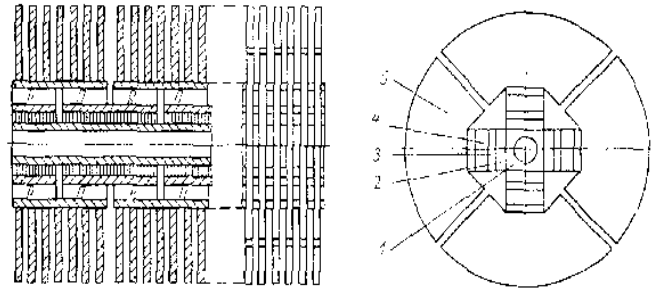


Рис.40. Термоэлектрическая батарея трубчатой конструкции.

К медной плите 1, имеющей сверленные или фрезерованные каналы для протока воды, припаиваются заранее собранные блочки термоэлементов, включающие в себя тепло-переход 2, коммутационную пластину 3 и два термоэлемента 4 с прямоугольным или круглым сечением *p*- и *n*-типов. После этого специальным многопластинчатым паяльником устанавливаются ребра 5, основание которых одновременно является и верхней коммутационной пластиной. В случае монтажа термоэлементов с обеих сторон медной плиты технология сборки несколько усложняется.

Набор унифицированных термобатарей подобной конструкции, установленных вдоль или поперек направления движения воздуха, позволяет получать любую необходимую холодо- или теплопроизводительность.

В некоторых устройствах применяют термобатареи трубчатой конструкции с термоэлементами прямоугольного сечения (рис.40). На трубе 1, имеющей сечение в виде квадрата (или многогранника), монтируются с четырех сторон блочки термоэлементов (теплопереход 2, коммутационная пластина 3 и термоэлементы 4), к которым припаиваются ребра 5. Монтаж блочков ведется с помощью специального прижимного устройства, значительно упрощающего технологию сборки.

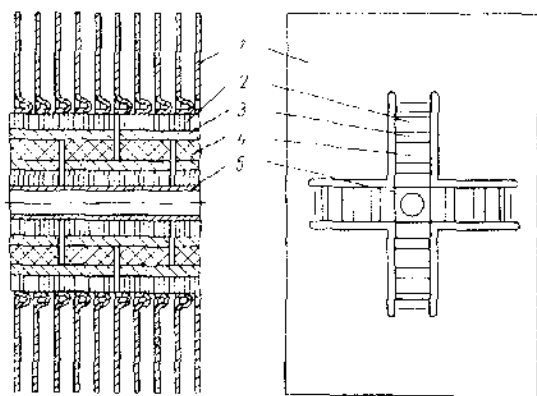


Рис.41. Термоэлектрическая батарея трубчатой конструкции с ребрами, охватывающими термоэлементы  
1 – ребра, 2 – гофрированный электроизолирующие теплопереход, 3 – коммутационная пластина, 4 - полупроводниковые ветви, 5 – теплообменник.

усложняет технологию изготовления. В термоэлектрических батареях трубчатой конструкции возможны дополнительные изгибающие напряжения вследствие малой жесткости самой трубы и ее прогиба. Применение ребер с демпфером и с охватом термоэлементов по периметру этой трубы в какой-то степени ужесточает конструкцию. Узел подобной схемы приведен на рис.41. Недостатком ее является необходимость установки теплопереходов по холодной стороне.

К трубчатой конструкции следует отнести и термоэлектрическую батарею с кольцевыми термоэлементами, отличающуюся большой компактностью (рис.42).

Возможность применения труб (в том числе и сребренных) весьма важна, так как позволяет создать малогабаритные устройства кожухотрубной конструкции, наиболее полно отвечающие на

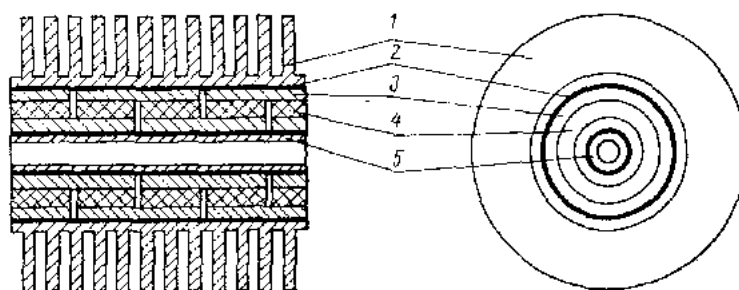


Рис.42. Термоэлектрическая батарея с кольцевыми термоэлементами.  
1 – наружная оребренная труба, 2 – изоляция, 3 – коммутационные элементы, 4 – кольцевые термоэлементы, 5 – внутренняя труба.

современном этапе всем требованиям. В случае применения кольцевых термо-

элементов очень трудно обеспечить разгрузку ветвей от возникающих напряжений из-за большой разницы коэффициентов линейного расширения полупроводников, теплообменник и коммутирующих элементов. До настоящего времени этот вопрос полностью не решен и широкого применения термоэлектрические устройства с кольцевыми термоэлементами не нашли.

Ко второй категории относят термоэлектрические устройства, работающие по схеме вода-вода. В них вода является теплоносителем и по холодной и по горячей стороне. По указанной схеме работают термоэлектрические холодильные установки, предназначенные для получения охлажденного до необходимой температуры рассола (воды). Подобные устройства могут применяться взамен холодильных машин - парокompрессионных, энжекторных и т. д.

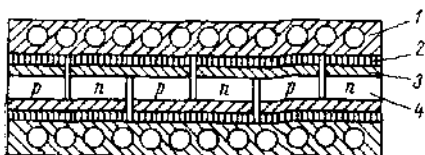


Рис.43. Термоэлектрическая батарея плоского типа.

1 – теплообменник, 2 – теплопереход, 3 – коммутационная пластина, 4 – полупроводниковые ветви.

Конструктивное оформление термоэлектрических батарей для холодильных установок может быть весьма разнообразным. Наиболее часто встречаются батареи плоского типа, схема которых приведена на рис.43. Плоская конструкция не обеспечивает свободы перемещения полупроводниковых ветвей и вызывает дополнительные термические напряжения в термоэлементах при работе. Применение свинцовых демпфирующих прокладок в этом случае не всегда позволяет компенсировать возможные деформации и обеспечить надежную работу.

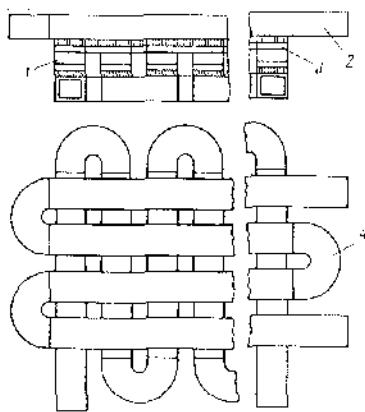


Рис.44. Термоэлектрическая батарея решетчатого типа

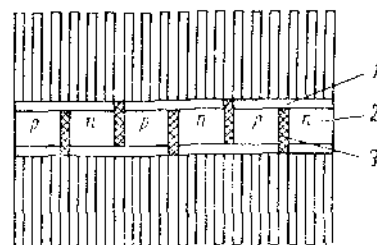


Рис.45. Термоэлектрическая батарея без несущего основания.

1 – коммутационные пластины с ребрами, 2 – ветви термоэлементов, 3 – эпоксидный компаунд.

Заслуживает внимания конструкция термоэлектрической батареи решетчатого типа (рис.44). В ней трубки 2, соединенные между собой калачами 4 и выполняющие роль теплообменников по холодной и горячей сторонам, образуют решетку и тем самым обеспечивают необходимую свободу перемещения ветвей термоэлементов 1. Соединение ветвей в термоэлементы производится таким образом, чтобы коммутационная пластина 3 совпадала по направлению с трубкой-теплообменником.

К третьей категории относят термоэлектрические устройства, работающие по схеме воздух-воздух. В них воздух используется в качестве теплоносителя как по холодной, так и по горячей стороне. Данная схема для судовых систем кондиционирования воздуха малоперспективна, так как требует наличия достаточно мощных вентиляторов, крупногабаритных воздухопроводов и т. д. Конструктивное оформление термобатарей для схемы воздух-воздух показано на рис.45.

## **КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Термоэлектродгенераторы по принципу действия представляют собой тепловые машины, в которых рабочим телом является электронный газ полупроводника, преобразующий тепловую энергию в электрическую. Как во всякой тепловой машине, к. п. д. термоэлектродгенератора в первую очередь зависит от к. п. д. цикла Карно  $(T_g - T_x)/T_g$ , что указывает на то, что конструкция должна иметь минимальные тепловые потери при передаче тепла к рабочему телу, т. е. к полупроводниковому материалу, и при съеме тепла с него. Основными узлами термоэлектродгенераторов являются источники тепла, собственно термобатарея с коммутационными и изоляционными слоями, устройство для съема тепла

(холодильник) и несущая конструкция, обеспечивающая необходимую прочность всей машины и надежность ее работы.

Термоэлектрогенераторы классифицируются по источникам тепла, по назначению, по рабочим температурам, по типу геометрии и конструкции термобатарей. Все классификации имеют как положительные, так и отрицательные стороны, и ни одна из них не дает достаточно четкого деления термоэлектрогенераторов по типам, так как большинство принципов конструирования сохраняется у термоэлектрогенераторов самых разных мощностей, назначений и конструкций.

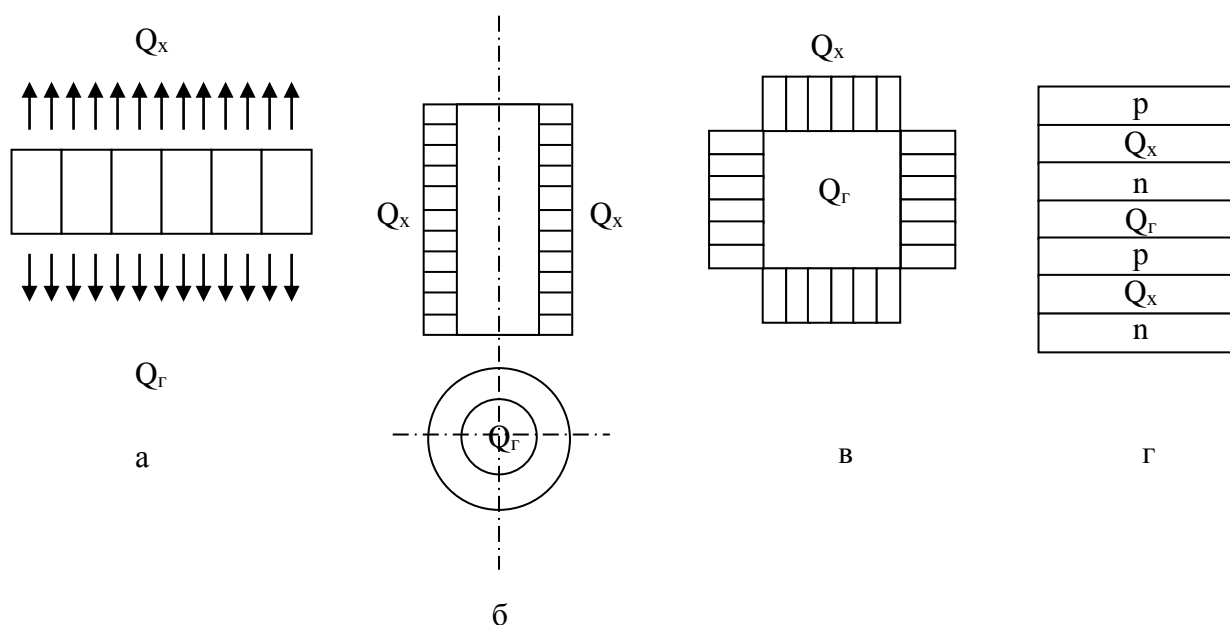


Рис.46. Схемы термоэлектрогенераторов.  
А – панельный, б – радиальный, в – шаровой, г – короткозамкнутый.

Эти принципы можно свести к основным. Термобатарея должна быть компактной, аккумулировать по возможности большую часть подведенного к ней тепла, обладать необходимой механической прочностью и химической стойкостью в условиях большого градиента температур в течение длительного времени, от 1000 ч до года и более. Иногда конструкция должна выдерживать вибрацию, удары и перегрузку. Учитывая, что подавляющее большинство термоэлектрогенераторов даже при малых мощностях вырабатывает электрический ток в десятки и сотни ампер, в конструкциях необходимо предусмотреть усло-

вия передачи электрического тока к нагрузке без существенных потерь. Несмотря на все многообразие конкретных конструкций и значительное число требований к ним, можно условно разделить все известные термоэлектрогенераторы по основным конструктивным схемам на панельные, радиальные, шаровые и короткозамкнутые.

**Панельные термоэлектрогенераторы** (рис.46, а) представляют собой плоскую термобатарею прямоугольной или квадратной формы, набранную из последовательно или параллельно соединенных полупроводниковых термоэлементов. В этой конструктивной схеме могут использоваться различные источники тепла. При использовании солнечной энергии не нужна электроизоляция. Плоскую термобатарею можно нагревать теплоносителем - жидким металлом или насыщенным паром. В этом случае теплоноситель прокачивается в плоских теплопроводах, что вызывает дополнительные конструктивные проблемы: создание системы циркуляции с наименьшими электрическими затратами (в большинстве случаев это принудительная циркуляция), выбор материала теплопровода с возможно малым тепловым сопротивлением, обеспечение надежного теплового контакта теплопровода с электрической изоляцией и последней с термобатареей. При этом существенную роль играет механическая прочность системы, обеспечение которой зависит от согласования коэффициентов линейного расширения слоев или конструктивных термических развязок. В качестве источников тепла панельных термобатарей могут применяться радиоизотопы, хотя при этом возникают проблемы выбора материала оболочек и его контакта с изоляцией (аналогично теплопроводу) и создание конструкции, обеспечивающей минимальные тепловые потери от теплопровода в окружающее пространство. Газовый нагрев панельных термобатарей, как правило, не применяется, так как в этом случае не велик коэффициент теплопередачи от источника тепла к тепловоспринимающей поверхности.

Охлаждение панельных термобатарей возможно двумя способами - хладагентом и оребрением. Теплоноситель также находится в теплопроводе,

и его эффективное применение требует решения тех же вопросов, что и для горячего теплоносителя. Охлаждающим теплоносителем могут быть вода и жидкий металл. Оребрение используется и в наземных условиях, когда невозможна затрата энергии на циркуляцию охлаждающего теплоносителя.

Положительная сторона панельных термоэлектрогенераторов - почти идеальное использование поверхности нагрева за счет плотного ее заполнения термоэлементами. Даже в случае разнесенных термоэлементов (как будет показано далее) коэффициент  $\eta$  не снижается. Панельная термобатарея очень удобна в изготовлении, технология ее сборки проста и поддается, как правило, механизации. Наиболее удобна эта схема при создании генераторов большой мощности, так как она позволяет создать компоновку большого числа панельных термобатарей (особенно при нагреве теплоносителем) с минимальными тепловыми и электрическими потерями всего устройства.

К недостаткам панельной схемы надо отнести: недостаточно высокие коэффициенты теплопередачи от источника тепла к термобатарее и от последней к холодильнику; трудность создания надежного теплового контакта между материалами теплопроводов и изоляцией, особенно если площадь нагрева термобатареи велика и значительно число слоев материалов, отличающихся друг от друга по своим термическим, электрическим, механическим и прочим свойствам.

Вопрос надежности длительной работы такой конструкции очень сложен. При этом надо учитывать и химическое взаимодействие материалов, особенно полупроводника с конструкционными материалами. Однако в конкретных конструкциях термоэлектрогенераторов эти трудности или разрешаются или обходятся с помощью различных конструкторских и технологических приемов. Панельная схема, учитывая ее многочисленные положительные стороны - одна из основных в термо-электрогенераторостроении.

**Радиальная конструкция** (рис.46 б) представляет собой в основе трубчатый теплообменник, стенками которого является термобатарея. Внутри тепло-



обменника находится источник тепла: радиоизотопы, теплоносители, горячие газы или ТВЭЛы атомных реакторов.

К оболочке радиоизотопа крепятся через изоляцию кольцевые, если оболочка цилиндрическая, или плоские, если она имеет вид многогранника, термоэлементы. В этом случае конструирование термоэлектрогенератора встречается с теми же трудностями, что и для панельной схемы. Если в качестве источника тепла применять теплоноситель в виде жидкого металла или насыщенного пара, то имеем дело с классическим теплообменным аппаратом. При этом также могут быть применены кольцевые или плоские термоэлементы. Циркуляция теплоносителя в этих термоэлектрогенераторах в большинстве случаев принудительная, что неизбежно приводит к потерям на прокачку, но зато увеличивается коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к термобатарее и повышается эффективность использования тепловой энергии.

Радиальная схема единственно приемлема при использовании газового нагрева — горячих газов от горелок различного типа или газовых отходов процессов в тепловых машинах, в двигателях внутреннего сгорания, реактивных двигателях и т. п. Основная задача при этом - создание конструкции, наиболее эффективно использующей тепло уходящих газов. В случае нагрева от газовых горелок наиболее рационально помещение многогранной беспламенной горелки внутри теплообменника. Использование ТВЭЛов в радиальной конструкции аналогично применению радиоизотопов, только в этом случае можно изготавливать теплообменники значительной длины и тем самым создавать термоэлектрогенераторы большой мощности.

Тепло от термобатарей в радиальной схеме отводится или излучением с помощью ребер охлаждения, или теплоносителем, причем первый способ более рационален в случае использования плоских, а второй - в случае кольцевых термоэлементов.

Положительная сторона радиальной схемы - высокие коэффициенты теплопередачи от источника тепла к термобатарее и от нее к охлаждающему теплоносителю. При этом наиболее эффективно используется поверхность излу-

чающих ребер. Другое, не менее важное, преимущество - компактность всего термоэлектрогенератора при удобстве изготовления и сборки.

К недостаткам схемы следует отнести неполное использование тепла в случае газового нагрева и, в меньшей степени, нагрева изотопами и трудность создания при использовании этих источников тепла термоэлектрогенераторов большой мощности. Так же как и в случае панельной конструкции, трудно обеспечить необходимую механическую и термическую прочности. Особенно это сложно при использовании кольцевых термоэлементов. Радиальная конструкция, учитывая ее важные положительные стороны, является в настоящее время основной для термоэлектрогенераторов малой и средней (до 1 кВт) мощностей.

**Шаровая схема** названа так условно, потому что под ней понимается конструкция, в которой термобатарея со всех сторон окружает источник тепла (см рис.46, в). Форма поверхности нагрева может быть многогранной. Термоэлементы в этой конструкции могут быть только плоские, соответственно расположенные и контактирующие с поверхностью нагрева. Источник тепла - радиоактивный изотоп. Охлаждение - с помощью теплоносителя или излучением с поверхности ребер, которые в этом случае должны быть игольчатого типа. Преимущество — полное использование выделенного источником тепла. Недостатки следующие: большая трудность изготовления и сборки термобатарей для этой конструкции, невозможность создать на этом принципе термоэлектрогенераторы большой мощности и ограниченность применения различных источников тепла. Все это приводит к тому, что шаровая схема очень редко встречается в термоэлектрогенераторах.

**Короткозамкнутая конструкция** термоэлектрогенераторов применяется для получения токов большой силы (сотни и тысячи ампер) при малом напряжении. Такие генераторы необходимы для питания, например, электромагнитных насосов. Источник тепла располагается между термоэлементами п- и р-типов, имеющими, как правило, большую площадь, равную даже площади панельной термобатареи (см. рис.46, г). К ветвям термоэлементов крепятся холо-

дильники. Таким образом, в этой конструкции направление теплового потока совпадает с направлением электрического тока. Электрическая изоляция и коммутация отсутствуют, что повышает термодинамический к. п. д. генератора. Крепящие детали в этом случае являются проводниками тока и тепла (отсюда и название - короткозамкнутые). Их сечения по отношению к сечению полупроводника (с учетом их удельных электрических сопротивлений) подбирают так, чтобы потери тока по замыкающему контуру не превышали 5-10%.

Источниками тепла в короткозамкнутой схеме могут быть теплоносители, радиоактивные изотопы и ТВЭЛы атомного реактора. Надежные тепловой и электрический контакты полупроводника с материалом теплопровода или оболочки осуществляются хорошим прижимом, пайкой или сваркой через соответствующие прослойки.

Так же как и в случае панельной термобатарей, в этой схеме необходимо снять механические и термические напряжения, особенно в местах контакта. Короткозамкнутый термоэлектрогенератор можно охлаждать только теплоносителем, циркулирующим в теплопроводе.

Преимущества короткозамкнутой конструкции - увеличение к.п.д. Карно за счет отсутствия изоляционных и коммутационных слоев, широкий выбор источников тепла и простота изготовления и сборки термобатарей и всей конструкции в целом. Недостаток - неизбежные электрические и тепловые потери по замкнутому контуру. Применяются короткозамкнутые термоэлектрогенераторы редко, в основном в лабораторных и проектных работах. В перспективе они могут использоваться в генераторах большой мощности (сотни и тысячи киловатт) для получения высоких напряжений.

В зависимости от способа подвода тепла к спаям термоэлементов различают реакторные термоэлектрические генераторы, изотопные термоэлектрические генераторы, термоэлектрические генераторы на органическом топливе и солнечные термоэлектрические генераторы.

### *Реакторные термоэлектрогенераторы.*

Атомная энергетика в настоящее время вступила в такую фазу своего развития, когда большое значение приобретают пути повышения эффективности и экономичности энергетических установок. До настоящего времени в атомных установках использовалась в основном многоступенчатая схема преобразования тепловой энергии деления атома в электрическую с помощью турбин и машинных генераторов тока. Однако эта схема не обеспечивает высокий к. п. д. агрегата из-за ограничения максимальной рабочей температуры цикла и наличия тепловых потерь. Надежная длительная работа таких агрегатов снижается из-за низкой прочности и термостойкости конструкционных материалов турбин. Установки, непосредственно преобразующие тепловую энергию деления в электрическую, лишены большинства из этих недостатков и в перспективе позволяют получить более высокий к. п. д. и удельную мощность при большей эффективности, надежности и компактности.

Одна из особенностей этой системы - радиоактивность топлива, представляющая потенциальную опасность для человека. Поэтому при разработке этой стороне вопроса должно уделяться большое внимание. И если для стационарных атомных станций большой мощности эта проблема относительно успешно решена, то для передвижных (транспортных) атомных станций, включая и космические, она представляется достаточно сложной.

Понятно, что только некоторые термоэлектрогенераторы экономичны при большой мощности, поэтому к настоящему времени создано очень мало действующих аппаратов этого типа, а большинство работ в этой области находится в проектной стадии.

Примером термоэлектрогенератора этого типа является термоэлектрогенератор «Ромашка». Генерируемое в активной зоне быстрого реактора тепло передается на термоэлектрическую батарею, расположенную на наружной поверхности отражателя. Ядерный реактор представляет собой (рис.47) полый цилиндр из металлического бериллия, внутри которого помещаются пластинчатые твэлы из дикарбида обогащенного (90%  $U^{235}$ ) урана. Вес  $U^{235}$  в активной

зоне 49 кг. Боковой отражатель собран из коаксиально расположенных элементов из бериллия и графита. Торцевые отражатели собраны из металлического бериллия. Для устранения утечек тепла через торцы применяется термоизоляция. Температура в центре активной зоны  $1770^{\circ}\text{C}$  при температуре твэлов  $1900^{\circ}\text{C}$ . Система регулирования реактора состоит из четырех стержней, расположенных в боковом бериллиевом отражателе, и нижнего торцевого отражателя.

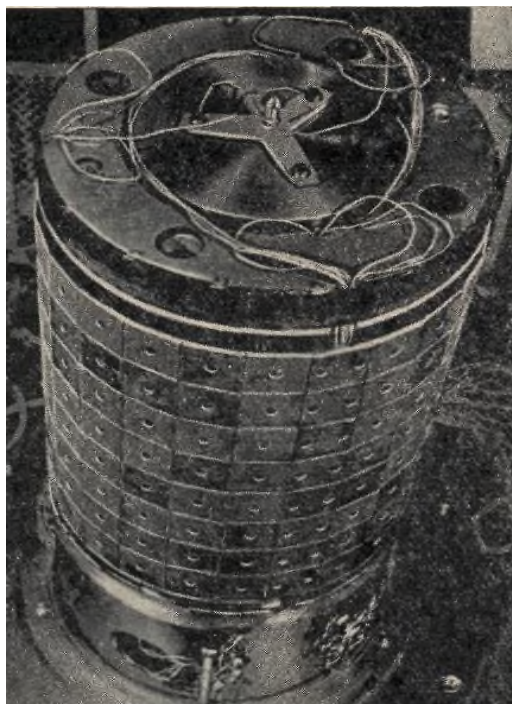


Рис.47. Реактор «Ромашка»

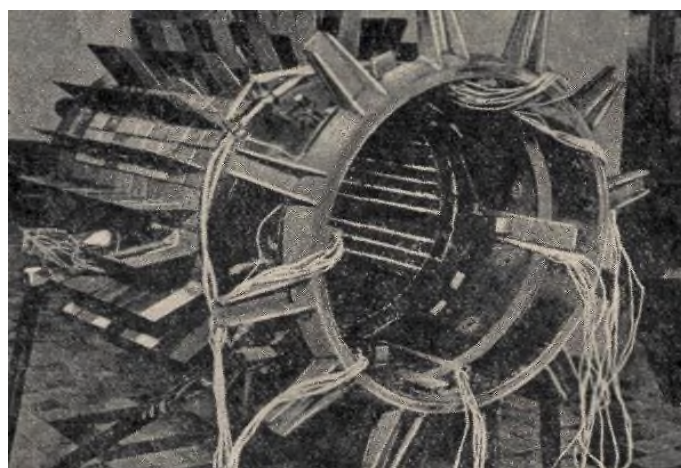


Рис.48. Термобатарея «Ромашка»

Термобатарея «Ромашки» (рис.48) состоит из термоэлементов, изготовленных на основе сплава германий-кремний. Термоэлемент представляет собой два термостолбика р- и n-проводимости, соединенные по горячей стороне коммутационной пластиной. По холодной стороне отдельные пары термостолбиков коммутируются между собой в единую цепь. Весь термоэлектрогенератор разбит на четыре группы элементов, каждая из которых имеет независимые выводы. Внутри каждой группы термоэлементы соединены в четыре параллельные цепи. Такая электрическая схема позволяет исследовать характеристики как отдельных групп, так и всего термоэлектрогенератора при последова-

тельном или параллельном соединении и обеспечивает большую надежность. Режим работы термоэлектродгенератора, а, следовательно, и вырабатываемая им электрическая мощность определяются допустимым уровнем температуры отдельных элементов реактора и преобразователя и возможностью отвода тепла излучателем

Электрическая мощность, вырабатываемая установкой, изменяется в пределах 500-800 Вт при температурах бериллиевого отражателя 980-1200° С и основания излучающих ребер 550° С, что обеспечивает к.п.д. реактора-преобразователя 1,5-2%. При параллельном соединении всех термоэлементов батарея вырабатывает ток силой 88 А. Мощность и температура с хорошей точностью поддерживались на заданном уровне за счет саморегулирования реактора.

### ***Изотопные термоэлектродгенераторы.***

За последние годы все больше внимания уделяется созданию маломощных автономных источников электрической энергии на основе радиоактивных изотопов. Такие источники находят применение для питания приборов и аппаратуры, работающих в труднодоступных для обслуживания условиях и способных работать длительное время. В качестве изотопных элементов используются  $Po^{210}$ ,  $Ce^{144}$ ,  $Sr^{90}$ ,  $Cs^{137}$ ,  $Pu^{238}$ .

Конструктивно термоэлектродгенератор выполняется из теплового и изотопного блока, термобатареи, теплового регулятора, устройства для обеспечения перегрузки термобатареи, корпуса и радиационной защиты. В качестве примера на рис.49 приведен внешний вид изотопного термоэлектрического генератора на  $Ce^{144}$ , выпущенного у нас в стране.

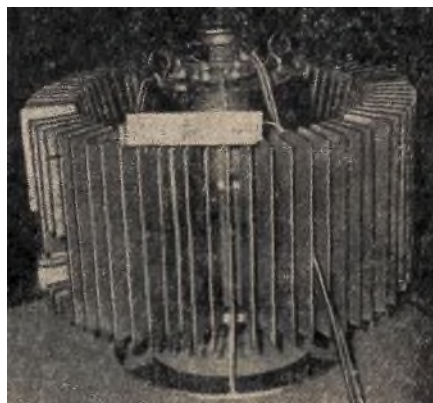


Рис.49. Термоэлектродгенератор с  $Ce^{144}$ .

Тепловой блок предназначен для размещения в нем изотопного источника и представляет собой вольфрамовый цилиндр диаметром 100 с боковой стенкой толщиной 20 и днищем толщиной 40 мм, закрыт полусферической крышкой, ко-

торая крепится к цилиндру накидным кольцом. Изотопный блок представляет собой двойную ампулу, выполненную из нержавеющей стали в виде двух коаксиальных цилиндров, внутри которых помещается стакан, заполненный расплавом молибдата церия.

Каждый цилиндр закрывается крышкой и заваривается аргоно-дуговой сваркой. Тепловой блок установлен на термобатарее, составленной из 97 термоэлементов. Термобатарея крепится в специальном корпусе и опирается на основание в виде цилиндрической медной пробки. Для поддержания номинального температурного режима работы термобатареи предусмотрены органы теплового регулирования, состоящие из специальных экранов и привода регулятора с редуктором. Постоянство теплового потока через термобатарею (при снижении тепловой мощности изотопа) обеспечивается уменьшением излучающей поверхности теплового блока путем изменения положения экрана. Тепловой блок, термобатарея и устройства для обеспечения перегрузки термобатареи заключены в цилиндрический корпус. Сверху корпус закрыт крышкой со свинцовым наполнителем. Генератор имеет радиационную защиту, выполненную в виде рабочего и транспортного контейнеров. Тепло от контейнера к окружающему воздуху отводится развитой ребренной поверхностью из алюминиевого сплава, состоящей из 64 прямоугольных ребер и закрепленной на рабочем контейнере при помощи стяжных болтов.

### ***Термоэлектрогенераторы на органическом топливе.***

Термоэлектрогенераторы, работающие на органическом топливе, были первыми в мире промышленными устройствами такого рода. Родиной их был Советский Союз. Достаточно назвать «партизанский котелок», в дне которого размещалась термобатарея, нагреваемая от костра и охлаждаемая кипящей водой. «Партизанский котелок» был разработан в 1942 г., состоял из термобатарей ZnSb-константан и при разности температур 250-300° С обеспечивал к.п.д. 1,5-2%. Развитием его служили генераторы ТГК-2, ТГК-3 и ТГУ-2, в ко-



торых использовалось тепло керосиновой лампы для нагрева термобатарей из ZnSb-константана.

В последние годы наибольшее распространение получили термоэлектрогенераторы на органическом топливе для станций катодной защиты, так как в них используются газо- или нефтепродукты. Катодная защита предохраняет магистральные газо- и нефтепроводы и радиорелейные линии от коррозии путем подачи на металлические трубы отрицательного потенциала, препятствующего окислению железа. Они приносят большой экономический эффект, так как увеличивают срок службы труб, а использование термоэлектрогенераторов для этой цели резко уменьшает расход рабочего времени на обслуживание магистралей.

Один из вариантов такого термоэлектрогенератора - ТЭГ-50 (рис.50) мощностью 50 Вт при напряжении 8 В. Инфракрасная горелка, работающая на природном газе, расположена в центре устройства и поддерживает температуру горячих спаев термобатарей 350-400° С. Тепло отводится естественной конвекцией, что увеличивает общие габариты устройства, но придает ему известную универсальность.

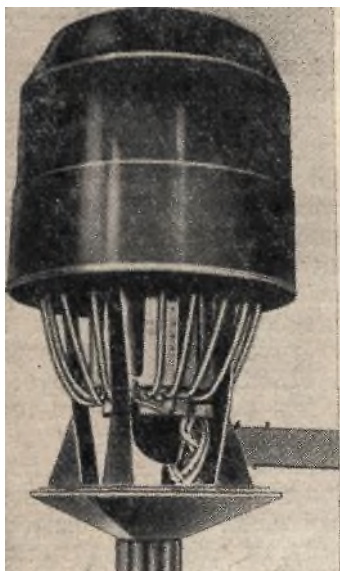


Рис.50. Внешний вид ТЭГ-50

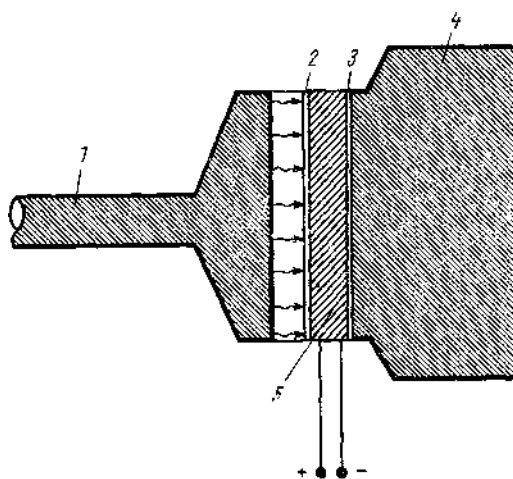


Рис.51. Схема термоэлектрогенератора для радиорелейной станции:  
1 – газовая горелка, 2 – горячий спай, 3 – холодный спай, 4 ребра охлаждения, 5 - термобатарея



Более мощная модель такого типа - ТЭГ-300 с полезной мощностью 300 Вт. Установка состоит из четырех индивидуальных колонок. Каждая колонка имеет мощность 75 Вт и состоит из инфракрасной горелки, к которой через теплоприемник примыкают термобатареи. Тепло от холодных спаев отводится ребрами охлаждения.

Для питания автоматической радиорелейной станции был создан термоэлектрогенератор, работающий на пропане (рис.51). Он состоит из газовой горелки, обогревающей горячие спаи плоской термобатареи, тепло которой отводится охлаждающими ребрами. Пропан содержится в специальном баллоне, давление которого для подачи в горелку дросселируется двумя клапанами. Термогенератор вырабатывает ток 0,5 А при напряжении ~12 В.

### ***Солнечные термоэлектрогенераторы.***

Первыми термоэлектрическими генераторами были генераторы, использующие энергию солнечных лучей. Первые упоминания о таких опытных установках относятся к концу XIX - началу XX. Основной составляющей частью их являются концентраторы солнечной энергии.

Солнечные термоэлектрогенераторы с концентраторами солнечной энергии по своим конструктивным схемам делятся на два типа: с одним концентратором и расположенной в его фокусе термобатареей и с большим числом маленьких концентраторов, в фокусе которых размещено по одному термоэлементу. Основная трудность конструирования солнечных термоэлектрогенераторов - создание равномерной температуры горячих спаев термобатареи, размещенной в фокусе, поскольку тепловой поток в фокальном пятне распределяется по кривой Гаусса. Этот вопрос может быть решен различными путями, хотя следует указать, что лучшее решение пока не найдено.

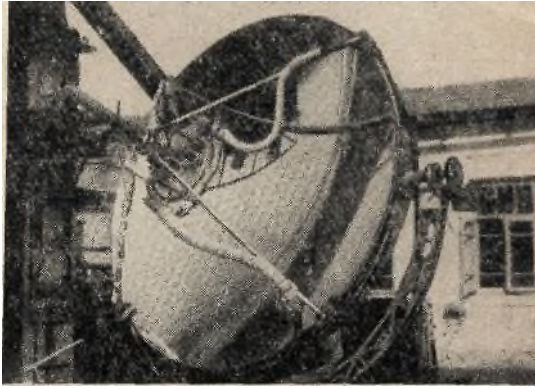


Рис.52. Солнечный термоэлектрогенератор с концентратором

Первый солнечный термоэлектрогенератор с концентрацией солнечной энергии (рис.52) был создан в СССР и представлял собой точный зеркальный концентратор диаметром 2 м, в фокусе которого размещалась плоская термобатарея из ZnSb-константана. На горячей стороне батареи помещена медная плита толщиной 5 мм, к шлифованной поверхности которой через слюдяную

изоляция прижимались горячие спаи термоэлементов. Тепло отводилось проточной водой. При разности температур  $400^{\circ}\text{C}$  ( $420^{\circ}\text{C}$  на горячем спае) мощность установки достигала 20 Вт при напряжении 20 В, что соответствует к.п.д. термобатареи 1,42 %, а к.п.д. всей установки 0,8 %. Значительные потери в к.п.д. относятся на счет потерь отражением и поглощением зеркала и излучением и конвекцией от горячей медной плиты термобатареи.

В последующем были созданы и испытаны солнечные термоэлектрогенераторы, в которых горячие спаи термобатареи нагревались непосредственно от концентратора, а выравнивание температур по их поверхности достигалось созданием требуемой конфигурации поверхности. Однако, ввиду большой сложности создания таких термобатарей, эти установки не дали положительных результатов. Нужно тем не менее подчеркнуть, что это решение вопроса - одно из самых правильных и эффективных.

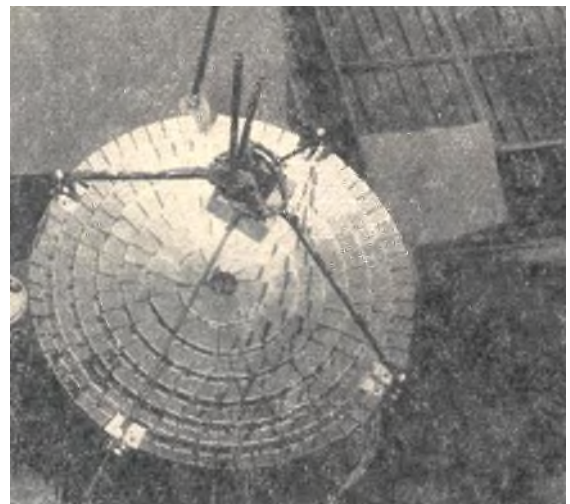


Рис.53. Солнечный термоэлектрогенератор с фасетным концентратором

Выравнивание температуры горячих спаев термобатареи было осуществлено по-другому в солнечном термоэлектрогенераторе мощностью 10 Вт (рис.53): применением фасетного концентратора диаметром 1 м. Фасетный концентратор состоял из большого количества концентрически расположенных плоских зеркал. Каждое зеркало шарнирно закреплено на каркасе, так что оно может быть сфокусировано в любую точку термобатареи. Специальной фокусировкой каждого facets в отдельности на горячем спае термобатареи было достигнуто довольно равномерное распределение температур. Термобатарея состояла из десяти термомодулей, причем каждый состоял из 18 последовательно соединенных термоэлементов. Горячие спаи термобатареи непосредственно освещались солнечными лучами, а холодные охлаждались проточной водой.

Солнечный термоэлектрогенератор, представляющий собой набор неболь-

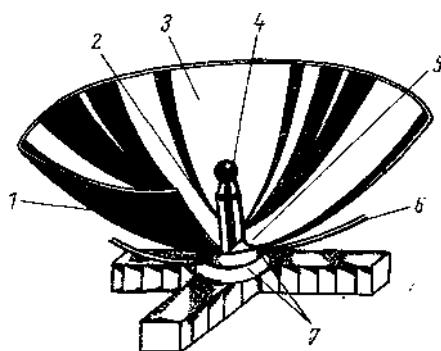


Рис.54. Единичный блок концентратор-термоэлемент:

1 – поверхность радиатора, 2 – раздвоенный опорный стержень, 3 – отражающая поверхность радиатора, 4 – приемник излучения с термопарой, 5 – сферическая опора, 6 – электрическая шина, 7 – электроизоляция.

ших концентраторов с термоэлементами в фокусе, был разработан позднее. Здесь основной конструкции является единственный блок (рис.54), представляющий собой параболический концентратор, отражающая поверхность которого собирает солнечные лучи в фокус, где расположен приемник тепла с термоэлементом на раздвоенном опорном стержне. Последний установлен на сферической опоре.

Приемник тепла представляет собой сферическую поверхность, имеющую покрытие с высоким коэффициентом поглощения. Сфера крепится на теплопроводящем конусе с покрытием, снижающим потери тепла излучением. Основание конуса — поверхность горячих термоэлементов, а холодные спаи — верх опорного устройства, разделенного электроизолятором, поскольку термоэлемент представляет собой два полуцилиндра n- и p-типов. Отводимое тепло

проходит через стержень и электрическую изоляцию толщиной 0,0025 мм к фланцу и концентратору. Тепло, проходя по концентратору, отводится с его поверхности излучением. Используя блок, можно изготовить панели различных форм и размеров. Эта схема обладает рядом преимуществ: отдельные элементы легко снять для ремонта, конфигурация установки обладает большой гибкостью, что особенно важно у космических генераторов, упрощены учет и компенсация температурных деформаций. Для проверки работы этой схемы была изготовлена и испытана действующая конструкция такого типа, состоящая из 56 блоков.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И НАГРЕВА**

В течение последнего десятилетия среднегодовой прирост мирового производства термоэлектрических охлаждающих модулей составляет 15-25%.

Западный годовой рынок термоэлектрических модулей в 2001 году можно оценить в 120 миллионов долларов. Примерно такой же объем производства модулей обеспечивает Китай, причем практически все эти модули остаются на внутреннем китайском рынке. Эта страна развила столь высокий уровень производства термоэлектрических модулей и холодильников буквально за последние 3-4 года. Годовое производство термоэлектрических охлаждающих модулей в разных странах (таблица 2) можно примерно оценить следующим образом:

Приятно подчеркнуть, что Россия сохранила лидирующее место в мире по качеству производимых термоэлектрических модулей. Прекрасно зарекомендовали себя модули российских фирм «Норд», «Криотерм», «Остерм», ИХПМ, «Электроника НН» и др. Наиболее известными производителями модулей в США являются фирмы «Marlow», «Melcor».

Таблица 2

Годовое производство термоэлектрических модулей.

Страна	Годовое производство модулей, млн. шт.
Китай	3-4
США	до 2
Россия	1-1,5
Украина	0,4-0,6
Остальные страны (Европа, Япония, Корея и др.)	до 0,5

Термоэлектрические охлаждающие системы имеют свои ниши на рынке получения искусственного холода. Рациональные области термоэлектрического метода обусловлены его преимуществами и недостатками, которые обсуждались в начале данной сессии.

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

1. Маломощные охладители с  $Q_0 < 100$  Вт. Подавляющее большинство термоэлектрических холодильников относится именно к этому классу. При таких холодопроизводительностях термоэлектрические холодильники с экономической точки зрения сравнимы с парокompрессионными машинами.
2. Термоэлектрические холодильники средней мощности:  $100 < Q_0 < 300$  Вт. В этом случае экономическая эффективность термоэлектрических холодильников, как правило, ниже, чем парокompрессионных. Тем не менее, термоэлектрическое охлаждение широко применяется в охладителях воздуха в шкафах для электроники, для осушки газов и т. п.
3. Высокие мощности с  $Q_0 > 300$  Вт. Применение термоэлектрических холодильников для создания таких мощностей может быть оправдано при выполнении каких-либо специфических требований, таких, как специальные ограничения по весу, размерам, устойчивости

к перегрузкам, необходимости автономной работы и т. п. Например, в США разработана термоэлектрическая микроклиматическая установка для пилотов вертолетов с  $Q_0 = 1$  кВт.

Что же касается сфер применения термоэлектрического преобразования энергии, можно выделить следующие области.

### ***1. Использование термоэлектрических устройств в различных отраслях промышленности.***

На рис.55 приведена структура термоэлектрических устройств промышленного назначения, построенная на основе литературных данных. Системы, описанные в источниках без указания отраслей применения, т.е. – общего применения, могут быть классифицированы как охладители потоков жидкости, потоков газа, термостаты среднетемпературного диапазона и криостаты низкотемпературного диапазона. В отношении охладителей потоков жидкости отметим, что уровень холодопроизводительности в таких промышленных системах достигает нескольких киловатт. Особенный интерес представляют комбинированные (гибридные) системы охлаждения, сочетающие термоэлектрический блок на низкотемпературной ступени с парокомпрессионной холодильной машиной, обеспечивающей отвод теплоты от термоэлектрического блока в окружающую среду.

Следующей группой устройств, являются системы, про которые в литературных источниках явно указано на их назначение как систем обеспечения тепловых режимов технологических процессов. Преимущества термоэлектрических преобразователей эффективно реализуются в космических технологиях. Использование эффектов Пельтье и Зеебека для первичных преобразователей сигнала в измерительных системах также очевидно. Здесь первичный влажочувствительный элемент выдает сигнал, пропорциональный психрометрической разности температур.

Далее приведены термоэлектрические системы в роли кристаллизаторов, осушителей газов, испытательных термоциклических установок. Термостабилизаторы технологических процессов могут быть представлены на примере

технологии изготовления микросхем, для расширения функциональных возможностей серийных жидкостных термостатов, для стабилизации опорных спаев термопар.

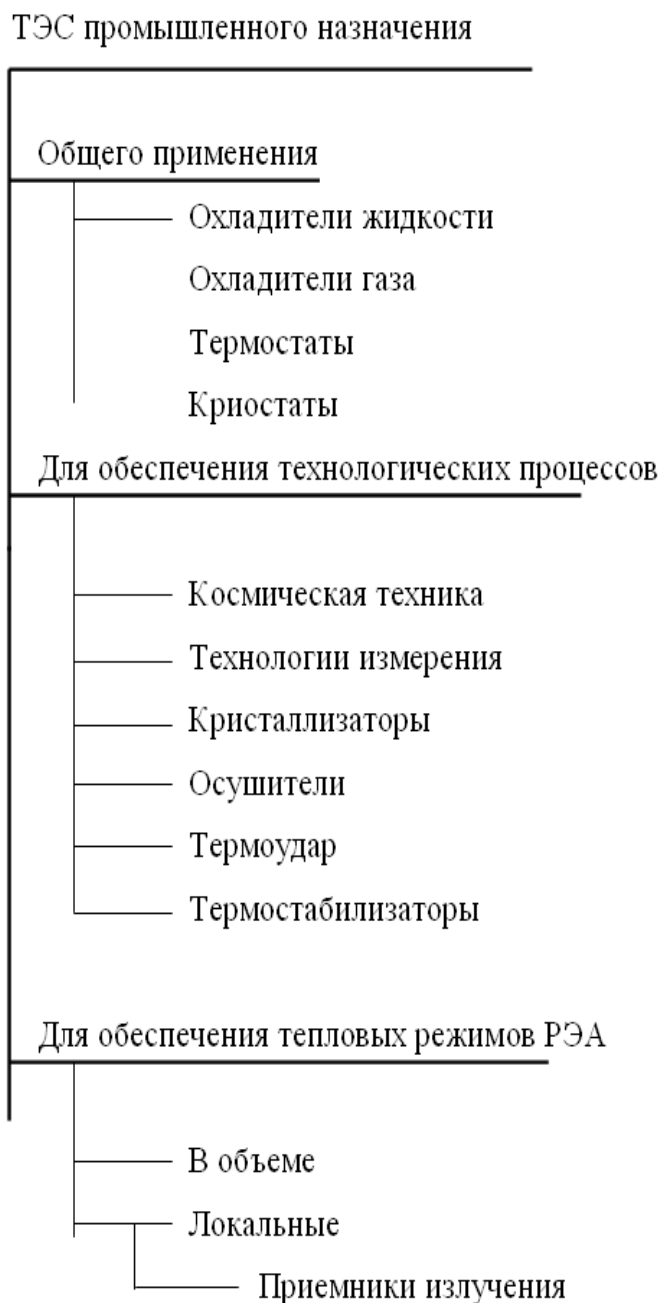


Рис.55. Структура термоэлектрических устройств промышленного назначения

Одной их классических областей применения термоэлектричества является термостабилизация радиоэлектронной аппаратуры. Существуют термоэлектрические устройства, обеспечивающие оптимальные температурные режимы в

объемах, содержащих блоки РЭА. Устройства локального действия обеспечивают термостабилизацию отдельных элементов РЭА при непосредственном тепловом контакте с источником тепловой нагрузки. Особое место в этом классе занимают охладители приемников излучения, которые позволяют на несколько порядков снизить фоновые (тепловые) шумы и соответственно повысить качество приема оптического сигнала.

## ***2. Приложения термоэлектрических устройств в биологии и медицине.***

Биология и медицина с самого начала практического использования эффекта Пельтье является областью его эффективного приложения. Такие преимущества термоэлектрических систем как бесшумность, отсутствие движущихся частей и токсичных хладагентов, а также высокая надежность, определили изобилие технических решений ТЭС в различных направлениях медицины и биологии. В СССР и России активные исследования в этом направлении проводились в НПО «Квант», ГСКБ ТФП, институте физики АН Азербайджана.

На рис.56 приведена структура реализаций термоэлектрических систем биомедицинского назначения. Структурируя системы медико-биологического назначения по результатам анализа литературы, прежде всего, выделим устройства, обеспечивающие локальное тепловое воздействие, т.е. криотермоаппликацию. Данное приложение наиболее соответствует природе эффекта Пельтье, как локального источника теплоты и холода, и широко используется в физиотерапии, хирургии, невропатологии, косметологии, профотборе.

В физиотерапии следует выделить устройства с объемным воздействием на поверхность тела человека в виде различного рода гибких повязок, шлемов, аппликаторов и т.п. Устройства с выраженным локальным (точечным) воздействием используются чаще всего в технологиях акупунктуры.

Хирургические приложения термоэлектрических приборов прежде всего представлены офтальмологическими приборами, обеспечивающими криовоздействие на хрусталик и сетчатку глаза при криоэкстракции и криопепсии. Следующей областью хирургии является кардиология, где термоэлектрически-



ми системами обеспечиваются тепловые режимы при операциях на открытом сердце. Известны также применения термоэлектрических устройств в урологии.

Следующими областями приложения выделим невропатологию и косметологию, где реализуются такие особенности эффекта Пельтье как малая инерционность и способность к реверсированию теплового потока.

Реакция организма на холодное воздействие и его переносимость исследуется при проведении профотбора с помощью специальных термоэлектрических устройств. Хорошая управляемость циклическим холодным воздействием используется в термоэлектрических устройствах, обеспечивающих бодрствование и высокий уровень работоспособности операторов ответственных технологических процессов.

Обеспечение оптимальных тепловых режимов при транспортировке вакцин и компонентов крови эффективно реализуется в устройствах, которые относятся к приложениям в гематологии.

К приложениям термоэлектрических устройств для биотехнологий относятся устройства, обеспечивающие термостабилизацию проб биообъектов, тепловые режимы биотехнологий на примере электрофореза. Особое значение имеют термоэлектрические приборы космического назначения, обеспечивающие биотехнологические процессы в невесомости. Известны также устройства сельскохозяйственного назначения, а также эффективные приложения термоэлектрических систем для задач амплификации ДНК в генной инженерии.

В литературе отражены и другие области медицины, в которых эффективно используются ТЭС. К ним относится стоматология, где термоэлектрическими устройствами обеспечивается хранение костной ткани и термостабилизация компаундов, а также анестезиология (испарение наркотических средств) и отторолинтология (исследования вестибулярного анализатора).

На рис.57 приведены некоторые разработки биомедицинского назначения, выполненные в ГСКБ ТФП (г. Санкт-Петербург), а на рис.58 – разработки, выполненные в СПбО ВНИИТ (г. Санкт-Петербург).

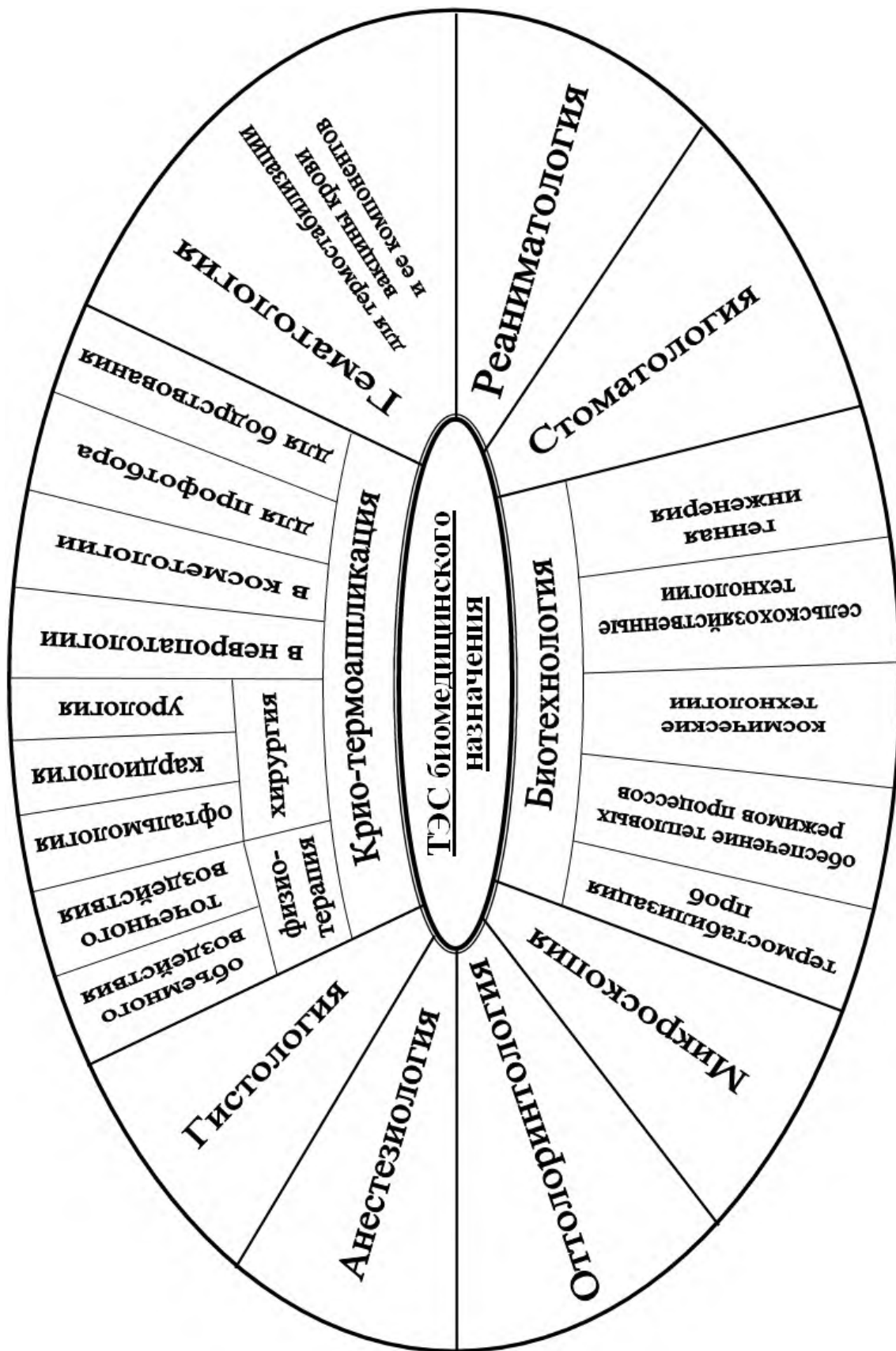
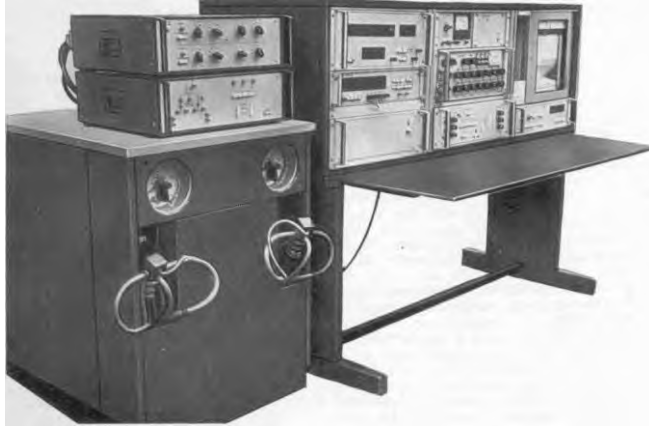


Рис.56. Структура реализаций термоэлектрических устройств биомедицинского назначения



а)



б)



в)



г)



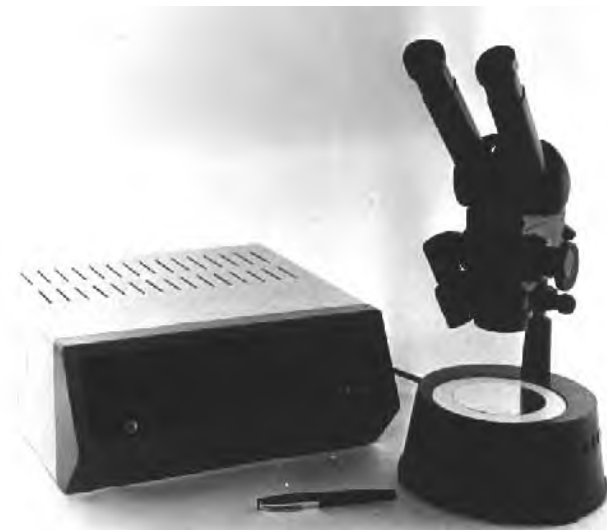
д)



е)

Рис.57. Разработки ГСКБ ТФП.

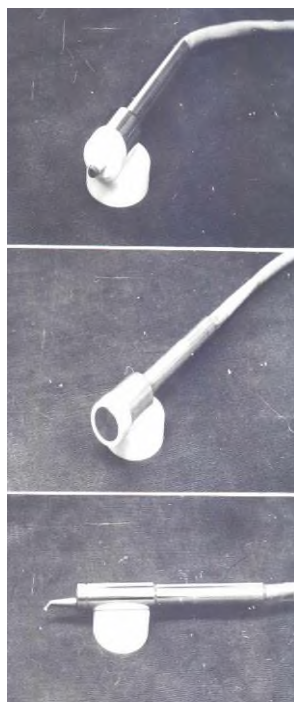
а)-микрокалориметр МИД-200; б)-замораживающий столик; в)-термостабилизатор пробирок ТСП-2; г)-термостабилизатор пробирок ТСП-3; д)-устройство «Биостат»; е)-генератор холодной воды для нейрохирургии.



а)



б)



в)



г)

Рис.58. Разработки СПБО ВНИИТ.

а)-микроскопный столик; б)-термостат с естественным конвективным теплоотводом; в)-криоапликатор; г)-криоапликатор офтальмологический во время операции.

### ***3. Термоэлектрические устройства бытового назначения:***

- холодильники для пикников (пикник-боксы или айс-боксы) объемом 15-40 л;
- охладители/нагреватели для воды;
- домашние холодильники для охлаждения соков, пива, вина, лекарств, для охлаждения и нагрева детского питания;
- малые термоэлектрические холодильники для гостиничных номеров.

### ***4. Термоэлектрические холодильные системы для транспорта:***

- холодильники для хранения продуктов в автомобилях, маломерных судах, малых самолетах, в купе пассажирских поездов;
- охладители/нагреватели воды для купе поездов, для самолетов, для судов;
- автомобильные охладители сидений;
- кондиционеры для пассажирских вагонов с дифференциацией параметров по купе, кондиционеры для кабин машинистов локомотивов, в том числе для поездов метро;
- автомобильные кондиционеры;
- охладители мотоциклетных шлемов.

### ***5. Лабораторное и научное оборудование:***

- охлаждаемые инфракрасные детекторы, рефрактометры, лазерные коллиматоры, фотоумножители, ПЗС матрицы, интегральные схемы, электронные платы, спектрофотометры, термопрограмматоры;
- охлаждаемые камеры и мешалки;
- детекторы точки замерзания жидкостей и точки росы;
- эталоны абсолютно черного тела;
- ячейки для электрофореза и осмометры;
- анализаторы загрязнения воздуха;
- приборы для определения температуры застывания нефти.
- термоэлектрические измерители температуры;

- преобразователи для измерения электрических величин;
- микрокалориметры;
- термоэлектрические приемники излучения;
- тепломеры.

### ***6. Термостатирующие устройства.***

Современное термоэлектрическое термостатирующее устройство представляет собой систему автоматического регулирования, в которой роль исполнительного устройства играет ТЭБ, которая, в зависимости от направления проходящего через нее тока, осуществляет нагрев или охлаждение термостатируемого объема, в котором помещается охлаждающее устройство.

Стенки термостата представляют собой две теплоотводящие оболочки, в промежутке между которыми прокладывается слой теплоизоляции. Блок-схема типового термоэлектрического термостатирующего устройства представлена на (рис.59.). Объектом регулирования является термостатируемый объем.

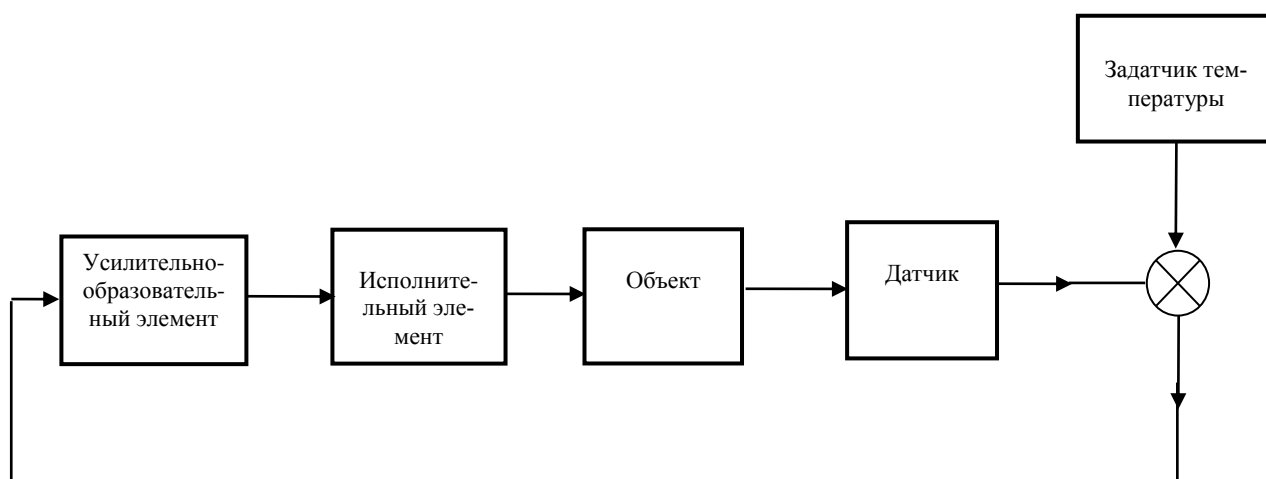


Рис.59. Блок-схема термоэлектрического термостатирующего устройства

В настоящее время намечаются две основные тенденции при термоэлектрическом термостатировании. Одна из них сводится к разработке модулей для термостатирования конкретных блоков или отдельных элементов устройства. Для теплоотвода от спаев ТЭМ используются сам корпус или специальные тепловые радиаторы (в ряде случаев предусматривают установку микро вентиляторов).

Другое направление основывается на применении отдельно стоящих термоэлектрических кондиционеров, которые подогревают или охлаждают воздух и подают его в термостатируемый объект. В этом случае более удачно сочетается проблема теплоотвода и рабочего режима. Термоэлектрические кондиционирующие устройства очень компактны и их регулирование осуществляется простым терморегулятором релейного типа.

В качестве примера на рис.60-61 приведен внешний вид термоэлектрических переносных термостатов, используемых для создания при транспортировании и ручных переносках оптимальных температурных условий хранения медицинских термочувствительных материалов: охлажденной донорской крови, плазмы, криопреципитата, трансплантатов, эндокринного сырья, различных лекарственных и иммунобиологических препаратов, в том числе вакцин, сывороток.



Рис.60. Переносной термоэлектрический термостат КОНТТЕРМ 12-01



Рис.61. Переносной термоэлектрический термостат для транспортировки медико-биологических объектов АРКТИ-КА-20М

Анализ патентной документации СССР и России выявил около 700 документов, касающихся только приложения термоэлектриков к задачам охлаждения. На рис.62 приведено распределение реализаций термоэлектрического охлаждения по некоторым областям техники.

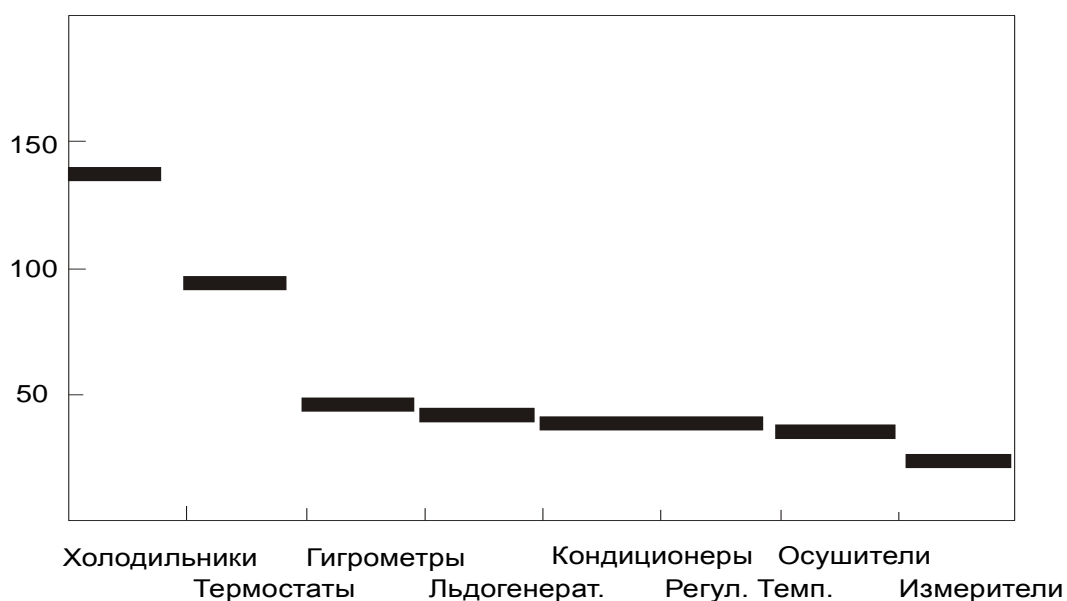


Рис.62. Термоэлектрические устройства в патентной документации СССР и России.



## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

В настоящее время существуют три основные области применения термоэлектрических генераторов:

- для катодной защиты магистральных газо- и нефтепроводов от коррозии;
- для питания космических аппаратов электрической энергией;
- для питания электрической энергией навигационных и метеорологических установок.

Конкретные конструктивные особенности термоэлектродгенераторов и особенности их применения для этих целей рассмотрены выше. Здесь кратко приведем наиболее перспективные и новые области использования термоэлектрической генерации электрической энергии.

Термоэлектродгенератор – идеальный источник тока для межпланетных сообщений. Единственный его конкурент в данном применении – фотоэлемент – перестает работать в отсутствии Солнца или на значительном удалении от него (за орбитой Марса). Источником же теплоты для термоэлектрического генератора энергии могут быть радиоактивные изотопы, период полураспада которых составляет сотни и тысячи лет.

Интересным применением термоэлектрического генератора электрической энергии является электростимулятор сердечной мышцы – термоэлемент, который вживляется под кожу пациента. Здесь источником теплоты также служит радиоактивный изотоп.

Естественно, термоэлектродгенераторы находят широкое применение и там, где использование традиционных источников тока связано с определенными сложностями – электронные буи, сигнальные знаки в труднодоступных регионах планеты и т.п. Кроме этого, термоэлектродгенератор является идеальным источником тока для термоэлектрических охлаждающих устройств.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

*Термоэлектрические измерители температуры (термопары).*

Термопара представляет собой простейший термоэлектрический генератор, который используется в качестве термометра. Термопара состоит из двух разнородных проводников 1 и 2 (обычно из металлической проволоки), соединенных с измерительным прибором (рис.63). Принцип измерения температуры основан на эффекте Зеебека, в соответствии с которым развиваемая термо-э.д.с.

$$E = \alpha(T_x - T_0),$$

где  $\alpha$  - коэффициент термо-э.д.с.,  $T_x$  - измеряемая температура,  $T_0$  - температура, которую имеют свободные концы термопары.

Для точного измерения температуры применяются дифференциальные термопары, у которых один спай термостатирован при известной температуре, а второй - используется для измерения неизвестной температуры.

В измерительной технике обычно используются стандартные термопары. Отечественная и зарубежная промышленность производит широкую номенклатуру стандартных термопар для обеспечения измерения температуры в различных диапазонах.

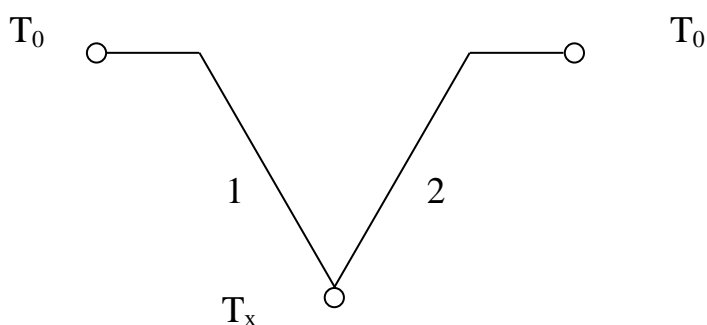


Рис.63. Термопара

*Преобразователи для измерения электрических величин.*

Термопары применяются не только для опосредованного измерения температуры, но и для опосредованного измерения электрических величин по тепловому действию тока. Такое измерительное устройство состоит из двух основных частей -

электрического нагревателя и термопары (или батареи термопар). Схема преобразователя для измерения электрических величин представлена на рис.64. связь между током  $I$ , подводимым к нагревателю, и термо-э.д.с  $E$ , возникающей в термопаре, согласно закону Джоуля-Ленца может быть представлена в виде

$$E = K_{np} I^2,$$

где  $K_{np}$  – коэффициент преобразователя, зависящий от материала нагревателя, типа термопары, конструкции и режима работы преобразователя.

Поскольку работа преобразователя основана на тепловом действии электрического тока, он позволяет измерять действующие значения величин и может быть использован как для переменного тока, так и для постоянного, причем направление постоянного тока не имеет значения.

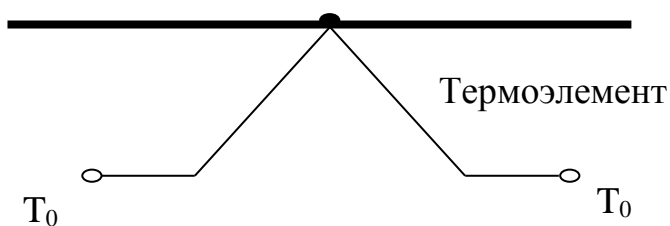


Рис.64. Преобразователь для измерения электрических величин

### *Микрокалориметры*

Микрокалориметрами называются приборы, служащие для измерения малого количества теплоты, образующейся в замкнутых объемах (реакционных камерах) (рис.65). Объектами изучения в микрокалориметрии являются различные биохимические и физико-химические процессы.

При адиабатической изоляции реакционной камеры количество выделяемой или поглощаемой теплоты в камере  $Q$  можно определить по изменению температуры  $\Delta T$  внутри камеры при известной теплоемкости  $C$  исследуемого вещества:

$$Q = C\Delta T.$$

Если в стенки реакционной камеры вмонтировать одну или несколько термоэлектрических батарей, то они смогут изменять разность температур между окружа-

ющей средой и внутренней частью камеры, а значит по термо-Э.Д.С. можно определить тепловыделения внутри камеры.

Существует множество разновидностей микрокалориметров, различающихся по тепловым условиям измерений, взаимодействию реакционной камеры с окружающей средой, конструкции, диапазонам измерений, чувствительности и т. п.

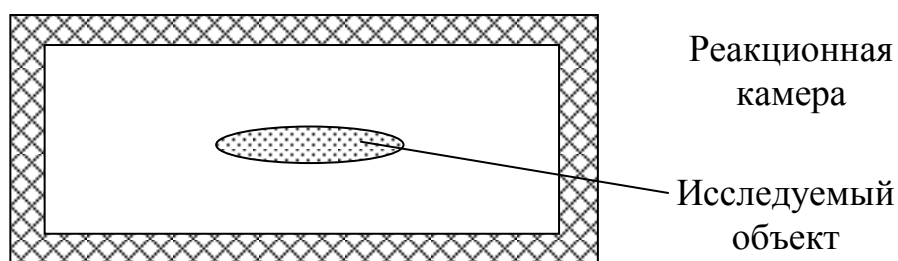


Рис.65. Микрокалориметр

### *Термоэлектрические приемники излучений*

Термоэлектрические приемники излучений представляют собой тепловые приемники, у которых энергия электромагнитного излучения преобразуется в тепловую и измеряется термоэлектрическими батареями. По своей природе такие приемники излучения являются неселективными, в этом заключается их важное преимущество по сравнению с другими типами приемников излучения.

На рис.66 представлена модель термоэлектрического приемника излучения. Термоэлектрические приемники излучения классифицируются по виду используемого термоэлемента, по его материалу и конструкции; по форме, материалу и конструкции коллектора энергии; по взаимодействию с окружающей средой и по назначению.

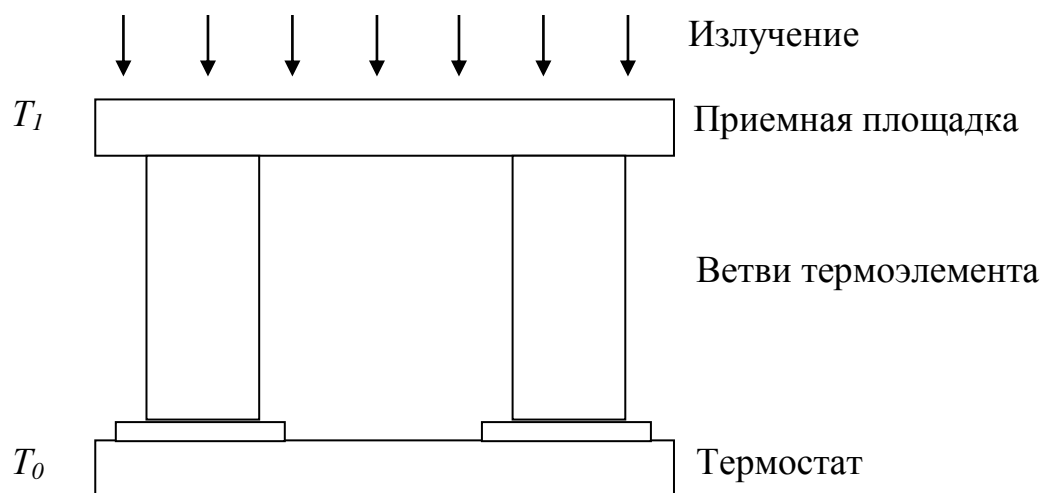


Рис.66. Модель термоэлектрического приемника излучения

### *Тепломеры*

Все процессы в живой и неживой природе всегда сопровождаются поглощением или выделением теплоты, что вытекает из второго начала термодинамики. Поэтому измерение тепловых параметров дает необходимую информацию как о процессах, протекающих в природе, так и о работе различных машин, механизмов, агрегатов и устройств.

Известны две основные физические величины, которые характеризуют тепловые процессы, - температура и поток тепла (или плотность потока тепла). Современная термометрия, т. е. способ измерения температуры, является вполне сформировавшейся наукой и позволяет измерять температуру с очень высокой точностью. В то же время термометрия как наука об измерении плотностей потоков тепла развита совершенно недостаточно по сравнению с термометрией.

На сегодняшний день существует несколько методов определения теплового потока. Один из них – метод вспомогательной стенки.

Метод вспомогательной стенки является весьма эффективным методом для измерения плотности потока тепла. Тонкая пластина толщиной  $h$  с известным

коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  помещается на пути потока тепла, который подлежит измерению (рис.67). Сущность метода состоит в измерении температурного перепада  $\Delta T$  между изотермическими плоскостями пластины. Тогда плотность потока тепла может быть определена согласно закону Фурье

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{h} .$$

Эффект Зеебека очень удобен для измерения перепада температур методом вспомогательной стенки, так как термоэлектрическая батарея может играть одновременно роль вспомогательной стенки и измерителя  $\Delta T$ . Поскольку термо-э.д.с.  $E$  пропорциональна перепаду температур, она пропорциональна также плотности потока тепла  $q$

$$E = kq ,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Чувствительность, быстродействие, диапазон рабочих температур, степень согласованности термоэлектрического тепломера с исследуемой средой определяются в первую очередь используемыми термоэлектрическими материалами. В качестве таких материалов обычно применяются металлические сплавы. Несмотря на высокую технологичность металлических термоэлектрических тепломеров, их чувствительность невысока. Поэтому для решения ряда задач теплотрии были разработаны полупроводниковые датчики теплового потока. Чувствительность таких преобразователей превышает, как минимум на порядок, чувствительность аналогичной батареи из металлического материала.

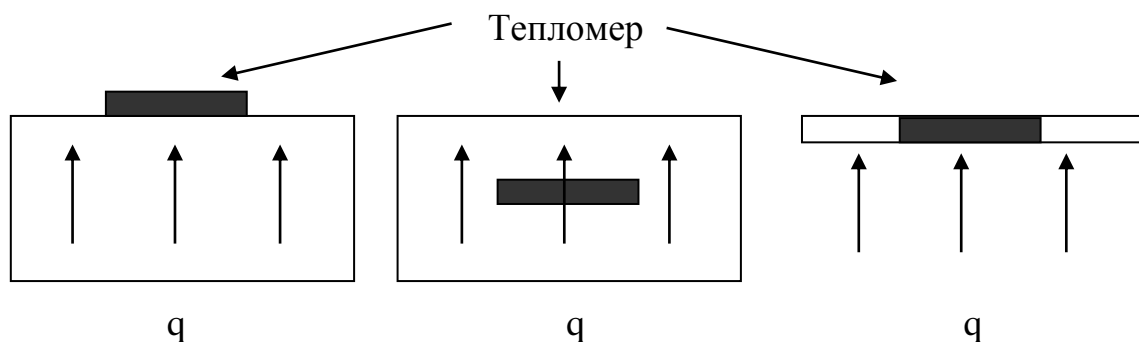


Рис.67. Метод вспомогательной стенки

Измерение плотностей потоков тепла с помощью высокочувствительных тепломеров требует уделять большое внимание процедуре градуировки датчиков и анализу погрешностей измерения.

Кроме обычных инструментальных погрешностей, свойственным всем видам измерений, при теплотрических измерениях особую роль играет погрешность, вызванная искажением первичного измеряемого теплового потока самим тепломером (вспомогательной стенкой). Это искажение обусловлено следующими причинами, вызванными установкой тепломера на поверхность исследуемого объекта:

- появлением дополнительного теплового сопротивления;
- изменением режима конвекции;
- изменением геометрии теплового поля;
- изменением излучательной способности;
- появлением контактного теплового сопротивления.

На сегодняшний день разработана серия теплотрических приборов и устройств различного назначения. К ним относятся следующие:

#### 1. Прибор контроля тепловых потерь.

Этот прибор предназначен для контроля и предотвращения потерь теплоты через тепловую изоляцию теплотрасс, тепловых элементов, для учета расхода теплоты при работе различных машин и агрегатов, контроля потерь теплоты через стены, окна и другие элементы зданий и сооружений. Он дает возможность снизить и оптимизировать потери теплоты, что позволяет добиться рационального расходования и существенной экономии тепловых энергоресурсов. Применяется для контроля над тепловыми процессами в судовом навигационном и электротермическом оборудовании, в соплах реактивных двигателей, при отбраковке технических стекол и т.д.

#### 2. Тепломер медико-биологического назначения.

Используется в медицине и биологии для экспресс-диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, для дифференциации здоровых, воспаленных и опухолевых тканей, для ранней диагностики хирургических заболеваний, для об-

нарушения биологически активных точек организма человека, для управления процессом мышечной электростимуляции. Он позволяет контролировать жизнедеятельность человека в экстремальных ситуациях и в условиях физических и тепловых перегрузок, дает возможность конструировать защитные костюмы и скафандры для работы в экстремальных условиях. Используется также для контроля жизнедеятельности различных животных.

### 3. Теплометрическое устройство геофизического назначения.

Служит для измерения тепловых потоков на дне морей и океанов и на поверхности Земли для обнаружения залежей полезных ископаемых, выявления запасов геотермальных вод, прогнозирования землетрясений и извержений вулканов, обнаружения полостей и скоплений газов в шахтах и горных выработках, а также скрытых очагов подземных пожаров и т. п.

### 4. Уровнемер.

Используется для неразрушающего определения уровня жидкости в непрозрачных емкостях. Применяется для измерения уровня пищевых продуктов в танках, уровня жидких металлов в кристаллизаторах.

### 5. Измеритель давления.

Позволяет определять давление жидкости или газа неразрушающим образом в герметично закрытых оболочках, таких, как тепловыделяющие элементы.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Анатычук А.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов, Черновцы: Прут, 1992.
2. Анатычук Л. И., Булат Л. П. Полупроводники в экстремальных температурных условиях. Санкт-Петербург: Наука, 2001.
3. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
4. Булат Л.П., Ведерников М.В., Вялов и др. Термоэлектрическое охлаждение / Под ред. Булата Л.П. – СПб. СПбГУНиПТ, 2002.
5. Иорданишвили Е.К., Бабин В.П. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии. М.: Наука, 1983.
6. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005.
7. Каганов М.А., Привин М.Р. Термоэлектрические тепловые насосы. Л.: Энергия, 1970. .
8. Лукишкер Э.М., Вайнер А.Л., Сомкин М.Н., Володагин В.Ю. Термоэлектрические охладители. М.: Радио и связь, 1986.
9. Парахин А.С., Налетов В.Л. Расчет и исследование термоэлектрических охладителей. Курган: КГУ, 2001.
10. Поздняков Б.С., Коктейлев Е.А. Термоэлектрическая энергетика. М.: Атомиздат, 1974.
11. Шарков А.В., Тахистов Ф.Ю., Кораблев В.А. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе. Учебное пособие // Под ред. проф. А. В. Шаркова. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003.