

Ю. Г. Манасян

Судовые
Термоэлектрические
устройства
и установки

25

Издательство
Судостроение.
Ленинград
1968

В книге излагаются основы теории и физики термоэлектрических процессов, а также методы расчета термоэлектрических генераторов, охлаждающих устройств и тепловых насосов.

Большое внимание уделено анализу конструктивных особенностей элементов термоэлектрических устройств и установок различного назначения и мощности и перспективам применения термоэлектрического метода преобразования энергии в судовой энергетике.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников судостроительной промышленности и может быть использована преподавателями и студентами высших технических учебных заведений.

В книге содержится 160 иллюстраций, 11 таблиц, приложения и библиография, включающая 173 наименования.

3-18-5

61-68

Прямое (безмашинное) преобразование тепловой энергии в электрическую — одна из наиболее актуальных проблем современной энергетики.

В последние годы в Советском Союзе и за рубежом ведутся интенсивные исследования термоэмиссионного, термоэлектрического и магнитогидродинамического методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую [1], [55]. Наибольшее практическое применение нашел термоэлектрический метод, который благодаря ряду весьма ценных особенностей получил широкое распространение в различных областях транспортной, в том числе судовой энергетики. Установки и устройства, основанные на термоэлектрическом методе, обладают значительным моторесурсом и отличаются простотой и надежностью, бесшумностью работы и отсутствием движущихся частей, универсальностью в отношении способов подвода и отвода теплоты. Не меньший интерес для направленного переноса теплоты представляют и термоэлектрические охлаждающие устройства и тепловые насосы, действие которых основано на использовании электроэнергии. Эти устройства также отличаются простотой и надежностью, а возможность создания комбинированных отопительно-охладительных агрегатов и кондиционеров открывает широкие перспективы для их использования на судах [4].

В последнее время вопросы практического применения термоэлектрических генераторов, охлаждающих устройств и тепловых насосов широко освещаются на страницах периодической печати [12]. Однако публикуемые материалы не содержат достаточно полных данных об использовании устройств и установок, основанных на термоэлектрическом методе прямого преобразования энергии, в судостроении.

В настоящей книге, в какой-то мере восполняющей этот пробел, излагаются основы теории, физики, расчета и конструирования судовых термоэлектрических устройств и установок в различных аспектах.

Пользуясь случаем, автор выражает благодарность Ю. Н. Горчинскому, И. И. Дьяченко, Л. В. Куркову за содействие в работе над книгой, а также научному редактору Е. К. Иорданишвили и рецензентам А. А. Азовцеву и И. А. Репину за ценные советы и замечания, высказанные при просмотре рукописи.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

F	площадь, m^2 , cm^2	B	магнитная индукция, $тл$
G	вес, $кГ$ массовый расход среды, $кг/сек$	L	коэффициент самондукции, $гн$
γ	удельный вес, $кГ/m^3$	M	коэффициент электрических сопротивлений
V	объем, m^3 объемный расход среды, $m^3/сек$	ψ	радиус окружности, $м$
v	удельный объем, $m^3/кг$	ϵ	модуль упругости, $кГ/m^2$, $кГ/см^2$
δ	плотность, $кг/m^3$, $г/см^3$	χ	удельная теплопроводность, $вт/м\cdotград$
β	коэффициент расширения, $1/град$	λ	коэффициент теплопроводности, $вт/м\cdotград$
T	термодинамическая температура, $^{\circ}К$	c	теплоемкость, $кдж/кг\cdotград$
ΔT	разность температур, $град$	χ	коэффициент температуропроводности, $м^2/сек$
S	энтропия, $дж/град$	ν	коэффициент кинематической вязкости, $м^2/сек$
ΔS	разность энтропий, $дж/град$	μ	коэффициент динамической вязкости, $кГсек/м^2$
η	коэффициент полезного действия	k_t	коэффициент теплопередачи, $вт/м^2\cdotград$
b, l	линейный размер, $м$, $см$, $мм$	Q	количество теплоты, $дж$, $вт$
d	диаметр, характерный геометрический размер, $м$, $см$, $мм$	q_T	удельный тепловой поток, $вт/м^2$
φ	величина угла, $рад$	q_e	количество электричества, $к$
e	основание натуральных логарифмов	α_T	коэффициент теплоотдачи, $вт/м^2\cdotград$
t	время, $сек$	α_S	коэффициент термоэдс, $мкв/град$
h	высота столба жидкости, $м$	n_e	концентрация носителей заряда, $1/см^3$
m	масса, $кг$	z	коэффициент добротности, $1/град$
w	скорость, $м/сек$	Π	коэффициент Пельтье, $мкв$
p	давление, $кГ/m^2$, $кГ/см^2$	τ	коэффициент Томсона, $мкв/град$
Δp	разность давлений $кГ/m^2$, $кГ/см^2$	v	подвижность носителей заряда, $см^2/в\cdotсек$
ρ	удельное электрическое сопротивление, $ом\cdotсм$	I	момент инерции сечения, $м^4$, $см^4$
r	внутреннее электрическое сопротивление, $ом$; радиус окружности, $м$, $см$, $мм$	Λ	коэффициент Пуассона, $кГ/m^2$, $кГ/см^2$
R	электрическое сопротивление нагрузки, $ом$; сила, $кГ$	Σ	механическое напряжение, $кГ/m^2$, $кГ/см^2$
E	электродвижущая сила, $в$	M	изгибающий, крутящий момент, $кГм$, $кГ\cdotсм$
ΔE	ширина запрещенной зоны, $в$	ξ	относительная деформация
σ	удельная электрическая проводимость, $1/ом\cdotсм$	ω	угловая скорость, $рад/сек$
j	плотность тока, $а/см^2$	i	количество термоэлектрических каскадов
P	электрическая мощность, $вт$, $квт$	ξ	коэффициент гидравлического сопротивления
U	напряжение, $в$		
I	сила тока, $а$		
u	работа выхода электрона, $в$		
ξ_x	холодильный коэффициент		
ξ_t	коэффициент эффективности теплового насоса		
Φ	магнитный поток, $вб$		

e_e — заряд электрона
 ξ — постоянная Больцмана
 N_A — число Авогадро

Индексы

кип — кипение
плав — плавление
макс — максимальное значение
ср — среднее значение
н — номинальное значение
кв — среднеквадратичное значение
к — коммутация
пп — полупроводник
из — электрическая изоляция
пл — герметизирующая пластина
г — горячий спай
х — холодный спай
эл — электрический
тэг — термоэлектрогенератор
тоу — термоэлектрическое охлаждающее устройство
ттн — термоэлектрический тепловой насос
ист — источник тепловой энергии
вх — параметры среды на входе
вых — параметры среды на выходе
ст — стенка
ж — жидкость
каск — каскадный

возд — воздушный
вод — водяной
м — местный
раст — растяжение
сж — сжатие
изг — изгиб
кр — кручение
у — упругий
внутр — внутренний
нар — наружный
тр — трение
движ — движитель
гидр — гидравлический
св — свободный
р — дырочный полупроводник
п — электронный полупроводник
кр — кристаллический
конт — контактный
с — самоиндукции
к. з — короткое замыкание
х. х — холостой ход
бат — батарея
П — Пельтье
т — Томсона
J — Джоуля
S — Зебека
е — электронный
Т — теплопередачи, теплоотдачи, тепловой

С термоэлектрическими эффектами человечество познакомилось почти полтора столетия назад, и уже скоро они стали использоваться в различных областях техники. На этих эффектах основано например, действие, некоторых контрольно-измерительных приборов, устройств для преобразования лучистой энергии в электричество и т. п. Однако почти целое столетие в центре внимания многих ученых продолжали оставаться термоэлектрические свойства различных металлов, которые из-за низкой термоэлектрической эффективности не могли найти применения в области энергетики [83]. Потребовались десятки лет напряженного труда многих исследователей, прежде чем академику А. Ф. Иоффе и его сотрудникам удалось четко сформулировать требования к термоэлектрическим свойствам обширной группы материалов, относящихся к классу полупроводников и полуметаллов, и обосновать огромные возможности применения этих материалов в различных областях техники [10], [14], [24—26]. Исследования, выполненные под руководством А. Ф. Иоффе, были положены в основу современных знаний в области термоэлектричества. Впервые были созданы предпосылки для реализации научных разработок, результатом которых явились термоэлектрические устройства и установки различного типа и назначения [15], [16], [74], [80]. Эти далеко не совершенные образцы термоэлектрических холодильников и генераторов показали огромную практическую ценность и перспективность устройств подобного типа.

В ближайшем будущем термоэлектрические устройства и установки, по-видимому, найдут широкое применение и в судостроении [63], [73], [77].

По мере увеличения эффективности термоэлектрических материалов для преобразования энергии, уменьшения их стоимости и упрощения технологии изготовления область их целесообразного применения непрерывно расширяется [4], [22].

Охлаждающие устройства и тепловые насосы, аварийные и вспомогательные электрогенераторы, в которых используются различные виды органического топлива, электрогенераторы утилизационного типа, преобразующие в электрическую энергию «бросовую» теплоту судовых энергетических установок, и, наконец, главные судовые термоэлектрические установки — все это возможные области использования термоэлектрогенераторов в судостроении. Однако ряд присущих термоэлектрогенераторам особенностей в некоторых случаях позволяет считать их приме-

нение целесообразным уже в настоящее время. Тем не менее, решение по этому вопросу должно приниматься в каждом отдельном случае на основе всесторонней оценки положительных и отрицательных качеств термоэлектрических устройств и установок с учетом их конкретного целевого назначения.

К сожалению, относительно низкая эффективность, малые значения э. д. с. термоэлементов, обусловливающие сложность коммутации большого количества последовательно соединенных термоэлементов, а также относительно малые значения электрического сопротивления изоляции и, наоборот, большие значения внутреннего электрического сопротивления, которые вызывают большие токи утечки и повышают опасность обслуживания, существенно ограничивают области использования термоэлектро-генераторов. Немаловажное значение в этом плане имеет и их относительно высокая стоимость.

Процесс постепенного внедрения термоэлектрических устройств и установок в различные области энергетики будет ускоряться по мере их дальнейшего совершенствования, а также улучшения характеристик существующих и создания новых высокоэффективных полупроводниковых материалов. Возможности науки в этом отношении неисчерпаемы и, как справедливо отметил академик А. Ф. Иоффе, «Трудно думать, что при этих условиях физика и техника полупроводников достигли устойчивого состояния, за которым последует, как в уже установленных областях техники, медленный процесс усовершенствования. Наоборот, можно не сомневаться, что мы находимся в преддверии бурного прогресса» [30].

§ 1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ

ПРОВОДНИКИ, ИЗОЛЯТОРЫ, ПОЛУПРОВОДНИКИ

Известно, что существующие в природе элементарные вещества и химические соединения по ряду физических характеристик делятся на три класса: два основных — проводники и изоляторы и один промежуточный — полупроводники.

Проводники и изоляторы отличаются противоположными электротехническими свойствами. Полупроводники характеризуются существенными количественными и качественными различиями от проводников и изоляторов.

Таблица 1

**Удельное электрическое сопротивление проводников,
полупроводников и изоляторов при комнатной температуре**

Материал		Удельное электрическое сопротивление ρ , $\text{ом}\cdot\text{см}$
Класс	Наименование	
Проводники	Алюминий	$2,5 \cdot 10^{-6}$
	Медь	$1,6 \cdot 10^{-6}$
	Серебро	$1,5 \cdot 10^{-6}$
	Железо	$10 \cdot 10^{-6}$
Полупроводники	ZnSb (p -тип)	$2,8 \cdot 10^{-3}$
	PbTe (n -тип)	$0,67 \cdot 10^{-3}$
	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (n -тип)	$1 \cdot 10^{-3}$
	$\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -тип)	$0,67 \cdot 10^{-3}$
Изоляторы	Полиэтилен	$10^{15} \div 10^{17}$
	Полихлорвинил	$10^{12} \div 10^{14}$
	Гетинакс	$10^{11} \div 10^{13}$
	Слюдя (мусковит)	$10^{14} \div 10^{15}$

Одной из основных, определяющих характеристик электротехнических свойств любого материала является удельное электрическое сопротивление ρ (или удельная электрическая проводимость $\sigma = \frac{1}{\rho}$). Для многих материалов ρ может быть различным в зависимости от кристаллографического направления, в котором оно измеряется. Весьма существенное влияние на его величину оказывает температура. У чистых металлов и многих их сплавов с увеличением температуры ρ возрастает, у полупроводников и изоляторов — уменьшается.

В некоторых случаях температурные изменения удельного электрического сопротивления оказываются настолько большими, что при значительном нагревании изоляционные материалы могут стать проводниками (например, стекло).

Различия физических свойств некоторых материалов, относящихся к рассмотренным классам веществ, иллюстрируются данными табл. 1.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Твердые тела, наиболее часто применяемые в термоэлектричестве, имеют кристаллическую структуру, свойственную не только металлам, но и большинству полупроводниковых материалов.

Из общих курсов физики известно, что затвердевание элементарных веществ и химических соединений может происходить в результате увеличения вязкости или появления в жидкости микроскопических твердых частиц, имеющих форму многогранников (кристаллов). В первом случае жидкость превращается в стеклообразное твердое тело. Процесс затвердевания идет непрерывно, и точка перехода из жидкого состояния в твердое точно установлена быть не может. Твердое тело подобного типа называется аморфным и может рассматриваться как переохлажденная жидкость. Кроме отсутствия фиксированной температуры перехода из жидкого состояния в твердое, аморфные тела характеризуются изотропией свойств, т. е. идентичностью численных значений физических характеристик, измеренных по всем направлениям.

В подавляющем большинстве случаев затвердевание жидкости сопровождается появлением кристаллов. Процесс затвердевания идет при постоянной для данного вещества температуре. В отличие от аморфных тел кристаллические материалы характеризуются анизотропией свойств, т. е. зависимостью основных физических характеристик от кристаллографического направления, в котором они измеряются.

Таким образом, кристаллические тела отличаются упорядоченностью внутренней структуры, при которой атомы, ионы и

молекулы располагаются в узлах геометрически правильных пространственных решеток. Если в газах и жидкостях молекулы, ионы и атомы в процессе теплового движения могут перемещаться по всему объему, занимаемому средой, то в твердых телах кристаллического строения их тепловое движение сводится к колебаниям около узлов кристаллической решетки.

Поскольку между молекулами, ионами и атомами кристаллической решетки существуют определенные связи и при этом они находятся в состоянии колебательного теплового движения, любая кристаллическая решетка характеризуется конечными значениями потенциальной и кинетической энергии. Сумма этих значений называется внутренней энергией решетки. Доказано, что любая кристаллическая решетка, представляющая собой плотную упаковку атомов, молекул и ионов вещества, характеризуется минимальной потенциальной энергией системы. Для разных типов кристаллических решеток плотность упаковки структурных элементов, характеризующаяся так называемым координационным числом, различна.

В зависимости от типа структурных элементов и характера сил взаимодействия между ними в кристаллографии различают четыре типа кристаллических решеток: атомные, ионные, молекулярные и металлические.

В атомных кристаллических решетках, образованных из атомов вещества, структурные элементы находятся под действием так называемых ковалентных сил. Возникновение этих сил обусловливается наличием в составе некоторых молекул электронных пар: двух электронов, обладающих одинаковой энергией и противоположными спинами. Ковалентная связь атомов наиболее прочная. Она характерна для материалов, отличающихся тугоплавкостью, большой скрытой теплотой испарения и твердостью (например, алмазов).

Ионные кристаллические решетки состоят из попеременно чередующихся положительных ионов металла и отрицательных ионов металлоида. Благодаря противоположным зарядам ионов между ними возникают электростатические силы притяжения. Ионные кристаллы характерны для таких веществ, как поваренная соль, хлористый цезий и др.

Молекулярные кристаллические решетки образуются из поллярных молекул, между которыми возникают силы взаимодействия, так называемые ван-дер-ваальсовы силы, имеющие электрическую природу. В молекулярной решетке они осуществляют довольно слабую связь. Молекулярную кристаллическую решетку имеют лед, природная сера и многие органические соединения.

Металлические кристаллические решетки характеризуются наличием в их узлах положительно заряженных ионов металла. Между положительно заряженными ионами возникают силы отталкивания, однако благодаря свободным электронам, имею-

щимся внутри металла, положительный заряд ионов нейтрализуется отрицательным зарядом электронов, и таким образом обеспечивается возникновение электростатических сил притяжения, обуславливающих устойчивость кристаллической решетки.

МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Многочисленные эксперименты показали, что при прохождении электрического тока через металлы в последних не обнаруживается каких-либо изменений химического характера и каких-либо перемещений атомов вещества. На основании этого явления было сделано предположение о существовании в металлах свободных носителей зарядов — электронов. Впоследствии эта гипотеза была подтверждена экспериментально. Представление о свободных электронах, перемещающихся между узлами кристаллической решетки, лежит в основе электронной теории металлов. Свободные электроны в некотором объеме металла уподобляются идеальному газу и поэтому носят название электронного газа.

Энергию поступательного движения одного электрона можно определить по уравнению Больцмана:

$$\frac{m_e \bar{w}_e^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1)$$

где m_e — масса электрона, g ;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура, $^{\circ}\text{K}$;

\bar{w}_e — средняя скорость поступательного движения электрона, м/сек.

Из уравнения (1) может быть определена средняя квадратичная скорость поступательного движения электрона:

$$\bar{w}_{e_{\text{кв}}} = \sqrt{\bar{w}_e^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} = 6750 \sqrt{T} \text{ м/сек.} \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что абсолютное значение средней скорости электронов \bar{w}_e приближается к значению их средней квадратичной скорости $\bar{w}_{e_{\text{кв}}}$. Однако среднее значение вектора скорости теплового движения электрона из-за беспорядочности, хаотичности этого движения оказывается равным нулю. Таким образом, тепловое движение электронов не вызывает электрического тока. Это объясняется отсутствием какого-либо преимущественного направления движения носителей заряда и тем, что суммарный заряд, проходящий в единицу времени через какую-либо площадку внутри материала, оказывается равным нулю.

Такое положение имеет место лишь до тех пор, пока внутри металлического проводника не создается электрическое поле. При возникновении на его концах разности потенциалов картина

резко меняется. В этом случае каждый электрон оказывается под действием некоторой силы, величина которой зависит от величины заряда электрона и напряженности электрического поля, а направление противоположно направлению поля. В данном случае электрическое поле является причиной направленного движения электронов, т. е. причиной возникновения электрического тока.

Направленное движение электронов под влиянием электрического поля может быть описано аналитическими зависимостями.

Известно, что сила тока равна количеству электричества, переносимого в единицу времени через некоторую поверхность внутри проводника:

$$I = c_e N' a, \quad (3)$$

где $c_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ — величина электрического заряда электрона, C ;

N' — количество электронов, проходящих через рассматриваемую поверхность в единицу времени, $1/\text{сек.}$

Если площадь поперечного сечения проводника, по которому идет ток, обозначить через F , то за время dt через эту площадь пройдут все электроны, занимающие объем $F \bar{w}_e \text{пост} dt$, где $\bar{w}_e \text{пост}$ — средняя скорость направленного движения электронов. Примем далее, что в единице объема вещества содержится некоторое количество свободных электронов n_e . Если приближенно считать, что количество свободных электронов равно количеству атомов вещества, содержащихся в единице объема, то можно вывести зависимость

$$n_e = N_A \frac{\delta}{m_e A} 1/cm^3, \quad (4)$$

где $N_A = 6,0247 \cdot 10^{23}$ — число атомов в грамм-атоме (моле) вещества, $1/\text{моль};$

δ — плотность вещества, $g/cm^3;$

$m_e A$ — масса грамм-атома (моля), $g/\text{моль}.$

На основании формул (3) и (4) можно получить

$$dN = n_e \bar{w}_e \text{пост} F dt.$$

При этом количество электронов, проходящих через площадь F в единицу времени, определяется по формуле

$$N' = \frac{dN}{dt} = n_e \bar{w}_e \text{пост} F 1/\text{сек.} \quad (5)$$

Таким образом величина тока, проходящего через площадь F , и плотность тока соответственно могут быть найдены из выражений

$$I = c_e n_e \bar{w}_e \text{пост} = e_e N_A \bar{w}_e \text{пост} F \frac{\delta}{m_e A} a; \quad (6)$$

$$j = \frac{I}{F} = e_e N_A \bar{w}_e \text{пост} \frac{\delta}{m_e A} a/cm^3. \quad (7)$$

Вышеизложенное позволяет оценить величину электрического тока в проводниках, основываясь на представлении о направленном движении свободных носителей заряда под влиянием электрического поля. Необходимым условием постоянства электрического тока является при этом неизменная величина напряженности электрического поля, связанная с постоянной затратой энергии на преодоление сопротивления электрическому току.

Металлическая кристаллическая решетка характеризуется наличием ионов, расположенных в ее узлах, и свободных электронов. Часть свободных электронов удерживается электрическим полем ионов, часть, так называемые электроны проводимости, непосредственно участвует в создании электрического тока. При создании внутри металлического проводника электрического поля, т. е. при создании на его концах разности потенциалов, электроны проводимости, находящиеся в состоянии хаотического теплового движения, начинают перемещаться в направлении, противоположном направлению электрического поля. Однако при направленном движении под влиянием электрического поля электроны проводимости испытывают взаимодействие с ионами кристаллической решетки, которые находятся в состоянии теплового колебательного движения. После каждого такого взаимодействия направление движения и скорость электрона меняются. На пути от одного столкновения до другого, т. е. на пути длины свободного пробега, электрон под влиянием электрического поля движется ускоренно, а при столкновении целиком или частично обменивается кинетической энергией с ионом кристаллической решетки. Такой процесс обмена энергией идет непрерывно и требует для ускорения электронов после каждого акта столкновения постоянной затраты энергии извне. Энергия же электронов проводимости, передающаяся ионам, расходуется на увеличение внутренней энергии тела, т. е. при прохождении тока происходит процесс выделения тепла Джоуля.

На основании рассмотренных физических явлений можно определить скорость направленного движения электронов проводимости под влиянием электрического поля.

Если обозначить напряженность электрического поля через $E_{эл.п.}$, а заряд электрона через e_e , то величина силы, действующей на электрон, будет равна $e_e E_{эл.п.}$. Импульс этой силы за время свободного пробега электрона t (время между двумя последовательными соударениями) будет выражаться произведением $e_e E_{эл.п.} t$, что численно равно количеству движения, приобретаемому электроном к концу свободного пробега. Можно считать, что в начале свободного пробега количество движения электрона равно нулю. В этом случае среднее приращение его скорости за время свободного пробега

$$\bar{w}'_{e \text{ пост}} = \frac{1}{2} \left(0 + \frac{e_e E_{эл.п.} t}{m_e} \right) = \frac{e_e E_{эл.п.} t}{2m_e} \text{ м/сек.}$$

Среднее значение этой величины для всех свободных пробегов

$$\bar{\omega}_e \text{ пост} = \frac{e_e E_{\text{эл. п}} t}{2m_e} \text{ м/сек}$$

представляет собой не что иное, как скорость течения электронного газа

$$\bar{\omega}_e \text{ пост} = \frac{e_e E_{\text{эл. п}} t}{2m_e} \text{ м/сек.} \quad (8)$$

Если обозначить через \bar{l}_e среднюю длину свободного пробега электрона, то среднее время пробега

$$\bar{t} = \frac{\bar{l}_e}{\bar{\omega}_e \text{ пост}} \text{ сек.}$$

В этом случае

$$\bar{\omega}_e \text{ пост} = \frac{e_e E_{\text{эл. п}} \bar{l}_e}{2m_e \bar{\omega}_e \text{ пост}} = v E_{\text{эл. п}} \text{ м/сек,} \quad (9)$$

где $v = \frac{e_e \bar{l}_e}{2m_e \bar{\omega}_e \text{ пост}}$ — средняя скорость носителя заряда, которую он приобретает в электрическом поле напряженностью равной единице.

Эта величина называется подвижностью носителя заряда и имеет размерность $\text{см}^2/\text{в}\cdot\text{сек.}$

На основании закона Ома и выведенных выше зависимостей получаем

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e_e n_e v \text{ 1/ом}\cdot\text{см.} \quad (10)$$

Поскольку для металлических проводников величины e_e и n_e являются постоянными и независимыми от различных внешних условий, величина электропроводности целиком и полностью определяется подвижностью носителей заряда.

Это положение подтверждается формулой (10). Здесь необходимо отметить, что металлы, обладая хорошей электропроводностью, характеризуются также высокими значениями теплопроводности. Математически взаимосвязь между удельной электропроводностью и теплопроводностью выражается формулой Видемана—Франца:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = f T, \quad (11)$$

где $f = \frac{3R^2}{e_e^3}$ — коэффициент пропорциональности, не зависящий от свойств металла, $\text{в}^2/\text{град.}$

Таковы основные положения классической электронной теории металлов. Эта теория позволяет вывести зависимости, объясняющие механизм электропроводности при условии следующих допущений:

1. Электронный газ может рассматриваться как идеальный газ.
2. Движение электронов подчиняется законам классической механики.
3. Взаимодействие между электронами отсутствует.
4. Взаимодействие электронов и ионов рассматривается как соударение тел.

МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В основу современных представлений о строении материи положено утверждение о существовании атомов вещества, состоящих из положительно заряженных протонов и не имеющих заряда нейтронов, образующих положительно заряженное ядро, и отрицательно заряженных вращающихся вокруг ядра электронов. На основании законов квантовой механики энергия электронов, входящих в состав атома, может иметь гамму определенных значений, т. е. электроны могут обладать лишь вполне определенной энергией. Энергетические уровни электронов, согласно этой теории, носят дискретный характер, а потеря или приобретение ими некоторой дополнительной энергии рассматривается как переход с одного «разрешенного» энергетического уровня на другой. При этом дискретный характер энергетических электронных уровней становится причиной такого же дискретного поглощения или излучения электроном энергии при переходе с одного энергетического уровня на другой. Дискретные порции энергии, поглощаемой или излучаемой электроном, носят название фотонов.

Квантовая механика позволяет глубже, чем классическая физика, понять закономерности строения материи. Рассматривая изложенные выше классические положения о строении кристаллических решеток, мы не учитывали взаимодействие электрических полей структурных элементов таких решеток. Однако именно это взаимодействие является причиной образования внутри кристаллической решетки электрического поля, периодический характер которого может быть нарушен лишь дефектами самой решетки. Взаимодействие электрических полей структурных элементов кристаллической решетки приводит еще к одному явлению, носящему квантовый характер: вместо характерных для каждого атома электронных уровней образуются зоны уровней, создающие энергетический спектр. В соответствии с принципом Паули на каждом из этих уровней, так же как и на уровнях, характерных для изолированного атома, может находиться по два электрона, отличающихся друг от друга противоположными значениями спинов. Энергетический спектр атомов состоит при этом из «разрешенных» и «запрещенных» энергетических зон. Помимо спектра основных уровней (зон), электроны атомов, находящихся в кристалле, могут иметь так называемый спектр уровней (зон) возбуждения.

Рассмотрим вид энергетических спектров валентных электронов металлического проводника, полупроводника и изолятора (рис. 1). Из рисунка видно, что энергетические уровни этих материалов имеют совершенно различный характер и позволяют довольно наглядно объяснить различие их свойств.

В случае металлического проводника (рис. 1, а) к спектру основных уровней непосредственно примыкает спектр возбужденных уровней электронов. При температуре $T_o = 273^\circ \text{ К}$ валентные электроны заполняют лишь спектр основных уровней, а спектр уровней возбуждения остается незаполненным. Поскольку в металлах энергетические уровни образуют сплошной спектр,

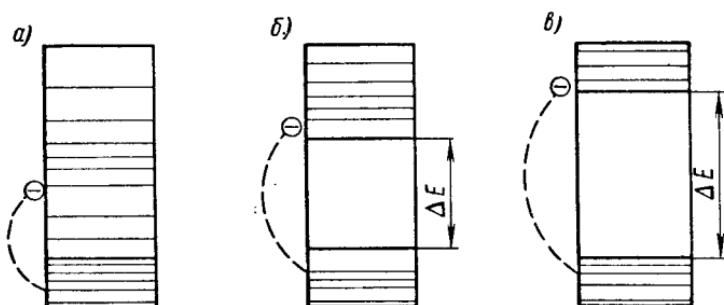


Рис. 1. Диаграмма энергетических спектров электронов: а—в металлических проводниках; б — в полупроводниках; в — в изоляторах

электроны даже при комнатной температуре легко могут переходить с одного уровня на другой в пределах спектра основных уровней, а также на свободные уровни спектра уровней возбуждения, обусловливая таким образом электропроводность металла.

Электропроводность полупроводников (рис. 1, б) также зависит от валентных электронов. Энергетический спектр полупроводников характеризуется наличием зон основных (валентных) уровней, запрещенной зоны и зоны проводимости. При температуре $T_o = 273^\circ \text{ К}$ на каждом из основных уровней полупроводника находится по два электрона с противоположно направленными спинами. Спектр основных уровней оказывается целиком заполненным электронами, а спектр уровней проводимости при этом свободен. Полупроводник в рассматриваемом случае является изолятором и его электрическая проводимость равна нулю, так как для перехода с основных уровней на уровни проводимости электронам необходимо преодолеть энергетический барьер в виде запрещенной зоны. Это оказывается возможным лишь при условии приобретения электроном некоторого количества энергии $H > \Delta E$ извне.

Для изоляторов также характерно существование запрещенной зоны, но большей по ширине, чем у полупроводников (рис. 1, в).

Таким образом, полупроводники и изоляторы отличаются от металлов наличием запрещенных зон. Между полупроводниками и изоляторами качественных различий нет и граница между ними является условной.

Зависимость электропроводности полупроводника от числа электронов, преодолевших энергетический барьер и перешедших на уровни проводимости, позволяет сделать вывод о том, что при нагревании вещества число электронов проводимости увеличивается. Математически это явление описывается экспоненциальной зависимостью

$$n_e = n_{e \text{ вал}} e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \text{ 1/cm}^3, \quad (12)$$

где $n_{e \text{ вал}}$ — количество электронов, участвующих в создании валентных связей, 1/cm^3 .

Удельная электрическая проводимость полупроводника также находится в экспоненциальной зависимости от температуры и ширины запрещенной зоны (ΔE):

$$\sigma \approx \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \text{ 1/ом} \cdot \text{см}, \quad (13)$$

где σ_0 — удельная электрическая проводимость полупроводника при комнатной температуре, $\text{1/ом} \cdot \text{см}$.

Таким образом, абсолютная температура и наличие запрещенной зоны обусловливают изменение величины удельной электрической проводимости полупроводника.

Значительное увеличение этого параметра может наступить при наличии в полупроводнике даже небольшого количества примеси. У металлов, наоборот, примесь приводит к уменьшению электропроводности.

Поскольку величина удельной электрической проводимости определяется величиной заряда электрона, концентрацией носителей заряда и их подвижностью, можно утверждать, что причиной изменения электропроводности в таком случае является изменение концентрации электронов проводимости. Так как влияние примеси на величину электрической проводимости имеет место при прочих равных условиях, то факт ее увеличения при введении примеси может быть объяснен лишь уменьшением ширины реальной запрещенной зоны за счет образования в ней дополнительных энергетических уровней электронов (рис. 2).

Если энергетические уровни электронов примеси при этом располагаются так, что величина энергетического барьера электронов $\Delta E_1 < \Delta E$ и атомы примеси становятся дополнительным источником электронов проводимости, то такие примеси называются донорными (рис. 2, б).

Однако существует и другой вид примеси — акцепторной, создающей акцепторные уровни, которые примыкают к спектру (зоне) основных энергетических уровней электронов. Поскольку

для перехода с основных уровней на акцепторные электрону нужно преодолеть энергетический барьер $\Delta E_2 < \Delta E$, вероятность этого процесса может стать достаточной и акцепторные уровни при нагревании окажутся заполненными электронами.

Однако переход электронов на акцепторные уровни освобождает часть энергетических уровней основного спектра. Поэтому при создании в полупроводнике электрического поля на освободившиеся более высокие энергетические уровни основного спектра будут попадать электроны с более низких уровней того же спектра. Следовательно, у той части электронов, которая остается в пределах уровней основного спектра, в этом случае появляется воз-

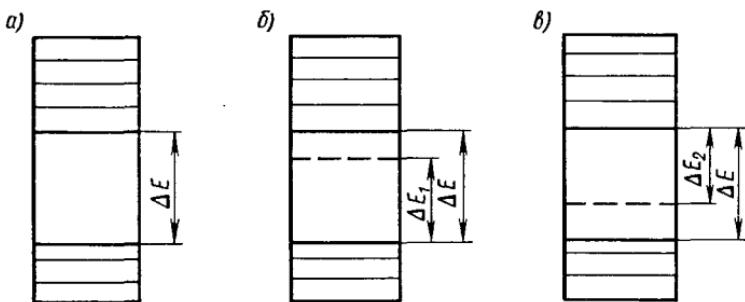


Рис. 2. Диаграмма энергетических спектров электронов в полупроводниках: а — чистом; б — с донорной примесью; в — с акцепторной примесью

можность перемещения. Под действием электрического поля электроны приобретают направленное движение. Однако это явление эквивалентно тому, что при движении электронов, находящихся на уровнях основного спектра, свободные места с энергией этого уровня перемещаются в направлении, противоположном движению электронов. Электропроводность при этом может быть объяснена либо как направленное движение электронов, либо как условное перемещение в противоположном направлении свободных энергетических уровней, или вакансий. Из приведенной схемы следует, что процесс перемещения отрицательно заряженных электронов в этом случае условно можно заменить процессом противоположного им перемещения некоторых фиктивных положительных зарядов, которые получили название дырок. Введение понятия дырок позволяет значительно упростить теоретический анализ явлений, имеющих место при рассмотренном типе электрической проводимости полупроводников, которая называется дырочной проводимостью.

В связи с качественным различием проводимости полупроводников (электронная или дырочная проводимость) в термоэлектричестве рассматриваются электронные (*n*-тип) и дырочные (*p*-тип) *

* От латинских слов *negativus* — отрицательный и *positivus* — положительный.

полупроводниковые материалы. Кроме того, существуют и такие материалы, в которых примеси создают одновременно и донорные, и акцепторные уровни. В этом случае электропроводность обуславливается как электронной, так и дырочной проводимостью, т. е. имеет место смешанный тип проводимости. Следует указать, что в совершенно чистых, так называемых собственных полупроводниковых материалах, существует именно этот тип проводимости.

Рассмотрим процессы, происходящие в таком полупроводнике при $T > 273^{\circ}$ К. Увеличение внутренней энергии тела приводит к тому, что часть электронов полупроводника приобретает необходимую энергию для преодоления энергетического барьера и переходит с уровней валентной зоны на уровня зоны проводимости. Этот процесс сопровождается образованием свободных уровней в основном спектре, т. е. дырок, в количестве, равном количеству электронов проводимости. При создании электрического поля в теле возникает движение электронов и дырок, а общий ток представляет собой сумму электронного и дырочного токов. При этом, поскольку концентрации электронов и дырок считаются равными, а их заряды имеют при разных знаках одинаковую величину, казалось бы, что электронный ток должен быть равен дырочному. На самом же деле, поскольку в большинстве случаев подвижность электронов выше, чем дырок, у полупроводника со смешанной проводимостью, как правило, электронный ток преобладает над дырочным.

Необходимо отметить, что смешанный тип проводимости характерен как для полупроводников с акцепторными или донорными примесями, так и для чистых полупроводников. Поэтому деление полупроводников на электронные и дырочные следует понимать лишь как признак, свидетельствующий о преобладающем типе проводимости.

Проводимость чистого полупроводника принято рассматривать как собственную проводимость, в то время как проводимость, обусловленную примесью, классифицируют как проводимость примесную.

В заключение следует отметить характерные особенности влияния температуры на проводимость полупроводника. При относительно низких температурах в полупроводнике преобладает проводимость, обусловленная примесью. В этих условиях в электронном полупроводнике переход электронов на уровни проводимости происходит как с основных, так и с донорных уровней. В начале этого процесса основным источником электронов проводимости являются донорные уровни, но по мере их истощения начинает преобладать процесс ухода электронов с уровней основного спектра, и появляется собственная проводимость. Такие явления характерны для большинства полупроводников. Однако существуют полупроводники, собственная проводимость которых даже при T_0 оказывается очень незначительной,

концентрация электронов проводимости остается на постоянном уровне, а электропроводность по мере увеличения температуры уменьшается, пока при некотором значении $T' > T_0$ не наступит собственная проводимость *.

В случае дырочного полупроводника, если акцепторные уровни еще не насыщены электронами, при относительно низких температурах преобладает примесная проводимость. Однако при достижении некоторой температуры T_0 акцепторные уровни уже не могут отбирать электроны, и собственная проводимость становится преобладающей.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Термоэлектрические процессы обусловливаются тремя термоэлектрическими эффектами: Зеебека, Пельтье и Томсона, которые обратимы и связаны друг с другом. Одновременно в термоэлектрических устройствах имеют место и необратимые процессы: теплопроводность, обусловленная перепадом температур на слое материала, и процесс выделения тепла Джоуля. Эти явления объясняются тем, что термоэлектрические процессы, в результате которых возникает электрический ток или которые являются результатом прохождения электрического тока по термоэлектрической цепи, сопровождаются обычными процессами, имеющими место в теплообменных аппаратах и электрических цепях.

Эффект Зеебека

Эффект Зеебека, названный именем немецкого физика, был открыт и исследован им в 1822 г., однако неправильно объяснен и самим автором, и его современниками. Сущность эффекта Зеебека заключается в следующем.

Если составить электрическую цепь из нескольких, например трех, разнородных проводников и поддерживать на контакте *A* температуру T_r , а на контакте *B* температуру T_x , то при условии $T_r \neq T_x$ (в рассматриваемом случае $T_r > T_x$) на концах цепи возникнет термоэлектродвижущая сила E , а при замыкании цепи в ней обнаруживается электрический ток (рис. 3).

Термоэлектродвижущая сила на концах разомкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, при указанных выше условиях может быть определена по формуле

$$E = \int_{T_x}^{T_r} \alpha_s dT \ v, \quad (14)$$

* К этому классу веществ, называемых полуметаллами, и принадлежит большинство термоэлектрических материалов. (Прим. научн. ред.)

где $\alpha_s = \alpha_s(T)$ — коэффициент дифференциальной термоэлектродвижущей силы (термоэдс), мкв/град.

Коэффициент термоэдс (в зарубежной литературе часто имеющийся коэффициентом Зеебека) зависит главным образом от физических свойств рассматриваемого материала и для большинства металлов, полупроводников и изоляторов представляет собой величину, отличную от нуля. Величина коэффициента термоэдс, как правило, является функцией температуры, хотя при небольших разностях температур $\Delta T = T_r - T_x$ для упрощения можно считать α_s равным его некоторому среднему значению в интервале от T_x до T_r .

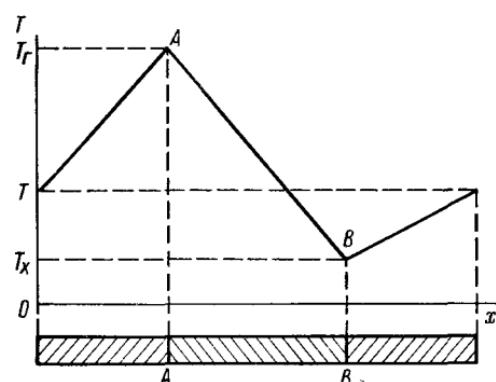


Рис. 3. Диаграмма распределения температур по длине стержня, выполненного из разнородных проводников (полупроводников)

где α_{sp} — коэффициент термоэдс дырочного полупроводника, мкв/град;

α_{sn} — коэффициент термоэдс электронного полупроводника, мкв/град.

Если материалы ветвей термоэлемента имеют различный тип проводимости, их термоэдс суммируются:

$$\alpha_s = \alpha_{sp} + \alpha_{sn} \text{ мкв/град.}$$

Таким образом, наличие пары материалов с электронным и дырочным коэффициентами термоэдс усиливает эффект. Поэтому, как правило, термоэлемент состоит из ветвей p - и n -типов.

Естественно, что в термоэлектрической цепи, составленной из последовательно соединенных пар дырочных и электронных полупроводников, суммарная термоэдс

$$E = k_{\text{посл}} \cdot 10^{-6} \int_{T_x}^{T_r} \alpha_s dT = k_{\text{посл}} \cdot 10^{-6} \int_{T_x}^{T_r} (\alpha_{sp} + \alpha_{sn}) dT \text{ в.} \quad (15)$$

Эффект Пельтье

Эффект Пельтье был открыт, хотя и неправильно истолкован, французским часовщиком Пельтье *, который в 1834 г. опубликовал описание этого явления. Физический процесс, получивший по имени автора название эффекта Пельтье, заключается в следующем.

Если через два стержня, состоящих из разнородных проводников или полупроводников, находящихся в электрическом контакте друг с другом, пропустить постоянный электрический ток, то в зоне контакта произойдет выделение или поглощение некоторого количества теплоты в зависимости от направления тока (рис. 4).

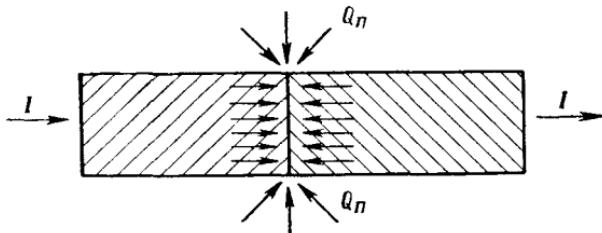


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая процесс поглощения (выделения) теплоты Пельтье в зоне контакта разнородных материалов при прохождении тока

Величина этой теплоты, называемой теплотой Пельтье, зависит от величины тока и времени его прохождения. Количество теплоты Пельтье, выделяющейся или поглощаемой в месте контакта за единицу времени, может быть определено по формуле

$$Q_{\text{П}} = \Pi I \cdot 10^{-6} \text{ вт}, \quad (16)$$

где Π — коэффициент Пельтье, мкв;

I — величина тока, а.

Таким образом, коэффициент Пельтье зависит от температуры зоны контакта. В отношении знака теплоты Пельтье (поглощение или выделение теплоты) можно отметить, что если направление тока совпадает с термотоком, который возник бы при нагревании места контакта, то теплота Пельтье поглощается. Если же направление тока противоположно термотоку, то теплота Пельтье выделяется.

В случае цепи, составленной из дырочного и электронного материалов, направление тока от дырочного полупроводника к электронному обусловливает выделение теплоты Пельтье в месте контакта. При противоположном направлении тока теплота Пельтье поглощается.

* Правильное физическое толкование эффекта Пельтье было дано в 1838 г. русским ученым Э. Х. Ленцем, который доказал, что эффект Пельтье заключается в нагревании или охлаждении сплавов при прохождении по цепи постоянного тока.

Эффект Томсона

Эффект, теоретически предсказанный и экспериментально подтвержденный в 1856 г. Томсоном, наблюдается при протекании электрического тока через проводник или полупроводник, на котором имеется градиент температур (рис. 5).

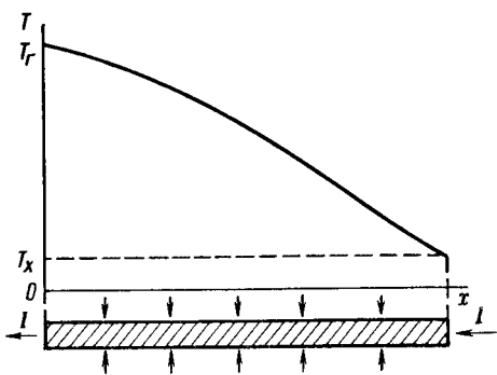


Рис. 5. Диаграмма, характеризующая процесс выделения теплоты Томсона при прохождении тока через термически неоднородный проводник (полупроводник)

Знак теплоты Томсона также зависит от направления тока. При совпадении направления тока и знака градиента температур теплота Томсона выделяется, а при их противоположной направленности поглощается *.

Абсолютная величина теплоты Томсона может быть рассчитана по формуле

$$Q_T = I \cdot 10^{-6} \int_{T_x}^{T_f} \tau dT \text{ вт}, \quad (17)$$

где τ — коэффициент Томсона, мкв/град.

Коэффициент Томсона определяется физической природой материала и является величиной, находящейся в сложной зависимости от температуры вещества.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

При замыкании электрической цепи термоэлемента, на котором создан и поддерживается постоянный градиент температур, могут быть обнаружены все три термоэлектрических эффекта. Физические процессы, обусловленные этими эффектами, обратимы, так как могут быть проведены в обратном направлении, в результате чего система возвратится в первоначальное состояние.

Помимо термоэлектрических эффектов, градиент температур на термоэлементе обуславливает передачу теплоты через термоэлемент теплопроводностью, а наличие тока в цепи приводит к выделению Джоулевой теплоты.

Указанные процессы протекают лишь в одном энтропийном направлении и исключают возможность самопроизвольного возвращения системы в первоначальное состояние, что говорит об их необратимости.

* При условии, что $\frac{d\alpha}{dT} > 0$, т. е. с повышением температуры, коэффициент термоэдс в большинстве термоэлементов возрастает. (Прим. научн. ред.)

Для установления взаимосвязи между тремя термоэлектрическими эффектами уподобим термоэлемент, выполненный в виде замкнутой цепи (рис. 6), обычной тепловой машине с электронным газом в качестве рабочего агента [7], [37]. Предполагая, что необратимые процессы теплопроводности и выделения Джоулем тепла отсутствуют, изобразим условный термодинамический цикл такой машины в координатах T — S фигуруй $ABCD$ (рис. 7).

Участки AD и BC цикла показывают процесс протекания некоторого количества электричества q_e через контактные (коммутационные) пластины термоэлемента.

Участки AB и CD характеризуют изменение состояния количества элек-

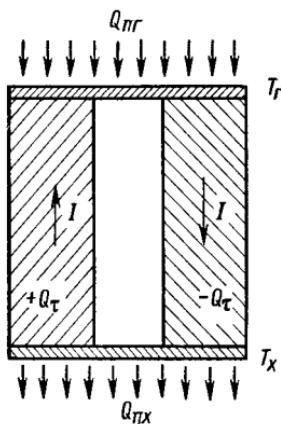


Рис. 6. Схема коротко-замкнутой термоэлектрической цепи

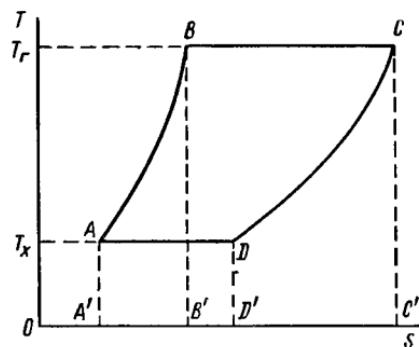


Рис. 7. Диаграмма условного термодинамического цикла термоэлектрической «тепловой машины»

тричества, происходящее в результате прохождения тока через полупроводниковые стержни термоэлемента.

На участке BC цикла происходит поглощение теплоты Пельтье, на участке AD — выделение. Теплота Томсона выделяется на участке CD и поглощается на участке AB .

Поскольку в цикле не происходит изменения внутренней энергии, алгебраическая сумма количества теплоты, полученной рабочим агентом, и количества теплоты, отданной рабочим агентом, эквивалентна работе, которую совершают термоэлектродвигущая сила при протекании в цепи количества электричества q_e :

$$\text{пл. } ABCD = \text{пл. } BCC'B' - \text{пл. } ADD'A' + \text{пл. } DCC'D' + \\ + \text{пл. } ABB'A',$$

или

$$Eq_e = \left[\Pi(T_r) - \Pi(T_x) - \int_{T_x}^{T_r} \tau_p dT + \int_{T_x}^{T_r} \tau_n dT \right] q_e. \quad (18)$$

Так как в цикле рассматриваются лишь обратимые процессы, энтропия системы не изменяется:

$$\int_{ABCD} dS = \left[\frac{\Pi(T_r)}{T_r} - \frac{\Pi(T_x)}{T_x} + \int_{T_x}^{T_r} \frac{\tau_p - \tau_n}{T} dT \right] q_e = 0. \quad (19)$$

Приняв $T_r - T_x = dT$, на основании уравнения (18) имеем:

$$dE = d\Pi + (\tau_p - \tau_n) dT,$$

$$d\left(\frac{\Pi}{T}\right) + \frac{\tau_p - \tau_n}{T} dT = 0.$$

Следовательно, взаимосвязь термоэлектрических величин может быть выражена следующими формулами:

$$\tau_p - \tau_n = \alpha_S - \frac{d\Pi}{dT} \text{ мкв/град}; \quad (20)$$

$$\Pi = \alpha_S T \text{ мкв}; \quad (21)$$

$$\tau_p - \tau_n = -T \frac{d\alpha_S}{dT} \text{ мкв/град}. \quad (22)$$

Необходимо отметить, что уравнения (20), (21) и (22), впервые выведенные Томсоном, получены без учета необратимых процессов. Однако более точные исследования, выполненные рядом ученых, показывают справедливость полученных зависимостей, которые и в случаях, когда термоэлектрические эффекты сопровождаются необратимыми процессами теплопроводности и выделения Джоулевой теплоты, дают хорошее совпадение с экспериментальными данными.

§ 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Термоэлектричество чаще всего рассматривается в связи с возможностью прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Именно это позволяет отнести термоэлектрический метод наряду с электрохимическим, термоэмиссионным и магнитогидродинамическим к категории методов, основанных на безмашинном преобразовании энергии.

Однако термоэлектрические эффекты могут быть положены в основу не только процессов генерирования тока, но и процессов получения холода и переноса теплоты. И если в первом случае они позволяют преобразовать часть тепловой энергии в энергию электрическую, то в двух других обеспечивают направленный перенос теплоты, потребляя при этом энергию от посторонних источников [89], [92], [95], [146].

Таким образом, термоэлементы с одинаковым успехом могут выполнять функции генераторов тока, охлаждающих устройств, тепловых насосов и устройств комбинированного типа.

Принцип действия термоэлектрических генераторов, охлаждающих устройств и тепловых насосов основан на термоэлектрических эффектах, сопровождающихся необратимыми процессами тепло-проводности и выделения Джоулевой теплоты (рис. 8).

Термоэлементы, предназначенные для целей генерирования электроэнергии (рис. 8, а), охлаждения (рис. 8, б) или нагрева (рис. 8, в), в конструктивном отношении идентичны. Во всех слу-

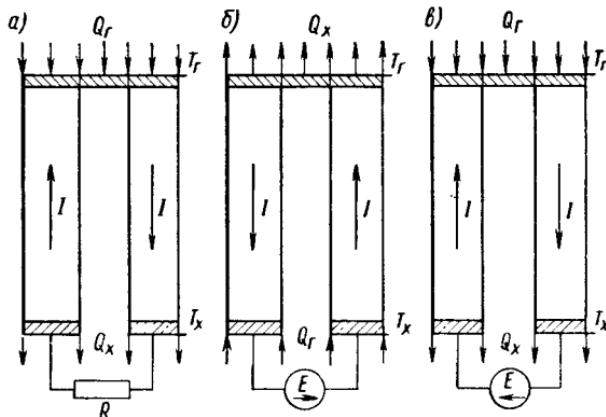


Рис. 8. Схематическое изображение термоэлементов, предназначенные для: а — генерирования электроэнергии; б — охлаждения; в — нагрева

чаях они состоят из стержней p - и n -типов, соединенных друг с другом коммутационной пластиной.

Термоэлементы, предназначенные для генерирования электроэнергии (рис. 8, а), включаются последовательно в электрическую цепь, в которой R — электрическое сопротивление, служащее потребителем электрической энергии. Физические явления, имеющие место в рассматриваемом случае, заключаются в том, что при нагревании одних спаев термоэлемента (горячих спаев) в участках полупроводниковых стержней, находящихся при более высокой температуре, энергия носителей заряда (скорость их теплового движения) оказывается более высокой, чем у носителей заряда, находящихся на участках, имеющих более низкую температуру. Благодаря этому возникает диффузия носителей заряда в направлении градиента температур, которая оказывается больше диффузии носителей заряда в противоположном направлении. Это явление приводит к тому, что на концах стержней возникает разность потенциалов. При постоянстве температур на спаях диффузия носителей заряда в направлении градиента температур тормозится электрическим полем внутри полупроводниковых стержней,

в результате чего устанавливается динамическое равновесие процесса диффузии носителей заряда и эффекта тормозящего поля. В случае, если электрическая цепь разомкнута, число носителей заряда, дифундирующих во взаимно противоположных направлениях внутри полупроводниковых стержней, одинаково. Однако энергия носителей заряда, движущихся от горячих спаев к холодным, выше, чем носителей заряда, движущихся им навстречу. Эта разность и является причиной переноса тепловой энергии, т. е. передачи теплоты теплопроводностью от горячих к холодным спаям.

Таковы упрощенные физические представления о возникновении разности потенциалов на спаях термоэлемента.

При замыкании электрической цепи по ней проходит электрический ток, обуславливающий возникновение эффектов Пельтье, Томсона и Джоуля.

Физическая сущность эффекта Пельтье заключается в том, что энергия носителей заряда главным образом зависит от природы вещества и характеризуется определенной величиной для каждого из материалов в зависимости от его температуры. Поэтому, переходя из одного материала в другой, носители заряда либо отдают свою энергию атомам вещества, либо приобретают ее за счет энергии последних, что связано с процессом подвода или отвода теплоты.

Поскольку этот процесс осуществляется вблизи зоны контакта разнородных материалов при прохождении тока, рассматриваемый участок нагревается или охлаждается в зависимости от направления тока. Описываемый процесс имеет место при любых обстоятельствах, независимо от того, носители какого знака заряда в нем участвуют [60]. Несколько сложнее обстоит дело в случае смешанного типа проводимости.

Эффект Томсона по своей физической природе во многом аналогичен эффекту Пельтье и обусловливается протеканием электрического тока по стержням термоэлемента, на которых имеется градиент температур.

При прохождении электрического тока по стержням термоэлемента термоэлектрические эффекты сопровождаются выделением Джоулевой теплоты. Этот процесс имеет место на любом участке электрической цепи, имеющей удельное электрическое сопротивление, отличное от нуля.

Выделение Джоулевой теплоты является результатом взаимодействий между электронами и структурными элементами кристаллической решетки вещества, вследствие которых энергия электронов частично или полностью расходуется на увеличение внутренней энергии тела. Выделение Джоулевой теплоты — процесс, при котором энергия электрического поля частично преобразуется в тепловую энергию материала.

Физические процессы, наблюдающиеся в термоэлементах, предназначенных для направленного переноса теплоты от одних

спаев к другим, аналогичны только что рассмотренным. Однако нагрев одних и охлаждение других спаев в этих случаях происходит в результате прохождения тока от постороннего источника электроэнергии через стержни термоэлемента [86], [173].

§ 3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Теоретические зависимости для термоэлектрических устройств, впервые выведенные академиком А. Ф. Иоффе, легли в основу многих последующих исследований [14]. Эти зависимости позволили найти количественные соотношения между коэффициентом полезного действия и коэффициентом добротности, т. е. между коэффициентом полезного действия, с одной стороны, и значениями коэффициентов термоэдс, удельной теплопроводности и электрической проводимости материалов — с другой. Кроме того, они позволили установить влияние на величину коэффициента полезного действия перепада температур в полупроводнике.

В дальнейшем на основании формул, выведенных академиком А. Ф. Иоффе, были получены уточненные зависимости, используемые при расчетах термоэлектрогенераторов, охлаждающих устройств и термоэлектрических тепловых насосов [17], [21], [127]. Ввиду определенной специфики, ниже вывод теоретических зависимостей приводится отдельно для каждого из рассматриваемых типов термоэлектрических устройств.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

Составим уравнение энергетического баланса для единичного термоэлемента, выполненного из полупроводниковых стержней *p*- и *n*-типов, соединенных коммутационной пластиной. Для упрощения теоретических зависимостей будем считать, что:

- термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов стержней термоэлемента не зависят от температуры (такое предположение позволяет теплоту Томсона считать равной нулю);
- электрическое сопротивление коммутационных пластин и контакта между коммутационными пластинами и полупроводниковым веществом равно нулю;
- площади поперечных сечений стержней термоэлемента постоянны по высоте;
- рассеяние тепла в окружающую среду отсутствует.

Примем следующие обозначения, считая, что индексы *p* и *n* относятся к дырочному и электронному стержням термоэлемента соответственно:

Q_r — количество теплоты, отбираваемой в единицу времени от горячего источника, вт ,

$$Q_r = Q_r^p + Q_r^n;$$

Q_x — количество теплоты, отдаваемой термоэлементом за единицу времени холодному источнику, вт ,

$$Q_x = Q_x^p + Q_x^n;$$

Q_{Pr} — теплота Пельтье, поглощаемая за единицу времени на горячих спаях, вт ,

$$Q_{Pr} = Q_{Pr}^p + Q_{Pr}^n;$$

Q_{Px} — теплота Пельтье, выделяющаяся за единицу времени на холодных спаях, вт ,

$$Q_{Px} = Q_{Px}^p + Q_{Px}^n;$$

Q_J — теплота Джоуля, выделяющаяся за единицу времени в термоэлементе при прохождении тока, вт ,

$$Q_J = Q_J^p + Q_J^n;$$

Q_T — теплота, передаваемая теплопроводностью за единицу времени от горячих к холодным спаям, вт ,

$$Q_T = Q_T^p + Q_T^n;$$

P — полезная электрическая мощность, вырабатываемая термоэлементом и выделяющаяся на нагрузке, вт ,

$$P = P^p + P^n.$$

Уравнение теплового баланса термоэлемента по горячей стороне может быть записано в виде

$$Q_r = Q_T + Q_{Pr} - \frac{1}{2} Q_J * \text{вт}.$$

Аналогично для холодной стороны можно получить

$$Q_x = Q_T + Q_{Px} + \frac{1}{2} Q_J \text{ вт.}$$

Исходя из условия сохранения энергии и вычитая из первого уравнения второе, имеем

$$P = Q_r - Q_x = Q_{Pr} - Q_{Px} - Q_J \text{ вт.}$$

Распределение потоков энергии в термоэлементе, используемом в качестве источника электроэнергии, показано на диаграмме

* Предполагается, что половина теплоты Джоуля, выделяющейся в стержнях термоэлемента, подводится к горячим, а вторая половина — к холодным спаям.

(рис. 9). Коэффициент полезного действия, характеризующий эффективность процесса прямого преобразования термоэлементом тепловой энергии в электрическую, определяется как отношение полезной мощности к количеству теплоты, отбираемой за единицу времени от горячего источника:

$$\eta = \frac{P}{Q_r} = \frac{Q_{\Pi r} - Q_{\Pi x} - Q_J}{Q_T + Q_{\Pi r} - \frac{1}{2} Q_J}. \quad (23)$$

Раскроем смысл величин, входящих в правую часть этой формулы. Поскольку термоэлемент составлен из стержней *p*- и *n*-типов,

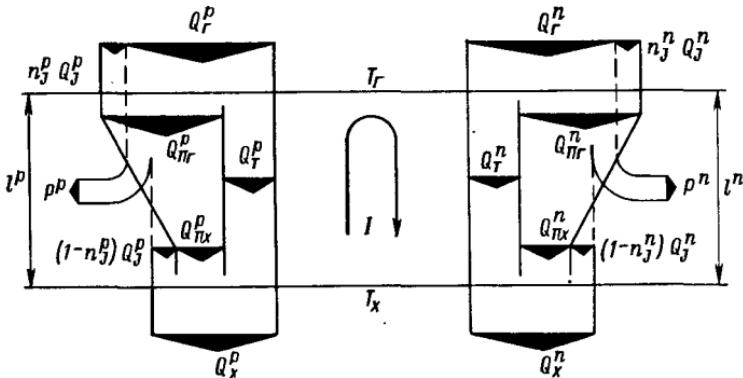


Рис. 9. Диаграмма энергетического баланса термоэлемента, используемого в качестве источника электроэнергии

коэффициент термоэдс представляет собой сумму коэффициентов термоэдс обоих стержней:

$$\alpha_s = \alpha_{sp} + \alpha_{sn} \text{ мкв/град, (в/град)}$$

где α_{sp} — коэффициент термоэдс дырочного полупроводникового материала, $\text{мкв/град, (в/град)}$;

α_{sn} — коэффициент термоэдс электронного полупроводникового материала, $\text{мкв/град, (в/град)}$.

Примем далее следующие обозначения:

ρ_p, ρ_n — удельные электрические сопротивления материала стержней, $\text{ом}\cdot\text{см}$;

r_p, r_n — электрические сопротивления стержней, ом ;
 λ_p, λ_n — коэффициенты теплопроводности стержней, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$;

κ_p, κ_n — удельные теплопроводности стержней, вт/град ;
 F_p, F_n — площади поперечных сечений стержней, см^2 ;

l_{nn} — высота стержней (принимается одинаковой для обоих стержней), см ;

I — сила тока, а ;

E — величина термоэдс, в .

Применяя указанные обозначения, можно принять:

$$r = r_p + r_n = \left(\frac{\rho_p}{F_p} + \frac{\rho_n}{F_n} \right) l_{\text{пп}} \text{ ом};$$

$$\kappa = \kappa_p + \kappa_n = (\lambda_p F_p + \lambda_n F_n) \frac{1}{l_{\text{пп}}} \text{ вт/град.}$$

На основании известных зависимостей количество теплоты, передаваемой теплопроводностью за единицу времени:

$$Q_T = \kappa (T_r - T_x) \text{ вт.}$$

Теплота Пельтье, поглощаемая за единицу времени на горячих спаях термоэлемента, определяется равенством

$$Q_{\Pi r} = \alpha_{S_r} I T_r \text{ вт},$$

а теплота Пельтье, выделяющаяся за единицу времени на холодных спаях:

$$Q_{\Pi x} = \alpha_{S_x} I T_x \text{ вт.}$$

Полезная мощность термоэлемента, устанавливаемая по электрическим параметрам, находится по формуле

$$P = I^2 R \text{ вт},$$

а величина термоэдс термоэлемента при этом

$$E = \alpha_S (T_r - T_x) \text{ в.}$$

С учетом этих зависимостей величина тока может быть определена по формуле

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{\alpha_S (T_r - T_x)}{R + r} a$$

или, принимая $\frac{R}{r} = M$,

$$I = \frac{\alpha_S (T_r - T_x)}{r (M + 1)} a.$$

На основании выведенных зависимостей, приняв $\alpha_S = \alpha_{S_p} + \alpha_{S_n}$ и $z = \frac{a_S^2}{\kappa r}$, окончательно имеем

$$Q_{\Pi r} = \alpha_S^2 T_r \frac{T_r - T_x}{r (M + 1)} \text{ вт};$$

$$P = \alpha_S^2 \frac{(T_r - T_x)^2 M}{r (M + 1)^2} \text{ вт.}$$

Подставляя эти выражения в формулу для к. п. д., находим

$$\eta = \frac{\alpha_s^2 \frac{(T_r - T_x)^2 M}{r(M+1)}}{\alpha_s^2 T_r \frac{T_r - T_x}{r(M+1)} + \kappa (T_r - T_x) - \frac{\alpha_s^2 (T_r - T_x)^2}{2r(M+1)^2}} = \\ = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{\frac{M}{M+1}}{1 + \frac{1}{z} \cdot \frac{M+1}{T_r} - \frac{T_r - T_x}{2T_r} \cdot \frac{1}{M+1}}. \quad (24)$$

Формула (24) дает в общем виде выражение к. п. д. процесса прямого преобразования тепловой энергии в электрическую и представляет собой произведение к. п. д. цикла Карно на некоторый множитель. Этот множитель может рассматриваться как условный термоэлектрический к. п. д., характеризующий степень уменьшения к. п. д. идеального цикла Карно вследствие необратимых потерь на теплопроводность и Джоулему теплоту.

Из формулы (24) следует, что к. п. д. термоэлектрического процесса преобразования энергии является функцией температур горячего и холодного спаев T_r и T_x , коэффициента добротности z полупроводниковых материалов термоэлемента и отношения электрического сопротивления внешней цепи к внутреннему электрическому сопротивлению термоэлемента $\frac{R}{r} = M$. Очевидно, для получения максимального значения к. п. д. процесса прямого преобразования энергии при вполне определенных численных значениях α_s , λ и σ и при произвольно выбранном значении M площади поперечных сечений стержней термоэлемента F_p и F_n следует подбирать такими, чтобы при известных λ и σ произведение κr достигло минимума. Для этого произведение

$$\kappa r = \frac{\lambda_p}{\sigma_n} \cdot \frac{F_p}{F_n} + \frac{\lambda_n}{\sigma_p} \cdot \frac{F_n}{F_p} + \frac{\lambda_p}{\sigma_n} + \frac{\lambda_n}{\sigma_p}$$

продифференцируем по $\frac{F_p}{F_n}$ и приравняем первую производную нулю. Получаем соотношение

$$\frac{\sigma_n}{\lambda_p} \cdot \frac{\lambda_n}{\sigma_p} = \left(\frac{F_p}{F_n} \right)^2,$$

тогда

$$\kappa r = \left(\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right)^2$$

дает минимальное значение этого произведения.

Для коэффициента добротности получаем формулу, определяющую его максимальное значение:

$$z = \frac{\alpha_S^2}{\kappa r} = \frac{\alpha_S^2}{\left(\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right)^2} \text{ 1/град.} \quad (25)$$

В целях определения величины к. п. д. процесса преобразования энергии, при котором достигается максимальная мощность в зависимости от M , достаточно положить $M = T$. Тогда

$$\eta = \frac{T_r - T_x}{2 \left(T_r + \frac{2}{z} - \frac{T_r - T_x}{4} \right)}. \quad (26)$$

Получение максимального значения к. п. д. процесса преобразования энергии возможно при условиях, которые могут быть установлены, если продифференцировать формулу (24) по M и приравнять первую производную нулю [121]. В окончательном виде это дает

$$\left(\frac{R}{r} \right)_{\text{опт}} = M_0 = \sqrt{1 + zT_{cp}}, \quad (27)$$

где $T_{cp} = \frac{T_r + T_x}{2}$.

Подставляя значение M_0 (27) в формулу (24), окончательно получим:

$$\eta_{\max} = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{M_0 - 1}{M_0 + \frac{T_x}{T_r}}. \quad (28)$$

Анализ этой формулы показывает, что чем больше разность $M_0 - 1$, т. е. чем больше произведение zT_{cp} , тем выше значение максимального к. п. д. Следовательно, для получения максимального к. п. д. необходимо иметь наибольшие значения к. п. д. цикла Карно и величины zT_{cp} .

Основные теоретические зависимости в графическом виде, иллюстрирующие полученные выводы, показаны на рис. 10, 11 и 12. Эти зависимости найдены для единичного термоэлемента, выполненного из стержней p - и n -типов, на которых создается и поддерживается постоянный перепад температур $\Delta T = T_r - T_x$. Схема единичного термоэлемента, называемого однокаскадным, показана на рис. 13, а.

В случае относительно небольших перепадов температур $\Delta T = T_r - T_x$ применение однокаскадных термоэлементов наиболее целесообразно. В зависимости от абсолютных значений указанных температур выбор эффективных для заданных условий полупроводниковых материалов может обеспечить получение наиболее приемлемых значений к. п. д. термоэлементов [61], [76].

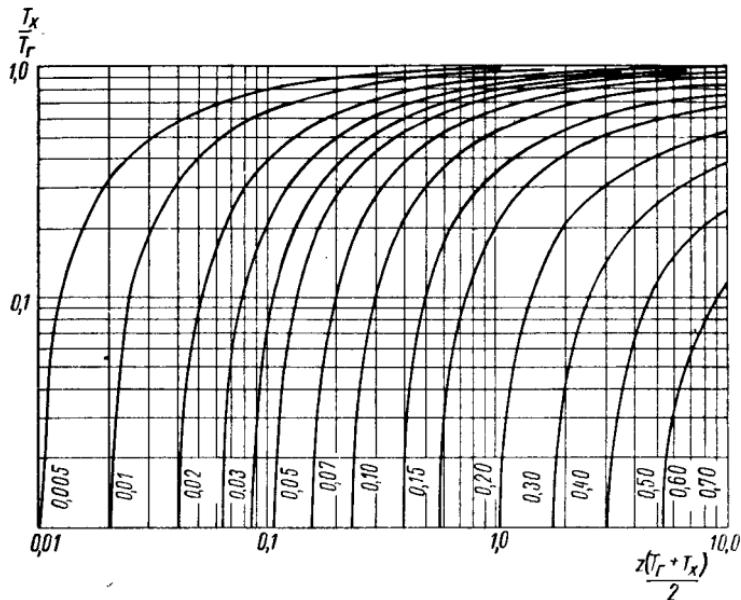


Рис. 10. График зависимости к. п. д. процесса термоэлектрического преобразования энергии от $\frac{T_x}{T_r}$ и $z \frac{T_r + T_x}{2}$

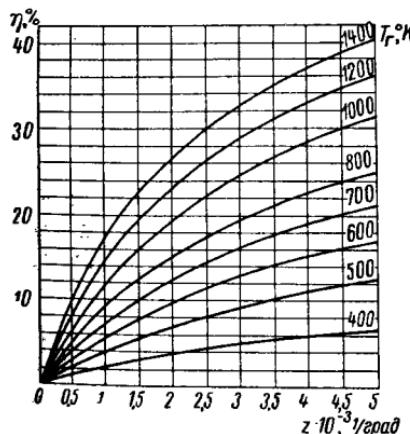


Рис. 11. График зависимости к. п. д. процесса термоэлектрического преобразования энергии от T_r и z ($T_x = 300^\circ \text{ K}$)

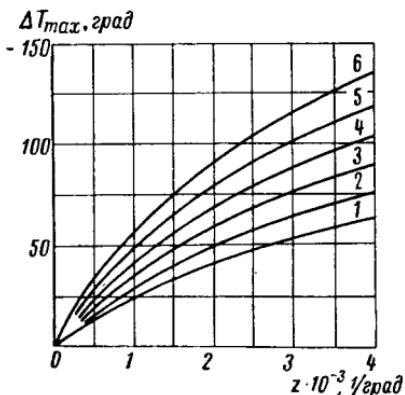


Рис. 12. График зависимости максимального перепада температур на термоэлементе от T_x и z .

1) $T_x = 243^\circ \text{ K}$; 2) $T_x = 273^\circ \text{ K}$; 3) $T_x = 303^\circ \text{ K}$; 4) $T_x = 333^\circ \text{ K}$; 5) $T_x = 363^\circ \text{ K}$;
6) $T_x = 393^\circ \text{ K}$

Однако на практике довольно часто возникает необходимость разработки термоэлементов на большие перепады температур ($\Delta T = T_r - T_x$). Такое решение позволяет создать необходимые предпосылки для получения наибольших значений к. п. д. термоэлемента при надлежащем выборе полупроводниковых материалов.

В этой связи необходимо вспомнить о принципе каскадирования тепловых двигателей, широко используемом в энергетике. Создание первых паровых машин показало, что их экономические характеристики в значительной мере зависят от степени расширения пара. В результате были созданы паровые машины многоцилиндровые машины с по-

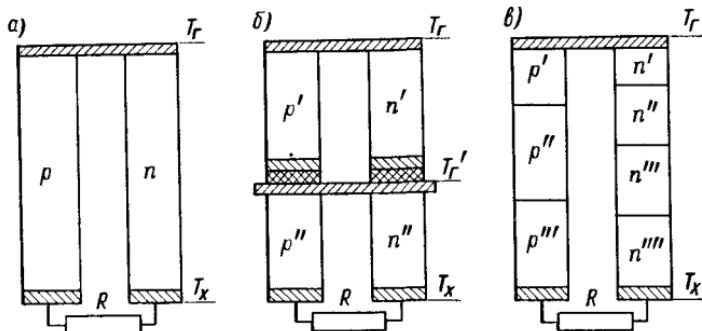


Рис. 13. Схематическое изображение однокаскадного а и многокаскадных (б и в) электрогенерирующих термоэлементов

следовательным расширением пара в цилиндрах. Эти машины оказались гораздо экономичнее одноцилиндровых машин, так как характеризовались большей степенью использования тепловой энергии и меньшими тепловыми потерями.

Паровая или газовая турбина — другой пример широко распространенного каскадного двигателя. Величина теплового перепада, который может быть достаточно эффективно использован в турбинной ступени, бывает обычно ограничена. При больших температурных перепадах, как правило, применяются многоступенчатые турбины, позволяющие наиболее эффективно использовать подводимую к турбине потенциальную энергию пара или газа.

Эти примеры показывают, что принцип каскадирования — один из наиболее действенных методов существенного увеличения эффективности тепловых двигателей.

Неудивительно, что аналогичный прием — каскадирование термоэлементов — также получил широкое распространение в термоэлектричестве [65], [140], [174].

Схемы каскадных термоэлементов со ступенчатым и непрерывным каскадированием показаны на рис. 13, б и в [71].

Увеличение эффективности в случае каскадирования термоэлементов обусловливается тем, что при этом оказывается возможным

подобрать для каждого интервала температур наиболее эффективные полупроводниковые материалы, характеризующиеся наибольшими средненеинтегральными значениями коэффициента добротности z . Кроме того, для создания оптимальной концентрации носителей заряда на каждом участке можно выбрать материал-матрицу с определенным содержанием примеси. При этом, без-

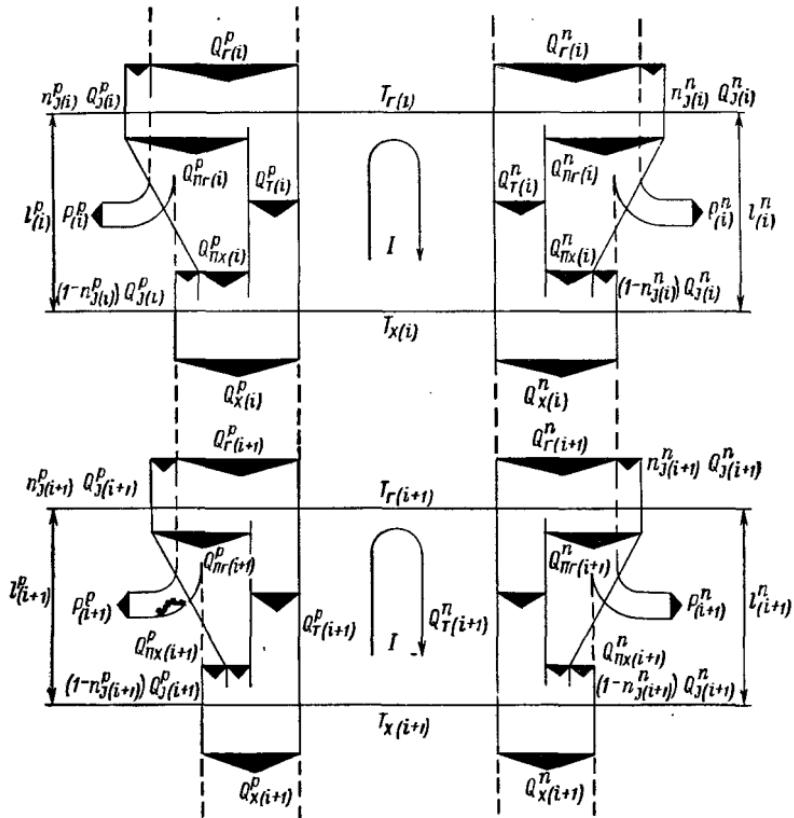


Рис. 14. Диаграмма энергетического баланса многокаскадного термоэлемента, используемого в качестве источника электрической энергии

условно, должно обеспечиваться достаточно хорошее согласование отдельных участков термоэлемента, обеспечивающее максимальное использование полупроводникового вещества во всем рассматриваемом интервале температур.

В случае каскадного термоэлемента распределение потоков энергии будет иметь вид, показанный на диаграмме рис. 14.

Составим уравнение энергетического баланса для каждого из спаев всех каскадов. Для первого каскада уравнение энергетического баланса можно записать в виде

$$Q_{r1} = Q_{\pi r1} + Q_{T1} - \frac{1}{2} Q_{J1} \text{ вт}; \quad Q_{x1} = Q_{\pi x1} + Q_{T1} + \frac{1}{2} Q_{J1} \text{ вт}.$$

Аналогично для второго каскада

$$Q_{\text{r2}} = Q_{\text{Pr2}} + Q_{\text{T2}} - \frac{1}{2} Q_{\text{J2}} \text{ em;}$$

$$Q_{x2} = Q_{\Pi x2} + Q_{T2} + \frac{1}{2} Q_{J2} \text{ em},$$

и так далее.

Для i -го каскада имеем

$$Q_{\text{ri}} = Q_{\Pi \text{ri}} + Q_{\text{T}i} - \frac{1}{2} Q_{\text{J}i} \text{ em;}$$

$$Q_{xi} = Q_{\Pi xi} + Q_{Ti} + \frac{1}{2} Q_{Ji} \text{ em.}$$

Для определения полезной мощности каждого из каскадов можно получить выражения

$$P_1 = Q_{r1} - Q_{x1} \text{ em;}$$

$$P_2 = Q_{r2} - Q_{x2};$$

• • • • • •

• • • • • • •

• • • • •

B 2 2

$$P_i = Q_{ri} - Q_{xi} \text{ em.}$$

$$Q_{\Gamma 2} = Q_{x1}; \quad Q_{\Gamma 3} = Q_x$$

складывая левые и правые части уравнений, получаем

$$\sum_{i=1}^n B_i = B_1 + B_2 + \dots + B_n = C_1 + C_2 + \dots + C_n = 0.$$

$$\sum P \equiv P_1 + P_2 + \cdots + P_i \equiv Q_{x1} - Q_{xi} \text{ for } i = 1, 2, \dots, n.$$

Суммарный к. п. д. термоэлектрического преобразования энергии для каскадного термоэлемента в этом случае находится как отношение

$$\eta_K = \frac{\sum P}{Q_{r1}} = \frac{Q_{r1} - Q_{xi}}{Q_{r1}}.$$

Если принять, что число каскадов $i \rightarrow \infty$, можно получить формулу для определения к. п. д. такой системы. Будем считать, что для какого-то k -го каскада

$$Q_{X, K} = Q_{r, K} - P_K = Q_{r, K} \left(1 - \frac{P_K}{Q_{r, K}} \right) = Q_{r, K} (1 - \eta_K) \text{ bits.}$$

При условии, что $T_r - T_x = dT$ есть величина бесконечно малая, а следовательно $\frac{T_x}{T_r} \approx 1$, максимальный к. п. д. одного каскада может быть найден по формуле

$$\eta_{K \max} = \frac{dT}{T} \cdot \frac{M_0 - 1}{M_0 + 1},$$

где $M_0 = \sqrt{1 + zT_{cp}}$.

В таком случае

$$Q_{x,k} = Q_{r,k} e^{- \int_{T_x}^{T_r} \frac{M_0 - 1}{M_0 + 1} \cdot \frac{dT}{T}} \text{ вт.} \quad (29)$$

Для бесконечного числа каскадов

$$\eta_{ki\infty} = \frac{Q_{r,k} - Q_{x,k}}{Q_{r,k}} = 1 - e^{- \int_{T_x}^{T_r} \frac{M_0 - 1}{M_0 + 1} \cdot \frac{dT}{T}} = \\ = 1 - e^{- \int_{T_x}^{T_r} \frac{1}{T} \cdot \frac{\sqrt{1+zT_{cp}} - 1}{\sqrt{1+zT_{cp}} + 1} dT} \quad (30)$$

Анализ формулы (30)* показывает, что в случае использования термоэлектрических батарей в качестве источников электроэнергии увеличение к. п. д. при переходе от одного каскада к k -каскадам оказывается незначительным, даже если добродельность z применяемых полупроводниковых материалов невелика. Например, при $\frac{T_x}{T_r} = 0,25$ ($T_x = 303^\circ \text{K}$, $T_r = 1203^\circ \text{K}$) к. п. д. термоэлектрогенератора, состоящего из k -каскадов, лишь в 1,1 раза превышает к. п. д. однокаскадного термоэлектрогенератора. При меньших отношениях $\frac{T_x}{T_r}$ выигрыш в к. п. д. оказывается еще менее значительным. Однако существуют и весьма серьезные доводы в пользу многокаскадных термоэлектрогенераторов. В случае широких температурных интервалов ($\Delta T = T_r - T_x$), а также возможности применения различных материалов, имеющих наибольшую эффективность в каждом интервале температур, многокаскадные термоэлементы имеют, несомненно, больший к. п. д., чем однокаскадные системы.

Существенные различия наблюдаются и в эффективности методов ступенчатого и непрерывного каскадирования термоэлементов.

* Формула (30) впервые предложена Зенером и в настоящее время повсеместно используется для расчета к. п. д. каскадных термоэлементов. (Прим. научн. ред.)

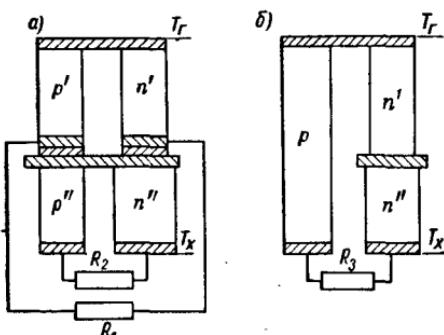


Рис. 15. Расчетные схемы одно- и многокаскадного термоэлементов, используемых в качестве источников электроэнергии

Обычно, если сравнивать многокаскадные термоэлектрические системы, показанные на рис. 15, *a* и *б*, расчетный к. п. д. термоэлементов с непрерывным каскадированием при прочих неизменных условиях будет равен или меньше к. п. д. термоэлементов со ступенчатым каскадированием.

Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

Предположим, что имеются два многокаскадных термоэлемента: термоэлемент со ступенчатым (рис. 15, *а*) и термоэлемент с непрерывным (рис. 15, *б*) каскадированием, *p*- и *n*-стержни которых имеют одинаковые сечения. Будем исходить из условия, что отно-

шения сечений стержней $\frac{F_n}{F'_p}$ и $\frac{F_n}{l''_p}$ и величины сопротивлений нагрузки R_1 и R_2 выбраны таким образом, что при заданных условиях обеспечивается максимальный к. п. д. системы. Условимся также считать, что температура на границе каскадов фиксирована

соответствующим выбором отношения $\frac{l'_p}{l''_p}$. Предположим также, что термическое сопротивление электрической изоляции между каскадами равно нулю. Чтобы термоэлемент *а* превратить в термоэлемент *б* (рис. 15), необходимо:

— изменить сопротивления нагрузки R_1 и R_2 так, чтобы сила тока в обоих каскадах оказалась одинаковой;

— изменить отношения $\frac{F'_p}{F''_p}$ и $\frac{l'_p}{l''_p}$ таким образом, чтобы постоянное значение температуры на границе каскадов сохранилось.

В этом случае термоэлемент рис. 15, *б* окажется эквивалентным термоэлементу рис. 15, *а*, а его сопротивление нагрузки можно считать равным сумме $R_1 + R_2$. Совершенно естественно, что если первоначально значения $\frac{F_n}{F'_p}$, $\frac{F_n}{l''_p}$, R_1 и R_2 были выбраны из расчета максимального к. п. д., то отклонение от их оптимальных значений при переходе от схемы *а* к схеме *б* вызывает его уменьшение. Таким образом, подтверждается сделанный ранее вывод о том, что система с непрерывным каскадированием при прочих равных условиях по эффективности уступает системе со ступенчатым каскадированием. Правда, лишь при условии равенства нулю термического сопротивления электрической изоляции между каскадами.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В термоэлементах охлаждающих устройств, основанных на использовании эффекта Пельтье, при прохождении тока имеют место процессы поглощения теплоты на одних спаях и выделение теплоты на других [17].

В случае термоэлектрических охлаждающих устройств электрическая энергия постороннего источника расходуется для переноса теплоты от одних спаев к другим.

Составим в соответствии с диаграммой рис. 16 уравнение энергетического баланса термоэлемента для термоэлектрического охлаждающего устройства.

Используя принятые ранее обозначения, запишем уравнение энергетического баланса для горячих спаев:

$$Q_r = Q_{\text{Пr}} - Q_t + \frac{1}{2} Q_j \text{ вт.}$$

Аналогичное уравнение для холодных спаев имеет вид:

$$Q_x = Q_{\text{Пx}} - Q_t - \frac{1}{2} Q_j \text{ вт.}$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$P = Q_r - Q_x = Q_{\text{Пr}} - Q_{\text{Пx}} + Q_j \text{ вт,}$$

где P — мощность, затрачиваемая от постороннего источника, вт.

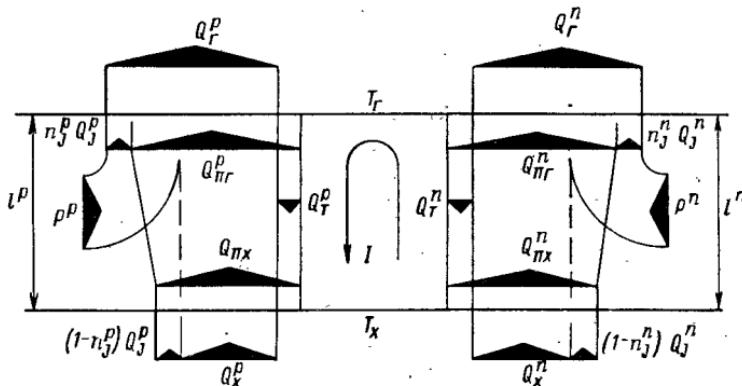


Рис. 16. Диаграмма энергетического баланса термоэлемента, используемого в качестве охлаждающего устройства

В случае термоэлектрического охлаждающего элемента его энергетическая эффективность определяется холодильным коэффициентом, который представляет собой отношение тепловой энергии, поглощаемой за единицу времени холодными спаями из окружающей среды, к затрачиваемой электрической мощности:

$$\mathcal{E}_x = \frac{Q_x}{P} = \frac{Q_{\text{Пx}} + Q_t - \frac{1}{2} Q_j}{Q_{\text{Пr}} - Q_{\text{Пx}} + Q_j}. \quad (31)$$

Подставим в формулу (25) выражения входящих в нее величин, вт:

$$Q_{\text{Пx}} = \alpha_{Sx} I T_x;$$

$$Q_t = \kappa (T_r - T);$$

$$Q_{\text{Пr}} = \alpha_{Sr} I T_r;$$

$$Q_j = I^2 r.$$

Если принять $\alpha_{S_r} = \alpha_{S_x} = \alpha_S$:

$$\mathcal{E}_x = \frac{\alpha_S I T_x - \kappa (T_r - T_x) - \frac{1}{2} I^2 r}{\alpha_S I (T_r - T_x) + I^2 r}. \quad (32)$$

Как и в случае электрогенерирующего термоэлемента, максимальное для данной $\Delta T = T_r - T_x$ значение холодильного коэффициента может быть получено при условии

$$\frac{F_p}{F_n} = \sqrt{\frac{\sigma_n}{\sigma_p} \cdot \frac{\lambda_n}{\lambda_p}},$$

тогда

$$\kappa r = \left(\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right)^2.$$

Если числитель и знаменатель формулы (32) умножить на r и принять $U = Ir$, зависимость для определения \mathcal{E}_x можно записать в виде

$$\mathcal{E}_x = \frac{\alpha_S T_x - \frac{1}{2} U - \frac{\kappa r}{U} (T_r - T_x)}{U + \alpha_S (T_r - T_x)}. \quad (33)$$

Для получения максимального значения функции $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}(U)$ продифференцируем правую часть уравнения (33) по U и приравняем первую производную нулю. После решения квадратного относительно U уравнения получаем

$$U_{opt} = \frac{2\kappa r}{\alpha_S} \cdot \frac{T_r - T_x}{T_r + T_x} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{1}{2} z(T_r + T_x)} \right] \text{ в.} \quad (34)$$

Примем, как и ранее

$$M = \sqrt{1 + zT_{cp}}.$$

После простых преобразований уравнение (34) приводится к виду

$$U_{opt} = \frac{\alpha_S (T_r - T_x)}{M - 1} \text{ в.} \quad (35)$$

Следовательно, максимальное значение холодильного коэффициента, соответствующее U_{opt} , может быть найдено по формуле

$$\mathcal{E}_{x_{max}} = \frac{T_x}{T_r - T_x} \cdot \frac{M - \frac{T_r}{T_x}}{M + 1}. \quad (36)$$

Как следует из формулы (36), при $M = \frac{T_r}{T_x}$ величина $\mathcal{E}_x = 0$. В этом случае может быть получена максимальная величина разности температур между спаями, т. е. величина максимального охлаждения:

$$(T_r - T_x)_{max} = \frac{1}{2} z T_x^2 \text{ град,} \quad (37)$$

при котором

$$U_{\text{опт}} = \alpha_s T_x \cdot e; \quad (38)$$

$$P = \kappa z T_x^2 \cdot em. \quad (39)$$

Анализируя формулу (36), можно сделать следующие выводы: первый член в этой формуле представляет собой выражение для термодинамического к. п. д. идеального обратного цикла Карно; второй член, как и в случае электрогенерирующего термоэлемента, характеризует степень уменьшения к. п. д. обратного цикла Карно вследствие необратимых потерь на теплопроводность и Джоулему теплоту. Аналогично можно считать, что холодильный коэффициент тем больше, чем выше zT_{cp} и чем меньше отношение температур $\frac{T_r}{T_x}$.

Приведенные выше теоретические зависимости получены применительно к однокаскадным охлаждающим термоэлементам. Однако так же, как и в случае электрогенерирующих термоэлементов, в некоторых условиях могут оказаться целесообразными многокаскадные термоэлементы, используемые для целей охлаждения.

Рассмотрим условия, при которых многокаскадные термоэлементы (рис. 17) имеют преимущество перед однокаскадными. В случае многокаскадного охлаждающего термоэлемента распределение потоков энергии может характеризоваться диаграммой рис. 18. Напишем уравнения энергетического баланса для каждого из спаев каскадов. Для горячих и холодных спаев первого каскада

$$Q_{r1} = Q_{\Pi r1} - Q_{T1} + \frac{1}{2} Q_J \cdot em;$$

$$Q_{x1} = Q_{\Pi x1} + Q_{T1} - \frac{1}{2} Q_J \cdot em.$$

Для спаев второго каскада получаем аналогичные выражения:

$$Q_{r2} = Q_{\Pi r2} - Q_{T2} + \frac{1}{2} Q_J \cdot em;$$

$$Q_{x2} = Q_{\Pi x2} + Q_{T2} - \frac{1}{2} Q_J \cdot em$$

и т. д.

Аналогично для i -го каскада можно найти:

$$Q_{ri} = Q_{\Pi ri} - Q_{Ti} + \frac{1}{2} Q_J \cdot em;$$

$$Q_{xi} = Q_{\Pi xi} + Q_{Ti} - \frac{1}{2} Q_J \cdot em.$$

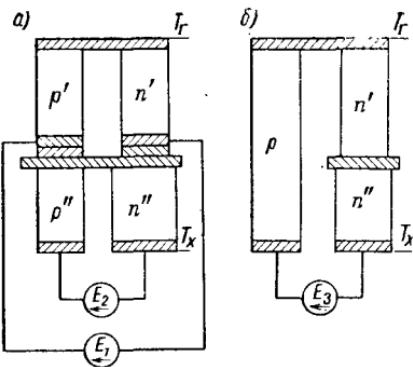


Рис. 17. Расчетные схемы многоакаскадных термоэлементов, используемых в качестве охлаждающего устройства:
а — с раздельными каскадами;
б — с совмещёнными каскадами

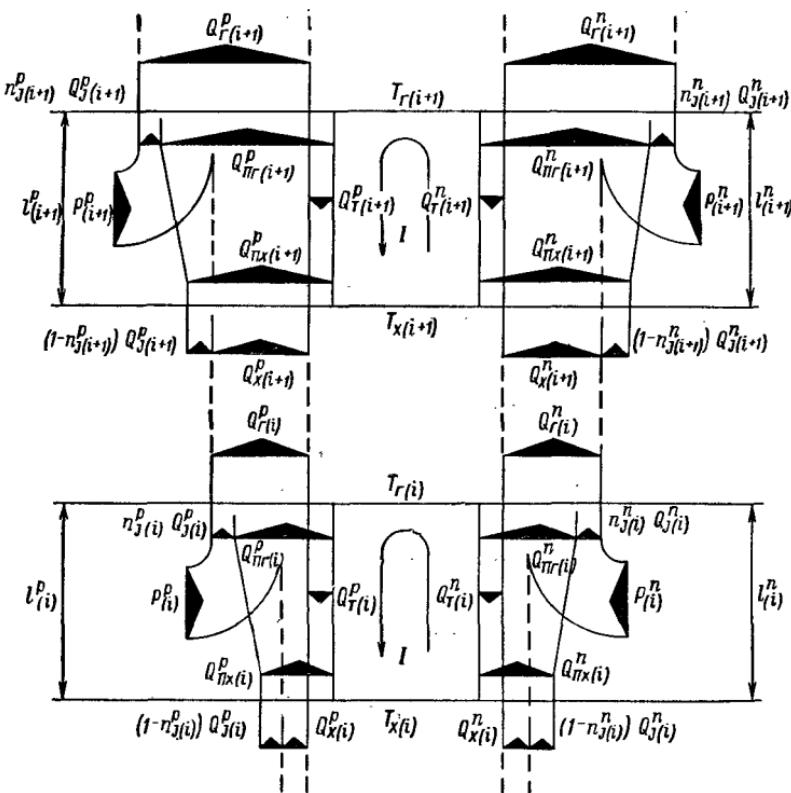


Рис. 18. Диаграмма энергетического баланса многоакаскадного термоэлемента, используемого в качестве охлаждающего устройства

Электрическая мощность, затрачиваемая на работу каждого из каскадов, определяется как разность

$$P_1 = Q_{r1} - Q_{x1} \text{ вт};$$

$$P_2 = Q_{r2} - Q_{x2} \text{ вт};$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$P_i = Q_{ri} - Q_{xi} \text{ вт};$$

Поскольку $Q_{r2} = Q_{x1}$; $Q_{r3} = Q_{x2}$; ...; $Q_{ri} = Q_x$, ($i = 1$), то

$$\sum P = P_1 + P_2 + \dots + P_i = Q_{r1} - Q_{xi} \text{ вт.}$$

Следовательно, суммарный холодильный коэффициент каскадного термоэлемента при $i \rightarrow \infty$ может быть найден по формуле

$$\mathcal{E}_x = \frac{Q_{xi}}{\sum P} = \frac{Q_{xi}}{Q_{r1} - Q_{xi}}.$$

Будем считать, что для какого-то k -го каскада

$$Q_{rk} = Q_{xk} + P_k = P_k \left(\frac{Q_{xk}}{P_k} + 1 \right) = P_k (1 + \mathcal{E}_{xk}) \text{ вт.}$$

Если принять, что $T_r - T_x = dT$ — величина бесконечно малая и $\frac{T_r}{T_x} \approx 1$, максимальный холодильный коэффициент k -го каскада

$$\mathcal{E}_{xk \max} = \frac{T}{dT} \cdot \frac{M-1}{M+1},$$

где $M = \sqrt{1 + zT_{cp}}$.

Таким образом

$$Q_{rk} = P_k e^{\int_{T_x}^{T_r} \frac{dT}{T} \cdot \frac{M-1}{M+1}} \text{ вт} \quad (40)$$

и

$$\mathcal{E}_{xki} \rightarrow \infty = \frac{1}{e^{\int_{T_x}^{T_r} \frac{dT}{T} \cdot \frac{M-1}{M+1}} - 1}. \quad (41)$$

Проанализируем формулу для определения холодильного коэффициента каскадного охлаждающего термоэлемента. На основании численных расчетов можно утверждать, что при достаточно большом коэффициенте добротности z полупроводникового материала холодильный коэффициент многокаскадного термоэлемента будет несколько большим или равным холодильному коэффициенту однокаскадного термоэлемента при относительно небольших

перепадах температур. В случае если температурный перепад приближается к максимально возможному на однокаскадном термоэлементе, холодильный коэффициент многокаскадного термоэлемента будет значительно большим [113—115] *.

Однако следует отметить, что использование термоэлементов с количеством каскадов более трех нецелесообразно, так как ходопроизводительность третьего каскада становится очень небольшой, не говоря уже о значительном усложнении конструкции охлаждающего устройства.

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Если в термоэлементе, используемом в качестве охлаждающего устройства, изменить направление тока на противоположное, то холодные спаи будут нагреваться, а горячие охлаждаться. Значит и в этом случае имеет место перенос теплоты только в направлении, противоположном начальному. Таким образом, термоэлемент в за-

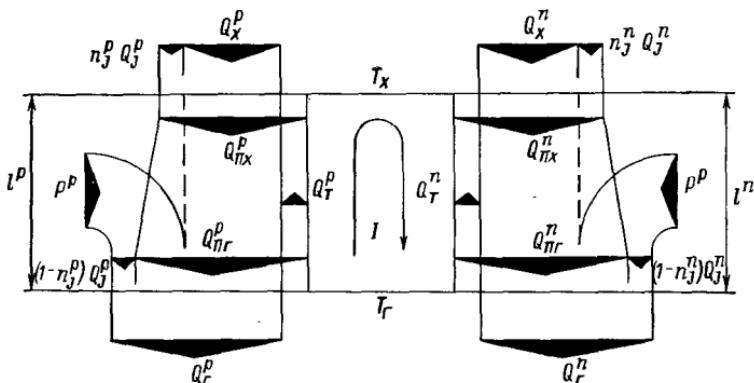


Рис. 19. Диаграмма энергетического баланса термоэлемента, используемого в качестве теплового насоса

висимости от направления тока может быть использован либо для нагрева, либо для охлаждения некоторого замкнутого объема.

Так же как и в случае термоэлектрического охлаждающего устройства, в термоэлектрическом тепловом насосе энергия постороннего источника используется для переноса теплоты от одних спаев к другим. Диаграмма распределения потоков энергии для термоэлемента, работающего в режиме теплового насоса, показана на рис. 19.

Составим уравнение энергетического баланса для горячих спаев такого термоэлемента:

$$Q_r = Q_{\text{ПГ}} - Q_T + \frac{1}{2} Q_J \text{ вт.}$$

* Особенное значение каскадирования заключается в возможности таким образом добиться снижения температур больше ΔT_{\max} , т. е. использовать предельные возможности однокаскадного термоэлемента. (Прим. научн. ред.)

Аналогичное уравнение для холодных спаев имеет вид

$$Q_x = Q_{Px} - Q_T - \frac{1}{2} Q_J \text{ вт.}$$

Для определения мощности постороннего источника электрической энергии, расходуемой на работу термоэлектрического теплового насоса, вычтем второе уравнение из первого:

$$P = Q_r - Q_x = Q_{Pr} - Q_{Px} + Q_J \text{ вт.}$$

К. п. д. термоэлемента, называемый в этом случае коэффициентом эффективности теплового насоса, как и ранее, представляет собой отношение тепловой энергии, отбираемой от горячих спаев за единицу времени, к затрачиваемой электрической мощности:

$$\mathcal{E}_T = \frac{Q_I}{P} = \frac{Q_{Pr} - Q_T + \frac{1}{2} Q_J}{Q_{Pr} - Q_{Px} + Q_J}.$$

Подставляя в эту формулу значения входящих в нее величин, после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_T &= \frac{a_S I T_r - \kappa (T_r - T_x) + \frac{1}{2} I^2 r}{I^2 r + a_S I (T_r - T_x)} = \\ &= \frac{a_S T_r + \frac{1}{2} U - \frac{\kappa r}{U} (T_r - T_x)}{U + a_S (T_r - T_x)}. \end{aligned} \quad (42)$$

С целью определения оптимального напряжения U_{opt} , при котором достигается максимальное значение коэффициента \mathcal{E}_T , продифференцируем уравнение для \mathcal{E}_T по U и приравняем первую производную нулю. Решая получающееся квадратное относительно U уравнение, получим:

$$\frac{1}{U} = -\frac{1}{a_S (T_r - T_x)} \pm \frac{1}{a_S (T_r - T_x)} \sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_r - T_x)} \frac{1}{6}. \quad (43)$$

Из формулы (43) следует, что

$$U_{opt} = \frac{a_S (T_r - T_x)}{M - 1} \text{ в.} \quad (44)$$

Подставляя это значение в формулу (42), находим максимальное значение коэффициента эффективности:

$$\mathcal{E}_{Tmax} = \frac{T_r}{T_r - T_x} \left[1 - \frac{1}{2M} \cdot \frac{T_r + T_x}{T_r} - \frac{(M-1)^2}{M} \cdot \frac{1}{z T_r} \right]. \quad (45)$$

Как и в случае термоэлектрического охлаждающего устройства, эффективность термоэлемента, используемого в качестве теплового насоса, зависит от идеального к. п. д. цикла теплового насоса, а также величин zT_{cp} и T_r , возрастающая при их увеличении.

Рассмотрим влияние количества каскадов на эффективность работы термоэлектрического теплового насоса. Распределение потоков энергии для многокаскадного термоэлектрического теплового насоса показано на диаграмме рис. 20.

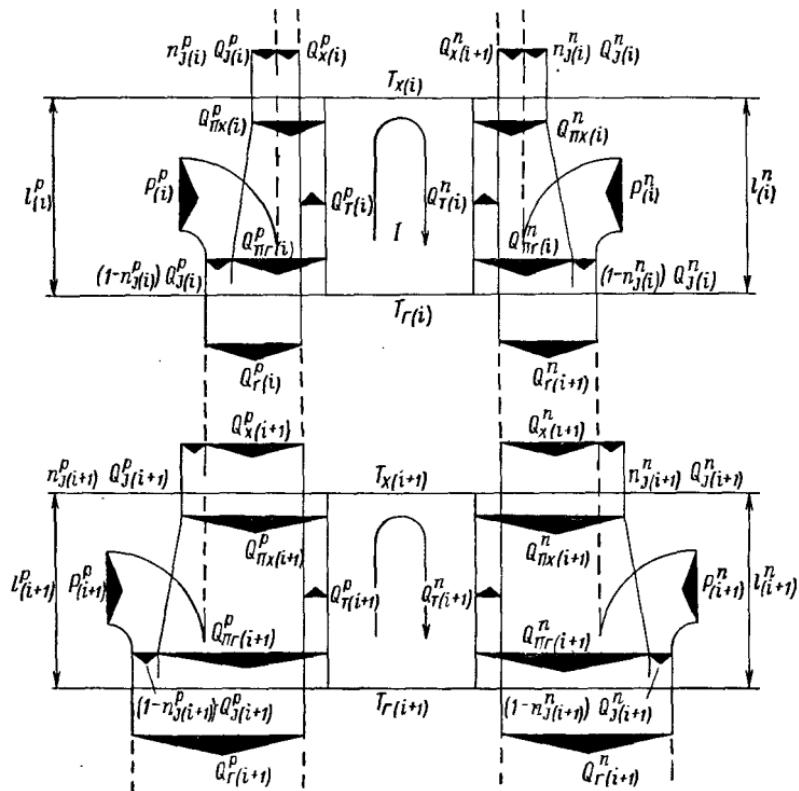


Рис. 20. Диаграмма энергетического баланса многокаскадного термоэлемента, используемого в качестве теплового насоса

Составим уравнения энергетического баланса для горячих и холодных спаев каждого из каскадов. Для первого каскада

$$Q_{r1} = Q_{\Pi r1} - Q_{T1} + \frac{1}{2} Q_{J1} \text{ вт};$$

$$Q_{x1} = Q_{\Pi x1} + Q_{T1} - \frac{1}{2} Q_{J1} \text{ вт}.$$

Аналогично для второго каскада

$$Q_{r2} = Q_{\Pi r2} - Q_{T2} + \frac{1}{2} Q_{J2} \text{ вт};$$

$$Q_{x2} = Q_{\Pi x2} + Q_{T2} - \frac{1}{2} Q_{J2} \text{ вт}.$$

Наконец, для i -го каскада

$$Q_{ri} = Q_{\Pi ri} - Q_{Ti} + \frac{1}{2} Q_{Ji} \text{ em;}$$

$$Q_{xi} = Q_{\Pi xi} + Q_{Ti} - \frac{1}{2} Q_{Ji} \text{ em.}$$

На работу каждого из каскадов от постороннего источника расходуется мощность

$$P_1 = Q_{r1} - Q_{x1} \text{ } \text{ } em;$$

$$P_2 = Q_{r2} - Q_{x2} \text{ em;}$$

• • • • • • •

• • • • • • •

* * * * *

$$\rho_i = Q_{ui} - Q_{vi} / \beta m_i$$

$$P_i = Q_{ri} - Q_{xi} \text{ em.}$$

$$\text{and } Q_{\text{sa}} = Q_{\text{sa}} \cup \{0\}$$

Part 1: *ers* + *exz*

$$P_2 + \cdots + P_i = Q$$

зисимость для опр

Поскольку $Q_{r2} = Q_{x1}$; $Q_{r3} = Q_{x2} \dots Q_{ri} = Q_{x(i-1)}$, то

$$\sum P = P_1 + P_2 + \dots + P_t = Q_{x1} - Q_{xi} \text{ sm.}$$

Таким образом, зависимость для определения коэффициента эффективности многокаскадного термоэлектрического теплового насоса приобретает вид

$$\mathcal{E}_{\text{T}, \kappa} = \frac{Q_{r1}}{\sum P} = \frac{Q_{r1}}{Q_{r1} - Q_{xi}}.$$

Примем, что для k -го каскада

$$Q_{x, \kappa} = Q_{r, \kappa} - P_\kappa = Q_{r, \kappa} \left(1 - \frac{P_\kappa}{Q_{r, \kappa}} \right) = Q_{r, \kappa} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{r, \kappa}} \right) \text{ em.}$$

Если предположить, что $i \rightarrow \infty$, $T_r - T_x = dT$ и $\frac{T_r + T_x}{T_r} \approx 2$,

$$\mathcal{E}_{T_{\max}} = \frac{T}{dT} \left[1 - \frac{1}{M} - \frac{(M-1)^2}{M} \cdot \frac{1}{zT} \right].$$

Следовательно, если

$$Q_{x, \kappa} = Q_{\Gamma, \kappa} e^{\int_x^{\Gamma} \frac{dT}{T} \left[1 - \frac{1}{M} - \frac{(M-1)^2}{M} \cdot \frac{1}{zT} \right]}, \quad (46)$$

TO

$$\mathcal{E}_{T, \kappa i} \rightarrow \infty = 1 - e^{T_x} \quad (47)$$

Из формулы (47) следует, что эффективность теплового насоса многокаскадного типа при небольших перепадах температур и при условии, что полупроводниковый материал характеризуется относительно большими значениями коэффициента добротности z ,

несколько больше эффективности однокаскадного теплового насоса. При увеличении температурного перепада преимущества многокаскадного термоэлемента становятся более ощутимыми, однако до известного предела. Поскольку с увеличением количества каскадов конструкция термоэлемента значительно усложняется, больше двух-трех каскадов применять нецелесообразно.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Эффективность термоэлектрических материалов, а следовательно и термоэлектрических устройств, определяется главным образом температурным перепадом $\Delta T = T_g - T_x$ и термоэлектрическими свойствами полупроводниковых материалов. Естественно, что даже при использовании одного и того же материала могут наблюдаться существенные отклонения от максимально достижимых значений эффективности в зависимости от технологии изготовления вещества, способа коммутации и условий работы термоэлемента. Эти факторы будут рассмотрены в соответствующих разделах, здесь же мы ограничимся рассмотрением физических характеристик материалов и анализом их влияния на термоэлектрическую эффективность [34], [62].

При оптимальных геометрических размерах стержней термоэлемента параметры, характеризующие эффективность термоэлектрического устройства (коэффициенты термоэдс, теплопроводности и удельной электрической проводимости), могут быть объединены в один универсальный параметр z , получивший наименование коэффициента добротности:

$$z = \frac{\alpha_s^2}{\left(\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right)} \text{ 1/град.}$$

Поскольку при фиксированных значениях температур холодного и горячего спаев термоэлемента его эффективность определяется величиной коэффициента добротности, основная задача состоит в подборе или создании таких полупроводниковых материалов, которые характеризовались бы максимальной величиной этого параметра во всем рабочем диапазоне температур от T_x до T_g . Иными словами, для обеспечения наибольшей эффективности полупроводникового материала необходимо получение максимальных средненеинтегральных значений α_s и σ и минимальных значений λ в заданном интервале температур. При этом необходимо учитывать, что α_s входит в формулу в квадрате. Поэтому его влияние на величину коэффициента добротности оказывается более существенным, чем влияние величин σ и λ .

Все величины, определяющие значения коэффициента добротности полупроводниковых веществ, зависят от концентрации сво-

бодных носителей заряда n_e . Можно считать, что коэффициент термоэдс находится в обратной пропорциональной зависимости от числа n_e , а значение электрической проводимости прямо пропорционально n_e . Анализ влияния различных факторов на коэффициент теплопроводности, который слагается из двух величин — коэффициента теплопроводности кристаллической решетки и коэффициента электронной теплопроводности, позволяет считать, что $\lambda = \lambda(n_e)$.

Вышеизложенное хорошо иллюстрируется графиками зависимостей $\alpha_s = \alpha_s(n_e)$, $\sigma = \sigma(n_e)$, $\lambda = \lambda(n_e)$ и $\alpha_s^2 \sigma = f(n_e)$, приведенными на рис. 21. Как видно из рисунка, максимум произведения $\alpha_s^2 \sigma$ лежит в районе концентраций свободных носителей заряда $n_e = 10^{19} \div 10^{20} \text{ 1/cm}^3$, характерных для классических полупроводников.

Поскольку у проводников первого рода (металлы и их сплавы) концентрации свободных носителей заряда лежат в диапазоне $n_e = 10^{22} \div 10^{24} \text{ 1/cm}^3$, значения α_s для них очень малы, значения λ слишком велики и, несмотря на хорошую электропроводность, величина σ неприемлемо мала.

В случае изоляторов количество свободных носителей аряда в единице объема незначительно. Поэтому высокие значения α_s и низкие значения λ не могут компенсировать очень малые значения σ , что в свою очередь не позволяет получить приемлемые значения коэффициента добротности.

Таким образом, наибольшей эффективностью могут обладать полупроводниковые материалы, которые, как это впервые показал академик А. Ф. Иоффе, позволяют решить проблему энергетического применения термоэлементов. Полупроводниковые материалы, помимо характерных для них наибольших значений $\alpha_s^2 \sigma$, обладают той особенностью, что с введением примеси значения α_s могут изменяться в широком диапазоне (рис. 22).

Теория позволяет установить зависимость максимального значения коэффициента добротности от характеристик материала:

$$z_{\max} = 1,2 \cdot 10^{-7} \frac{v}{\lambda_{\text{к.п}}} \left(\frac{m_{\text{ex}} \cdot T_x}{m_{\text{er}} \cdot T_r} \right)^{3/2} e^r \text{ 1/град}, \quad (48)$$

где v — подвижность свободных носителей заряда, $\text{cm}^2/\text{в.сек}$;

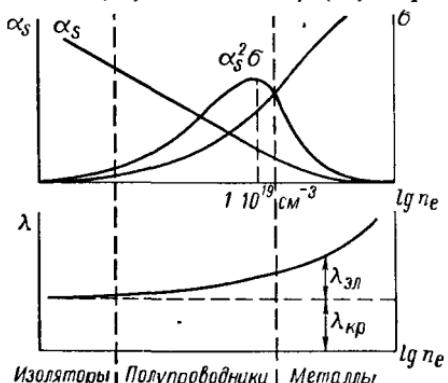


Рис. 21. Графики зависимости коэффициента термоэдс α_s , электрической проводимости σ и теплопроводности λ от концентрации носителей заряда n_e

$\lambda_{k.p}$ — теплопроводность кристаллической решетки, $вт/см^2\cdot град$;

m_e — эффективная масса носителя заряда, $г$;

r — показатель, характеризующий механизм рассеяния свободных носителей заряда;

e — основание натуральных логарифмов;

T — абсолютная температура, $^{\circ}К$.

Можно считать, что наибольшее влияние на величину z , помимо n_e , оказывает отношение $\frac{v}{\lambda_{k.p}}$, т. е. отношение подвижности носителей заряда к теплопроводности кристаллической решетки.

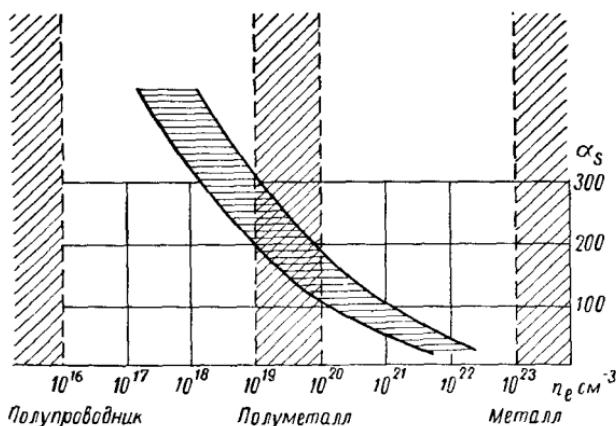


Рис. 22. График зависимости коэффициента термоэдс α_s от концентрации носителей заряда n_e для полупроводников

Следовательно, максимальная эффективность полупроводникового материала обеспечивается при условии достижения оптимальной концентрации носителей заряда в диапазоне рабочих температур и получения наибольших значений отношения подвижности носителей заряда к теплопроводности кристаллической решетки.

§ 4. ТВЕРДЫЕ, ЖИДКИЕ И ГАЗООБРАЗНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Впервые термоэлектрические свойства различных материалов экспериментально были исследованы Зеебеком. Составленный им термоэлектрический ряд охватывает твердые и жидкые металлы, их сплавы, минералы и полупроводники.

Многочисленные экспериментальные исследования термоэлектрических свойств различных материалов, которые ведутся как

в СССР, так и за рубежом, позволили не только улучшить свойства многих ранее известных веществ, но открыть и синтезировать ряд новых термоэлектрических материалов, которые представляют большой практический интерес.

Полупроводниковые материалы в зависимости от их агрегатного состояния могут быть разделены на три группы: твердые, жидкие и газообразные термоэлектрические материалы.

ТВЕРДЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Твердые термоэлектрические материалы — самая обширная и наиболее полно изученная группа полупроводников. В настоящее время считается установленным, что ряд чистых химических элементов, располагающихся довольно компактно в III—VII группах и II—VI периодах таблицы Д. И. Менделеева, обладает ярко выраженным свойствами полупроводников (табл. 2).

Большинство этих элементов, получивших название элементарных полупроводников, находит применение в термоэлектрических устройствах и полупроводниковых приборах в виде компонентов сложных химических соединений.

Наиболее обширную группу твердых термоэлектрических материалов, представляющих практический интерес, составляют различные химические соединения, обладающие нужными термоэлектрическими свойствами. Это двойные, тройные и многокомпонентные системы, в состав которых чаще всего входят и элементарные полупроводники [103]. К числу таких соединений относятся сурьмянистый цинк (Sb_2Zn), антимонид кобальта ($CoSb_2$), теллуристый свинец ($PbTe$), сернистый свинец (PbS), теллурид висмута (Bi_2Te_3), селенид висмута (Bi_2Se_3), теллурид кадмия ($CdTe$), кремний—германий ($SiGe$) и др.

Наряду с этими химическими соединениями и сплавами используются и более сложные многокомпонентные полупроводниковые термоэлектрические материалы. Полезно также отметить, что несмотря на отсутствие удовлетворительных термоэлектрических свойств в химически чистом виде, некоторые элементы обнаруживают эти свойства в химических соединениях, например двуокись урана UO_2 .

Кроме того, следует иметь в виду, что термоэлектрические характеристики многих веществ могут быть изменены в довольно широких пределах введением примесей или созданием дефектов кристаллических решеток путем воздействия температуры, магнитных, электрических или радиационных полей.

Некоторые характеристики полупроводниковых соединений приведены в табл. 3.

Таблица 2

Распределение элементарных полупроводников по группам и периодам периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева

Период	Ряд	Группа									
		1	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	0
I	1	H									He
II	2	Li	Be	B	C	N	O	F			Ne
III	3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl			Ar
IV	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	FeCoNi		Kr
	5	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br			
	6	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	RuRdPd		
V	7	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J		Xe	
	8	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	OsIrPt		
VI	9	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po			Rn	
VII	10	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U				

Таблица 3

**Некоторые характеристики полупроводниковых соединений,
полученные при комнатной температуре**

Соединение	Ширина запрещенной зоны ΔE , эВ	Подвижность электронов v_n' , см ² /в·сек	Подвижность дырок v_p' , см ² /сек	Температура плавления $T_{\text{плав}}$, °К
Cu ₂ O	1,50	—	100	1505
SbZn	0,60	60	100	819
CoSb ₃	0,50	300	—	1131
PbTe	—	2 100	800	1190
PbS	0,60	640	800	1387
Bi ₂ Te ₃	0,25	600	150	858
Bi ₂ Se ₃	0,35	1 200	200	979
Ag ₂ Te	0,17	4 000	—	1228
InSb	0,18	80 000	4000	796
Mg ₂ Sn	0,20	300	250	1051
InP	1,30	3 500	700	1328
GaAs	1,35	4 000	400	1553
InAs	0,35	30 000	200	1115
PbSe	0,55	1 500	1500	1338

ЖИДКИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

В случае термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов температуры спаев обычно находятся в пределах от 223 до 323° К. В термоэлектрогенераторах чаще всего приходится иметь дело с более высокими температурами, достигающими по стороне горячих спаев термоэлементов 1273° К.

Постоянное стремление к увеличению к. п. д. термоэлектрических генераторов, а следовательно к увеличению к. п. д. цикла Карно, приводит к необходимости изучения возможности использования жидких термоэлектрических материалов. Другой причиной, в ряде случаев обуславливающей целесообразность применения жидких термоэлектрических материалов, являются высокотемпературные источники теплоты.

Помимо существенного увеличения к. п. д. процесса термоэлектрического преобразования энергии жидкие термоэлектрические материалы, по-видимому, сделают возможным значительно более легкое решение проблемы коммутации. Поскольку многие твердые термоэлектрические материалы, обладая хрупкостью при высоких температурах, часто непригодны для работы в условиях

больших перепадов температур, жидкие термоэлектрические материалы помогут также решить вопросы, связанные с разработкой оптимальной геометрической формы термоэлементов. Однако несмотря на целый ряд преимуществ жидкие термоэлектрические материалы по сравнению с твердыми полупроводниками изучены очень слабо, а количественная теория протекающих в них термоэлектрических процессов еще не разработана.

Качественно же эти процессы могут быть описаны, если базироваться на основных положениях теории термоэлектрических процессов, протекающих в твердых полупроводниковых материалах.

Физическими, в том числе рентгенографическими, исследованиями установлено, что в жидкостях, находящихся вблизи точки плавления, существует определенная упорядоченность структуры.

Действительно, на примере обычной воды можно утверждать, что лед и вода вблизи точки замерзания состоят из одних и тех же молекул, прочность структурных связей которых различна. На основании современных физических представлений можно также считать, что геометрическая структура льда длительное время сохраняется в талой воде и последняя может рассматриваться как своеобразный раствор льда в воде. Такая упорядоченная структура талой воды остается неизменной в некотором диапазоне температур вблизи точки плавления и постепенно исчезает при нагревании.

Аналогичная картина наблюдается при исследовании многих других жидкостей, находящихся вблизи точки плавления, что позволяет распространить на них основные положения зонной теории твердых полупроводниковых материалов.

Если по ориентировочным значениям α_s и σ , приведенным в табл. 4 для системы $\text{Cu}_2\text{S}-\text{Cu}_2\text{Te}$, определить величину коэффициента добротности, то, по утверждению некоторых зарубежных исследователей, могут быть достигнуты значения $z = -1 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$ для системы Cu_2S и $z = 2 \div 3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$ для сплава Cu_2Te (75%) — Cu_2S (25%) [27], [82]. Эти значения z оказываются мало зависящими от температуры и позволяют рассчитывать на достижение высоких средних значений коэффициентов добротности в широком диапазоне температур.

В случае применения многокаскадной системы, верхней ступенью которой может служить жидкий полупроводник, характеризующийся значениями z , близкими к указанным, можно рассчитывать на увеличение эффективности процесса термоэлектрического преобразования энергии. Повышение эффективности этого процесса откроет широкие возможности для применения термоэлектро-генераторов в энергетике.

Таким образом, жидкие термоэлектрические материалы, изучение которых началась еще сравнительно недавно, следует считать достаточно перспективными.

Таблица 4

Ориентировочные значения термоэлектрических характеристик некоторых жидких полупроводниковых соединений

Соединение	Коэффициент термоэдс a_s , мкв/град		Удельная электрическая проводимость σ , $1/\text{ом} \cdot \text{см}$	Коэффициент теплопроводности при различных температурах	
	в точке плавления	в области жидкости		$T, ^\circ\text{K}$	$\lambda, 10^{-3} \text{ вт}/\text{м}\cdot\text{град}$
Cu_2S	450	300	75	1373	0,08÷0,10
				1473	0,12÷0,14
				1573	0,16÷0,19
				1673	0,19÷0,22
				1773	0,23÷0,27
				1873	0,27÷0,31
				—	—
75% Cu_2S —25% Cu_2Te			160	—	—
50% Cu_2S —50% Cu_2Te	200	160	230	—	—
25% Cu_2S —75% Cu_2Te	175	170	640	—	—
Cu_2Te	150	100	1500	—	—

ГАЗООБРАЗНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Основной недостаток твердых и жидких термоэлектрических материалов заключается в том, что в термоэлементах, изготовленных из них, большая часть теплоты передается теплопроводностью от горячих к холодным спаям. Поэтому вполне естествен интерес к системам, имеющим между горячим и холодным источниками газ или откаченное до глубокого вакуума пространство. В этом случае перенос теплоты теплопроводностью может быть уменьшен до минимума. Однако при этом изменится и качественная сторона физических процессов.

Действие описанного преобразователя тепловой энергии в электрическую основано на явлении эмиссии электронов, открытом Эдисоном в 1881 г. Поэтому в отличие от термоэлектрических они носят название термоэмиссионных. На отдельных лабораторных образцах термоэмиссионных генераторов были получены значения удельных мощностей по катоду $10 \div 15 \text{ вт}/\text{см}^2$ при напряжении $1 \div 2 \text{ в}$. Максимальный к. п. д. термоэмиссионного метода

преобразования энергии при температуре катода около 2000° К и анода 1000° К составляет примерно 20%. Такое значение к. п. д. позволяет считать термоэмиссионный метод прямого преобразования энергии весьма перспективным.

Уровни температур катода и анода, характерные для термоэмиссионных преобразователей энергии, лежат несколько выше диапазона температур, наиболее целесообразного для использования термоэлектрогенераторов. Поэтому серьезного внимания заслуживают различные сочетания термоэмиссионного и термоэлектрического преобразователей энергии, в которых последние служат утилизаторами теплоты, отводимой от анодов.

Конструктивно такие системы могут быть выполнены как совмещенными, так и раздельными. В первом случае передача теплоты от анода к горячим спаям термоэлементов осуществляется теплопроводностью, во втором — посредством теплоносителя. По электричеству обе системы могут быть соединены последовательно либо параллельно, нагрузка может быть общей или раздельной [100].

Суммарный к. п. д. комбинированного термоэмиссионно-термоэлектрического процесса преобразования энергии может быть определен по формуле

$$\eta_{\text{комб}} = \eta_{\text{тэм. г}} + \eta_{\text{тэ. г}}(1 - \eta_{\text{тэм. г}}),$$

где $\eta_{\text{тэм. г}}$ — к. п. д. термоэмиссионного преобразователя энергии;

$\eta_{\text{тэ. г}}$ — к. п. д. термоэлектрического преобразователя энергии.

Эффективность комбинированного преобразователя энергии уже в настоящее время может быть достаточно высокой. Так, при $\eta_{\text{тэм. г}} = 20\%$ и $\eta_{\text{тэ. г}} = 10\%$ $\eta_{\text{комб}} = 28\%$. Эти данные в будущем позволяют рассчитывать на возможность применения термоэмиссионно-термоэлектрических установок в качестве главных энергетических установок на судах различных типов.

§ 5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время известно большое количество различных полупроводниковых веществ и соединений, однако ни одно из них не обладает достаточно высокими термоэлектрическими характеристиками в широком диапазоне температур ($\Delta T > 300$ град). Поэтому в зависимости от абсолютных значений температуры и разности температур между горячими и холодными спаями для изготовления термоэлементов приходится использо-

вать различные полупроводниковые материалы, причем если эффективность единичного термоэлектрического каскада оказывается недостаточной и при этом полезный перепад температур $\Delta T = T_r - T_x$ велик, приходится обычно применять термоэлектрические каскады [57, 58].

Именно по этой причине вопрос о выборе полупроводникового вещества для заданного температурного перепада, равно как и вопрос об оптимальном количестве каскадов термоэлектрических устройств вообще и термоэлектрогенераторов в частности, является основным при разработке этих устройств. При этом необходимо

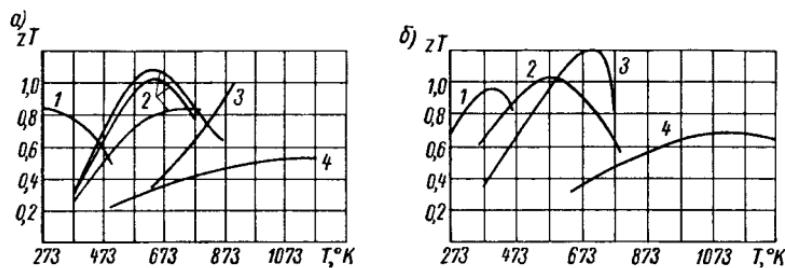


Рис. 23. Зависимость параметра zT от T для некоторых полупроводниковых материалов: *а* — *p*- и *б* — *n*-типов.

1 — Bi_2Te_3 ; 2 — PbTe ; 3 — SnTe (PbSnTe); 4 — GeSi

учитывать и ряд других факторов: наличие разработанных методов коммутации, стоимость и дефицитность материалов, их физические характеристики, такие, как:

- температура плавления;
- упругость паров;
- диффузионные свойства примесей и материал-матрицы;
- окисляемость;
- механическая прочность;
- коэффициент теплового расширения и др.

К числу наиболее изученных термоэлектрических материалов, нашедших применение в термоэлектрических устройствах, относятся различные одно- и многокомпонентные химические соединения и сплавы, в состав которых обычно входят и элементарные полупроводники. Характеристики некоторых из этих материалов приведены в табл. 5.

Для оценки оптимального температурного диапазона термоэлектрических материалов на рис. 23 приводятся графические зависимости $zT = f(T)$, которые могут быть использованы для ориентировочных расчетов характеристик термоэлементов, изготовленных из наиболее широко используемых термоэлектрических веществ [48—50], [129].

Таблица 5

Термоэлектрические характеристики некоторых полупроводниковых соединений, применяемых в термоэлектрогенераторах, при комнатной температуре

Соединение	Коэффициент термод. α_s , мкв/град	Электротехническая проводимость σ , $1/\text{ом}\cdot\text{см}$	Коэффициент теплопроводности λ , $\text{вт/см}\cdot\text{град}$	Коэффициент доб. относит. $\gamma \cdot 10^{-3}$, $1/\text{град}$	Температура плавления $T_{\text{пл}}$, K
ZnSb (<i>p</i> -тип)	200	350	0,020	0,70	779
PbS (<i>n</i> -тип)	160	600	0,022	0,9	1387
PbSe (<i>n</i> -тип)	160	1100	0,024	1,35	1361
PbTe (<i>n</i> -тип)	160	1500	0,028	1,50	1203
Bi ₂ Te ₃ (<i>n</i> -тип)	170	1000	0,018	2,00	858
Bi ₂ Se ₃ (<i>n</i> -тип)	200	500	0,014	0,80	979
Sb ₂ Te ₃ (<i>p</i> -тип)	100	3000	0,032	0,90	985
PbTe—PbSe (<i>n</i> -тип)	160	900	0,012	1,80	—
Bi ₂ Te ₃ —Bi ₂ Se ₃ (<i>n</i> -тип)	170	1000	0,012	3,00	—
Bi ₂ Te ₃ —Sb ₂ Te ₃ (<i>p</i> -тип)	160	1500	0,014	2,80	—
MnSi ₂ (<i>p</i> -тип)	175	При температуре $T=973^\circ \text{K}$ 67	0,093 0,022	—	—
CrSi ₂ (<i>p</i> -тип)	120	При температуре $T=773^\circ \text{K}$ 100	0,05 0,030	—	—
MoSi ₂ (<i>p</i> -тип)	20	При температуре $T=1773^\circ \text{K}$ 46 700	0,04 0,470	—	—

§ 6. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Инженерный расчет термоэлектрических устройств связан с известными трудностями, которые заключаются в том, что термоэлементы одновременно представляют собой и один из участков электрической цепи, и теплопередающее звено. Тесная взаимосвязь между электрическими и теплофизическими процессами требует при расчете термоэлектрических систем одновременного учета как электрических, так и теплотехнических параметров. Кроме того, процесс теплопередачи через термоэлемент оказывается значительно более сложным, чем обычные процессы теплопроводности, с которыми приходится встречаться в судовых теплообменных аппаратах. Это объясняется тем, что тепловой поток, проходящий через термоэлемент, не остается постоянным по его высоте. Последнее объясняется наличием распределенных и сосредоточенных источников и стоков теплоты, обусловливаемых термоэлектрическими эффектами.

Выше были рассмотрены основные теоретические зависимости, которые могут быть использованы для расчетной оценки основных характеристик термоэлементов, применяемых как в качестве источников электроэнергии, так и для целей направленного переноса теплоты. Эти классические зависимости, достаточно наглядно иллюстрирующие взаимосвязь термоэлектрических процессов, основываются, однако, на предположении постоянства термоэлектрических характеристик полупроводниковых веществ в рассматриваемом диапазоне температур. Такое предположение дало возможность значительно упростить основные теоретические зависимости и в большинстве случаев сохранить приемлемую для практических целей точность результатов расчета.

На основании предположения о постоянстве термоэлектрических параметров вещества в некотором диапазоне температур теплота Томсона оказывалась равной нулю, а теплота Джоуля, выделяющаяся в термоэлементе, рассматривалась как состоящая из двух половин: одна половина возвращалась к горячему, другая — к холодному спаям термоэлемента.

Указанное предположение оказывалось оправданным, пока и поскольку перепад температур на термоэлементе был относительно небольшим. Однако при значительных температурных перепадах предположение о постоянстве α_s , σ и λ в рассматриваемом интервале температур может привести к погрешностям в расчете, которые в ряде случаев недопустимы. В связи с этим возникает необходимость в более точных формулах расчета.

Практически наибольшие перепады температур имеют место в термоэлементах, используемых в качестве генераторов.

По-видимому, тенденция к увеличению перепада температур сохранится и далее, по крайней мере в транспортной энергетике, так как в этой области чаще всего оказывается целесообразным упрощение конструкции термоэлектрогенератора путем уменьшения количества каскадов, даже если это приводит к некоторому уменьшению к. п. д.

В других случаях увеличение перепада температур может быть следствием стремления к более высоким значениям максимальной температуры, а следовательно, к более высоким значениям к. п. д. идеального цикла Карно, что также приводит к увеличению эффективности термоэлектрогенератора.

Несколько иная картина наблюдается в случаях, когда термоэлементы используются в качестве охлаждающих устройств или

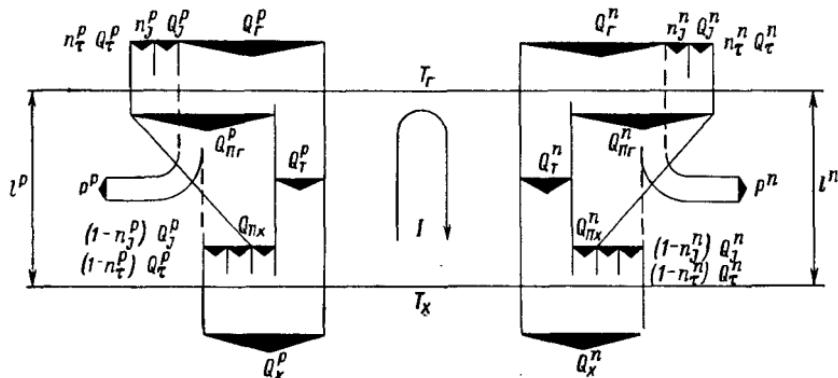


Рис. 24. Диаграмма энергетического баланса термоэлемента, используемого в качестве источника электроэнергии при $\alpha_S = \alpha_S(T)$; $\sigma = \sigma(T)$; $\lambda = \lambda(T)$; $\tau = \tau(T)$

тепловых насосов. Обычно в однокаскадных термоэлементах подобного типа перепады температур на полупроводниковых стержнях не выходят за пределы 50 град, а в многокаскадных — 80÷100 град. При этих условиях можно использовать приведенные ранее основные теоретические зависимости с достаточной для практических целей точностью.

Поскольку на основании приведенных выше соображений при расчете термоэлектрогенерирующих устройств следует считать α_S , σ и λ зависящими от температуры полупроводниковых веществ, в выведенные ранее формулы необходимо внести соответствующие уточнения [21], [34], [170]. Эти уточнения сводятся к определению долей теплоты Томсона и Джоуля, подводимых к горячим и холодным спаям, и введению в формулы среднеинтегральных значений α_S , σ , λ и τ для заданного температурного интервала.

Распределение потоков энергии в термоэлементе, являющемся источником электроэнергии, для данного случая показано на диаграмме рис. 24.

Уравнение энергетического баланса для горячего спая термоэлемента будет иметь вид

$$Q_r = Q_T + Q_{Pr} - n_J^p Q_J^p - n_J^n Q_J^n - n_\tau^p Q_\tau^p - n_\tau^n Q_\tau^n \text{ вт.}$$

Аналогично для холодного спая

$$Q_x = Q_T + Q_{Px} - (1 - n_J^p) Q_J^p - (1 - n_J^n) Q_J^n - (1 - n_\tau^p) Q_\tau^p - (1 - n_\tau^n) Q_\tau^n \text{ вт,}$$

где n_τ^p , n_τ^n — доля теплоты Томсона, возвращаемая к горячим спаям;

n_J^p , n_J^n — доля теплоты Джоуля, возвращаемая к горячим спаям.

Выведем формулы для определения величин, входящих в правые части уравнений энергетического баланса для горячего и холодного спаев.

Количество теплоты, передаваемой теплопроводностью за единицу времени от горячего к холодному спаям, может быть определено по формуле

$$Q_T = (\bar{\lambda}_p F_p + \bar{\lambda}_n F_n) \frac{T_r - T_x}{l_{pp}} \text{ вт,}$$

где $\bar{\lambda}_p$, $\bar{\lambda}_n$ — среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности стержней, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$;

F_p , F_n — площадь поперечного сечения стержня, м^2 .

Количество теплоты Пельтье, поглощаемой за единицу времени на горячих спаях термоэлемента:

$$Q_{Pr} = I(\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r) T_r \text{ вт,}$$

где α_{Sp}^r , α_{Sn}^r — коэффициент термоэдс полупроводникового вещества при T_r , $\text{мкв}/\text{град}$ ($\text{в}/\text{град}$).

Количество теплоты Пельтье, выделяющейся за единицу времени на холодных спаях, определим по формуле

$$Q_{Px} = I(\alpha_{Sp}^x + \alpha_{Sn}^x) T_x \text{ вт,}$$

где α_{Sp}^x , α_{Sn}^x — коэффициент термоэдс полупроводникового вещества при T_x , $\text{мкв}/\text{град}$ ($\text{в}/\text{град}$).

Теплота Томсона, выделяющаяся в единицу времени в стержнях p - и n -типов соответственно, находится по формулам

$$Q_\tau^p = \bar{\tau}_p (T_r - T_x) \text{ вт;}$$

$$Q_\tau^n = \bar{\tau}_n (T_r - T_x) \text{ вт,}$$

где $\bar{\tau}_p$, $\bar{\tau}_n$ — среднеинтегральное значение коэффициента Томсона, $\text{мкв}/\text{град}$ ($\text{в}/\text{град}$).

В этих выражениях в зависимости от знака коэффициента Томсона $\bar{\tau}_p$ и $\bar{\tau}_n$ значения Q_τ^p и Q_τ^n могут быть как положительными, так

и отрицательными. Теплота Томсона — величина положительная, если с возрастанием температуры коэффициент термоэдс увеличивается, и наоборот.

Далее на основании известных зависимостей может быть определена величина теплоты Джоуля, выделяющейся в стержнях термоэлемента при прохождении тока:

$$Q_J^p = I^2 r_p \text{ вт};$$

$$Q_J^n = I^2 r_n \text{ вт},$$

где r_p , r_n — электрические сопротивления стержней термоэлемента, ом.

В случае, если термоэлемент составлен из стержней p - и n -типов и $\alpha_S = \alpha_s(T)$, величина термоэдс может быть найдена из формулы

$$E = (\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(T_r - T_x) \text{ в},$$

где $\bar{\alpha}_{Sp}$, $\bar{\alpha}_{Sn}$ — среднеинтегральные значения коэффициента термоэдс, мкв/град (в/град).

Обозначим, как и ранее, $\frac{R}{r} = M$. Тогда

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(T_r - T_x)}{r(M+1)} \text{ а.}$$

Величина полезной мощности, вырабатываемой термоэлементом, на основании закона сохранения энергии находится как разность теплоты, подведенной и отведенной от термоэлемента за единицу времени:

$$P = Q_r - Q_x = Q_{\Pi r} - Q_{\Pi x} - Q_J - Q_\tau \text{ вт}.$$

Таким образом, к. п. д. процесса преобразования энергии может быть получен по формуле

$$\eta = \frac{P}{Q_r} = \frac{Q_r - Q_x}{Q_r} = \frac{Q_{\Pi r} - Q_{\Pi x} - Q_J - Q_\tau}{Q_r + Q_{\Pi r} - n_J^p Q_J^p - n_J^n Q_J^n - n_\tau^p Q_\tau^p - n_\tau^n Q_\tau^n}. \quad (49)$$

Если в эту формулу подставить выражения входящих в нее величин, можно получить

$$\eta = \frac{I(\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r)T_r - I(\alpha_{Sp}^x + \alpha_{Sn}^x)T_x - I^2 r - I(\bar{\tau}_p + \bar{\tau}_n)(T_r - T_x)}{(\lambda_p F_p + \lambda_n F_n) \frac{T_r - T_x}{l_{\Pi r}} + I(\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r)T_r - I^2 (n_J^p r_p + n_J^n r_n) - I(n_\tau^p \bar{\tau}_p + n_\tau^n \bar{\tau}_n)(T_r - T_x)}. \quad (50)$$

Далее можно показать, что

$$(\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r) T_r - (\alpha_{Sp}^x + \alpha_{Sn}^x) T_x + (\bar{\tau}_p + \bar{\tau}_n) \times \\ \times (T_r - T_x) = (\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) (T_r - T_x).$$

С учетом последнего выражения, а также выведенных ранее зависимостей для I после несложных преобразований получим

$$\eta = \frac{\frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})^2 (T_r - T_x)}{r(M+1)} - \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})^2 (T_r - T_x)}{r(M+1)^2}}{\frac{(\bar{\lambda}_p E_p + \bar{\lambda}_n E_n) \frac{r}{I_{\text{пп}}} + (\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) (\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r) T_r}{M+1} -} = \\ - \frac{r_p n_j^p + r_n n_j^n}{r} \cdot \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})^2}{(M+1)^2} (T_r - T_x) - \frac{\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}}{M+1} \times \\ \times (n_j^p \bar{\tau}_p + n_j^n \bar{\tau}_n) (T_r - T_x) \\ = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) (T_r - T_x) \frac{M}{(M+1)^2}}{(\bar{\lambda}_p F_p + \bar{\lambda}_n F_n) \frac{r}{I_{\text{пп}}} + \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) (\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r) T_r}{M+1} \times} \\ \times \frac{r_p n_j^p + r_n n_j^n}{r} \cdot \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})^2}{(M+1)^2} (T_r - T_x) - \\ - \frac{\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}}{M+1} (n_\tau^p \bar{\tau}_p + n_\tau^n \bar{\tau}_n) (T_r - T_x). \quad (51)$$

Используя выражение

$$r = I_{\text{пп}} \left(\frac{\bar{\lambda}_p}{\bar{\lambda}_p \sigma_p F_p} + \frac{\bar{\lambda}_n}{\bar{\lambda}_n \sigma_n F_n} \right) OM$$

и принимая, что

$$\frac{F_p}{F_n} = \frac{\bar{\lambda}_n}{\bar{\lambda}_p} \sqrt{\frac{\sigma_n \bar{\lambda}_p}{\sigma_p \bar{\lambda}_n}},$$

после введения обозначений

$$f = \frac{\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r}{\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}}; \\ a = \frac{n_j^p r_p + n_j^n r_n}{r} \cdot \frac{T_r - T_x}{f T_r}; \\ b = \frac{n_\tau^p \bar{\tau}_p + n_\tau^n \bar{\tau}_n}{\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r} \cdot \frac{T_r - T_x}{T_x}; \\ z = \left(\sqrt{\frac{\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}}{\frac{\bar{\lambda}_p}{\sigma_p}}} + \sqrt{\frac{\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}}{\frac{\bar{\lambda}_n}{\sigma_n}}} \right)^2$$

окончательно получим

$$\eta = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{\frac{M}{f(M+1)} \left(1 - \frac{a}{M+1} - \frac{M+1}{fT_r z} - b \right)}{f(M+1) \left(1 - \frac{a}{M+1} - \frac{M+1}{fT_r z} - b \right)}. \quad (52)$$

Сохраняя прежнюю последовательность рассуждений и введя оптимальное отношение сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению термоэлемента

$$\left(\frac{R}{r}\right)_{\text{опт}} = M_0 = \sqrt{1 + (1 - a - b) f z T_r}, \quad (53)$$

можно получить зависимость для определения максимально достижимого к. п. д. процесса термоэлектрического преобразования энергии в случае, если α_s , σ и λ являются функциями температуры, а $\tau \neq 0$:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{M_0 - 1}{f[M_0(1 - b) + 1 - b - 2a]}. \quad (54)$$

Нетрудно доказать, что при условии $b = 0$; $f = 1$; $n_J^p = n_J^n = 0,5$; и $= \frac{T_r - T_x}{2T_r}$ эта формула приводится к ранее выведенной формуле (28).

Остановимся несколько подробнее на вопросе об определении величин долей теплоты Джоуля n_J и Томсона n_τ , возвращаемых к горячим спаям p - и n -стержней термоэлемента.

Теоретический анализ распределения температуры и зависимости, устанавливающие величину теплового потока в различных сечениях стержней термоэлементов, позволяют вывести следующие формулы:

$$n_J = 1 - \frac{\int_{T_x}^{T_r} \lambda(T) dT \int_{T_x}^T \lambda(T') \rho(T') dT'}{\bar{\lambda} (\bar{\lambda} \rho) (T_r - T_x)^2};$$

$$n_\tau = 1 - \frac{\int_{T_x}^{T_r} \lambda(T) dT \int_{T_x}^T \lambda(T') \rho(T') dT'}{\bar{\tau} \bar{\lambda} (T_r - T_x)^2}.$$

Поскольку для большинства полупроводников λ претерпевает не очень существенные изменения при изменении температуры, во многих случаях можно принимать $\lambda = \text{const}$ и считать

$$n_J = \frac{\int_{T_x}^{T_r} T \rho(T) dT}{\rho (T_r - T_x)^2} - \frac{T_x}{T_r - T_x}, \quad (55)$$

$$n_{\tau} = \frac{\int_{T_x}^{T_r} T \tau(T) dT}{\tau (T_r - T_x)^2} - \frac{T_x}{T_r - T_x}. \quad (56)$$

В некоторых случаях при значениях $\frac{T_x}{T_r} = 0,5$ и близких к ним можно с достаточной для практики точностью считать, что $n_J = 0,640$; $n_{\tau} = 0,500$ для полупроводниковых материалов в виде твердых растворов; $n_J = 0,610$; $n_{\tau} = 0,550$ для полупроводниковых материалов в виде кристаллов стехиометрического состава.

Как указывалось ранее, при условии постоянства α_s , σ и λ доля теплоты Джоуля, возвращаемая к горячим спаям, $n_J = 0,500$ *.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Термоэлектрические генераторы используются для прямого (безмашинного) преобразования тепловой энергии в электрическую и в зависимости от конкретных технических требований могут быть рассчитаны либо на работу в режиме максимального к. п. д., либо на работу в режиме максимальной мощности. Как правило, габариты и вес термоэлектрогенератора, а также расход полупроводникового вещества в первом случае оказываются меньшими. Поэтому на практике расчет термоэлектрогенераторов осуществляется по формулам максимального к. п. д. [7], [14], [98].

Практический расчет термоэлектрогенератора, одновременно являющегося теплообменным аппаратом и источником электроэнергии, в полном объеме включает определение теплотехнических и электрических параметров, находящихся в тесной взаимосвязи. Следует отметить, что для достижения оптимальных характеристик термоэлектрогенератора в процессе его разработки нельзя ограничиваться рассмотрением только термоэлектрических батарей или термоэлементов. Любое термоэлектрическое устройство может быть достаточно эффективным лишь при условии необходимого соответствия действительных теплотехнических и электрических параметров расчетным данным. Именно по этой причине исходные данные для расчета термоэлектрогенератора, так же как и условия его работы, должны быть заданы с достаточной степенью точности, а диапазон их изменения быть небольшим.

* Теория расчета каскадных термоэлементов и выражения (52) — (56) впервые сформулированы Б. Я. Мойжесом [21].

В качестве исходных данных для расчета термоэлектрогенератора обычно служат:

- электрическая мощность термоэлектрогенератора;
- напряжение на выходных клеммах термоэлектрогенератора;
- род, температура, давление и скорость теплоносителя и охладителя;
- выбранный или заданный тип полупроводникового вещества для p - и n -стержней термоэлемента, а также зависимости термоэлектрических характеристик вещества от температуры.

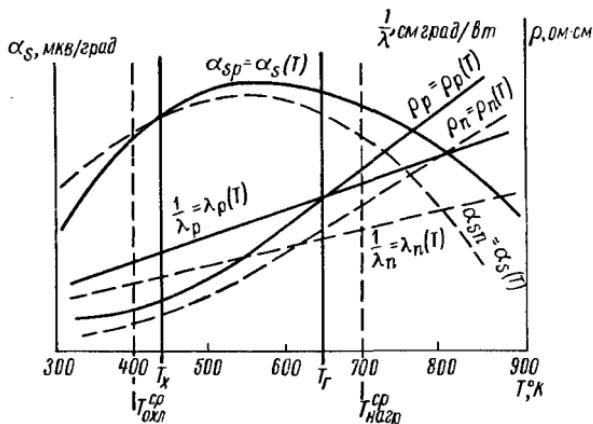


Рис. 25. Графический метод определения значений α_s , λ и σ для расчета термоэлектрогенератора

Род и параметры теплоносителя и охладителя на входе и выходе из термоэлектрогенератора позволяют в первом приближении оценить средние значения температур греющей и охлаждающей сред. Эти температуры заведомо отличны от температур горячего и холодного спаев термоэлементов. Тем не менее для определения термоэлектрических величин условимся считать их равными температурам спаев:

$$T_{\text{тепл}}^{\text{ср}} \approx T_r;$$

$$T_{\text{окhl}}^{\text{ср}} \approx T_x.$$

Это позволит в первом приближении ограничить диапазон изменений α_s , σ , λ и τ полупроводниковых материалов, произвести оценку средних значений их термоэлектрических характеристик (рис. 25), а также найти условное численное значение η'_{\max} . Задание приближенного значения $l_p = l_n = l'_{\text{пп}}$ дает возможность найти величину удельной мощности $\left(\frac{P}{F}\right)'$.

Для последующего расчета необходима разработка эскиза теплопередающей поверхности термоэлектрогенератора и оценка ее толщины, значений коэффициентов теплопередачи через отдельные слои многослойной стенки при значениях T'_x и T'_g соответственно. Знание этих величин, а также предварительных значений коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{T,g}$ и $\alpha_{T,x}$ позволяет в первом приближении вычислить коэффициенты теплопередачи $k_{T,g}$ и $k_{T,x}$.

Поскольку значения $\left(\frac{P}{F}\right)'$ и η'_{\max} позволяют определить величины удельных тепловых потоков по горячей ($q_{T,g}$) и холодной ($q_{T,x}$) сторонам термоэлектрогенератора, на основании формул теплопередачи в первом приближении находятся действительные значения T_x и T_g и перепад температур на полупроводниковом веществе ΔT . Знание температурного диапазона позволяет перейти к установлению значений термоэлектрических характеристик материалов p - и n -типов. По графикам зависимостей $\alpha_s = \alpha_s(T)$; $\sigma = \sigma(T)$; $\lambda = \lambda(T)$; $\tau = \tau(T)$ находятся значения коэффициентов термоэдс, удельной тепло- и электропроводности, а также коэффициента Томсона для p - и n -стержней термоэлемента при температурах T_x и T_g . Далее определяются среднеинтегральные значения этих величин в диапазоне $T_g - T_x$ и в первом приближении величины $\frac{F_p}{F_n}$, z' и M'_0 .

Используя значения термоэлектрических характеристик вещества и исходные значения P_{Tg} и U_{Tg} , можно определить количество последовательно ($k_{\text{посл}}$) соединенных термоэлементов, параллельно ($k_{\text{пар}}$) соединенных термобатарей и общее количество термоэлементов:

$$k = k_{\text{посл}} k_{\text{пар}}.$$

Наконец, в первом приближении рассчитывается величина $I_{\text{вн}}$. После определения составляющих уравнений энергетического баланса для горячих и холодных спаев могут быть получены значения P , $\frac{P}{F}$ и η_{\max} . Если совпадение этих величин с ранее заданными значениями неудовлетворительно, весь расчет следует повторить во втором приближении. Обычно при соответствующих навыках это оказывается достаточным. Если результаты расчета, выполненного методом последовательных приближений, оказываются приемлемыми, то это позволяет установить точные значения термоэдс E_{Tg} , сопротивления нагрузки R_{Tg} , внутреннего сопротивления термоэлектрогенератора r_{Tg} , а также силы тока I_{Tg} и напряжения на клеммах U_{Tg} .

Последовательность расчета термоэлектрогенератора на режим максимального к. п. д. приводится в табл. 1. Приложения.

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА
ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
НА РЕЖИМЫ МАКСИМАЛЬНОГО
ХОЛОДИЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
И МАКСИМАЛЬНОЙ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Термоэлектрические охлаждающие устройства используются для поддержания в замкнутом объеме температур, меньших температуры окружающей среды, или для других целей, связанных с направленным переносом теплоты от одной среды к другой. Перенос теплоты в устройствах такого типа осуществляется от холодных спаев к горячим за счет затрат электрической энергии от какого-либо внешнего источника постоянного тока.

Термоэлектрические охлаждающие устройства могут быть рассчитаны на работу либо в режиме максимального холодильного коэффициента, либо в режиме максимальной холодопроизводительности. В первом случае достигается большая эффективность использования затрачиваемой электрической энергии, во втором может быть получена меньшая температура холодных спаев. Практически при $\Delta T = 35$ град характеристики обоих режимов оказываются близкими, и поэтому для расчета можно пользоваться формулами режима максимальной холодопроизводительности. В случае небольших перепадов температур термоэлектрические охлаждающие устройства целесообразно рассчитывать по формулам режима максимального холодильного коэффициента.

Так же как и в случае термоэлектрогенератора, при расчете термоэлектрического охлаждающего устройства применяется метод последовательных приближений. Однако поскольку термоэлектрические характеристики полупроводниковых материалов можно считать с приемлемой для практических целей степенью точности не зависящими от температуры, расчет несколько упрощается.

В качестве исходных данных для расчета термоэлектрического охлаждающего устройства принимаются:

- количество теплоты, которое должно быть подведено к холодным спаям в единицу времени;
- напряжение;
- род, температура, давление и скорость охлаждаемой и нагреваемой сред;
- выбранный или заданный тип полупроводникового вещества для p - и n -стержней термоэлемента, а также зависимости термоэлектрических характеристик вещества от температуры или их средние численные значения для заданного интервала температур.

Параметры охлаждаемой и нагреваемой сред, а также способы, при помощи которых осуществляются отвод и подвод теплоты к спаям термоэлементов, позволяют оценить средние температуры

сред. Условимся в первом приближении считать эти температуры равными температурам спаев термоэлементов:

$$T_{\text{окл}}^{\text{ср}} \approx T_x';$$

$$T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} \approx T_g'.$$

При этом условии, если имеются графические зависимости $\alpha_s = \alpha_s(T)$, $\sigma = \sigma(T)$ и $\lambda = \lambda(T)$ (рис. 26), можно найти средние значения α_s , σ и λ в диапазоне $T_g' - T_x'$. Полученные величины термоэлектрических параметров позволяют определить значения

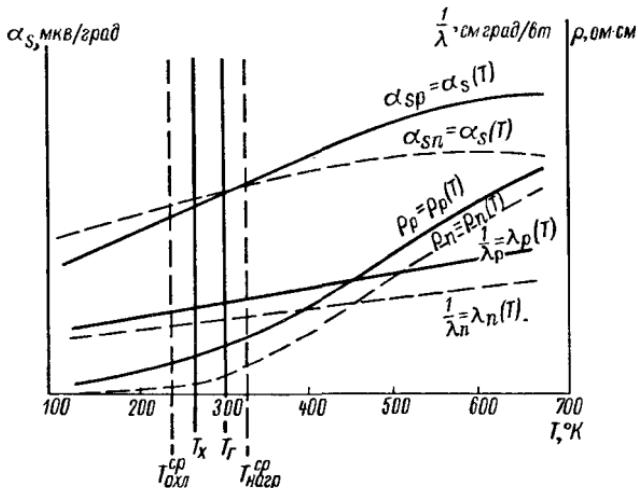


Рис. 26. Графический метод определения средних значений α_s , λ и σ для расчета термоэлектрического охлаждающего устройства

$z_{\text{ср}}$ и M и при заданной величине $l_p = l_n = l_{\text{пп}}'$ найти значение удельной холодопроизводительности $\left(\frac{Q_x}{F}\right)'$ и $\mathcal{E}_x^{\text{max}}$.

Для последующего расчета, так же как в случае термоэлектрогенератора, необходима разработка эскиза теплопередающей поверхности, знание толщин и коэффициентов теплопередачи через отдельные слои многослойной стенки при температурах T_x' и T_g' . Численные значения этих величин и коэффициентов теплоотдачи по стороне охлаждаемой и нагреваемой сред позволяют в первом приближении оценить значения коэффициентов теплопередачи $k_{T,g}$ и $k_{T,x}$. Эти величины в свою очередь позволяют определить значения удельных тепловых потоков по горячей и холодной сторонам $q_{T,g}$ и $q_{T,x}$ и температуры T_g и T_x .

После уточнения средних значений α_s , σ и λ в диапазоне температур $T_g - T_x$ находятся отношения площадей поперечных сечений стержней термоэлементов $\frac{F_p}{F_n}$, величина коэффициента

добротности z и отношение электрических сопротивлений M . Далее, определив количество последовательно соединенных термоэлементов, электрические сопротивления r и $R_{\text{той}}$ и величину оптимального тока $I_{\text{опт}}$, можно найти значение $\dot{R}_{\text{той}}$, величины составляющих уравнений энергетического баланса для обоих спаев, отношение $\frac{Q_x}{F}$ и $\mathcal{E}_{x \text{ опт}}$.

В случае если численные значения этих величин отличаются от полученных предварительно, расчет повторяется во втором приближении.

Последовательность расчета термоэлектрического охлаждающего устройства на режимы максимального холодильного коэффициента и максимальной холодопроизводительности приводится соответственно в табл. 2 и 3 Приложения.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ОДНОКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Выше указалось, что термоэлектрические эффекты могут быть использованы не только для целей генерирования электроэнергии и получения холода, но и для нагревания различных сред и объемов. Так, вместо широко распространенного процесса подогрева при помощи эффекта Джоуля может быть применен термоэлектрический подогрев, который в ряде случаев оказывается более эффективным.

Преимущества термоэлектрического подогрева при этом тем более значительны, чем меньше разность температур на термоэлементах. Практически при использовании разработанных термоэлектрических материалов целесообразно ограничить ΔT значениями, не превышающими $30 \div 40$ град.

Термоэлектрические тепловые насосы обычно рассчитываются на режим оптимального коэффициента эффективности. Поскольку в рассматриваемом случае речь идет об относительно небольших перепадах температур, так же как и в случае охлаждающих устройств, целесообразно α_s , σ и λ полупроводникового вещества считать не зависящими от температуры и принять их равными некоторым средним значениям в диапазоне $T_r - T_x$ (рис. 27):

В качестве исходных данных для расчета термоэлектрического теплового насоса примем:

- количество теплоты, отдаваемой горячими спаями в единицу времени;
- напряжение;
- род, температура, давление и скорость нагреваемой и охлаждаемой сред;

— выбранный или заданный тип полупроводникового вещества для *p*- и *n*-стержней термоэлемента, а также зависимости термоэлектрических характеристик вещества от температуры или их средние численные значения для заданного интервала температур.

Последовательность расчета термоэлектрического теплового насоса сохраняется такой же, как и в случае термоэлектрического охлаждающего устройства. При известных параметрах сред,

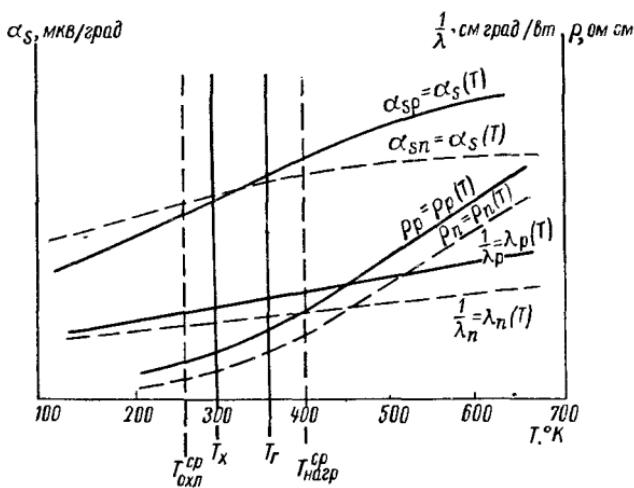


Рис. 27. Графический метод определения средних значений α_s , λ и σ для расчета термоэлектрического теплового насоса

а также принятых или заданных способах подвода и отвода теплоты можно принять, как и ранее,

$$T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} \approx T'_r;$$

$$T_{\text{окл}}^{\text{ср}} \approx T'_x.$$

После этого оцениваются средние значения α_s , σ и λ для материалов *p*- и *n*-типов в диапазоне температур $T'_r - T'_x$, определяются значения $z'_{\text{ср}}$, M' и при заданной величине $l_p = l_n = l'_{\text{пп}}$ находятся численные значения $\left(\frac{Q_r}{F}\right)'$ и $\mathcal{E}_{\text{T max}}'$.

После разработки предварительной конструкции теплопередающей поверхности определяются теплотехнические характеристики, используемые для расчета $k_{\text{T}, r}$ и $k_{\text{T}, x}$ и позволяющие определить в первом приближении $q_{\text{T}, r}$ и $q_{\text{T}, x}$, значения T_x и T_r , а также средние для диапазона температур ΔT значения α_s , σ и λ .

После определения в первом приближении $\frac{Fp}{F_n}$, z и M могут быть найдены количество последовательно соединенных термоэлементов $k_{\text{посл}}$, значения электрических сопротивлений r и $R_{\text{ттн}}$, величина тока $I_{\text{опт}}$ и составлены уравнения энергетического баланса для обоих спаев. Расчет завершается определением численных значений $\frac{Q_r}{F}$ и $\mathcal{E}_{t \max}$. В случае неудовлетворительного совпадения этих величин с принятыми в начале расчета выполняются второе и последующие приближения.

Последовательность расчета термоэлектрического теплового насоса приводится в табл. 4 Приложения.

§ 7. КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

Собственно термоэлектрическое устройство (термоэлектрогенератор, термоэлектрическое охлаждающее устройство или термоэлектрический тепловой насос) состоит из трех основных групп элементов:

- конструкций и систем, обеспечивающих подвод теплоты к термоэлектрическим батареям;
- термоэлектрических батарей;
- конструкций и систем, обеспечивающих отвод теплоты от термоэлектрических батарей.

Указанные элементы термоэлектрических устройств связаны друг с другом настолько тесно, что конструктивная разработка последних невозможна без учета взаимного влияния всех элементов друг на друга.

Однако еще более сложными являются вопросы, связанные с разработкой и созданием термоэлектрического преобразователя в целом. В этом случае в тесной взаимосвязи находятся не только основные элементы термоэлектрического устройства, но и такие, как источник и приемник энергии.

Термоэлектрические установки состоят из следующих основных элементов:

- источник тепловой энергии (в случае термоэлектрических охлаждающих устройств и термоэлектрических тепловых насосов — источник электроэнергии);
- конструкции и системы, обеспечивающие подвод теплоты к термоэлектрическим батареям;
- термоэлектрические батареи;
- конструкции и системы, обеспечивающие отвод теплоты от термоэлектрических батарей;
- приемник электроэнергии — электродвигатель или электрическая аппаратура (отсутствует в случае термоэлектрических охлаждающих устройств и термоэлектрических тепловых насосов).

Так же как элементы термоэлектрического устройства, основные элементы термоэлектрических установок связаны настолько тесно, что требуют комплексной разработки и конструирования.

Только при этом условии возможно получение оптимальных характеристик, что особенно важно, если речь идет об установках, предназначенных для работы в судовых условиях.

Ниже рассматриваются особенности основных элементов термоэлектрических устройств и установок в соответствии с их конструктивными признаками и целевым назначением.

ОДНОКАСКАДНЫЕ ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ

Принципиально термоэлементы для термоэлектрогенераторов, термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов имеют идентичные конструктивные особенности. Это позволяет классифицировать их по конструктивному оформлению, а не по признаку принадлежности к тому или другому типу термоэлектрического устройства.

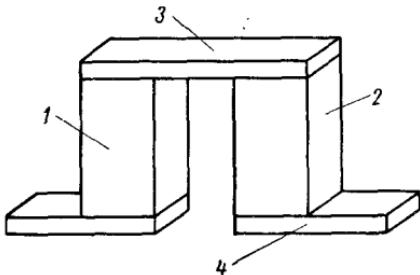


Рис. 28. Конструктивная схема термоэлемента.

1 — ветвь *p*-типа; 2 — ветвь *n*-типа;
3 — «горячая» коммутационная пластина;
4 — «холодная» коммутационная пластина

— коммутационная пластина по стороне горячего спая;
— коммутационная пластина по стороне холодного спая
(рис. 28).

В конструктивном отношении различают термоэлементы плоского, кольцевого и секторного типов. Термоэлементы плоского типа в настоящее время наиболее распространены, а технология их изготовления наиболее освоена. Однако подобное конструктивное оформление термоэлементов и составленных из них термобатарей приводит к необходимости создания плоских теплоотводов и теплоподводов. Такая конструкция при больших давлениях греющей и охлаждающей сред обуславливает увеличение толщины прочно-плотных стенок, отделяющих термобатареи от указанных сред. При прочих равных условиях подобное утолщение приводит к уменьшению полезного перепада температур на термоэлементах и существенно влияет на габариты и вес устройств.

Сечение ветвей плоских термоэлементов может иметь прямоугольную (квадратную) (рис. 29, *a*) или круглую (рис. 29, *b*)

Основой термоэлектрической батареи являются единичные термоэлементы, соединенные последовательно или параллельно. Термоэлементы, как известно, состоят из двух ветвей, выполненных из дырочного и электронного полупроводниковых материалов, соединенных токоведущими коммутационными пластинами. Таким образом, обязательными элементами конструкции единичного термоэлемента являются:

- ветвь *p*-типа;
- ветвь *n*-типа;

форму в зависимости от технологических требований, а также установленных габаритов и веса. Оптимальными с точки зрения наиболее рационального использования поверхности теплообмена являются сечения ветвей термоэлемента в форме шестиугранника, однако технологически изготовление этих термоэлементов более сложно.

При разработке и изготовлении термоэлементов вообще и плоских, в частности, особого внимания требуют вопросы коммутации и уменьшения возникающих термических напряжений до значений, ограниченных прочностью используемых материалов в условиях длительной эксплуатации и периодических термоциклов.

Удовлетворение этим требованиям — задача весьма трудная, поскольку термоэлемент представляет собой сочетание элементов, выполненных из разных материалов, жестко соединенных друг с другом. Необходимо также учитывать, что коммутационные материалы, как правило, должны обладать хорошей тепло- и электропроводностью, а следовательно, большим коэффициентом линейного расширения. Эти свойства еще более усугубляют вопрос о компенсации температурных расширений.

В настоящее время применяются решения, позволяющие уменьшить

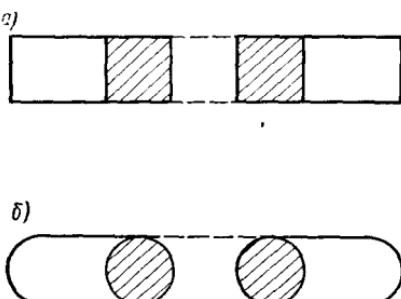


Рис. 29. Конструктивные схемы термоэлементов с квадратным (а) и с круглым (б) сечением ветвей

различные конструктивные термические напряжения в термоэлементах до безопасных пределов. При небольших перепадах температур ΔT (термоэлектрические охлаждающие устройства и тепловые насосы) для этой цели иногда оказывается достаточным использование холодных коммутационных пластин, имею-

Рис. 30. Конструктивная схема термоэлемента с коммутационными пластинами различной длины

щих меньшие линейные размеры, чем горячие пластины (рис. 30). Однако такая конструкция термоэлемента, хотя и позволяет уменьшить термические напряжения, приводит к очень нерациональному использованию поверхности теплообмена. Возможным, но далеко не оптимальным решением может быть использование компенсационных элементов на горячих коммутационных пластинах (рис. 31, 32).

Наиболее целесообразным с конструктивной точки зрения и позволяющим уменьшить термические напряжения в термоэлементе следует считать использование демпфирующих прослоек

между материалом ветвей и коммутационными пластинами [17], [144], [147]. Материалом таких прослоек могут служить вещества, обладающие хорошей пластичностью в рассматриваемом диапазоне температур и не вызывающие увеличения электрического и теплового сопротивлений в месте сопряжения полупроводниковых материалов с коммутационными пластинами.

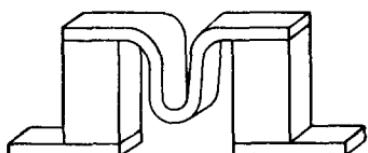


Рис. 31. Конструктивная схема термоэлемента с компенсированной коммутационной пластиной

металлами. Конструктивные схемы термоэлементов с демпфирующими прослойками приведены на рис. 33.

Не менее сложной, чем вопрос компенсации термических деформаций, является проблема коммутации, т. е. соединения ветвей термоэлемента с токоведущими коммутационными пластинами. Обычно в качестве материалов коммутационных пластин используются медь, никель или их сплавы, имеющие удельную электрическую проводимость на два или три порядка больше, чем полупроводниковые материалы. Поэтому электрическим сопротивлением собственно коммутационных пластин без ущерба для точности при расчетах можно пренебречь.

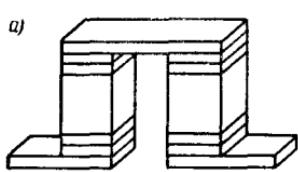


Рис. 33. Конструктивные схемы термоэлементов с демпфирующими прослойками: а — двухслойной; б — однослоиной

но не поддается расчету, а ее измерение связано с определенными трудностями. Кроме того, в процессе длительной эксплуатации термоэлементов она может изменяться под влиянием различных

В качестве демпфирующих прослоек при относительно небольших температурах чаще всего применяются свинец, висмут или их сплавы с другими

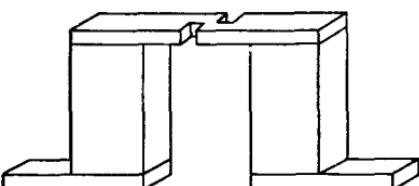


Рис. 32. Конструктивная схема термоэлемента с разрезной коммутационной пластиной

В равной степени это утверждение может быть отнесено и к термическому сопротивлению коммутационных пластин, которые, являясь хорошими проводниками, вместе с тем характеризуются более высокими значениями коэффициента теплопроводности, чем полупроводниковые вещества.

Несмотря на это суммарное электрическое сопротивление коммутации непосредственно в местах контакта коммутационных пластин и полупроводниковых материалов, т. е. на горячих и холодных спаях, может оказаться неприемлемо большим. Величина сопротивления спаев обыч-

факторов. Естественно, что величина электрического сопротивления спаев должна быть по возможности минимальной, так как только в этом случае при прочих равных условиях может быть достигнута эффективность термоэлементов, приближающаяся к эффективности термоэлектрических материалов. Как указывалось ранее, эффективность термоэлементов представляет собой функцию коэффициента добротности полупроводникового вещества:

$$z = \frac{a_s^2}{\left(\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right)^2} \text{ 1/град.}$$

Если предположить, что электрическое сопротивление зоны контакта пренебрежимо мало, этот коэффициент будет учитывать электрическое сопротивление (электропроводность) лишь собственно полупроводникового вещества.

Обозначив удельное электрическое контактное сопротивление коммутации $r_{p \text{ конт}}$, $r_{n \text{ конт}}$, $\text{ом} \cdot \text{см}^2$ и высоту термоэлемента $l_{\text{пп}}$, см , формулу для определения коэффициента добротности в этом случае можем записать в виде

$$z = \frac{a_s^2}{\left(\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p + \frac{l_{\text{пп}}}{r_{p \text{ конт}}}}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n + \frac{l_{\text{пп}}}{r_{n \text{ конт}}}}} \right)^2} \text{ 1/град.} \quad (57)$$

Легко заметить, что в этом случае термоэлектрическая эффективность процесса преобразования энергии уменьшается, в результате чего могут быть сведены на нет все усилия, связанные с подбором и разработкой эффективных полупроводниковых материалов.

Минимальное электрическое сопротивление спаев — не единственное требование, предъявляемое к способу коммутации термоэлементов. Этот способ должен обеспечивать механическую прочность под действием термических напряжений, по возможности исключать диффузию материала токоведущих коммутационных пластин или связующих материалов в полупроводник, т. е. предотвращать диффузионное легирование полупроводника примесью, которое неизбежно приведет к изменению его термоэлектрических свойств. Эти, как и многие другие, технологические требования в значительной степени ограничивают выбор коммутационных материалов и методов коммутации.

Наиболее широко используемыми в настоящее время методами коммутации являются пайка и прижимное механическое контактирование. В некоторых случаях применяются также методы совместного прессования полупроводникового и коммутационного материалов, диффузионного сращивания, напыления или заливки коммутационной перемычки, а также гальванический и химический (с использованием пересыщенных солей металлов) методы (табл. 6) [43].

Таблица 6

**Электрическое сопротивление контактирующих поверхностей металл—полупроводник
при различных методах коммутации**

Метод коммутации	Материал стержня термоэлемента	Технология коммутации				Значение сопротивления контакта	Характеристика
		Припой	Флюс	Подготовительные операции	Контакт обладает высокой механической прочностью		
	$\text{Bi}_{12}\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (<i>n</i> -тип)	Cu Bi Sn Bi Sn Bi Sn Bi Sb Bi Sb	100 99 1 95 5 90 10 90 10 80 20	544 538 — 528 — 508 623 673 — — —	Стеарин — — — — — Нашатырь Глицерин —	$r_0 < 10^{-5}$ $\Omega \cdot \text{cm}^2$	Контакт обладает высокой механической прочностью
Пайка	$\text{Bi}_{12}\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (<i>p</i> -тип)	Cu Bi Sb Bi Sb	— — — — —	— — — — —	— — — — —	—	—
Пайка	Интерметаллические соединения на основе Bi, Sb, Te и Se	Cu Sn Bi Sn	85 15 70 30	— — — —	— — — —	Перед пайкой осуществляется травление в 2 стадии:	—

Продолжение табл. 6

Метод коммутации	Материал стержня термоэлемента	Технология коммутации				Значение	Характеристика сопротивление контакта
		Припой	Флюс	Подготовительные операции			
Коммутация при нагреве	Банне-матрица	Korhе-тре-гроу-репар-тинг, %	Tempera-tура-тире-па-тире-ра, °K	Hannehо-матрица	Флюс, %	Korhе-гроу-репар-тинг, %	а) в водном растворе безводной CrO ₃ (55 г CrO ₃ + HNO ₃ , уд. вес 1,18 г/см ³ , концентрация 430 см ³ /л) Длительность операции 10 сек; б) в безводном растворе CrO ₃ (1275 г/л) Длительность операции 2 мин.
Пайка	Интерметаллические соединения на основе Bi, Sb, Te и Se	Cu	Bi Sn	70 30	—	—	Перед пайкой осуществляется гравирование в 2 стадии: а) в смеси кислот HCl (20 объемных %, уд. вес 1,18 г/см ³) + HNO ₃ (80 объемных %, уд. вес 1,38 г/см ³)

Продолжение табл. 6

Метод коммутации	Материал	Технология коммутации				Значение	Характеристика
		Прилож.	Флюс	Подготовительные операции	Электрическое сопротивление контакта		
стержня термоблемента		Hanmeto-technika	Kontakte-technik	Длительность операции 20 сек.: б) в смеси кинолог HCl (50 вес. %) + HNO ₃ (50 вес. %)	$r = 3.1 \times 10^{-4} \text{ ом}$		
				Длительность операции 10 сек.			
Заливка сплавом	Соединение на основе Bi и Te	Sb или Sb + Te	—	—	—	—	За время работы 2100 час. при $T_g = 573^\circ\text{K}$ и $T_x = 343^\circ\text{K}$ мощность термоэлемента уменьшилась на 15% от начальной
Припрессовка коммутационного материала	Bi ₂ Te ₃ —Sb ₂ Te ₃ (ρ -тип)	Константан	—	—	—	Перед прессовкой константана проволока залуживается составом Sb (10%) + Sn (90%)	$r = 10^{-3} + 10^{-4} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$

Продолжение табл. 6

Метод коммутации	Материал стержня термоэлемента	Технология коммутации			Электрическое сопротивление контакта
		Припой	Флюс	Подготовительные операции	
PbTe (<i>n</i> -тип)	Ni	—	—	Перед припеккой никелевая проволока залуживается составом Sb—Sn или Bi	$r_0 = 0.25 \times 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ За время работы 50 час. при $\Delta T = 300^\circ\text{K}$ сопротивление термоэлемента возросло на 7–8%. Через 100 час. работы контакт разрушился
		Порошок NiBi + Ni	—	—	$r_0 = 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ За 100 час. работы при $\Delta T = 300^\circ\text{K}$ сопротивление не изменилось

Продолжение табл. 6

Метод коммутации	Материал	Технология коммутации				Значение	Характеристика
		Припой	Флюс	Подготовительные операции	Электрическое сопротивление контакта		
Совместное прессование	$\text{Bi}_{12}\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -тип)	Порошок $\text{NiBi} + \text{Ni}$	—	—	Раздельное ходовое прессование ветвей термоэлемента с последующим одновременным горячим прессованием при $T_0 = 623^\circ \text{K}$ и $p = 5 \text{ m/cm}^2$	$r_0 = 65 \times 10^{-4} \text{ om} \cdot \text{cm}^2$	Длительность выдержки в вакууме 6 час.

Продолжение табл. 6

Метод коммутации	Материал стержня термоэлемента	Технология коммутации				Электрическое сопротивление контакта
		Припой	Флос	Подготовительные операции	Значение характеристики	
C:Si ₂ (<i>p</i> -тип) CoSi (<i>n</i> -тип)	Хаммонд оронд коммутаци- я стекло ка	Korninge K Temmepa- тия типа ма- териала	Hanne ma- terials Hanne ma- terials Hanne ma- terials Hanne ma- terials	Длительность выдержки в вакууме 6 час.	$r_0 = 10^{-6}$ $\text{см} \cdot \text{см}^2$	Завремя работы в один час, при $T_r = 623^\circ\text{K}$ со-противление контакта резко возросло
		Korninge K Temmepa- тия типа ма- териала	Hanne ma- terials Hanne ma- terials Hanne ma- terials Hanne ma- terials	Холодная прессовка порошка и последую-щее горячее прессование термо-элемента в шелом при $T_0 = 623^\circ\text{K}$ и $p = 5 \text{ mPa}$	Длительность выдержки в вакууме 6 час.	Формирование контакта осуществляется в атмосфере аргона при нагревании до 1473°K

Продолжение табл. 6

Метод коммутации	Материал стержня термоэлемента	Припой	Технология коммутации			Подготовительные операции	Значение характеристики
			Гарнеко- хромати- ческий (наносит- ся комму- тационная перемычка)	Гарнеко- хромати- ческий (наносит- ся комму- тационная перемычка)	Флюс		
Гальва- нический (наносит- ся комму- тационная перемычка)	Sb ₂ Te ₃ (<i>p</i> -тип) Bi ₂ Te ₃ (<i>n</i> -тип)	Ni	—	—	—	Состав ванны: NiSO ₄ · 7H ₂ O (400 г); NiCl ₂ · 6H ₂ O (15 г); H ₃ BO ₃ (30 г); CdSO ₄ (0,03 г); H ₂ O (1000 м.л) Температура— 323—333° К; <i>pH</i> =3,5÷4; анод—Ni	— За время работы 5100 час. при <i>T_r</i> =523° К и <i>T_x</i> =293° К сопротивление контакта воз- росло на 10%, коэффициент термоджада 6—8%
Гальва- нический (наносит- ся комму- тационная перемычка)	SbZn (<i>p</i> -тип) CoSb (<i>n</i> -тип) PbTe (<i>n</i> -тип)	Ni	—	—	—	Состав ванны: NiSO ₄ · 7H ₂ O (400 г); NiCl ₂ · H ₂ O (15 г); H ₃ BO ₃ (30 г); CdSO ₄ (0,03 г); H ₂ O (1000 м.л) Температура— 323—333° К; <i>pH</i> =3,5÷4; анод—Ni ₁	— За время работы 3000 час. при <i>T_r</i> =523° К и <i>T_x</i> =293° К сопротивление ветви из SbZn осталось неиз- менным, за вре- мя работы 3500 час. сопротивление ветви из CoSb увеличилось на 0,7%

Продолжение табл. 6

Метод коммутации	Материал стержня термоэлемента	Технология коммутации		Подготовительные операции	Значение	Характеристика
		Припой	Флюс			
Гальванический (наносится коммутационная перемычка)	SbZn (<i>p</i> -тип) CoSb (<i>n</i> -тип) PbTe (<i>n</i> -тип)	Ni	—	Состав ванны: NiSO ₄ •7H ₂ O (400 г); NiCl ₂ •H ₂ O (15 г); H ₃ BO ₃ (30 г); CdSO ₄ (0,03 г) H ₂ O (1000 мл) Температура— —323—333° К; <i>pH</i> = 3,5÷4; анод — Ni	—	За время работы 4500 час., сопротивление ветви из PbTe возросло на 8—10%, коэффициент термод. на 7—8%
Прижимное контактiroвание	PbTe (<i>p</i> -тип) PbTe (<i>n</i> -тип)	Низколегированые стали и Fe	—	—	Механический прижимной контакт в восстановительной или инертной среде при $\rho \approx 7$ к Ω /см ² и $T_0 = 643^{\circ}$ К	$r_0 = 10^{-6}$ си. см ²

Анализ данных табл. 6 позволяет утверждать, что все способы, связанные с нагревом материалов в процессе коммутации, вследствие взаимной диффузии материалов оказывают влияние на качество термоэлементов и продолжительность их непрерывной работы. С этой точки зрения наиболее удовлетворительными можно считать так называемые методы холодной коммутации. Однако несмотря на отмеченные достоинства других методов наиболее широкое распространение в настоящее время, особенно при изготовлении термоэлементов для охлаждающих устройств и тепловых насосов, получил метод коммутации пайкой.

Это объясняется высокой технологичностью этого метода, незначительностью контактного электрического сопротивления и приемлемой механической прочностью контакта. Учитывая также возможность применения припоев, предотвращающих взаимную диффузию материалов и обеспечивающих длительную работу термоэлементов, можно считать метод коммутации пайкой наиболее универсальным.

В последние годы, особенно для коммутации по стороне горячих спаев среднен-

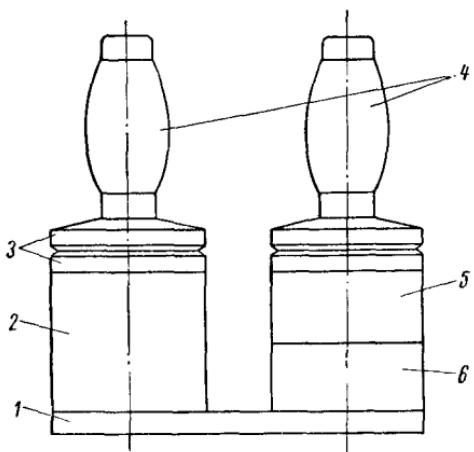


Рис. 34. Термоэлемент с прижимным контактом по «горячей» и паяным контактом по «холодной» стороне.

1 — холодная коммутационная пластина; 2 — ветвь *p*-типа; 3 — прижимные коммутационные пластины; 4 — гибкие теплоэлектропроводы; 5 — верхний каскад ветви *n*-типа; 6 — нижний каскад ветви *n*-типа

и высокотемпературных электрогенерирующих термоэлементов, получил распространение метод прижимного механического контактирования. Этот метод достаточно прост, не требует нагрева, обеспечивает хорошую компенсацию термических деформаций и приемлемые значения переходного омического сопротивления. Однако имея ряд положительных сторон, он приводит к усложнению конструкции, увеличению габаритов и веса термоэлектрического устройства.

В конструкциях термоэлементов, нашедших практическое применение, чаще всего используются методы коммутации пайкой, прижимного механического контактирования или их комбинация. Что касается других методов, то они либо недостаточно изучены, либо применяются в единичных конструкциях термоэлектрических устройств, в которых по тем или иным причинам исключается использование прижимного механического контактирования или пайки. Рассмотрим некоторые конструкции термоэлементов различного типа и целевого назначения.

На рис. 34 показана конструкция термоэлемента, по холодной стороне которого коммутация осуществляется пайкой, а по горячей использованы прижимные гибкие (выполненные из медных проволочек) теплоэлектропроводы, соединенные с контактными пластинами [49]. Необходимое усилие прижима, как это показано на рис. 35, обеспечивается при помощи пружин.

Коммутация посредством прижимных контактов обеспечивает необходимую компенсацию термических деформаций при сохранении на всех режимах работы электрического и теплового контактов. Однако такой тип коммутации приводит к значительному увеличению габаритов и веса термоэлектрического устройства. С этой точки зрения более целесообразно применение паяных соединений, хотя последние также имеют ряд существенных недостатков.

Как видно из рис. 36, между коммутационной пластиной и полупроводником образуется несколько переходных слоев, имеющих свойства, отличные от свойств исходных материалов. Эффективная высота полупроводника в этом случае уменьшается. Паяные соединения, кроме того, не дают надежной гарантии с точки зрения компенсации термических деформаций и в ряде случаев ограничивают допускаемый температурный интервал применения термоэлемента.

Выше были рассмотрены плоские термоэлементы. Для судовых условий более перспективны термоэлементы кольцевого типа или секторные, которые позволяют использовать более компактные трубные поверхности теплообмена. Конструктивные схемы таких термоэлементов показаны на рис. 37.

Вопрос компенсации температурных деформаций в этом случае еще более усложняется и приводит к новым технологическим проблемам. Тем не менее конструкции термоэлементов данного типа представляют несомненный интерес. При использовании ядерных источников энергии с термоэлементами, размещаемыми непосредственно на тепловыделяющих элементах реакторов (рис. 38) или применяемых в сочетании с термоэмиссионными преобразователями энергии (рис. 39), такие конструкции оптимальны.

Известны и некоторые другие конструктивные решения термоэлементов, например оригинальная конструкция коаксиального цилиндрического термоэлемента (рис. 40). Этот термоэлемент отличается тем, что ветвь *p*-типа выполнена в виде цилиндрического

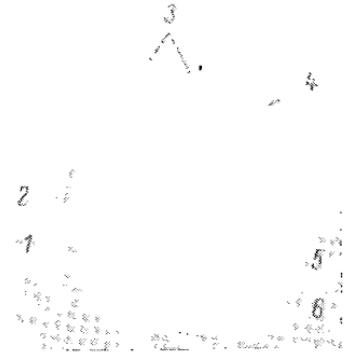


Рис. 35. Термоэлемент с прижимным контактом по «горячей» и паяным контактом по «холодной» стороне в собранном виде.

1 — ветвь *p*-типа; 2 — прижимные коммутационные пластины; 3 — гибкие теплоэлектропроводы; 4 — пружины; 5 — ветвь *n*-типа; 6 — «холодная» коммутационная пластина

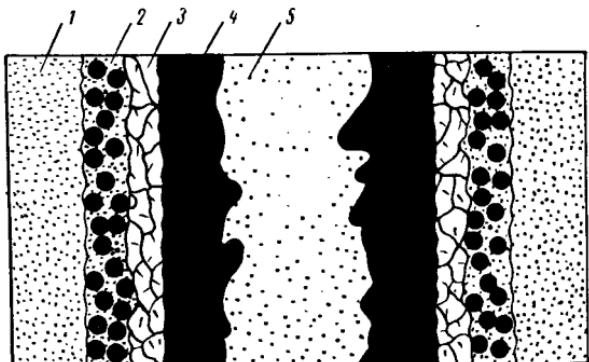


Рис. 36. Схематическое изображение микроструктуры термоэлемента с паяной коммутацией по «горячей» и «холодной» сторонам.

Рис. 37. Конструктивные схемы кольцевого (а) и секторного (б) термоэлементов.

1 — «холодное» коммутационное кольцо; 2 — полупроводниковый материал; 3 — «горячее» коммутационное кольцо; 4 — тепловая изоляция

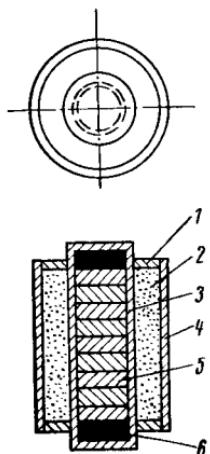
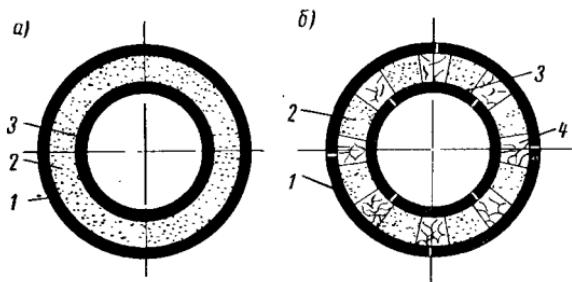


Рис. 38. Конструктивная схема термоэлемента, совмещенного с ядерным тепловыделяющим элементом.

1 — электрическая изоляция; 2 — полупроводниковый материал; 3 — «горячее» коммутационное кольцо; 4 — «холодное» коммутационное кольцо; 5 — ядерное топливо; 6 — тепловая изоляция

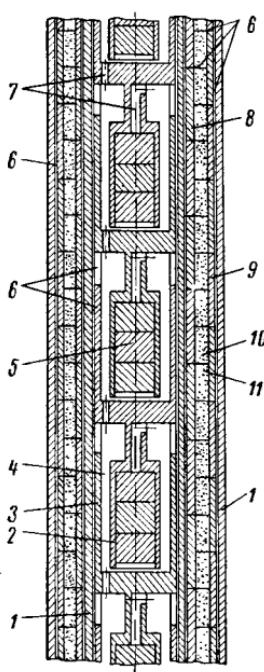


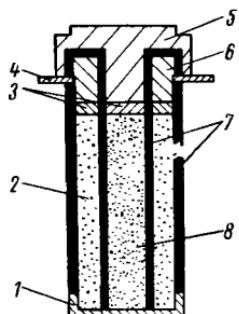
Рис. 39. Конструктивная схема комбинированного термоэмиссионно-термоэлектрического генератора, совмещенного с ядерным тепловыделяющим элементом.

1 — оболочка из циркаля; 2 — катод (эмиттер); 3 — анод; 4 — межэлектродное пространство, заполненное парами Cs; 5 — ядерное топливо (UO_2); 6 — электрическая изоляция; 7 — каналы для удаления газообразных продуктов деления; 8 — «горячее» коммутационное кольцо; 9 — «холодное» коммутационное кольцо; 10 — кольцо из полупроводникового материала p -типа; 11 — кольцо из полупроводникового материала n -типа

стержня, располагаемого по оси и окруженного кольцевым элементом из материала *n*-типа. Ветви изолированы друг от друга керамической изоляцией. Коммутация выполнена таким образом, чтобы сделать возможным использование платы с печатной схемой. В этом случае изготовленные термоэлементы вставляются в гнезда платы и припаиваются к внешним токоведущим соединениям, образуя батарею термоэлементов.

Рис. 40. Конструктивная схема коаксиального цилиндрического термоэлемента.

1—«холодный» коммутационный цилиндр; 2—«цилиндрическая» кольцевая ветвь *n*-типа; 3—припой; 4—кольцевой токоотвод; 5—«горячая» коммутационная втулка ветви *p*-типа; 6—«горячая» коммутационная шайба ветви *n*-типа; 7—керамические электроизоляционные цилиндры; 8—цилиндрическая ветвь *p*-типа



МНОГОКАСКАДНЫЕ ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ

Многокаскадные термоэлементы по сравнению с однокаскадными отличаются большей конструктивной и технологической сложностью, так как представляют собой сочетание иногда весьма различных по характеристикам полупроводниковых материалов.

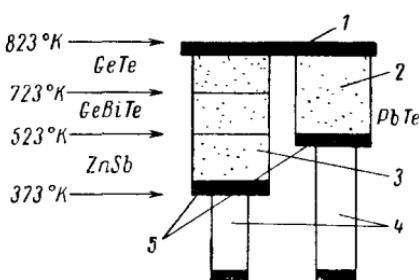


Рис. 41. Конструктивная схема цилиндрического многокаскадного термоэлемента.

1—«горячая» коммутационная пластина; 2—ветвь *n*-типа; 3—ветвь *p*-типа; 4—теплоэлектропроводы; 5—контактные шайбы

Кроме того, каскадные термоэлементы по сравнению с однокаскадными, как правило, рассчитываются для работы при значительно больших перепадах температур, что еще более усугубляет проблему обеспечения требуемой механической прочности термоэлемента. Немалые сложности представляют также проблема обеспечения надежного электрического и теплового контактов слоев, предотвращение взаимной диффузии материалов каскадов и др. Конструктивные схемы многокаскадных термоэлементов двух типов показаны на рис. 41, 42.

В конструктивном отношении многокаскадные термоэлементы аналогичны однокаскадным и могут выполняться плоскими, кольцевыми, секторными и т. д. При этом каскады могут быть с различными площадями поперечных сечений.

В виде примера на рис. 43 показан цилиндрический плоский термоэлемент, одна ветвь которого состоит из двух каскадов, имеющих различные площади поперечных сечений, а вторая выполнена однокаскадной. Коммутация по горячей стороне

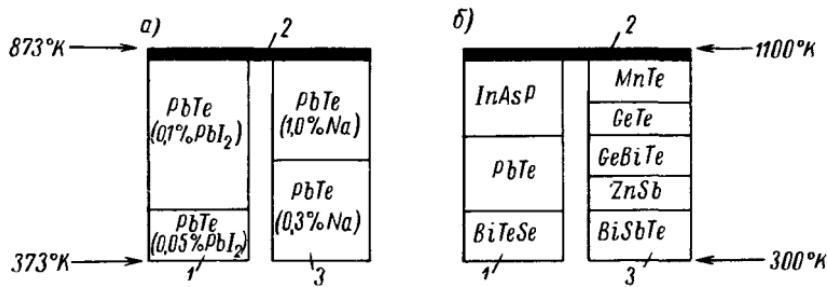


Рис. 42. Конструктивные схемы двухкаскадного (а) и многокаскадного (б) термоэлементов.

1 — ветвь *n*-типа; 2 — коммутационная пластина; 3 — ветвь *p*-типа.

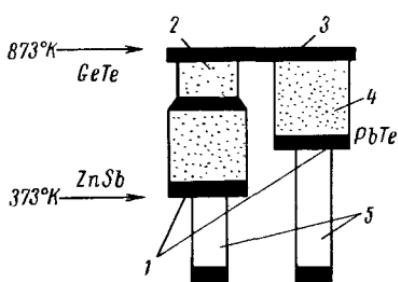


Рис. 43. Конструктивная схема многокаскадного термоэлемента с различными площадями поперечных сечений каскадов.

1 — контактные шайбы; 2 — ветвь *p*-типа; 3 — коммутационная пластина; 4 — ветвь *n*-типа; 5 — теплоизолирующие проводы

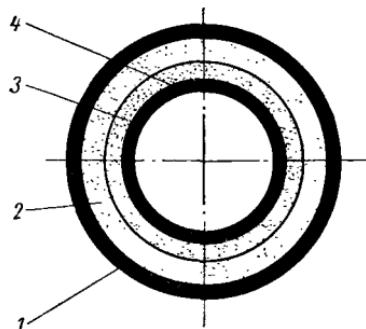


Рис. 44. Конструктивная схема двухкаскадного кольцевого термоэлемента.

1 — «холодное» коммутационное кольцо; 2 — нижний каскад; 3 — верхний каскад; 4 — «горячее» коммутационное кольцо

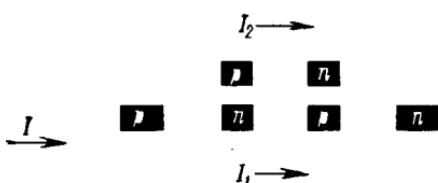


Рис. 45. Схема двухкаскадного охлаждающего термоэлемента с параллельным питанием каскадов

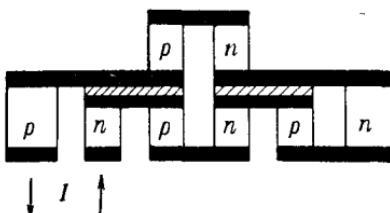


Рис. 46. Схема двухкаскадного охлаждающего термоэлемента с последовательным питанием каскадов

осуществляется методом прижимного контакта, по холодной — методом коммутации пайкой.

Схему кольцевого многокаскадного термоэлемента по аналогии с однокаскадным можно представить по рис. 44.

В случае термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов встречаются многокаскадные термоэлектрические системы с последовательным или параллельным питанием термоэлементов от внешних источников электроэнергии (рис. 45, 46).

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ БАТАРЕИ

Конструктивное оформление и размеры термоэлектрических батарей определяются не только конструкцией единичных термоэлементов, но и многими другими факторами. Основные трудности, связанные с разработкой и изготовлением термоэлектрических батарей, обусловлены необходимостью коммутации большого количества термоэлементов, обеспечения требуемых механических характеристик, теплового контакта с поверхностями

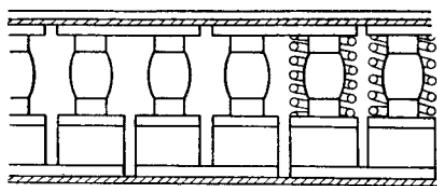


Рис. 47. Конструктивная схема термоэлектрической батареи термоэлектро-генератора с комбинированными контактными соединениями

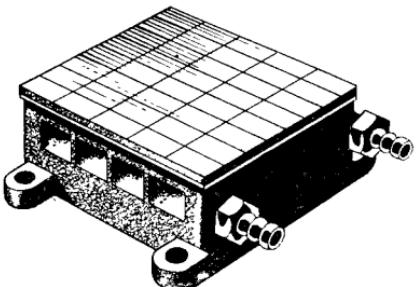


Рис. 48. Термоэлектрическая батарея охлаждающего устройства с плоскими квадратными термоэлементами и паяными контактами

теплообмена, надежной электрической изоляции от конструкционных элементов термоэлектрического устройства и т. д. По аналогии с единичными термоэлементами батареи могут быть осуществлены в плоском или в кольцевом исполнении [160].

Плоские термоэлектрические батареи изготавливаются из термоэлементов квадратного или круглого сечения, имеющих паяные, прижимные или комбинированные контактные соединения ветвей. На рис. 47 показана конструктивная схема батареи термоэлектро-генератора, состоящая из цилиндрических ветвей p - и n -типов с комбинированными контактными соединениями. На рис. 48 — термоэлектрическая батарея охлаждающего устройства, состоящая из плоских термоэлементов квадратного сечения, для соединения которых с коммутационными пластинами использован

метод пайки. На рис. 49 показана термоэлектрическая батарея, образованная цилиндрическими коаксиальными термоэлементами, собранными на печатной плате [74].

Несомненный интерес представляют термоэлектрические батареи для термоэлектрогенераторов, используемых в сочетании с ядерными источниками тепловой энергии. Конструктивная схема такой термоэлектрической батареи, состоящей из кольцевых термоэлементов, показана на рис. 50, а ее модель — на рис. 51.

Оригинальные конструктивные особенности отличают экспериментальную термоэлектрическую батарею с кольцевыми термоэлементами (рис. 52) из сплава Bi_2Te_3 , которые соединяются при помощи фигурных коммутационных колец, выполненных из меди или стали, и рассчитаны на работу в диапазоне температур от

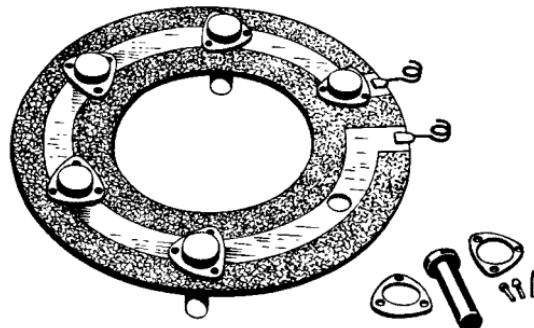


Рис. 49. Термоэлектрическая батарея термоэлектрогенератора с коаксиальными цилиндрическими термоэлементами, собранными на плате с печатной схемой

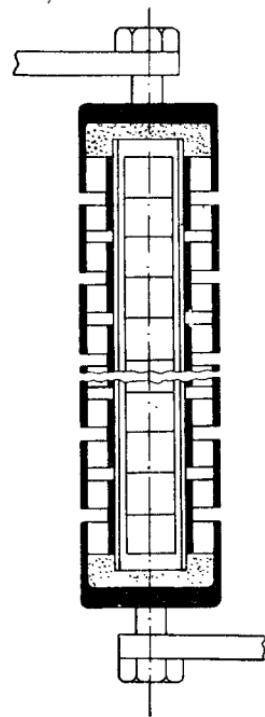


Рис. 50. Конструктивная схема термоэлектрической батареи из кольцевых термоэлементов с ядерным источником энергии

$T_r = 523^\circ \text{ K}$ до $T_x = 293^\circ \text{ K}$. Конструкция батареи обеспечивает значительное уменьшение термических радиальных деформаций полупроводниковых колец. Батарея успешно проработала в течение 1000 час., причем при указанном перепаде температур значение к. п. д. составило 5% без заметного ухудшения характеристик в течение всего периода эксплуатации.

Рассмотренная конструкция термоэлектрической батареи разработана для использования в качестве источника теплоты конденсации паров смеси дифенил—дифенилоксид ($T_{\text{кип}} = 523^\circ \text{ K}$) и воды в качестве охладителя. При других способах нагрева и охлаждения она также может представить большой интерес.

В инженерных конструкциях термоэлектрических устройств, как правило, применяются термоэлектрические батареи, а не единичные термоэлементы. Именно термоэлектрическая батарея представляет собой основной узел таких устройств. Не следует считать, что при условии наличия хорошо отработанных единичных термоэлементов создание термоэлектрической батареи — процесс несложный.

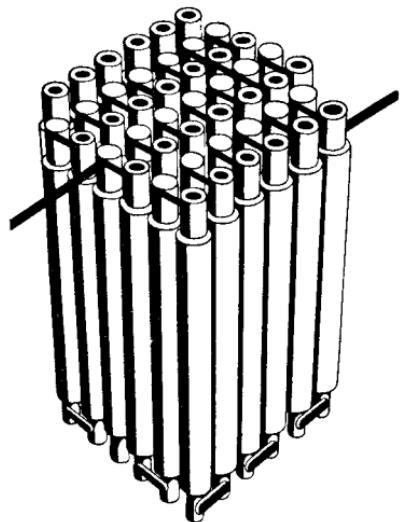


Рис. 51. Модель сборки тепловыделяющих элементов ядерного реактора с термоэлементами

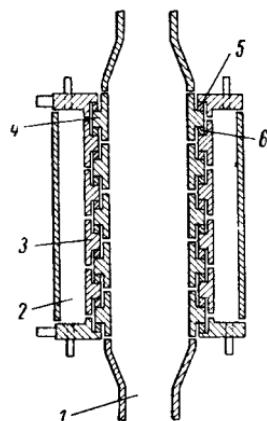


Рис. 52. Конструктивная схема термоэлектрической батареи с кольцевыми термоэлементами.

1 — канал теплоносителя;
2 — канал охладителя; 3 — «холодное» коммутационное кольцо; 4 — «горячее» коммутационное кольцо; 5 — кольцо *p*-типа; 6 — кольцо *n*-типа

Разработка и создание термоэлектрических батарей — весьма ответственная задача и требует от конструктора, с одной стороны, широких познаний в области теплопередачи, электротехники и материаловедения, с другой — знания вопросов эксплуатации устройств и установок в специфических судовых условиях.

§ 8. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

ТЕПЛОВОЕ СОПРЯЖЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ТЕПЛООБМЕНА

Метод теплового сопряжения термоэлектрических батарей с поверхностями теплообмена — один из наиболее важных вопросов, которые необходимо решить при разработке термоэлектрических устройств [17]. Особенное значение приобретает он

при конструировании термоэлектрогенераторов, тепловые потоки в которых достигают значительных величин, что, как известно, при больших термических сопротивлениях в местах теплового сопряжения может вызвать резкое уменьшение температурного перепада на термоэлементах (рис. 53, 54). Таким образом, недооценка важности метода сопряжения может привести к весьма значительному уменьшению эффективности термоэлектрических устройств. Однако этим не исчерпываются трудности, связанные с разработкой теплового сопряжения термоэлектрических батарей с поверхностями теплообмена. С одной стороны, это объясняется

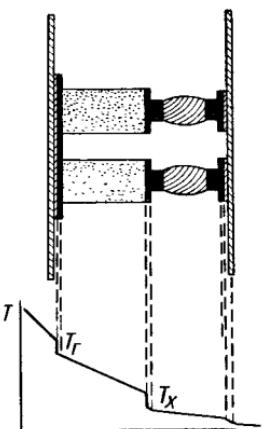


Рис. 53. Диаграмма перепада температур на термоэлементе с контактным термическим сопротивлением

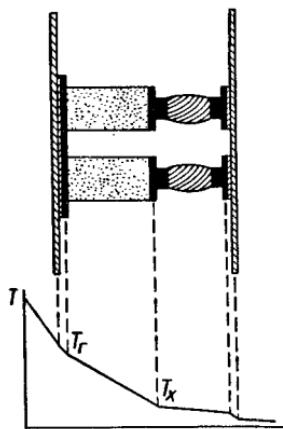


Рис. 54. Диаграмма перепада температур на термоэлементе без контактного термического сопротивления

тем, что тепловое сопряжение должно обеспечивать минимальное изменение температуры от сред к спаям (или наоборот), с другой — создавать надежную электрическую изоляцию термобатарей от конструкционных элементов. Эти требования значительно усложняют конструкцию теплового сопряжения и существенно затрудняют выбор материалов, так как для уменьшения термического сопротивления теплового сопряжения необходимо использовать материалы с высокими значениями коэффициента теплопроводности. Однако высокая теплопроводность в абсолютном большинстве случаев связана с высокой электропроводностью. Поэтому возникает необходимость в поиске таких решений, которые бы учитывали и конструктивные, и технологические, и эксплуатационные требования.

Применяемые в настоящее время методы тепловых сопряжений можно разделить на две основные группы — непрерывные и контактные (рис. 55).

Характерная особенность конструкции контактных тепловых сопряжений заключается в наличии теплового контакта между коммутационными пластинами и конструкционными элементами через твердые электроизоляционные прослойки.

Такого рода тепловые сопряжения отличаются относительной простотой конструкции и достаточной надежностью в эксплуатации, однако приводят к значительному уменьшению полезного перепада температур. Процесс переноса тепла в этих сопряжениях осуществляется посредством контактного теплообмена между разнородными материалами.

Ввиду важности указанных вопросов для термоэлектрических устройств рассмотрим некоторые физические явления, имеющие место при контактном теплообмене [41].

Известно, что контактный теплообмен между твердыми телами носит дискретный характер, так как соприкоснение поверхностей контактирующих тел вследствие шероховатости, неравномерности термических деформаций и усилия прижима осуществляется не во всех точках. Из-за этого между контактирующими поверхностями образуются полости, заполненные газом или другой средой, имеющие меньшую теплопроводность, чем металлы.

Рассмотрим упрощенные представления об особенностях контактного теплообмена между двумя металлическими телами. Выделим в контактирующих телах контактную полосу b , ширина которой равна шагу выступов шероховатости (рис. 56).

Количество тепла, протекающего через сечения x_1 и x_2 , можно определить по формулам

$$Q_1 = -\lambda_1 F_{x1} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_1} \text{ вт};$$

$$Q_2 = -\lambda_2 F_{x2} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_2} \text{ вт},$$

где λ_1, λ_2 — коэффициенты теплопроводности контактирующих металлических тел, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$;

F_{x1}, F_{x2} — площади сечений в зоне контакта, см^2 ;

T — температура в зоне контакта, $^\circ\text{К}$;

x — линейный размер, см .

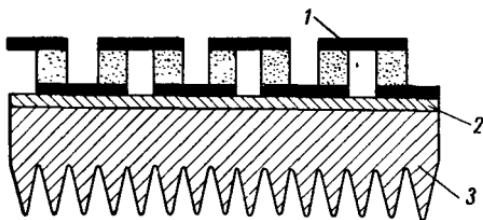


Рис. 55. Конструктивная схема непрерывного теплового сопряжения термоэлементов с оксидированной алюминиевой плитой.

1 — термоэлементы; 2 — слой оксидированного алюминия; 3 — алюминиевая плита

Поскольку $Q_1 = Q_2$, то приняв $\lambda_1 = \lambda_2 = \text{const}$, получим

$$\frac{\frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_1}}{\frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_2}} = \frac{F_{x_2}}{F_{x_1}}. \quad (58)$$

Отсюда следует, что градиент температур вдоль оси x по пути теплового потока постепенно увеличивается, достигает максимального значения и затем вновь уменьшается. Температуры контактирующих тел в точке k одинаковы.

При отсутствии выступов шероховатости распределение температур в контактирующих телах соответствует прямым линиям AC и BD , причем в плоскости контакта наблюдается скачок ΔT , величина которого зависит от контактного термического сопротивления.

Вышеизложенное наглядно иллюстрирует характер контактного теплообмена и влияние термического сопротивления на процесс теплообмена между контактирующими телами.

Полученные выводы могут быть дополнены некоторыми количественными оценками. Если обозначить максимальный зазор между впадинами шероховатости через l_{\max} , то средний зазор между впадинами шероховатости, которым обычно оперируют при расчетах, $l_{cp} = 0,5l_{\max}$.

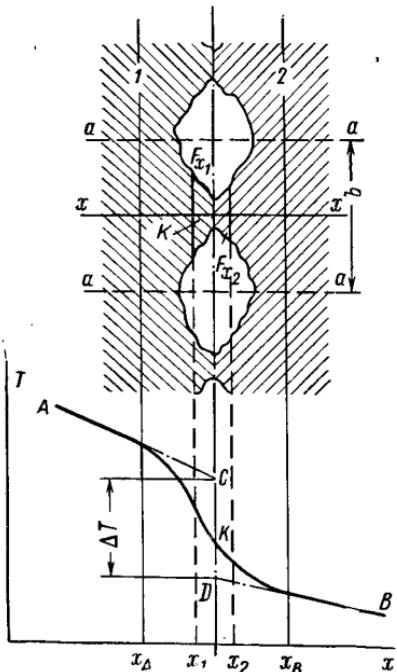
Рис. 56. Диаграмма распределения температур в контактирующих металлических телах 1, 2

Приняв $l_{\max} = 0,03 \text{ мм}$ и $l_{cp} = 0,015 \text{ мм}$, $q_T = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ вт}/\text{м}^2$ и $\lambda_{\text{возд}} = 3,18 \cdot 10^{-4} \text{ вт}/\text{м}\cdot\text{град}$, получим следующее значение термического сопротивления:

$$\theta = \frac{2l_{cp}}{\lambda_{\text{возд}}} = 0,196 \cdot 10^{-3} \text{ вт}/\text{м}\cdot\text{град}.$$

Такая величина контактного термического сопротивления приведет к возникновению на тепловом сопряжении температурного перепада в 220 град , в то время как падение температуры в металле толщиной $0,03 \text{ мм}$ при тех же условиях составило бы лишь сотые доли градуса.

Полученные данные приводятся без учета увеличения площади контактных пятен вследствие их взаимного прижатия.



Однако следует учесть, что даже при чрезмерно больших усилиях прижатия невозможно резко изменить величину термического сопротивления контакта. Тем более, что в свою очередь это вызовет резкое увеличение габаритов и веса термоэлектрического устройства. Кроме того, в большинстве случаев трудно добиться равномерности прижима, особенно если принять во внимание неизбежность возникновения термических деформаций во время работы термоэлектрического устройства.

Вопросы, связанные с контактным теплообменом, чрезвычайно сложны и с трудом поддаются теоретическому анализу. В связи с этим большое значение приобретают эмпирические зависимости, устанавливающие влияние различных факторов на процесс контактного теплообмена.

На рис. 57 приводятся графики зависимости термического сопротивления θ контакта от усилия прижима p контактирующих металлических поверхностей. Анализ этих зависимостей позволяет утверждать, что усилие прижима оказывает влияние на величину контактного термического сопротивления, которое уменьшается при увеличении усилия.

На основании этих же данных можно установить влияние на величину θ и ее изменение при изменении p таких факторов, как пластичность металла и чистота обработки поверхностей.

На рис. 58 дан график зависимости $\theta = \theta(T)$ при постоянном усилии прижима контактирующих металлических тел. Ход температурной зависимости контактного термического сопротивления показывает влияние на величину последнего механических свойств металлов и коэффициента теплопроводности среды, заполняющей полости между выступами шероховатости.

Влияние на процесс контактного теплообмена свойств заполняющей среды еще более наглядно иллюстрируется графиком зависимости термического сопротивления контакта от давления (разрежения), при котором между выступами шероховатости находится газовая среда (рис. 59), а также графиками, полученными для случаев заполнения полостей в зоне контакта различными газовыми средами (рис. 60).

Таким образом, многочисленные экспериментальные исследования устанавливают зависимость контактного термического сопротивления от чистоты обработки контактируемых поверхностей, усилия прижима, теплопроводности заполняющей среды, температуры в зоне контакта, пределов текучести материала и других факторов. Все это позволяет также установить возможности уменьшения величины контактного термического сопротивления.

Наиболее эффективным методом уменьшения контактного термического сопротивления следует считать использование в зоне контакта материалов с высокой теплопроводностью:

- прокладок из мягких металлов;
- порошкообразных или вязких жидких наполнителей;

$$\theta \cdot 10^{-4}, \text{м}^2/\text{град}\cdot\text{вт}$$

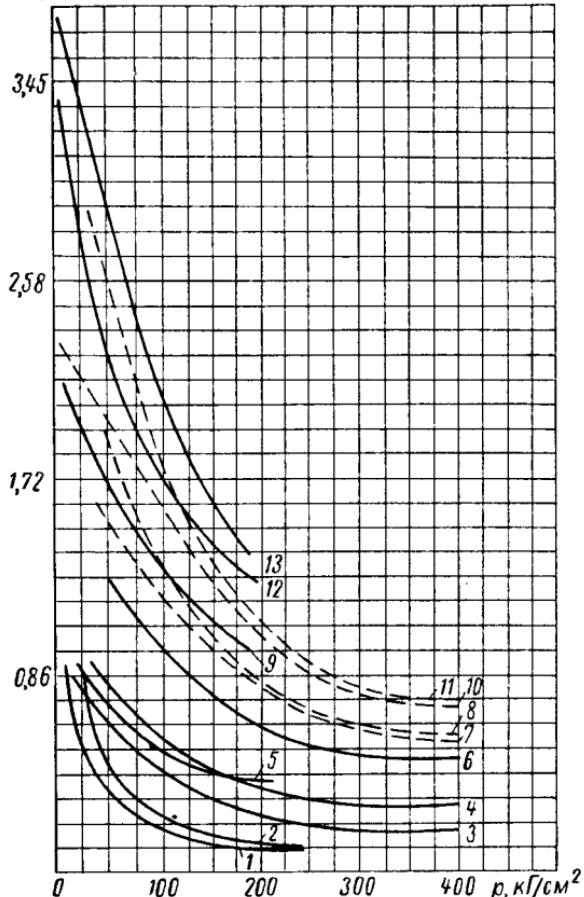


Рис. 57. График зависимости термического сопротивления контакта от нагрузки.

1, 2 — контактная пара: алюминиевый сплав Д-16—Д-16 (чистота обработки поверхности $\nabla 5$, $\nabla 4$); 3 — контактная пара: алюминиевый сплав Д-16—Д-16Т (чистота обработки поверхности $\nabla 5$); 4, 6, 8, 11 — контактная пара: Ст.45—Ст. 45 (чистота обработки поверхности $\nabla 8$, $\nabla 7$, $\nabla 5$); 5 — контактная пара: Ст.3 — Ст.3 (чистота обработки поверхности $\nabla 8$); 7, 10 — контактная пара: ЭЖ-1—ЭЖ-1 (чистота обработки поверхности $\nabla 7$, $\nabla 6$); 9, 12, 13 — контактная пара: Ст. X18Н9Т — Ст. X18Н9Т (чистота обработки поверхности $\nabla 7$, $\nabla 6$, $\nabla 5$)

$$\theta \cdot 10^{-4}, \text{м}^2/\text{град}\cdot\text{вт}$$

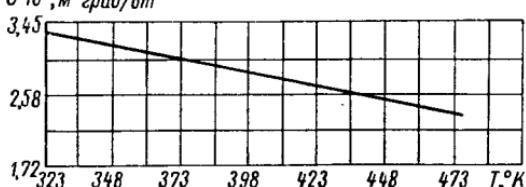


Рис. 58. Зависимость термического сопротивления контакта от температуры. Материал контактирующих поверхностей: X18Н9Т — X18Н9Т, чистота обработки поверхностей $\nabla 5$, нагрузка 40 $\text{кГ}/\text{см}^2$

— газов, имеющих лучшую, чем у воздуха, теплопроводность.

Соответствующие экспериментальные зависимости приведены на рис. 61, 62.

Поскольку в термоэлектрических устройствах контакт между металлическими поверхностями осуществляется через слой электроизоляционного материала, выбор такого материала целесообразно осуществлять исходя из необходимости получения минимального контактного сопротивления тепловому потоку.

Практически это требование сводится к тому, что электроизоляционный материал должен обеспечить

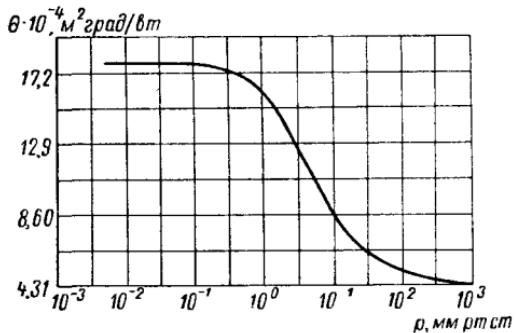


Рис. 59. Зависимость термического сопротивления контакта от разрежения. Материал контактирующих поверхностей: X18H9T—X18H9T, чистота обработки поверхностей $\nabla 5$, нагрузка $20 \text{ кг}/\text{см}^2$; среда — воздух

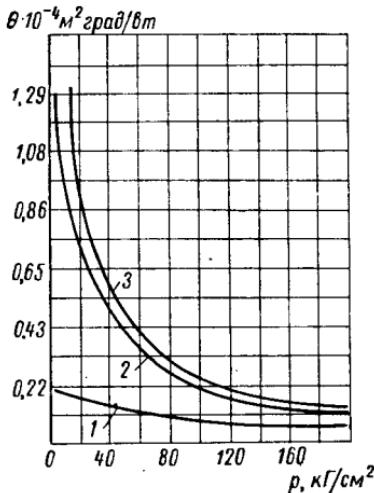


Рис. 60. Зависимость термического сопротивления контакта от среды и нагрузки. Материал контактирующих поверхностей — алюминиевый сплав Д-16—Д-16. 1 — гелий; 2 — воздух; 3 — вакуум

заполнение впадин шероховатости и, следовательно, полное вытеснение воздуха или других газов. При этом необходима надежная электрическая изоляция термоэлементов от конструкционных деталей.

Конструкции непрерывных тепловых сопряжений термоэлектрических батарей с поверхностями теплообмена были описаны выше. В этих случаях поверхности соприкасаются во всех своих точках, т. е. контакт можно считать идеальным, и наличие газовых полостей на пути теплового потока практически исключается. Такие тепловые сопряжения с достаточной точностью могут быть рассчитаны по формулам теплопроводности для многослойной стенки.

Технологически изготовление непрерывных тепловых сопряжений возможно при использовании электроизоляционных покрытий, осуществляемых методами нанесения на поверхности и последующего их соединения (спекание, склеивание, диффузионное сращивание).

$\theta \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ град/Вт}$

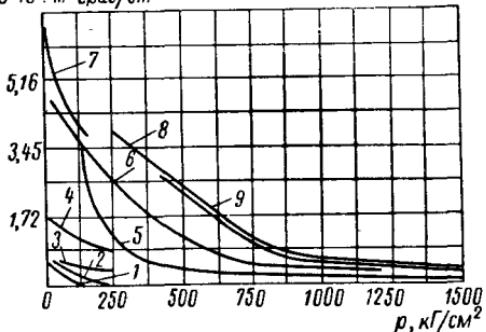


Рис. 61. Зависимость термического сопротивления контакта с демпфирующими прокладками от нагрузки. Материал контактирующих поверхностей: X18H9T—X18H9T, чистота обработки поверхностей $\nabla 3$.

1 — прокладка из оловянной фольги;
2 — то же после расплавления фольги;
3 — наполнитель из смеси порошка графита с эпоксидной смолой;
4 — наполнитель из смеси порошка графита с маслом;
5 — то же в воздухе;
6 — прокладка из медицинской фольги в вакууме;
7 — контакт без прокладки;
8 — прокладка из алюминиевой фольги в вакууме;
9 — то же в воздухе.

Рис. 62. Зависимость термического сопротивления контакта с демпфирующими прокладками от нагрузки. Материал контактирующих поверхностей: X18H9T — X18H9T, чистота обработки поверхностей $\nabla 6$.

1 — наполнитель: расплавленное олово; 2, 3 — прокладка из алюминиевой фольги (в вакууме, в воздухе), 4, 5 — прокладка из медной фольги (в воздухе, в вакууме).

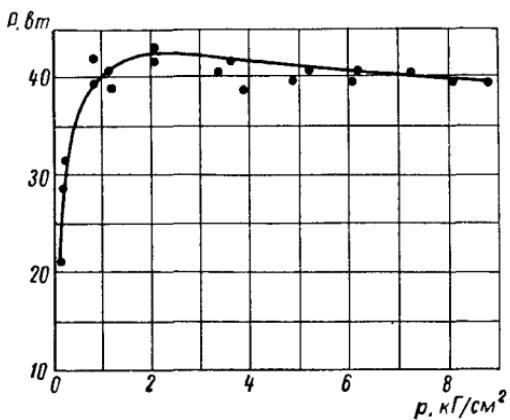
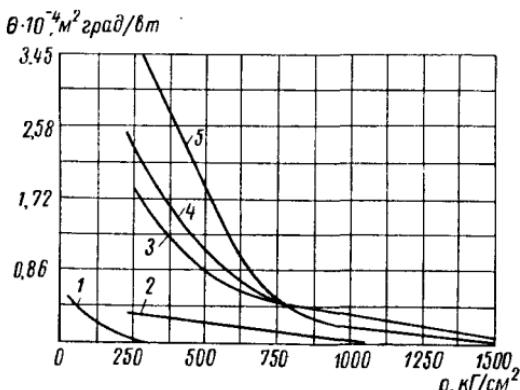


Рис. 63. График зависимости мощности термоэлектрической батареи от усилия прижима. Материал ветвей термоэлементов: Bi_2Te_3 — Sb_2Te_3 (p -тип) и Bi_2Te_3 — Bi_2Se_3 (n -тип); материал электроизоляции: слюда толщиной 5 $\mu\text{м}$; материал теплопроводов: Ст3

Непрерывные тепловые сопряжения по сравнению с сопряжениями контактного типа позволяют уменьшить величину термического сопротивления тепловому потоку и значительно улучшить характеристики термоэлектрического устройства.

Конструкции таких тепловых сопряжений весьма разнообразны и зависят от наличия разработанной технологии нанесения электроизоляционных покрытий, используемых материалов и т. д.

В заключение следует отметить, что рассмотренные выше физические особенности контактного теплообмена оказывают непосредственное влияние на удельные электрические характеристики и мощность термоэлектрических устройств (рис. 63). В связи с этим необходима тщательная экспериментальная отработка процессов теплообмена, имеющих место в термоэлектрических устройствах и установках.

РАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

Наибольшая эффективность термоэлектрического устройства может быть получена в случае, если по всей поверхности термоэлектрических батарей обеспечивается максимально допустимый температурный перепад. Это требование вполне естественно, если учесть, что термоэлектрическая батарея представляет собой совокупность единичных термоэлементов, которые в идеальном случае должны находиться в одинаковых температурных условиях [8].

Практически это требование трудновыполнимо, однако не исключает необходимости поиска решений, обеспечивающих уменьшение неравномерности температурных полей.

Следует различать макро- и микронеравномерности температурных полей по поверхности термоэлектрических батарей. Типичная диаграмма линий теплового потока и изотерм термоэлемента при наличии микронеравномерностей, обусловленных промежутками между ветвями и отдельными батареями, заполненными электроизоляционным материалом, показана на рис. 64. Подобные микронеравномерности температурных полей могут быть более или менее значительными

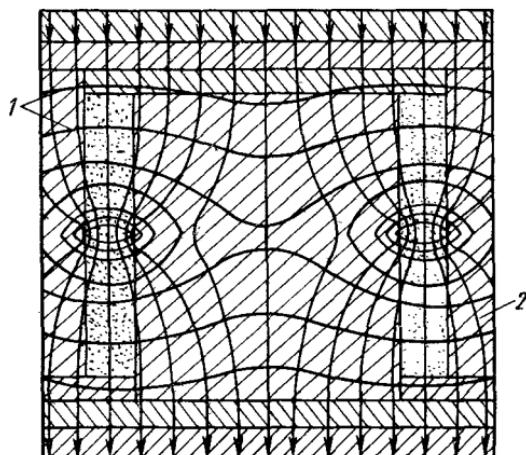


Рис. 64. Изотермы (1) и линии теплового потока (2) в термоэлементе (без учета термоэлектрических эффектов)

в зависимости от конструктивного оформления термоэлектрических батарей и практически неизбежны.

Уменьшить микронеравномерности можно, если довести до минимума величину зазоров между соседними термоэлементами и отдельными термоэлектрическими батареями, что к тому же позволит наиболее полно использовать всю поверхность теплообмена.

Гораздо сложнее уменьшить макронеравномерности температурных полей. Термоэлектрическое устройство любого типа прежде всего является теплообменным аппаратом и при конечных значениях расходов греющей (охлаждаемой) и охлаждающей (нагреваемой) сред их температуры на входе и выходе из устройства будут отличаться друг от друга на некоторую конечную величину, если речь идет о средах, не изменяющих своего агрегатного состояния в процессе теплообмена.

Однако габариты и вес любого теплообменного аппарата зависят от разности температур между горячей и холодной средами. Для термоэлектрических устройств влияние температурного напора на габариты и вес оказывается еще более существенным, так как в прямой зависимости от этой величины находится к. п. д., а следовательно, и мощность термоэлементов.

В связи с этим расходы горячей и холодной сред должны устанавливаться максимально возможными, однако при условии, если затраты энергии на их прокачку не выйдут за пределы оптимальных значений.

Весьма существенным с точки зрения макронеравномерностей температурных полей является также выбор способов подвода и отвода теплоты. Наибольшего эффекта в этом отношении можно достичь при использовании для подвода теплоты конденсирующихся, а для отвода теплоты испаряющихся сред. Такие среды практически обеспечивают полное выравнивание макронеравномерностей температурных полей по поверхностям термоэлектрических батарей, а характерные для указанных сред высокие значения коэффициентов теплоотдачи одновременно позволяют значительно уменьшить разности температур между средами и спаями термоэлементов.

УСТРАНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ МОСТИКОВ МЕЖДУ СРЕДАМИ

Тепловые мостики между средами могут привести к существенному уменьшению степени эффективного использования активной поверхности теплообмена термоэлектрического устройства.

В основном тепловые мостики создаются конструкционными элементами.

Однако хотя электроизоляционные материалы и обладают достаточно низким коэффициентом теплопроводности, некоторая часть тепла передается от горячей среды к холодной через слои

электроизоляции между соседними термоэлектрическими батареями и термоэлементами. Эти потери, естественно, находятся в прямой зависимости от температурного напора, суммарной поверхности и толщины слоя электроизоляционного материала и еще раз доказывают необходимость максимального увеличения доли активной поверхности термоэлектрических батарей от суммарной поверхности теплообмена.

При разработке конструкции термоэлектрических устройств, особенно термоэлектрогенераторов, этим вопросам следует уделять должное внимание.

ШУНТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СЛОЯМИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В зависимости от количества последовательно соединенных термоэлементов, уровней температур, физических свойств используемых электроизоляционных материалов, а также конструктивных факторов в термоэлектрических батареях может иметь место шунтирование термоэлектрической цепи изоляцией.

Схемы, иллюстрирующие это явление, показаны на рис. 65 и дополнительных пояснений не требуют. Однако необходимо отметить, что пока и поскольку речь идет о термоэлектрических устройствах, рассчитанных на относительно небольшие мощности и работающих при относительно низких температурных уровнях, уменьшение эффективности термоэлектрических устройств оказывается очень небольшим.

При разработке термоэлектрических устройств большой мощности, работающих при высоких уровнях температур (термоэлектрогенераторы), потери энергии оказываются неприемлемо большими и резко уменьшают эффективность термоэлектрических устройств. Весьма неблагоприятен тот факт, что большинство существующих электроизоляционных материалов характеризуется

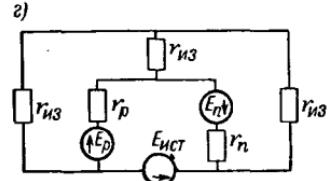
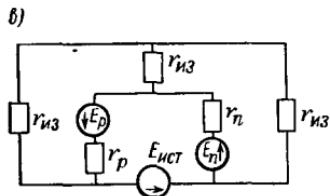
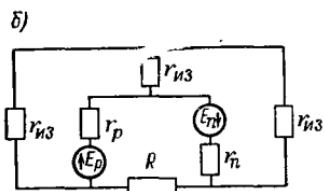
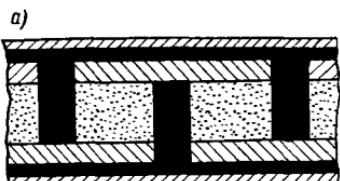


Рис. 65. Схемы электрических цепей термоэлементов с изоляцией: а—конструктивная схема; б—термоэлектрогенератор; в—термоэлектрическое охлаждающее устройство; г—термоэлектрический тепловой насос

резким уменьшением электросопротивления при высоких температурах. В этой связи выбор электроизоляционных материалов и тщательная разработка конструкции термоэлектрического устройства приобретают особенное значение.

Низкие электроизоляционные свойства материалов при высоких температурах и несовершенство конструкции термоэлектрического устройства, помимо уменьшения эффективности последнего, могут привести к замыканию термоэлектрической цепи на корпус устройства, что в судовых условиях чревато серьезными последствиями.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Физическая природа термоэлектрических процессов такова, что они не связаны с физико-химическими изменениями, происходящими в материале. Практически это позволяет считать возможным получение очень больших длительностей работы. Вместе с тем физико-химический состав термоэлектрических материалов может зависеть от давления, температуры и контакта термоэлементов с веществами, химически взаимодействующими с полупроводниковыми материалами. Поэтому при разработке конструктивных мероприятий, направленных на устранение влияния окружающих условий на полупроводниковые материалы, следует учитывать многие факторы. Наиболее простым техническим решением этой проблемы следует считать размещение батарей термоэлементов в герметичных эвакуированных или заполненных инертным газом (или восстановительной средой) касетах.

В ряде случаев, например при использовании материалов типа PbTe при высоких температурах (термоэлектрогенераторы), уже около 773° К наблюдается сублимация молекул вещества. При этом молекулы, испаряющиеся с горячих участков термоэлементов, диффундируют в менее нагретые области и осаждаются на поверхностях, в результате чего происходит изменение размеров термоэлементов и одновременное ухудшение их термоэлектрических свойств. При использовании материалов, у которых при рабочих температурах происходит сублимация основы или примеси, вокруг термоэлементов необходимо создание некоторого избыточного давления газа.

Другим конструктивным решением, при помощи которого может быть устранено влияние окружающих условий и сублимации на длительность работы термоэлементов, является нанесение на поверхность термоэлектрических батарей герметизирующих покрытий [87].

КОМПЕНСАЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

В процессе работы вокруг термоэлектрических батарей образуется магнитное поле, которое в большинстве случаев может влиять на работу аппаратуры и приборов, что в судовых условиях совершенно недопустимо.

Простейший метод борьбы с этим недостатком заключается в создании вокруг термоэлектрического устройства специального магнитного экрана. Такое решение, однако, не может считаться удачным, так как обуславливает некоторое увеличение габаритов и веса устройства. Более оптимальным является метод взаимной компенсации магнитных полей термоэлектрических цепей, которая достигается при бифилярном прохождении тока. Схема расположения термоэлементов в батарее, обеспечивающая самокомпенсацию магнитного поля, показана на рис. 66.

Однако следует иметь в виду, что бифилярное течение тока не позволяет полностью скомпенсировать магнитное поле. Только применяя дополнительные компенсирующие витки, по своей форме повторяющие расположение термоэлементов в батарее, можно решить эту задачу полностью.

Размещая компенсирующие витки параллельно плоскости термоэлектрической батареи и пропуская по ним ток в направлении, противоположном току в термоэлектрических батареях, можно добиться полной компенсации магнитного поля [17].

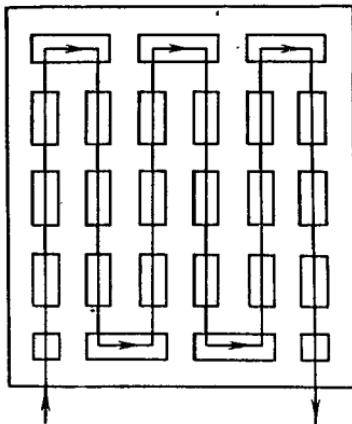


Рис. 66. Схема расположения термоэлементов в батарее, обеспечивающая самокомпенсацию магнитного поля

§ 9. ХАРАКТЕР НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОСКИХ И КОЛЬЦЕВЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ

В любом конструктивном исполнении термоэлемент представляет собой многослойную конструкцию, отдельные слои которой во время работы имеют различную температуру. При некотором различии теплофизических свойств, а также механических характеристик материалов такое положение приводит к возникновению напряжений, характер которых довольно сложен [14], [34, 35].

Выведем некоторые расчетные зависимости для плоских термоэлектрических батарей, приняв следующие допущения:

1. Толщины коммутационных пластин и слоя полупроводникового вещества соизмеримы и их смещение относительно друг друга отсутствует.

2. Толщины коммутационных пластин и их материалы одинаковы, а изменение теплофизических свойств материалов коммутационных пластин в диапазоне температур от T_x до T_r пренебрежимо мало.

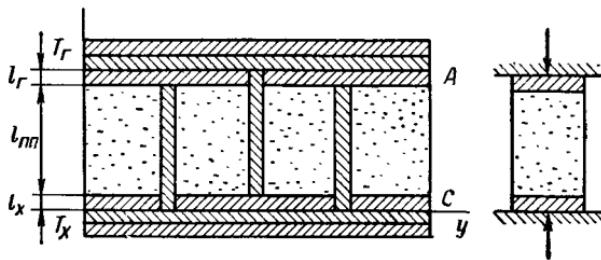


Рис. 67. Схема для расчета напряжений, возникающих в плоских термоэлементах под действием сжимающих усилий

3. Электроизоляционные прослойки между термоэлементами абсолютно несжимаемы.

4. Влияние на термоэлектрическую батарею конструкционных элементов отсутствует.

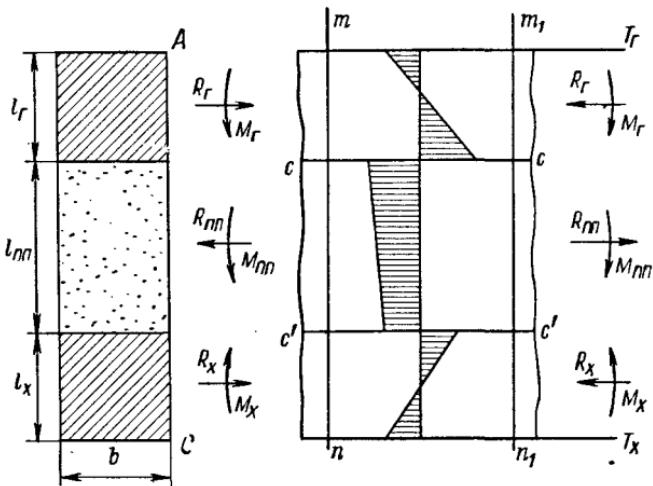


Рис. 68. Схема для расчета напряжений, возникающих в батарее из плоских термоэлементов под действием изгибающей нагрузки

Выделим в плоской термоэлектрической батарее некоторый участок (рис. 67 и 68).

При увеличении температуры от начальной T_0 до T_r на горячей стороне и от T_0 до T_x на холодной коммутационные пластины A и C подвергаются изгибу и сжатию, а полупроводниковое вещество — изгибу и растяжению (в зависимости от геометрических размеров, температур и теплофизических свойств материалов знак напряжений может изменяться). Рассматривая выделенный эле-

мент mm_1n_1n , найдем, что если усилия в любом поперечном сечении уравновешены, должны быть справедливы следующие зависимости:

$$R_r + R_x - R_{\text{пп}} = 0; \quad (59)$$

$$R_r l_r - R_{\text{пп}} l_{\text{пп}} + R_x l_x = 2(M_r + M_{\text{пп}} - M_x). \quad (60)$$

Обозначив через J — момент инерции сечения, см^4 ;
 ψ — радиус кривизны, см ,

получим

$$M_r = \frac{1}{\psi} \varepsilon_r J_r \kappa \Gamma \cdot \text{см};$$

$$M_{\text{пп}} = \frac{1}{\psi} \varepsilon_{\text{пп}} J_{\text{пп}} \kappa \Gamma \cdot \text{см};$$

$$M_x = \frac{1}{\psi} \varepsilon_x J_x \kappa \Gamma \cdot \text{см}.$$

Следовательно,

$$R_r l_r - R_{\text{пп}} l_{\text{пп}} + R_x l_x = \frac{2}{\psi} (\varepsilon_r J_r + \varepsilon_{\text{пп}} J_{\text{пп}} - \varepsilon_x J_x)$$

или поскольку

$$l_r = l_x = l; \quad \varepsilon_r = \varepsilon_x = \varepsilon; \quad J_r = J_x = J,$$

то

$$(R_r + R_x) l - R_{\text{пп}} l_{\text{пп}} = \frac{2}{\psi} (\varepsilon_{\text{пп}} J_{\text{пп}} - 2\varepsilon J).$$

Так как неизвестными величинами являются R_r , R_x , $R_{\text{пп}}$ и ψ , то к уравнениям (59) и (60) необходимо добавить еще два уравнения, которые могут быть выведены из условия, что на спаях $c—c$ и $c_1—c_1$ относительные удлинения материалов одинаковы. Поэтому

$$\beta_r T_r - \frac{2R_r}{\varepsilon l b} + \frac{l}{2\psi} = \beta_{\text{пп}} T_{\text{р}} + \frac{2R_{\text{пп}}}{\varepsilon_{\text{пп}} l_{\text{пп}} b} + \frac{l_{\text{пп}}}{2\psi};$$

$$\beta_{\text{пп}} T_x + \frac{2R_{\text{пп}}}{\varepsilon_{\text{пп}} l_{\text{пп}} b} + \frac{l_{\text{пп}}}{2\psi} = \beta_x T_x - \frac{2R_x}{\varepsilon l b} - \frac{l}{2\psi}.$$

Произведя простейшие преобразования, получим систему из четырех уравнений:

$$R_r + R_x - R_{\text{пп}} = 0;$$

$$(R_r + R_x) l - R_{\text{пп}} l_{\text{пп}} = \frac{2}{\psi} (2\varepsilon J + \varepsilon_{\text{пп}} J_{\text{пп}});$$

$$\frac{2}{b} \left(\frac{R_{\text{пп}}}{\varepsilon_{\text{пп}} l_{\text{пп}}} + \frac{R_r}{\varepsilon l} \right) = (\beta_r - \beta_{\text{пп}}) T_r + \frac{l - l_{\text{пп}}}{2\psi};$$

$$-\frac{2}{b} \left(\frac{R_{\text{пп}}}{\varepsilon_{\text{пп}} l_{\text{пп}}} + \frac{R_x}{\varepsilon l} \right) = (\beta_{\text{пп}} - \beta_x) T_x + \frac{l + l_{\text{пп}}}{2\psi}.$$

Решая эти уравнения относительно R_r , R_{nn} , R_x и ψ , находим

$$\psi = \frac{2\epsilon_{nn}l_{nn}}{l - l_{nn}} \cdot \frac{1}{\frac{a_2\epsilon l}{1 + a_2\epsilon l} \left(\frac{\epsilon l}{1 + a_2\epsilon l} + \frac{1}{a_2} \right)} \text{ см}; \quad (61)$$

$$R_x = -\frac{D}{a_2} \kappa \Gamma; \quad (62)$$

$$R_r = \frac{\epsilon l}{1 + a_2\epsilon l} (a_1 - D) \kappa \Gamma; \quad (63)$$

$$R_{nn} = \frac{\epsilon l}{1 + a_2\epsilon l} (a_1 - D) - \frac{D}{a_2} \kappa \Gamma, \quad (64)$$

где

$$a_1 = \frac{b}{2} (\beta_r - \beta_{nn}) T_r;$$

$$a_2 = \frac{1}{\epsilon_{nn}l_{nn}} - \frac{b(l - l_{nn})^2}{8\epsilon_{nn}l_{nn}};$$

$$J = \frac{bl^3}{96} \text{ см}^4;$$

$$J = \frac{bl_{nn}^3}{96} \text{ см}^4;$$

$$D = \frac{\frac{b\epsilon l}{2\epsilon_{nn}l_{nn}} \left[1 - \frac{bl_{nn}(l - l_{nn})^2}{8J_{nn}} \right] \left[(\beta_r - \beta_{nn}) T_r - (\beta_{nn} - \beta_x) T_x \right] + 1}{\frac{2\epsilon l}{\epsilon_{nn}l_{nn}} \left\{ 1 + \frac{\epsilon l}{\epsilon_{nn}l_{nn}} \left[1 - \frac{bl_{nn}(l - l_{nn})^2}{8J_{nn}} \right] \right\} \left[1 - \frac{bl_{nn}(l - l_{nn})^2}{8J_{nn}} \right]}.$$

Так как

$$M_r = \frac{\epsilon J}{\psi} \kappa \Gamma \cdot \text{см};$$

$$M_{nn} = \frac{\epsilon_{nn}J_{nn}}{\psi} \kappa \Gamma \cdot \text{см};$$

$$M_x = \frac{\epsilon J}{\psi} \kappa \Gamma \cdot \text{см}$$

и наибольшие напряжения возникают на горячем спае в результате совместного действия растяжения и изгиба, то

$$\Sigma_{раст} = \frac{2R_{nn}}{bl_{nn}} + \frac{\epsilon_{nn}l_{nn}}{4\psi} \kappa \Gamma / \text{см}^2. \quad (65)$$

Эпюра напряжений показана на рис. 68.

Следует отметить, что полученные выше зависимости не учитывают влияния на величину напряжения в термоэлементах конструкции термоэлектрического устройства. В последнем случае характер напряжений еще более сложен, а его теоретический анализ чрезвычайно затруднен.

В ряде случаев при анализе напряженного состояния термоэлементов может встретиться необходимость оценки напряжений сжатия, возникающих в термоэлементах в случае их размещения между двумя жесткими конструкционными стенками [32]. Знание этих напряжений необходимо не только для оценки работоспособности термоэлементов с точки зрения их прочности на сжатие, но и для оценки величины контактного термического сопротивления, зависящего от усилия прижима слоев разнородных материалов.

Будем считать, что термоэлементы неподвижно защемлены между стенками конструкции. Поэтому при нагревании они будут «распирать» опоры, в результате чего со стороны последних на термоэлементы будут действовать усилия R , которые вызовут в них напряжения сжатия. Эти напряжения не могут быть найдены из условий статики, так как последние дают возможность говорить лишь о равенстве усилий в опорах. В связи с этим необходимо ввести условие совместности деформаций.

Примем, что при нагревании длина термоэлемента остается неизменной:

$$2l + l_{\text{пп}} = \text{const}.$$

Следовательно, можно считать, что уменьшение длины термоэлемента под действием сжимающих усилий R равно его удлинению вследствие нагревания:

$$\Delta l_T - \Delta l_R = 0 \quad (66)$$

и далее

$$\Delta l_R = \frac{R}{F} \left(\frac{2l}{\epsilon} + \frac{l_{\text{пп}}}{\epsilon_{\text{пп}}} \right);$$

$$\Delta l_T = \beta_r l(T_r - T_0) + \beta_{\text{пп}} l_{\text{пп}}(T_{\text{cp}} - T_0) + \beta_x l(T_x - T_0), \quad (67)$$

где

$$T_{\text{cp}} = \frac{T_r + T_x}{2}.$$

Подставляя значения Δl_R и Δl_T в уравнение (66), получим

$$\sum_{\text{сж}} = \frac{R}{F} = \frac{\frac{2l}{\epsilon} + \frac{l_{\text{пп}}}{\epsilon_{\text{пп}}}}{\beta_r l(T_r - T_0) + \beta_{\text{пп}} l_{\text{пп}}(T_{\text{cp}} - T_0) + \beta_x l(T_x - T_0)} \kappa G / \text{cm}^3. \quad (68)$$

Рассмотрим характер напряжений, возникающих в кольцевых термоэлементах во время их работы [5], [20].

Выделим бесконечно малый элемент многослойного кольца, ограниченный двумя цилиндрическими поверхностями 5—6 и 7—8 и двумя меридиональными плоскостями 5—8 и 6—7 (рис. 69), и будем исходить из следующих условий:

- плоскость кольца строго перпендикулярна оси;
- коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов кольца одинаковы и неизменны в диапазоне температур от T_x до T_r ;

- возникающие напряжения носят упругий характер;
- влияние деталей конструкции на кольцевой термоэлемент отсутствует;
- теплопроводность коммутационных материалов значительно выше теплопроводности полупроводникового вещества, благодаря чему изменением температуры по толщине коммутационных колец можно пренебречь;
- нагрев термоэлемента осуществляется изнутри, охлаждение — снаружи;
- изменение величины теплового потока вследствие термоэлектрических эффектов отсутствует;

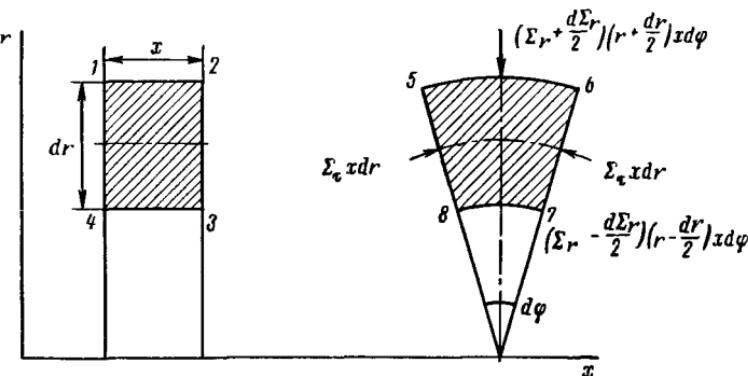


Рис. 69. Схема для расчета на прочность кольца

— при начальной температуре T_0 напряжения в термоэлементе отсутствуют.

В случае равновесия элемента 5—6—7—8 можно получить, что сумма проекций всех действующих сил на взаимно-перпендикулярные направления должна равняться нулю. Такими направлениями будем считать меридиональное (положительное от центра к периферии) и тангенциальное.

На выделенный элемент действуют по граням:

$$1-2 \text{ и } 5-6 \text{ — сила } \left(\Sigma_r + \frac{d\Sigma_r}{2} \right) \left(r + \frac{dr}{2} \right) d\varphi x;$$

$$3-4 \text{ и } 7-8 \text{ — сила } \left(\Sigma_r - \frac{d\Sigma_r}{2} \right) \left(r - \frac{dr}{2} \right) d\varphi x;$$

$$5-8 \text{ и } 6-7 \text{ — сила } \Sigma_\tau x dr.$$

Меридиональная составляющая тангенциальных сил при этом равна $\Sigma_\tau x d\varphi dr$.

Условие равновесия элемента может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \left(\Sigma_r - \frac{d\Sigma_r}{2} \right) \left(r - \frac{dr}{2} \right) d\varphi x - \left(\Sigma_r + \frac{d\Sigma_r}{2} \right) \left(r + \frac{dr}{2} \right) d\varphi x + \\ + \Sigma_\tau x d\varphi dr = 0. \end{aligned} \quad (69)$$

Если пренебречь бесконечно малыми высших порядков, то окончательно получим

$$\Sigma_r - \Sigma_\tau + \frac{d \Sigma_r}{dr} r = 0. \quad (70)$$

Таким образом, из условия равновесия можно получить одно уравнение, а поскольку неизвестных два, задача статически неопределенна. Поэтому необходимо обратиться к рассмотрению деформаций.

Из теории упругости известны зависимости между напряжениями и деформациями, имеющие вид

$$\frac{1}{\epsilon} (\Sigma_r - \Lambda \Sigma_\tau) = \frac{d \zeta}{dr} = \zeta';$$

$$\frac{1}{\epsilon} (\Sigma_\tau - \Lambda \Sigma_r) = \frac{\zeta_2}{r}$$

или

$$\Sigma_r = \frac{\epsilon}{1 - \Lambda^2} \left(\Lambda \frac{\zeta_2}{r} + \zeta'_2 \right); \quad (71)$$

$$\Sigma_\tau = \frac{\epsilon}{1 - \Lambda^2} \left(\frac{\zeta_2}{r} + \Lambda \zeta'_2 \right). \quad (72)$$

Далее будем исходить из следующих рассуждений.

Если в некоторой точке кольцевого термоэлемента, радиус которой равен r , температура возрастает от начальной T_0 до некоторой величины T , то вследствие нагревания радиальное перемещение этой точки

$$\zeta_1 = \beta r T.$$

Суммарная же деформация под действием сил составляет ζ . Таким образом, величина упругой деформации

$$\zeta_2 = \zeta - \zeta_1 = \zeta - \beta r T.$$

Подставляя это значение ζ_2 в формулы (71) и (72), получим

$$\Sigma_r = \frac{\epsilon}{1 - \Lambda^2} \left[\Lambda \left(\frac{\zeta}{r} - \beta T \right) + \left(\frac{d \zeta}{dr} - \beta T \right) \right]; \quad (73)$$

$$\Sigma_\tau = \frac{\epsilon}{1 - \Lambda^2} \left[\left(\frac{\zeta}{r} - \beta T \right) + \Lambda \left(\frac{d \zeta}{dr} - \beta T \right) \right]. \quad (74)$$

Наконец, решая совместно эти уравнения, находим зависимость

$$(1 + \Lambda) \beta \frac{dT}{dr} = \zeta'' + \frac{\zeta'}{r} - \frac{\zeta}{r^2}$$

и далее, поскольку

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} (\zeta r) \right] = (1 + \Lambda) \beta \frac{dT}{dr},$$

то

$$\zeta = ar + \frac{b}{r} + \frac{1 + \Lambda}{r} \beta \int_{r_0}^r Tr dr, \quad (75)$$

где a и b — постоянные интегрирования.

Совместное решение уравнений (71), (72) и (73) дает окончательный результат:

$$\Sigma_r = \frac{\epsilon}{1-\Lambda^2} \left[(1+\Lambda)a - (1-\Lambda) \frac{b}{r^2} - \frac{1-\Lambda^2}{r^2} \beta \int_{r_0}^r Tr dr \right] \kappa G / \text{cm}^2; \quad (76)$$

$$\Sigma_\tau = \frac{\epsilon}{1-\Lambda^2} \left[(1+\Lambda)a + (1-\Lambda) \frac{b}{r^2} + \frac{1-\Lambda^2}{r^2} \beta \times \right. \\ \left. \times \int_{r_0}^r Tr dr - (1-\Lambda^2)\beta T \right] \kappa G / \text{cm}^2. \quad (77)$$

Полученные формулы позволяют вычислить напряжения в кольце, если известны граничные условия, а также зависимость $T =$

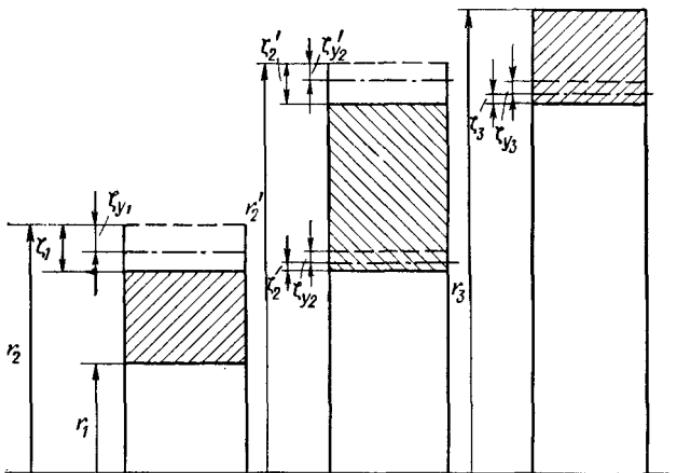


Рис. 70. Схема для расчета на прочность многослойного кольца

$= f(r)$ (предполагаются также известными теплофизические и механические характеристики материала и геометрические размеры колец).

Если кольцо изготовлено из одного материала, то граничными условиями, необходимыми для определения постоянных интегрирования a и b , являются

$$\Sigma_r = 0 \text{ при } r = r_{\text{вн}};$$

$$\Sigma_r = 0 \text{ при } r = r_{\text{нар}},$$

где $r_{\text{вн}}$ и $r_{\text{нар}}$ — внутренний и наружный радиусы кольца.

В случае многослойного кольца, изготовленного из разнородных материалов, определение Σ_r и Σ_τ представляет значительные трудности. Однако и в этом случае, если ввести некоторые дополнительные предположения, могут быть получены расчетные

зависимости, удовлетворительно описывающие характер и величину термических напряжений в кольцевом термоэлементе.

Рассмотрим расчетную схему трехслойного кольцевого термоэлемента, показанную на рис. 70, и запишем для нее систему уравнений:

$$\begin{aligned} \Sigma_{r1} &= \frac{\varepsilon_1}{1-\Lambda_1^2} \left[(1+\Lambda_1) a_1 - (1-\Lambda_1) \frac{b_1}{r^2} - \frac{1-\Lambda_1}{r^2} \beta_1 \int_{r_1}^r T_r r dr \right]; \\ \Sigma_{\tau 1} &= \frac{\varepsilon_1}{1-\Lambda_1^2} \left[(1+\Lambda_1) a_1 - (1-\Lambda_1) \frac{b_1}{r^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1-\Lambda_1}{r^2} \beta_1 \int_{r_1}^r T_r r dr - (1-\Lambda_1^2) \beta_1 T_r \right]; \quad (78) \\ \Sigma_{r2} &= \frac{\varepsilon_2}{1-\Lambda_2^2} \left[(1+\Lambda_2) a_2 - (1-\Lambda_2) \frac{b_2}{r^2} - \frac{1-\Lambda_2}{r^2} \beta_2 \int_{r_2}^r T_r dr \right]; \\ \Sigma_{\tau 2} &= \frac{\varepsilon_2}{1-\Lambda_2^2} \left[(1+\Lambda_2) a_2 - (1-\Lambda_2) \frac{b_2}{r^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1-\Lambda_2}{r^2} \beta_2 \int_{r_2}^r T_r dr - (1-\Lambda_2^2) \beta_2 T_r \right]; \\ \Sigma_{r3} &= \frac{\varepsilon_3}{1-\Lambda_3^2} \left[(1+\Lambda_3) a_3 - (1-\Lambda_3) \frac{b_3}{r^2} - \frac{1-\Lambda_3}{r^2} \beta_3 \int_{r_2'}^r T_x r dr \right]; \\ \Sigma_{\tau 3} &= \frac{\varepsilon_3}{1-\Lambda_3^2} \left[(1+\Lambda_3) a_3 - (1-\Lambda_3) \frac{b_3}{r^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1-\Lambda_3}{r^2} \beta_3 \int_{r_2'}^r T_x r dr - (1-\Lambda_3^2) \beta_3 T_x \right]; \\ \zeta_1 - \zeta_2 &= \zeta_{y1} + \zeta_{y2} = (\beta_2 - \beta_1) T_r r_2; \\ \zeta_2' - \zeta_3 &= \zeta_{y2'} + \zeta_{y3} = (\beta_3 - \beta_2) T_x r_2'. \end{aligned}$$

Установим следующие граничные условия:

при $r = r_2 - \Sigma_{r1} = \Sigma_{r2}; \quad \zeta_{y1} + \zeta_{y2} = (\beta_2 - \beta_1) T_r r_2;$

при $r = r_2' - \Sigma_{r2} = \Sigma_{r3}; \quad \zeta_{y2'} + \zeta_{y3} = (\beta_3 - \beta_2) T_x r_2';$

при $r = r_1 - \Sigma_{r1} = 0;$

при $r = r_3 - \Sigma_{r3} = 0;$

Если учесть, что

$$\begin{aligned}\zeta_{y1} &= a_1 r_1 + \frac{b_1}{r_1} + \frac{1+\Lambda_1}{2} \beta_1 T_r (r_2^2 - r_1^2); \\ \zeta_{y2} &= a_2 r_2 + \frac{b_2}{r_2}; \\ \zeta_{y2'} &= a_2 r_{2'} + \frac{b_2}{r_{2'}} + \frac{1+\Lambda_2}{r_{2'}} \beta_2 \int_{r_2}^{r_{2'}} Tr dr; \\ \zeta_{y3} &= a_3 r_{2'} + \frac{b_3}{r_{2'}},\end{aligned}\quad (79)$$

а также

$$\begin{aligned}T &= T_r - \frac{q_{Tl}}{2\pi\lambda_{\text{пп}}} \ln \frac{r}{r_2}; \\ \int_{r_2}^{r_{2'}} Tr dr &= \frac{r_{2'}^2 - r_2^2}{2} \left[T_r + \frac{q_{Tl}}{2\pi\lambda_{\text{пп}}} \left(\ln \frac{r_2^2}{r_{2'}} + \frac{1}{2} \right) \right],\end{aligned}\quad (80)$$

где q_{Tl} — удельный тепловой поток, отнесенный к единице длины, $\text{вт}/\text{м}^2$;

$\lambda_{\text{пп}}$ — коэффициент теплопроводности полупроводника, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$

и принять $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = \Lambda$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$, получим систему уравнений, из которой могут быть установлены значения неизвестных:

$$\begin{aligned}(1+\Lambda) \left(a_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - a_2 \right) - \frac{1-\Lambda}{r_2^2} \left(b_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - b_2 \right) - \frac{1-\Lambda^2}{2} \times \\ \times \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^2} \beta T_r = 0; \\ (1+\Lambda) \left(a_2 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} - a_3 \right) - \frac{1-\Lambda}{r_{2'}^2} \left(b_2 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} - b_3 \right) - \frac{1-\Lambda^2}{2} \times \\ \times \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} \cdot \beta \frac{r_{2'}^2 - r_2^2}{r_{2'}^2} \left[T_r + \frac{q_{Tl}}{2\pi\lambda_{\text{пп}}} \left(\ln \frac{r_2^2}{r_{2'}} + \frac{1}{2} \right) \right]; \\ (1+\Lambda) a_1 - (1-\Lambda) \frac{b_1}{r_1^2} = 0;\end{aligned}\quad (81)$$

$$(1+\Lambda) a_3 - (1-\Lambda) \frac{b_3}{r_3^2} - \frac{1+\Lambda^2}{2} \cdot \frac{r_3^2 - r_{2'}^2}{r_3^2} \beta T_x = 0;$$

$$a_1 r_1 + a_2 r_2 + \frac{b_1}{r_1} + \frac{b_2}{r_2} + \frac{1+\Lambda}{2} (r_2^2 - r_1^2) \beta T_r = 0;$$

$$\begin{aligned}a_2 r_2 + a_3 r_3 + \frac{b_2}{r_{2'}^2} + \frac{b_3}{r_{2'}^2} + \frac{1+\Lambda}{2} \beta \frac{r_{2'}^2 - r_2^2}{r_{2'}^2} \times \\ \times \left[T_r + \frac{q_{Tl}}{2\pi\lambda_{\text{пп}}} \left(\ln \frac{r_2^2}{r_{2'}} + \frac{1}{2} \right) \right] = 0;\end{aligned}$$

Решая систему уравнений (81) относительно a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 и b_3 , получим значения этих величин, которые для расчета напряжений подставляются затем в формулы (78). К сожалению, даже с учетом принятых выше допущений расчетные формулы в этом случае получаются очень громоздкими и поэтому здесь не приводятся *.

Характер напряжений, возникающих в кольцевых термоэлементах, иллюстрируется эпюрами рис. 71.

Приведенные выше зависимости позволяют в первом приближении оценить напряженное состояние плоских и кольцевых термоэлементов. Но при этом необходимо учитывать, что в реальных конструкциях большое влияние на величину напряжений в термоэлементах будет оказывать их взаимодействие с элементами конструкции, что исключает какую-либо возможность расчетной оценки напряженного состояния.

Следует обратить внимание на некоторые дополнительные требования, предъявляемые к механической прочности термоэлементов, которые необходимо учитывать при их разработке.

Прочностные расчеты конструкций выполняются обычно для определения степени соответствия принятых технических решений предъявляемым требованиям в условиях воздействия различных статических и динамических нагрузок. Эти вопросы являются основными при расчетах на прочность термоэлектрических батарей и устройств. Однако их решение связано с дополнительными требованиями, которые обусловливаются тем, что термоэлемент и термоэлектрическая батарея являются участком электрической цепи. В связи с этим величина допускаемых напряжений должна устанавливаться не только в целях предотвращения разрушения термоэлементов, но и для полного исключения возможности появления микротрещин, которые могут стать причиной значительного возрастания омического сопротивления.

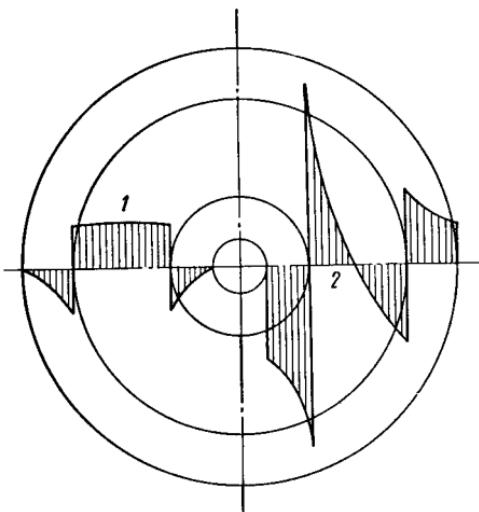


Рис. 71. Эпюра напряжений в трехслойном кольце.

1 — радиальные напряжения Σ_r ; 2 — тангенциальные напряжения Σ_t

* Для выполнения расчетов по приведенной методике целесообразно использование электронных вычислительных машин.

В связи с этим величину допускаемых напряжений на разрыв полупроводниковых материалов в настоящее время приходится ограничивать значениями, в 5—8 раз меньшими тех, которые могли бы быть допущены по условиям прочности.

В заключение необходимо отметить, что полученные выше зависимости для оценки величины возникающих механических напряжений выведены при условии постоянства температур горячих и холодных спаев термоэлементов. На практике термоэлементы могут испытывать резкий нагрев и охлаждение.

В некоторых случаях наблюдается изменение знака градиента температур и направления теплового потока на противоположные, что в свою очередь приводит к значительным изменениям характера напряженного состояния конструкции.

В реальных конструкциях наряду с термическими напряжениями в термоэлементах возникают дополнительно напряжения от их механического взаимодействия с конструкционными элементами, напряжения, обусловленные воздействием динамических нагрузок, и др.

Расчетная оценка напряжений в термоэлементах с учетом указанных факторов едва ли возможна. Поэтому создание термоэлектрических батарей и устройств, которые могли бы удовлетворять требованиям надежности при длительной эксплуатации в судовых условиях, требует проведения комплексных экспериментальных исследований.

§ 10. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И УСТАНОВОК

Для работы термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов необходимо использование источников постоянного тока. В судовых условиях для этой цели могут быть применены различные источники электроэнергии с преобразователями или без них в зависимости от конкретных условий. Таким образом, применение термоэлектрических устройств на судне требует учета необходимости их питания от судовых источников. Такая возможность должна быть предусмотрена схемой генерирования и распределения электроэнергии.

В отличие от термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов термоэлектрогенераторы сами являются источниками постоянного тока и нуждаются в различного рода источниках тепловой энергии. Практически в судовых условиях можно рассматривать следующие виды источников энергии для термоэлектрогенераторов: химические, ядерные, радиоизотопные и сбрасываемая тепловая энергия различных теплоносителей.

НЕЗАВИСИМЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

В настоящее время к. п. д. пригодных для использования термоэлектрических материалов еще далек от тех значений, когда можно считать экономически целесообразным применение термоэлектро-генераторов в главных судовых энергетических установках, в которых используются различные виды химического топлива.

В связи с этим говоря о независимых источниках энергии для термоэлектро-генераторов, приходится рассматривать их главным образом в качестве автономных аварийных или вспомогательных источников электроэнергии [122].

Практически для этих целей могут быть применены различные виды жидкого, твердого и газообразного топлива, например пропан, бутан, керосин, мазут, дизельные топлива, уголь, дрова и др.

Необходимым элементом термоэлектрической установки является топка или камера сгорания. Теплота продуктов сгорания вследствие лучистого и конвективного теплообмена подводится к горячим спаям термоэлементов, а охлаждение холодных спаев осуществляется воздухом или забортной водой непосредственно либо с помощью промежуточных охлаждающих контуров.

При использовании различного рода химических источников тепловой энергии могут быть применены разнообразные технические решения, которые широко используются в судовых энергетических установках и рассматриваются в специальных курсах.

ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ РАЗЛИЧНЫХ АГЕНТОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В ряде случаев может оказаться целесообразным применение для термоэлектрического генерирования тока тепловой энергии различных рабочих агентов судовых энергетических установок: пара, воды, продуктов сгорания органического топлива. При этом термоэлектро-генераторы будут иметь вид обычного теплообменного аппарата, в котором часть тепловой энергии непосредственно преобразуется в электрическую энергию, а неиспользованная часть отводится и передается забортной воде.

В том случае если это экономически целесообразно, термоэлектро-генераторы принципиально могут использоваться в любой области цикла паротурбинной, дизельной или газотурбинной судовой установки. При этом следует учитывать эксплуатационные факторы и другие специфические требования. В настоящее время можно лишь отметить, что по мере увеличения эффективности термоэлектрических материалов и уменьшения их стоимости область целесообразного применения термоэлектро-генераторов на судах будет непрерывно расширяться [148], [151, 152].

Однако если вопрос о целесообразности включения термоэлектрогенераторов в различные области энергетических установок пока еще спорен, то их применение как утилизаторов тепловой энергии в ряде случаев оказывается более предпочтительным, чем применение утилизационных котлов. Интересно отметить, что такая замена тем более целесообразна, чем меньше мощность энергетической установки (а следовательно, и количество энергии, уносимой уходящими газами) и чем больше требования к минимизации эксплуатационных расходов и обеспечению надежности утилизационного устройства.

Следует особенно подчеркнуть, что непрерывно ведущаяся работа по улучшению эффективности существующих и изысканию новых термоэлектрических материалов не позволяет еще однозначно решить вопрос о границах целесообразности применения термоэлектричества в судовой энергетике. Однако при необходимости удовлетворить какому-то весьма специальному требованию, даже при меньшей эффективности термоэлектрических генераторов, применение может оказаться более целесообразным, чем применение машинных преобразователей энергии.

РАДИОИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

При использовании радиоизотопных источников энергии, не требующих каких-либо химических агентов или окислителей, отпадают все проблемы, связанные с организацией подачи и сжигания топлива. Именно по этой причине они находят широкое применение на искусственных спутниках Земли как источники тепловой энергии, преобразуемой в электрическую при помощи термоэлектрогенераторов. Несомненные перспективы применения систем радиоизотопный источник — термоэлектрогенератор открываются и в судостроении, особенно в случае небольших мощностей — до 1 квт.

В связи с этим представляет интерес рассмотрение основных характеристик радиоизотопных источников энергии [34], [108], [119]. Из теории строения ядра известно, что при одинаковом числе протонов ядра элементов могут содержать различное число нейтронов. Такие ядра носят название изотопов. Среди большого количества различных изотопов есть такие, которые характеризуются самопроизвольным распадом ядра с испусканием α - и β -частиц и γ -излучения. В результате определенной последовательности распадов образуются стабильные ядра, и процесс распада прекращается.

Испускаемые приadioактивном распаде частицы, обладающие значительной кинетической энергией, быстро теряют ее, взаимодействуя с ядрами материалов. Эта энергия выделяется в виде теплоты, которая при помощи термоэлектрогенераторов может быть частично преобразована в электрическую энергию.

Процесс радиоактивного распада не зависит от химического соединения, содержащего радиоактивный изотоп, или физического состояния последнего. Скорость радиоактивного распада определяется по формуле

$$\frac{dN_{\text{из}}}{dt} = -aN_{\text{из}},$$

где $N_{\text{из}}$ — количество атомов изотопа, $\text{атом}/\text{см}^3$;

a — постоянная распада.

Из этой формулы следует, что

$$N_{\text{из}} = N_{0\text{из}} e^{-at},$$

где $N_{0\text{из}}$ — количество атомов изотопа в начальный период, $\text{атом}/\text{см}^3$;

e — основание натуральных логарифмов.

Обычно в качестве основной характеристики радиоактивного изотопа рассматривается период полураспада, т. е. время, за которое распадается половина первоначального количества атомов:

$$t_{1/2} = \frac{0,6931}{a} \text{ сек.}$$

В отличие от химических источников энергии радиоизотопные источники характеризуются переменной во времени величиной выделяемой энергии. Поэтому возникает необходимость определять их мощность исходя либо из некоторой средней величины, либо из величины мощности, требуемой в конце расчетной длительности эксплуатации.

Удельная мощность радиоизотопного источника энергии может быть найдена из соотношения

$$\frac{Q_{\text{ист}}}{m_{0\text{из}}} = 4,85 \cdot 10^{13} \frac{\sum Q_{\text{ист}}}{m_{\text{из}} t_{1/2}} e^{-at} \text{ вт/кг}, \quad (82)$$

где $m_{0\text{из}}$ — начальная масса изотопа, г;

$m_{\text{из}}$ — масса изотопа, г;

$\sum Q_{\text{ист}}$ — суммарная энергия, выделяемая в процессе радиоактивного распада, дж;

$t_{1/2}$ — период полураспада, сутки;

t — время распада, сутки.

В настоящее время известно очень большое количество радиоактивных изотопов, однако не все они пригодны для использования в энергетике вследствие относительно небольших периодов полураствора и ряда других причин. В табл. 7 приведены данные для основных радиоизотопных веществ, которые могут рассматриваться как источники тепловой энергии для термоэлектрических генераторов малой мощности.

Из таблицы видно, что различие физических свойств и удельных энерговыделений радиоактивных изотопов настолько велико,

Таблица 7

Энергетические характеристики радиоизотопных источников тепловой энергии

Радиоизотопный источник тепловой энергии	Период полураспада, годы	Химическая формула	Вид радиоактивного излучения	Величина удельного тепловыделения		$\text{Удельный вес, } \text{Г/см}^3$	Биологическая защита
				$\text{ет}/\Gamma$	$\text{ет}/\text{см}^3$		
Продукты переработки отработавшего ядерного топлива	—	—	β, γ	—	$0,001 \div 0,2$	$2 \div 3$	От γ -квантов высокой энергии
Sr ⁹⁰	27,7	Titanat SrTiO ₃ ·SrO	β	0,20	0,9	4,5	Должна быть рассчитана на поглощение термозногого γ -излучения, обусловленного первичным β -излучением
Cr ¹³⁷	26,6	—	$\beta (\gamma)$	0,072	0,215	3,0	От γ -квантов
Ce ¹⁴⁴	0,78	Оксид CeO ₃	$\beta (\gamma)$	2,30	13,8	6,0	» »
Ru ¹⁴⁷	2,62	Оксид Ru ₂ O ₃	β	0,18	1,0	5,5	—
Po ²¹⁰	0,38	Металлический	α	1,40	1320	9,4	Необходима лишь при возникновении вторичного γ -излучения
Ru ²³⁸	86,4	Оксид RuO ₂	α	0,56	9,3	16,6	То же
Cm ²⁴²	0,45	Оксид	α	120	1170	9,81	» »
Cm ²⁴⁴	17,6	Оксид	α	2,3	22,4	9,81	» »
Au ¹⁹⁶	1	Металлический	—	29,5	—	—	» »

что в каждом отдельном случае необходимо учитывать следующие конкретные требования:

- длительность непрерывной работы без замены источника энергии;
- стоимость;
- габаритно-весовые ограничения;
- безопасность использования.

Теоретически радиоактивные изотопы представляют собой идеальный источник тепловой энергии для термоэлектрогенераторов. Действительно, подвод теплоты к горячим спаям термоэлементов осуществляется в этом случае теплопроводностью непосредственно от источника теплоты. Благодаря этому исключается необходимость в использовании теплоносителей и средств, обеспечивающих их циркуляцию. Кроме того, радиоактивные изотопы позволяют обеспечить работу термоэлектрогенераторов в течение многих месяцев и лет без замены топлива.

Однако габариты и вес термоэлектрических установок, в которых используются эти источники энергии, могут быть получены удовлетворительными лишь при мощностях от нескольких до десятков ватт. Таким образом, область их применения весьма ограничена и позволяет рассматривать радиоизотопные термоэлектрические установки только как источники электроэнергии для питания приборов и некоторых видов судовой аппаратуры, особенно там, где необходима исключительно высокая надежность источников питания.

ЯДЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Ядерные источники энергии представляют наибольший интерес с точки зрения их использования в сочетании с термоэлектрическими генераторами большой мощности — порядка сотен и тысяч киловатт [94], [116, 117]. Источники энергии такого типа не требуют атмосферного воздуха и специальных систем для подачи топлива. Они характеризуются большими сроками непрерывной работы на одной загрузке ядерного топлива и имеют максимальную плотность энерговыделения. Кроме того, при использовании ядерных источников энергии (а также и радиоизотопных) отсутствует потеря теплоты с уходящими газами, поникающая общую эффективность установок, в которых используется органическое топливо.

Действительно, выше было показано, что для наибольшей эффективности термоэлементов источник и сток теплоты должны характеризоваться равномерностью температур по поверхностям теплообмена в практически осуществимых пределах. При использовании различных видов органического топлива образующиеся газы на выходе из термоэлектрогенератора должны иметь минимальную температуру. Выполнение этого условия приводит к тому,

что разность температур газа на входе и выходе из термоэлектро-генератора оказывается довольно значительной, а температурный перепад на термоэлементах связан с величиной средней темпера-туры газов. Увеличение последней возможно путем повышения либо

максимальной температуры га-за, либо температуры газа на выходе, что чаще всего неприем-лемо.

Поскольку в случае ядерного источника тепловой энергии си-стема работает по замкнутому циклу, обеспечить изотермич-ность подвода теплоты значи-тельно проще, особенно при использовании в качестве тепло-носителей жидкостей, изменяю-щих свое агрегатное состоя-ние в процессе отвода теплоты из активной зоны ядерного реак-тора и подвода энергии к горячим спаям термоэлементов.

Рассмотрим некоторые особенности применения ядерных источ-ников в сочетании с термоэлектрогенераторами [34].

Так же как и в схемах судо-вых атомных энергетических уста-новок, ядерный реактор может рас-сматриваться как источник тепло-вой энергии, которая частично преобразуется в электрическую. В этом случае для транспортировки тепловой энергии от реактора к тер-моэлектрогенератору необходи-мы те или иные теплоносители, сред-ства, обеспечивающие циркуляцию этих теплоносителей и, естественно, системы, обеспечивающие отвод теплоты от холодных спаев термо-элементов (рис. 72).

При наличии всех этих элемен-тов термоэлектрогенератор пред-ставляет собой электрогенерирующий теплообменный аппарат, включаемый в схему аналогично парогенераторам судовых атом-ных паротурбинных установок.

Однако, как это видно из рис. 73, существуют и другие возмож-ности использования термоэлектрогенераторов. В этом случае контур теплоносителя, который служит для переноса теплоты из активной зоны ядерного реактора к термоэлектрогенератору, отсутствует, термоэлементы располагаются непосредственно на

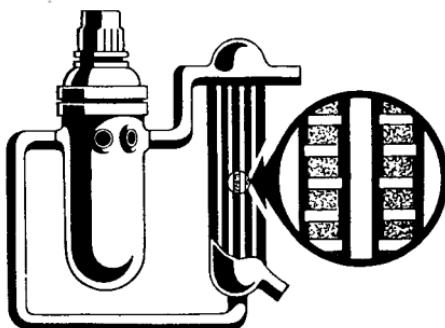


Рис. 72. Принципиальная схема атом-ной термоэлектрической установки с выносным термоэлектрогенератором

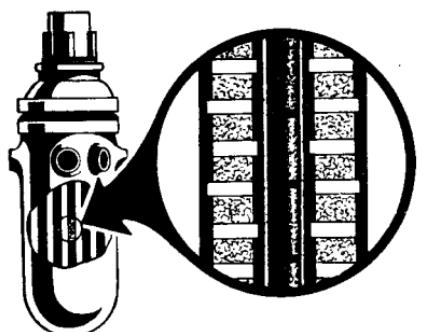


Рис. 73. Принципиальная схема атомной термоэлектрической уста-новки с термоэлектрогенератором, расположенным в активной зоне ядерного реактора

тепловыделяющих элементах (ТВЭ) активной зоны, а подвод к ним теплоты осуществляется теплопроводностью. Для отвода теплоты должен быть использован охладитель, характеристики которого выбираются в зависимости от температуры холодных спаев, давления в системе, возможности циркуляции охладителя через активную зону и других факторов [116].

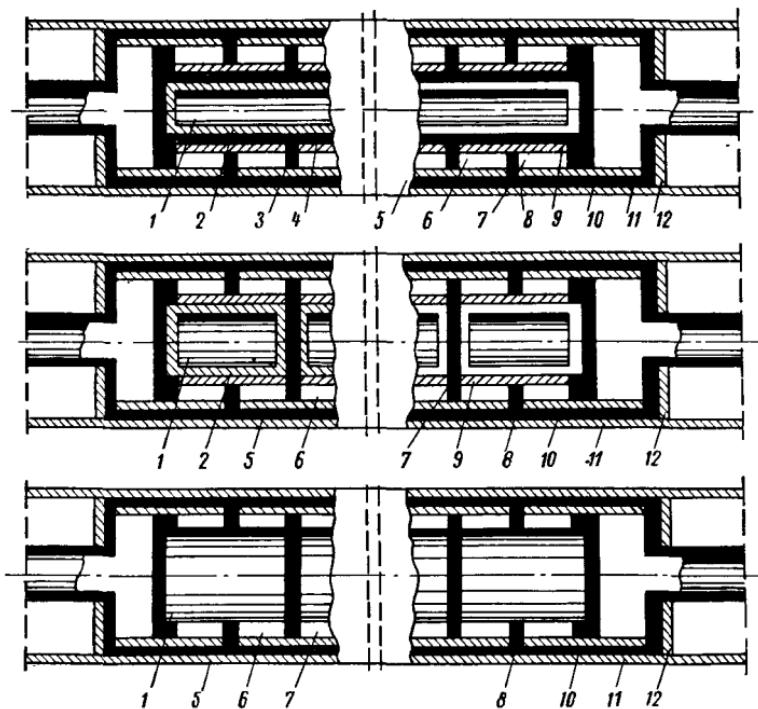


Рис. 74. Конструктивные схемы совмещенных ядерных тепловыделяющих элементов — термоэлектрогенераторов.

1 — ядерное топливо; 2 — оболочка тепловыделяющего элемента; 3, 8 — электроизоляционные кольца; 4, 5 — электроизоляционные слои; 6 — ветвь *n*-типа; 7 — ветвь *p*-типа; 9, 10 — коммутационные кольца; 11 — кожух; 12 — прокладка

Помимо рассмотренных, можно привести еще ряд интересных технических решений, связанных с использованием для работы термоэлектрогенераторов тепловой энергии ядерных реакций [128]. В I главе указывалось, что некоторые химические соединения расщепляющихся материалов обнаруживают полупроводниковые свойства. В частности, отмечалось, что такие свойства присущи двуокиси урана UO_2 .

Поскольку это соединение при соответствующей степени обогащения изотопом U^{235} широко применяется в качестве материала тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, напрашивается вывод о возможности совмещения термоэлементов и тепловыделяющих элементов (рис. 74). Такая конструкция при успешном раз-

решении ряда весьма сложных проблем могла бы рассматриваться как наиболее перспективная в конструктивном отношении.

Несомненный интерес представляет также совмещение ядерного источника энергии с термоэмиссионным и термоэлектрическим преобразователями энергии. Такое сочетание позволит значительно увеличить полезный температурный перепад и получить достаточно высокий суммарный к. п. д. процесса прямого преобразования энергии.

§ 11. ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Применение радиоизотопных или ядерных источников энергии в термоэлектрических устройствах и установках характеризуется тем, что полупроводниковые материалы оказываются под действием радиационных полей. Обычно α - и β -излучения, проникающая способность которых невелика, могут не учитываться, однако влияния γ - и нейтронного излучений на свойства термоэлектрических материалов избежать не удается.

Интенсивность излучений, действующих на термоэлементы, может колебаться в очень широких пределах в зависимости от характеристик источника, геометрического расстояния от него до термоэлементов, свойств среды на пути радиационных потоков и многих других факторов. Особенно важно учитывать влияние радиационных полей на полупроводниковые материалы в случае размещения термоэлементов непосредственно на тепловыделяющих элементах в активной зоне ядерного реактора.

Из теории термоэлектрических эффектов известно, что существует значительное влияние концентрации носителей заряда, или дефектов кристаллической решетки, на термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов. Выше указывалось, что дефекты кристаллической решетки, создаваемые примесями, радиационными полями и другими способами, позволяют изменить свойства полупроводников. В принципе воздействие радиационных полей может не только ухудшать термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов, но иногда и улучшать их. Очевидно, изменение свойств полупроводникового материала зависит не только от его исходных характеристик, но и от вида излучения (потоки γ -квантов или нейтронов), величин потоков и длительности пребывания материала в радиационном поле. Существенное влияние должна оказывать и температура, при которой происходит процесс облучения. Особенное действие на термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов, видимо, оказывают быстрые нейтроны и жесткое γ -излучение.

Механизм взаимодействия нейтронов и γ -излучения с ядрами полупроводникового материала заключается в следующем:

1. При столкновении с ядрами атомов полупроводникового материала быстрые нейтроны обмениваются с ними энергией. Величина этой энергии чаще всего превышает энергию связи атомов в молекулах, вследствие чего возможен разрыв химических связей и сдвиг атомов в кристаллической решетке с образованием вакансий. В некоторых случаях атом при столкновении с быстрым нейтроном может приобрести энергию, во много раз превышающую пороговую энергию смещения. Это приведет к последовательному возникновению большого количества вторичных вакансий и значительному изменению термоэлектрических характеристик материала, даже при относительно небольших интегральных потоках.

Тепловые нейтроны, а также нейтроны промежуточной (до 300 эВ) энергии, по-видимому, не в состоянии вызвать большого количества смещений атомов в кристаллической решетке. Поэтому даже при больших интегральных потоках их влияние на термоэлектрические свойства будет значительно меньшим, чем в случае быстрых нейтронов.

2. γ -кванты при взаимодействии с полупроводниковым материалом выбивают электроны из оболочки атомов, сообщая им значительную энергию. Электроны, получившие эту энергию, могут разрушить химические связи атомов в молекулах, что также приведет к изменению термоэлектрических свойств.

В ряде случаев необходимо также учитывать явление превращения атомов под действием радиоактивного излучения и легирование полупроводникового материала осколками деления. Скорее всего естественно, что изменение свойств полупроводникового материала в радиационном поле зависит также от его ядерно-физических свойств.

Табл. 8, иллюстрирующая различия в величине эффективного сечения поглощения тепловых нейтронов и других ядерно-физических характеристик некоторых веществ, применяемых в термоэлектрических устройствах, позволяет сделать вывод о том, что влияние радиоактивного излучения может быть существенно различным в зависимости от материала [13].

В качестве примера рассмотрим некоторые экспериментальные данные, полученные на Брукхейвенском реакторе 6MTR и реакторе TR фирмы Westinghouse. В результате этих экспериментов были определены коэффициент термоэдс и удельное электрическое сопротивление некоторых термоэлектрических материалов до и после облучения и непосредственно в процессе облучения.

Результаты экспериментов (первая группа), основанных на замерах свойств термоэлектрических материалов Bi—Ge—Te, GeTe и PbTe до и после облучения, показаны на рис. 75—78 [44].

Вторая группа экспериментов базировалась на замерах термоэлектрических характеристик материалов непосредственно в реакторе. Схемой устройства для замеров (рис. 79) предусматривалась возможность пропускания через образец постоянного тока и ав-

томатическая запись показаний приборов. Коэффициент термоэдс и величина электрического сопротивления определялись в функции продолжительности облучения и величины потока.

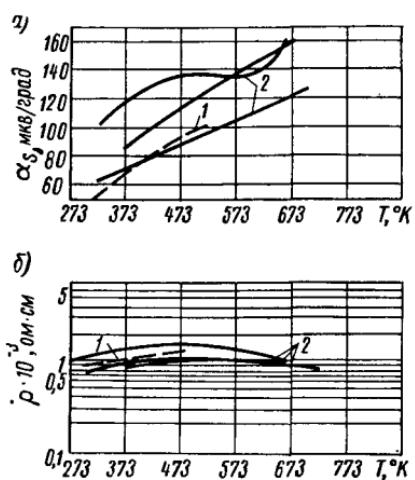


Рис. 75. Графики зависимостей $\alpha_s = \alpha_s(T)$ и $\rho = \rho(T)$ до и после облучения образцов из $\text{Ge}_{0,95} \text{Bi}_{0,05} \text{Te}$ интегральным потоком тепловых нейтронов $9,43 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (а, б).
1 — после облучения; 2 — до облучения;

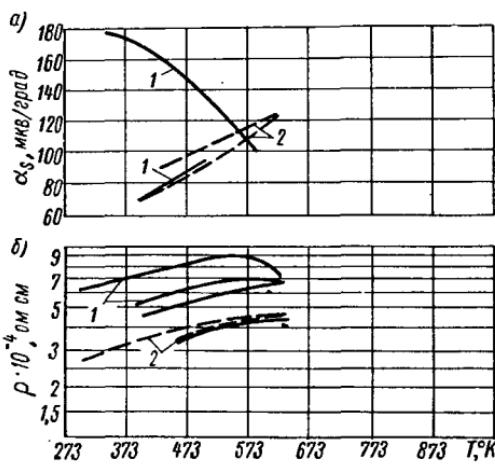


Рис. 76. Графики зависимостей $\alpha_s = \alpha_s(T)$ и $\rho = \rho(T)$ до и после облучения образцов $\text{Ge}_{0,95} \text{Bi}_{0,05} \text{Te}$ интегральным потоком тепловых нейтронов $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (а, б).

1 — до облучения; 2 — после облучения

1 — до облучения; 2 — после облучения

Таблица 8

Ядерно-физические характеристики некоторых термоэлектрических материалов

Элемент	Химический символ	Атомный номер	Атомный вес	Атомная плотность, 10^{-22} , атом/ см^3	Микроскопическое сечение поглощения для тепловых нейтронов, см^{-2}	Продукты активации	
						Период полу-распада	Энергия, Эзб
Висмут	Bi	83	209,0	2,82	0,0004	725 лет	4,90α
Германий	Ge	32	72,6	4,53	0,13	82 мин.	1,20β
Кадмий	Cd	48	112,41	4,63	120	43 дня	1,62β
Кремний	Si	14	28,06	5,19	0,010	2,6 часа	1,80γ
Мышьяк	As	33	74,91	4,61	0,20	27 час.	3,0β
Свинец	Pb	82	207,21	3,30	0,007	3,3 часа	1,45β 0,70γ
Селен	Se	34	78,96	3,43	0,52	59 мин.	1,44β
Сера	S	16	32,06	3,76	0,015	87 дней	1,92β
Серебро	Ag	47	107,88	5,86	3,5	2,3 мин.	2,70β
Сурьма	Sb	51	121,76	3,31	0,17	60 дней	1,62β
Теллур	Te	52	127,61	2,95	0,12	25 мин.	1,80β
Цинк	Zn	30	65,38	6,67	0,060	250 дней	1,14γ

Результаты второй группы опытов для образцов Li—Ni—O при перепаде температур $\Delta T = 50$ град и при $T_r = 698^\circ\text{K}$, $T_x = 648^\circ\text{K}$ (образцы находились в среде гелия) и образцов PbTe

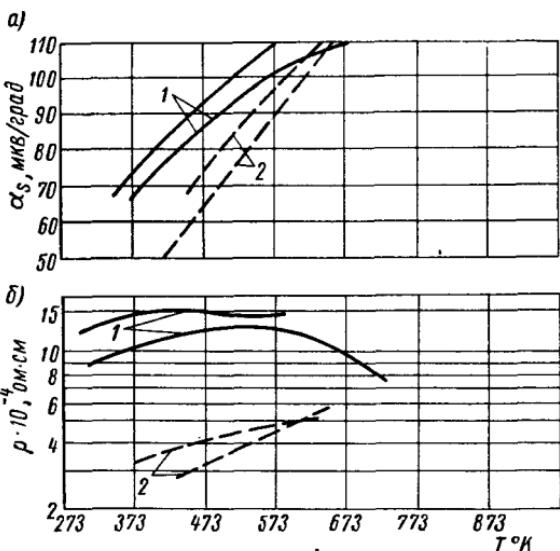


Рис. 77. Графики зависимостей $\alpha_S = \alpha_S(T)$ и $\rho = \rho(T)$ до и после облучения образцов из сплава GeTe интегральным потоком тепловых нейтронов $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (а, б).

1 — до облучения; 2 — после облучения

p -типа (образцы находились в среде атмосферного воздуха) при перепаде температур $\Delta T = 50$ град ($T_r = 673^\circ\text{K}$, $T_x = 623^\circ\text{K}$) приводятся на рис. 80, 81 [44].

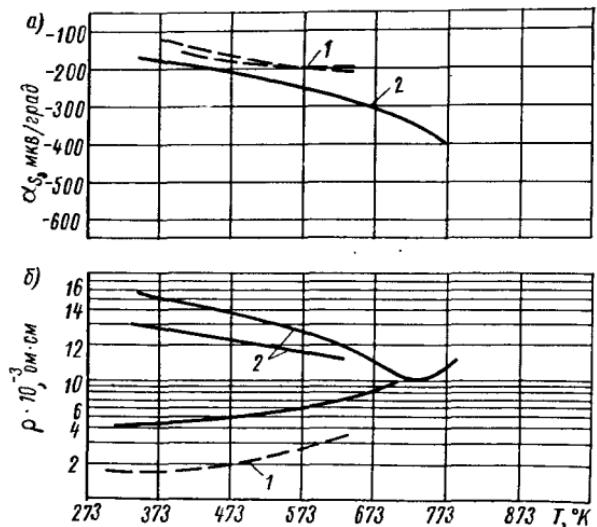


Рис. 78. Графики зависимостей $\alpha_S = \alpha_S(T)$ и $\rho = \rho(T)$ до и после облучения образцов n -типа из сплава PbTe интегральным потоком тепловых нейтронов $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ (а, б).

1 — после облучения; 2 — до облучения

Рассмотренные данные экспериментов позволяют утверждать, что радиоактивное облучение в большинстве случаев не вызывает в термоэлементах необратимых явлений, которые могли бы привести к резкому изменению их характеристик [16]. Однако

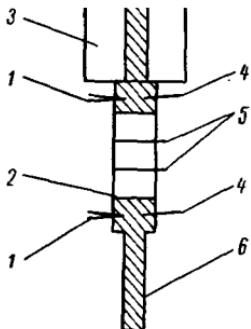


Рис. 79. Конструктивная схема устройства для измерения термоэлектрических характеристик образцов при их облучении.

1 — термопары; 2 — термоэлектрический материал; 3 — нагреватель; 4 — измеритель э. д. с.; 5 — измеритель потенциала; 6 — хвостовик из инконеля

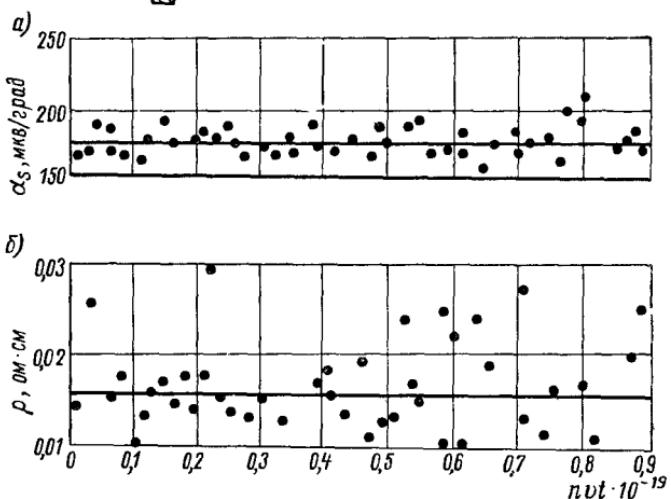


Рис. 80. Влияние облучения потоком тепловых нейтронов на α_S и ρ образцов из сплава $\text{Li}_{0.08} \text{Ni}_{0.92}\text{O}$ (а, б) ($T_r = 698^\circ \text{K}$, $T_x = 648^\circ \text{K}$)

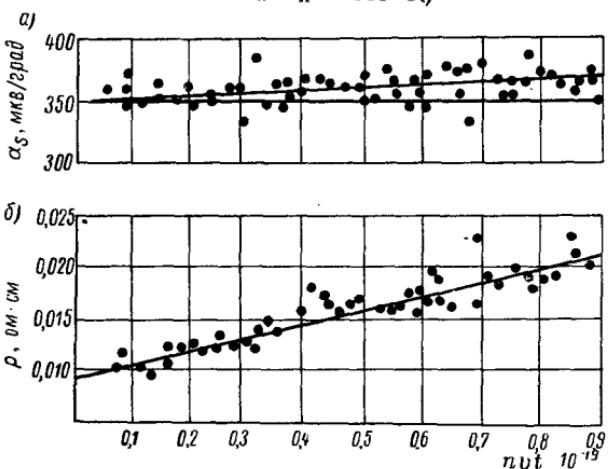


Рис. 81. Влияние облучения потоком тепловых нейтронов на α_S и ρ образцов p -типа из сплава PbTe (а, б) ($T_r = 673^\circ \text{K}$, $T_x = 623^\circ \text{K}$)

такое утверждение правильно лишь в случае, если средняя температура полупроводникового материала не ниже некоторой температуры, характерной для данного материала, выше которой устанавливается динамическое равновесие между возникающими из-за облучения и исчезающими вследствие отжига дефектами кристаллической решетки [44].

Таким образом, действие радиоактивного излучения не может сколько-нибудь значительно повлиять на термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов при соответствующих температурах и, следовательно, заставить отказаться от их использования в термоэлектрогенераторах с радиоизотопными или ядерными источниками тепловой энергии.

§ 12. СПОСОБЫ ПОДВОДА И ОТВОДА ТЕПЛОТЫ ОТ ГОРЯЧИХ И ХОЛОДНЫХ СПАЕВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ

Выбор способов подвода теплоты к одним спаям и отвода от других спаев термоэлектрических батарей играет исключительно большую роль при создании термоэлектрических устройств и установок. Эти способы определяют габариты и вес термоэлектрогенераторов, термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов [64], [120]. Особенно важен правильный их выбор при разработке аппаратов указанного типа для судовых условий. Габаритно-весовые ограничения, затрудненность, а иногда полное отсутствие доступа к аппаратам и ряд других требований обуславливают необходимость тщательного анализа возможных конструктивных решений.

С технологической точки зрения любое термоэлектрическое устройство представляет собой теплообменный аппарат со всеми присущими ему специфическими особенностями. При этом, однако, количество тепловой энергии, подведенной и отведенной от термоэлектрических батарей, неодинаково и отличается на величину, эквивалентную выделяемой полезной электрической мощности

$$P = Q_r - Q_x \text{ вт.}$$

Вместе с тем в большинстве случаев (за исключением термоэлектрических устройств с кольцевыми или секторными термоэлементами) поверхности теплообмена по стороне подвода или отвода теплоты одинаковы по размерам. Поэтому величины удельных тепловых потоков могут отличаться друг от друга в большей или меньшей степени в зависимости от эффективности полупроводникового материала термоэлементов и режима работы. Все это накладывает весьма своеобразный отпечаток на конструкцию термоэлектрического устройства [84], [85], [88].

Теплопередающая поверхность термоэлектрического устройства обычно представляет собой многослойную композицию,

состоящую из разнородных в теплотехническом отношении материалов: герметизирующих металлических пластин, слоев электроизоляционного материала, коммутационных металлических пластин и полупроводникового вещества. Теплопередача через такую многослойную стенку и характер изменения температур вдоль теплового потока схематично показаны на рис. 82.

Коэффициенты теплопередачи в этом случае могут быть рассчитаны по формулам, широко используемым в теплотехнике:

$$k_{Tr} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Tr}} + \frac{l_{пл}^r}{\lambda_{пл}^r} + \frac{l_{из}^r}{\lambda_{из}^r} + \frac{l_k^r}{\lambda_k^r}} \text{ вт}/\text{м}\cdot\text{град};$$

$$k_{Tx} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Tx}} + \frac{l_{пл}^x}{\lambda_{пл}^x} + \frac{l_{из}^x}{\lambda_{из}^x} + \frac{l_k^x}{\lambda_k^x}} \text{ вт}/\text{м}\cdot\text{град},$$

где α_{Tr} , α_{Tx} — коэффициент теплоотдачи, $\text{вт}/\text{м}^2\cdot\text{град}$;

l — толщина слоя материала, м;

λ — коэффициент теплопроводности, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$.

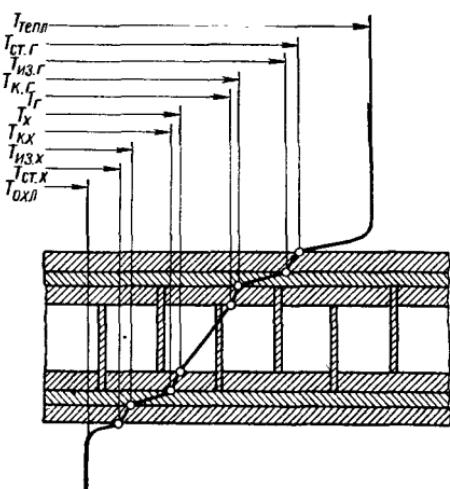
Как видно из формул, помимо конструктивных факторов (толщины коммутационных и электроизоляционных материалов, толщины герметизирующих стекок), теплотехническое совершенство термоэлектрического устройства, как и любого теплообменного аппарата, в значительной степени зависит от коэффициентов теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи определяется как количество тепла, переданного в единицу времени через единицу поверхности, при разности температур между последней и омывающей средой в 1 град.

Величина коэффициента теплоотдачи во всех случаях зависит от ряда факторов:

Рис. 82. Диаграмма температур, получаемых при прохождении теплового потока через многослойную плоскую стенку

- условий движения среды (свободная или вынужденная конвекция, характер потока — ламинарный или турбулентный);
- скорости движения среды;
- теплотехнических характеристик среды (плотность, вязкость, теплоемкость и теплопроводность);



— направления потока по отношению к поверхности теплообмена;

— формы поверхности, степени ее шероховатости и др.

Казалось бы, обилие факторов, оказывающих влияние на коэффициент теплоотдачи, предоставляет большие возможности для максимального повышения теплотехнических характеристик. Однако в большинстве случаев выбор тех или иных условий теплообмена в значительной мере ограничен конкретными техническими требованиями: физической природой веществ, технологическими и экономическими показателями [135—137]. Чаще всего одним из немногих средств рациональной компоновки поверхности теплообмена термоэлектрического устройства бывает выбор той или иной конструктивной формы, которая в значительной мере определяется конструкцией термоэлементов.

Прежде чем перейти к рассмотрению различных конструктивных форм поверхностей теплообмена термоэлектрических устройств, приведем основные формулы, которые используются при расчетах.

Как и в обычных теплообменных аппаратах, передача теплоты от сред к стенкам и наоборот осуществляется теплопроводностью, свободной или вынужденной конвекцией, а в некоторых случаях частично или полностью тепловым излучением. Оценка влияния каждого из этих процессов на теплоотдачу оказывается, как правило, невозможной, а их совместное влияние выражается величиной коэффициента теплоотдачи, определяемой экспериментальным путем. Поскольку эксперимент — единственный метод определения коэффициента теплоотдачи, на практике широко используются критерии подобия, устанавливающие взаимосвязь между величинами, определяющими процесс теплоотдачи.

К числу теплофизических характеристик, необходимых для определения коэффициентов теплоотдачи и гидравлических сопротивлений термоэлектрических устройств, относятся:

а) удельный вес вещества

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ кг/см}^3$$

и связанные с ним величины удельного объема

$$v = \frac{1}{\gamma} \text{ см}^3/\text{кг}$$

и плотности

$$\delta = \frac{\gamma}{g} \text{ кг/см}^3,$$

где G — вес теплоносителя (охладителя), кг ;

V — объем теплоносителя (охладителя), см^3 ;

g — ускорение силы тяжести, м/сек^2 ;

б) коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \frac{Q}{tF \frac{\Delta T}{l_T}} \text{ вт}/\text{м} \cdot \text{град},$$

где Q — тепловая энергия, дж;

t — время, сек;

F — площадь теплообмена, м^2 ;

ΔT — разность температур теплообменивающихся сред, $^\circ\text{К}$;

l_T — длина пути теплового потока, м;

в) коэффициент температуропроводности

$$\chi = \frac{\lambda}{\gamma c_p} \text{ м}^2/\text{сек},$$

где c_p — теплоемкость теплоносителя (охладителя) при постоянном давлении $\text{кдж}/\text{м}^3\text{град}$.

г) коэффициент динамической вязкости

$$\mu = \nu g \text{ вт}/\text{м} \cdot \text{град},$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости теплоносителя (охладителя), $\text{м}^2/\text{сек}$;

д) коэффициент гидравлических сопротивлений, определяемый экспериментальным путем, и ряд других величин.

В обычных теплообменных аппаратах количество теплоты, передаваемой от одной среды к другой, является функцией температурного напора, т. е. среднелогарифмической разности температур. В этом случае знания коэффициента теплопередачи, величины поверхности теплообмена и среднелогарифмической разности температур вполне достаточно для определения количества теплоты, которым обмениваются греющая и охлаждающая среды. В термоэлектрических устройствах, в которых тепловой поток через теплопередающую стенку, разделяющую среды, является переменным по толщине стенки, тепловой расчет выполняется прежде всего для установления значений температур спаев, необходимых для последующего решения системы уравнений энергетического баланса термоэлементов. По этой причине понятие среднелогарифмической разности температур в термоэлектрических устройствах может быть использовано лишь в оценочных, приближенных расчетах.

Весьма существенной при разработке конструкции поверхности теплообмена термоэлектрических устройств следует считать величину затрачиваемой в единицу времени энергии, необходимой для обеспечения отвода и подвода требуемых количеств тепловой энергии (в случае, если для этих целей используются циркулирующие среды, а не подвод теплоты непосредственно от источника

энергии теплопроводностью). Величина этой мощности обычно определяется по формуле

$$P = \frac{G \Delta p}{102 \gamma \eta_{\text{нас}}} \text{ квт},$$

где G — весовой расход теплоносителя (охладителя), кг/сек ;

Δp — суммарное гидравлическое сопротивление систем, $\kappa\Gamma/\text{см}^2$;

γ — удельный вес теплоносителя (охладителя), $\kappa\Gamma/\text{см}^3$;

$\eta_{\text{нас}}$ — к. п. д. насоса.

Наибольшее влияние на величину мощности, затрачиваемой на прокачку теплоносителя (охладителя), оказывают величина весового расхода G и суммарное гидравлическое сопротивление Δp . Последнее состоит из местных гидравлических сопротивлений, сопротивления трения и сопротивления, вызванного изменением плотности потока:

$$\Delta p = \Delta p_m + \Delta p_{tp} \pm \Delta p' \text{ } \kappa\Gamma/\text{см}^2,$$

где Δp_m — гидравлическое сопротивление, обусловленное местными потерями, $\kappa\Gamma/\text{см}^2$;

Δp_{tp} — гидравлическое сопротивление, обусловленное потерями на трение, $\kappa\Gamma/\text{см}^2$;

$\Delta p'$ — гидравлическое сопротивление, обусловленное изменением плотности потока, $\kappa\Gamma/\text{см}^2$.

Величина местных сопротивлений, обусловленная внезапными сужениями и расширениями проходных сечений, наличием поворотов, препятствий и т. д., определяется по формуле

$$\Delta p_m = \xi_m \frac{\delta \omega^2}{2} \text{ } \kappa\Gamma/\text{см}^2,$$

где ξ_m — коэффициент местных гидравлических сопротивлений;

δ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{см}^3$.

Сопротивление трения рассчитывается по формуле

$$\Delta p_{tp} = \xi_{tp} \frac{l}{d_s} \cdot \frac{\delta \omega^2}{2} \text{ } \kappa\Gamma/\text{см}^2,$$

где ξ_{tp} — коэффициент гидравлических потерь на трение;

l — линейный размер поверхности трения, см ;

d_s — эквивалентный диаметр, см ,

и определяется силами внутреннего трения жидкости и трения между жидкостью и омыываемой поверхностью. И, наконец, величина гидравлического сопротивления, обусловленного изменением плотности потока, находится по формуле

$$\Delta p = (\gamma_1 - \gamma_2) h + 2 \left(\frac{\delta_2 \omega_2^2}{2} - \frac{\delta_1 \omega_1^2}{2} \right)^2 \text{ } \kappa\Gamma/\text{см}^2,$$

где γ — удельный вес жидкости, $кГ/см^3$;

δ — плотность жидкости, $кг/м^3$;

w — скорость жидкости, $м/сек$;

h — высота столба жидкости, $м$

(индекс 1 относится к потоку при меньшей, а 2 — к потоку при большей температуре).

Величина $\Delta p'$ может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от характера изменения величин, входящих в формулу.

Прежде чем перейти к рассмотрению различных конструкций поверхностей теплообмена термоэлектрических устройств, необходимо остановиться на некоторых общих требованиях. Безусловно, любое термоэлектрическое устройство, предназначенное для использования на судне, должно характеризоваться при прочих равных условиях наибольшей эффективностью. Однако эффективность не является самоцелью и в ряде случаев целесообразно за счет ее некоторого уменьшения максимально упростить конструкцию, уменьшив ее габариты и вес, а также повысить надежность.

В общем виде эти требования могут быть сформулированы как условие получения максимальной мощности на единицу объема устройств при наибольшей простоте и надежности конструкции.

Если проанализировать зависимости, устанавливающие взаимосвязь между конструктивными характеристиками термоэлементов, термоэлектрическими свойствами выбранных полупроводниковых материалов и теплофизическими характеристиками греющей и охлаждающей сред, то нетрудно прийти к заключению, что величина полезной мощности на единицу объема может варьироваться в очень широких пределах.

Однако практически это утверждение едва ли правильно. Известно, что поскольку величина удельного теплового потока ограничена, хотя бы по стороне одного из спаев, а также вследствие конечного сопротивления, вносимого коммутацией, высота стержней термоэлемента не может быть получена сколь угодно малой.

Следовательно, в любом случае будет существовать некоторое предельное значение удельного теплового потока, а значит, и минимальная высота термоэлемента.

Таким образом, возникает необходимость в создании максимальных возможных тепловых потоков, т. е. в интенсификации теплообмена.

Одним из наиболее простых методов интенсификации теплообмена является увеличение скоростей теплообменывающихся сред. Этот метод используется при разработке термоэлектрических устройств, в пределах, которые могут быть признаны целесообразными с точки зрения затрат энергии, необходимой для циркуляции теплоносителя и охладителя, эрозии конструкционных материалов и т. д. Часто хорошие результаты можно получить благодаря правильному выбору конструкции поверхностей теплообмена.

Весьма эффективно также использование различных конструктивных решений, способствующих турбулизации теплообменывающихся сред, т. е. интенсивному перемешиванию слоев жидкости и уменьшению толщины пограничного слоя. Чаще всего это приводит также к увеличению поверхности теплообмена. Однако в каждом отдельном случае целесообразность применения турбулизаторов следует оценивать не только с точки зрения их влияния на интенсификацию теплообмена, но и с точки зрения допустимости некоторого увеличения гидравлических сопротивлений. Но так как последнее связано с затратами энергии на прокачку теплообменывающихся сред, необходимо найти какие-то оптимальные компромиссные решения.

Немаловажное значение при компоновке поверхностей теплообмена термоэлектрических устройств, как и любых теплообменных аппаратов, имеет правильный выбор тракта для греющей и охлаждающей сред. Так, если речь идет о трубной конструкции, то внутри трубок целесообразно обеспечить движение среды, имеющей при прочих равных условиях большее давление. При использовании трубчатых поверхностей теплообмена, если греющей средой является конденсирующий пар, охлаждающую среду целесообразно пропускать внутри трубок. Это дает возможность увеличить скорость охлаждающей среды и соответственно коэффициент теплопередачи. Увеличение скорости конденсирующегося пара практически не сказывается на величине коэффициента теплопередачи.

При использовании трубчатых поверхностей теплообмена значительное влияние на габариты и вес оказывает шахматное или коридорное расположение трубок. При шахматном расположении турбулизация, а следовательно, и интенсивность теплопередачи оказываются большими. Когда для теплоотвода применяются кипящие жидкости, омывающие трубы снаружи, целесообразнее коридорное расположение трубок, так как при этом вероятность прилипания паровых пузырьков и связанного с этим ухудшения теплопередачи уменьшается.

В определенных условиях рациональную компоновку поверхности теплообмена термоэлектрического устройства можно обеспечить выбором оптимальной схемы движения сред (прямоток, противоток или перекрестный ток) и методом ступенчатого теплообмена.

Исключительно большое значение при конструировании термоэлектрических устройств имеет правильный выбор конструкционных, электроизоляционных и коммутационных материалов. И если последние чаще всего определяются почти однозначно в зависимости от используемого полупроводникового вещества, то для конструкционных и электроизоляционных материалов есть определенные возможности выбора.

Не говоря о необходимости уменьшения или полного устранения контактного термического сопротивления, при прочих равных

условиях целесообразно использовать материалы, характеризующиеся большей теплопроводностью.

Если существует возможность выбора, то величину термоэдс (или напряжения) целесообразно ограничивать минимальными значениями, так как это позволит уменьшить толщину электроизоляционного материала, а следовательно, и термическое сопротивление поверхности теплообмена.

В судовых условиях следует также иметь в виду необходимость сохранения на требуемом уровне термического сопротивления поверхности теплообмена в процессе длительной эксплуатации. Причиной значительного ухудшения процесса теплопередачи может оказаться отложение продуктов коррозии и загрязнения на теплопередающих поверхностях. Для их устранения в схемах термоэлектрических установок, как и в схемах многих судовых систем, необходимо использование ионообменных и механических фильтров, отстойников и т. д., а также правильный выбор конструкционных материалов, предназначенных для работы в контакте с выбранными теплообменивающимися средами.

В отдельных случаях необходимо также обеспечивать очистку поверхностей теплообмена промывкой, продувкой или механическим способом.

В судовых условиях отвод теплоты от спаев термоэлементов чаще всего осуществляется забортной водой. Однако эта вода содержит большое количество растворенных солей, ила и др. Нерастворимые продукты, содержащиеся в морской воде, могут быть удалены в механических фильтрах. Что касается растворенных продуктов, то для предотвращения их отложения на поверхностях теплообмена максимальную температуру морской воды в трактах следует ограничивать значениями, меньшими, чем те, при которых (в зависимости от состава) начинается солеотложение.

Выше было отмечено, что вопросы интенсификации теплообмена играют исключительно большую роль при конструировании термоэлектрических устройств.

Чаще всего интенсифицировать теплообмен удается за счет применения оптимальных конструкций поверхностей теплообмена. Конкретные рекомендации по этому вопросу даются в специальной технической литературе. Здесь мы ограничимся некоторыми данными, которые позволяют, основываясь на экспериментальных результатах, отыскать наиболее целесообразные технические решения на начальной стадии проектирования термоэлектрических устройств.

Сравнительная оценка различных конструкций теплообменных поверхностей термоэлектрических устройств, как и в случае обычных теплообменных аппаратов, может быть выполнена на основе сопоставления:

- теплопередающих свойств;
- величин гидравлических сопротивлений движению сред;

- габаритно-весовых характеристик;
- простоты и технологичности конструкций;
- эксплуатационной надежности.

Теплопередающая способность различных поверхностей теплообмена оценивается по графикам зависимости

$$Nu_{ж} = f(Re),$$

где $Nu_{ж}$ — критерий Нуссельта;

Re — критерий Рейнольдса

или $K_0 = f(Re)$, где K_0 определяется из критериального уравнения

$$Nu_{ж} = a Re_{ж}^n Pr_{ж}^m \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ct}} \right)^D$$

в виде

$$K_0 = \frac{Nu_{ж}}{a Pr_{ж}^m \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ct}} \right)^D},$$

где a — безразмерный коэффициент.

Очевидно, чем больше $Nu_{ж}$ или K_0 при прочих равных условиях, тем лучше будут теплопередающие свойства поверхности теплообмена. На графиках рис. 83, 84 и 85 приведены зависимости $Nu_{ж} = f(Re)$ и $K_0 = f(Re)$, позволяющие оценить значение коэффициентов теплоотдачи для термоэлектрогенераторов, в которых греющей и охлаждающей средами являются жидкости или газы.

Однако для всесторонней оценки знание только теплопередающих характеристик той или иной конструкции поверхности теплообмена оказывается далеко недостаточным. Немаловажным фактором при сравнительной оценке качества конструкций является также величина гидравлического сопротивления. Эта величина при прочих равных условиях должна быть минимальной, так как в противном случае произойдет возрастание непроизводительных потерь энергии на прокачку теплоносителя и охладителя [124].

Если в качестве критерия для сравнения гидравлических сопротивлений принять суммарный коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к 1 м длины:

$$\xi = \sum \xi_m + \xi_{tr} \frac{l}{d_3},$$

можно построить зависимости $\xi = f(Re)$ для различных поверхностей теплообмена. Такие зависимости для некоторых конструкций поверхностей теплообмена и сред, показанные на рис. 86—88

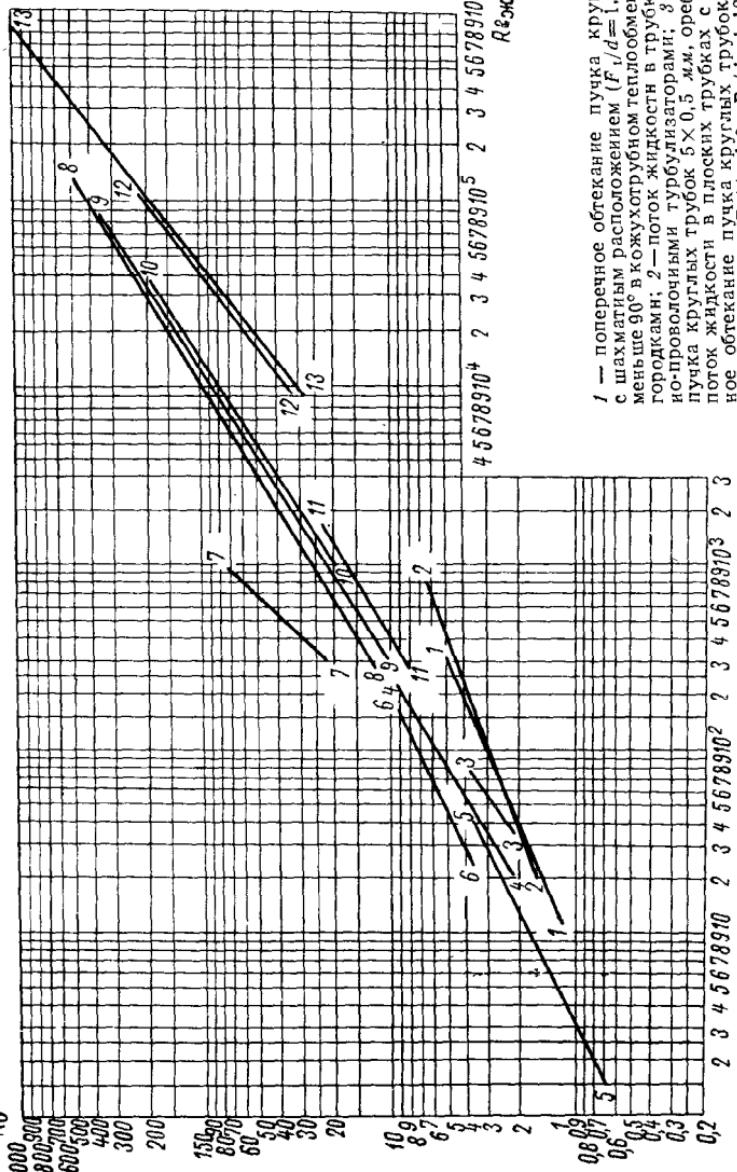


Рис. 83. Теплоотдача для различных типов поверхностей теплообмена при использовании жидких теплоносителей

1 — поперечное обтекание пучка круглых трубок $10 \times 1 \text{ мм}$ с шахматным расположением ($F_{1/d} = 1.3; F_{2/d} = 1.12$) под углом меньше 90° в кожухотрубном теплообменнике с сегментными перегородками; 2 — поток жидкости в трубках $10 \times 1 \text{ мм}$ со спиральными-волнообразными турбулизаторами; 3 — поперечное обтекание пучка круглых трубок $5 \times 0.5 \text{ мм}$, обребренными пластинами; 4 — поперечное обтекание пучка круглых трубок $10 \times 1 \text{ мм}$ с шахматным расположением ($F_{1/d} = 1.3, F_{2/d} = 1.12$) под углом меньше 90° в плоских трубках с решетками; 5 — поперечный поток жидкости в плоских трубках $10 \times 1 \text{ мм}$ с решетками; 6 — поток жидкости в пучке круглых трубок $1 \times 1 \text{ мм}$ с шахматным расположением ($F_{1/d} = 1.3; F_{2/d} = 1.13$); 7 — поток жидкости в пучке круглых трубок $1 \times 1 \text{ мм}$ с корицневым расположением ($F_{1/d} = 1.3, F_{2/d} = 1.13$) под углом 60° ; 8 — поток жидкости между гладкими пластинами; 9 — поперечное обтекание пучка круглых трубок $10 \times 1 \text{ мм}$ с шахматным расположением ($F_{1/d} = 1.3, F_{2/d} = 1.13$) под углом 60° ; 10 — поток жидкости в спиральных эмиссивках; 11 — поток жидкости в трубках $10 \times 1 \text{ мм}$

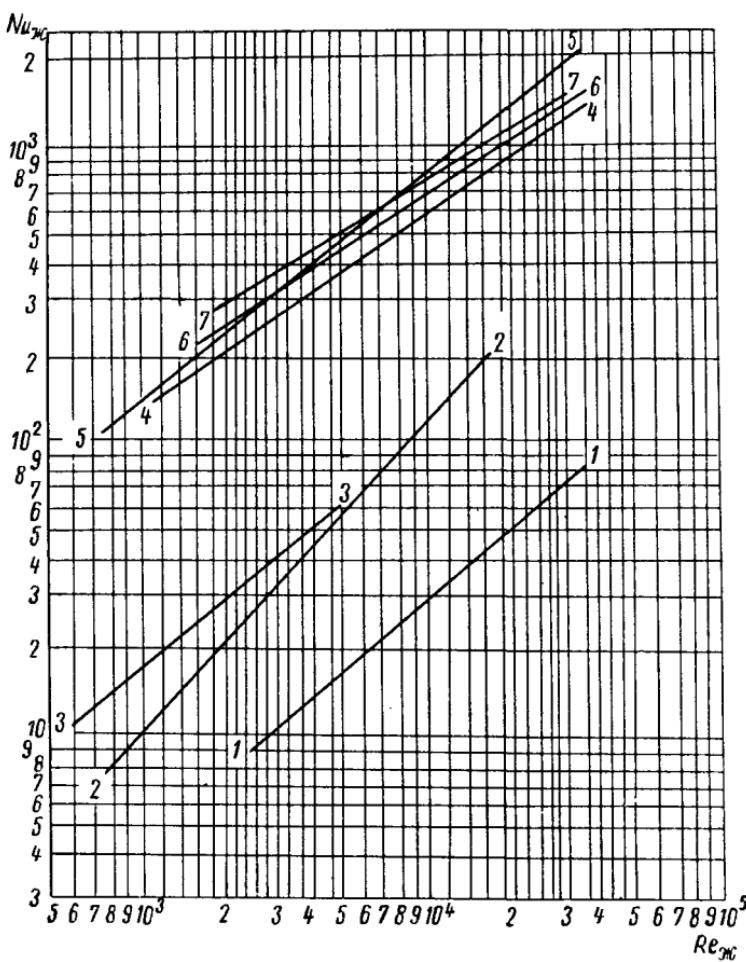


Рис. 84. Теплоотдача для различных типов поверхностей теплообмена при использовании газовых теплоносителей.

1 — поток внутри круглых трубок 10×1 мм; 2 — продольное обтекание круглых трубок 10×1 мм, оребренных гофрированной лентой; 3 — продольное обтекание треугольных каналов с просечками на стенках; 4 — пластинчатые аппараты с овальнообразными выступами; 5 — пластинчатые аппараты с полусферическими лунками; 6 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 10×1 мм с шахматным расположением ($F_1/d = F_2/d = 1,3$); 7 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 10×1 мм с шахматным расположением ($F_1/d = 1,3$, $F_2/d = 1,13$)

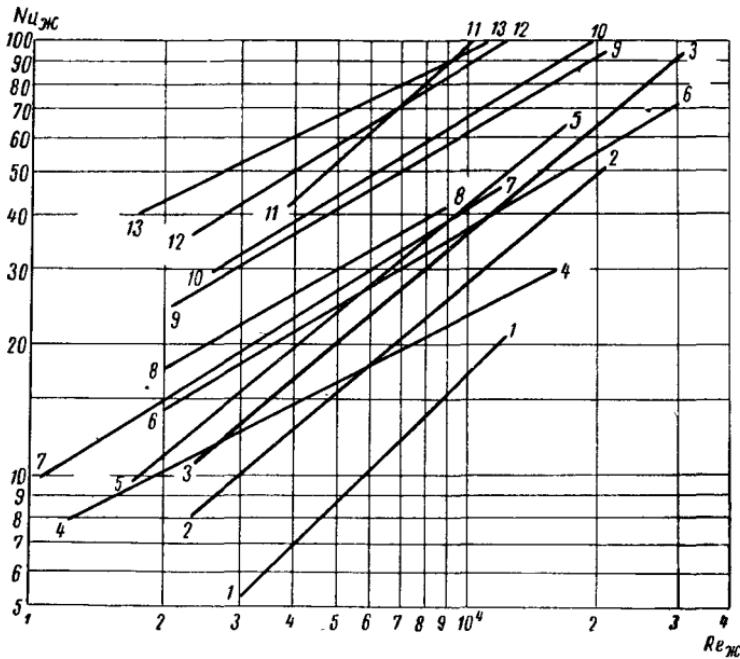
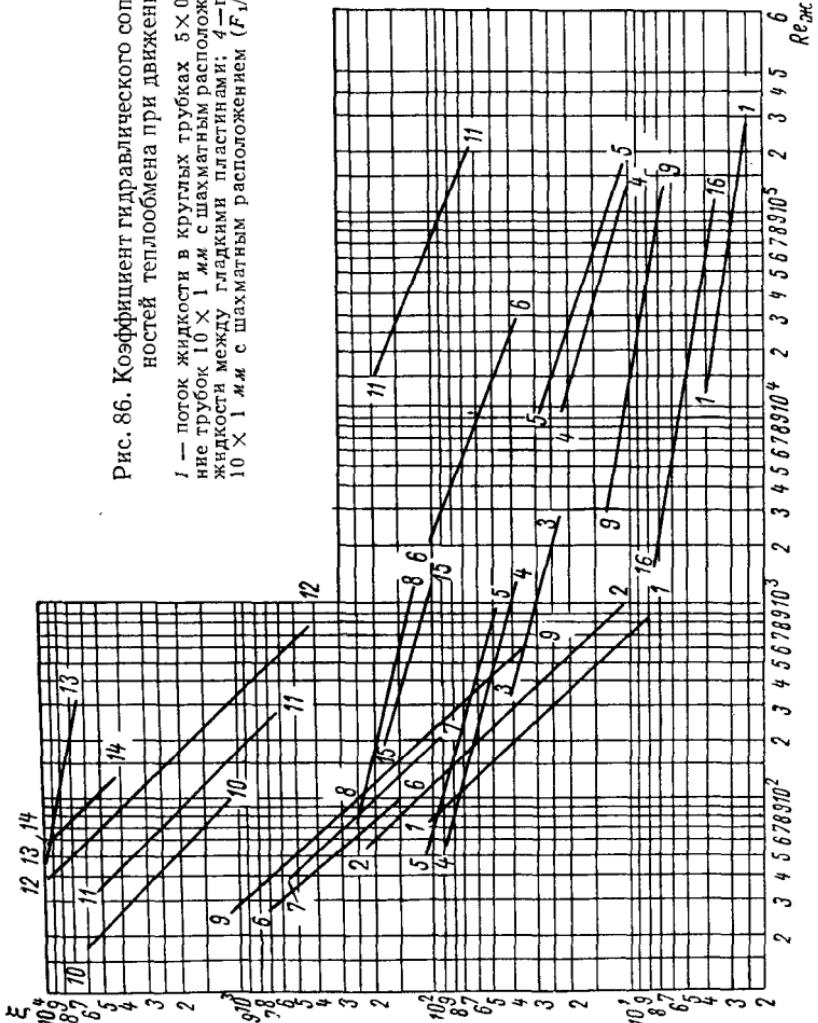


Рис. 85. Теплоотдача со стороны газа в газожидкостных теплообменных аппаратах.

1 — поток газа внутри круглых трубок; 2 — поперечное обтекание пучка плоских трубок $22 \times 3,0$ мм, оребренных сплошными листами (шаг 2,6 мм при коридорном расположении трубок $F_1 = 11$ мм, $F_2 = 26,5$ мм); 3 — продольное обтекание пучка круглых трубок 16×1 мм, оребренных продольными ребрами высотой 12 мм; 4 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 10×1 мм, оребренных специальной лентой (высота ребер 6,6 мм, шаг извишки 2,2 мм, толщина ребер 0,4 мм); 5 — продольное обтекание пучка круглых трубок $d_h = 20$ мм, оребренных низкими ребрами $l = 1,5$ мм (расстояние между ребрами 2 мм); 6 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 10×1 мм, оребренных сплошными пластинами толщиной 0,2 мм; расстояние между пластинами 3,0 мм, расположение трубок — шахматное ($F_1/d = 2,15$, $F_2/d = 2,5$); 7 — поперечное обтекание пучка круглых трубок, оребренных дисковыми ребрами 10×1 мм (толщина ребер 0,5 мм, шаг 4 мм, высота 14 мм); 8 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 10×1 мм, оребренных прямоугольными ребрами (толщина ребер 0,3 мм, шаг 2,7 мм, размер: $13,5 \times 13,5$ мм); 9, 10 — поперечное обтекание пучка трубок $16 \times 6,4$ мм удобообтекаемой формы, оребренных гладкими пластинами; расстояние между пластинами 2,0 мм, расположение трубок — шахматное ($F_1 = 7,16$ мм, $F_2 = 13,5$ мм); 11 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 10×1 мм, оребренных проволочной спиралью ($d_h = 0,4$ мм, $F_1 = 14,0$ мм, $F_2 = 12,1$ мм); 12 — поперечное обтекание пучка гладких плоских трубок 109×31 мм с шахматным расположением ($F_1 = 77$ мм, $F_2 = 115$ мм); 13 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 12×1 мм, оребренных петлями из проволоки ($d_h = 0,69$ мм, наружный диаметр оребрения 28 мм, шаг витков 8,5 мм; $F_1 = 31,5$ мм, $F_2 = 27,0$ мм)

Рис. 86. Коэффициент гидравлического сопротивления для различных поверхностей теплообмена при движении жидких теплоносителей

1 — поток жидкости в круглых трубках $5 \times 0,5$ м.м.; 2 — продольное внешнее обтекание трубок 10×1 м.м. с шахматным расположением ($F_z/d = F_z/d = 1,3$); 3 — поток жидкости между гладкими пластины; 4 — поперечное обтекание круглых трубок 10×1 м.м. с шахматным расположением ($F_z/d = 1,3$, $F_z/d = 1,13$) под углом 60° ; 5 — поперечное обтекание круглых трубок 10×1 м.м. с шахматным расположением ($F_z/d = 1,3$, $F_z/d = 1,13$); 6 — поток жидкости в гладких плоских трубках $26,5 \times 4,3$ м.м.; 7 — поток жидкости в круглых трубках 10×1 м.м. со вставками в виде пластины; 8 — поперечное обтекание круглых трубок 10×1 м.м. при коридорном расположении ($F_z/d = F_z/d = 1,3$); 9 — поток жидкости в круглых трубках 14×1 м.м.; 10 — поперечное обтекание круглых трубок $5 \times 0,5$ м.м., обернутых пластины; 11 — поток жидкости в плоских трубках с лунками; 12 — поток жидкости в круглых трубках со спирально-проволочными турбинами; 13 — поток жидкости в круглых трубках 44×2 м.м. с шайбами; 14 — поток жидкости в плоских трубках с решетками; 15 — поток жидкости между гофрированными пластины; 16 — поток жидкости в круглых трубках 10×1 м.м.



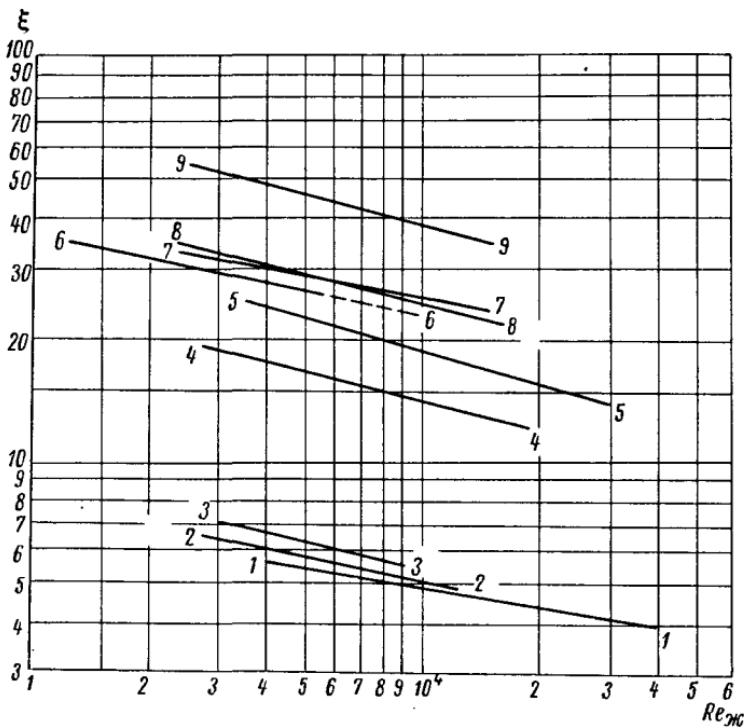


Рис. 87. Коэффициент гидравлического сопротивления в газожидкостных теплообменных аппаратах по стороне газа

1 — продольное обтекание пучка круглых трубок 16×1 мм, оребренных снаружи 12 продольными ребрами высотой 17 мм; 2 — поперечное обтекание плоских трубок $22 \times 3,0$ мм с коридорным расположением, оребренных сплошными листами ($f = 2,6$ мм, $F_1 = 11$ мм; $F_2 = 26,5$ мм); 3 — поперечное обтекание удобообтекаемых гладких трубок 100×20 мм с шахматным расположением ($F_1 = 40$ мм, $F_2 = 66$ мм); 4 — поперечное обтекание удобообтекаемых трубок $16 \times 6,4$ мм с шахматным расположением, оребренных гладкими пластинами ($f = 2,0$ мм, $F_1 = 7,16$ мм, $F_2 = 13,5$ мм); 5 — поперечное обтекание пучка круглых иеборененных трубок 10×1 мм с шахматным расположением ($F_1/d = 1,3$, $F_2/d = 1,13$); 6 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 10×1 мм с шахматным расположением, оребренных сплошными листами ($I_{пл} = 0,3$ мм, $f = 3,0$ мм, $F_1/d = 2,15$, $F_2/d = 2,5$); 7 — поперечное обтекание пучка круглых трубок 12×1 мм с шахматным расположением, оребренных проволочными петлями ($d_{пр} = 0,69$ мм, наружный диаметр оребрения 28 мм, $f = 8,5$ мм, $F_1/d = 2,62$, $F_2/d = 2,25$); 8 — то же, оребренных прямоугольными ребрами $13,5 \times 13,5$ мм ($f = 2,7$ мм, $I_{пл} = 0,3$ мм, $F_1/d = F_2/d = 1,7$); 9 — поперечное обтекание пучка круглых трубок, оребренных спиральной лентой $I = 6$ мм ($f = 2,2$ мм, $I_{пл} = 0,4$ мм, $F_1/d = 2,43$, $F_2/d = 2,0$)

позволяют произвести оптимальный выбор поверхностей теплообмена со стороны греющей и охлаждающей сред. Важным фактором при разработке конструкции является также метод теплового сопряжения поверхности теплообмена с коммутационными пластинами термоэлементов. Например, при использовании трубчатых поверхностей теплообмена более целесообразным следует считать

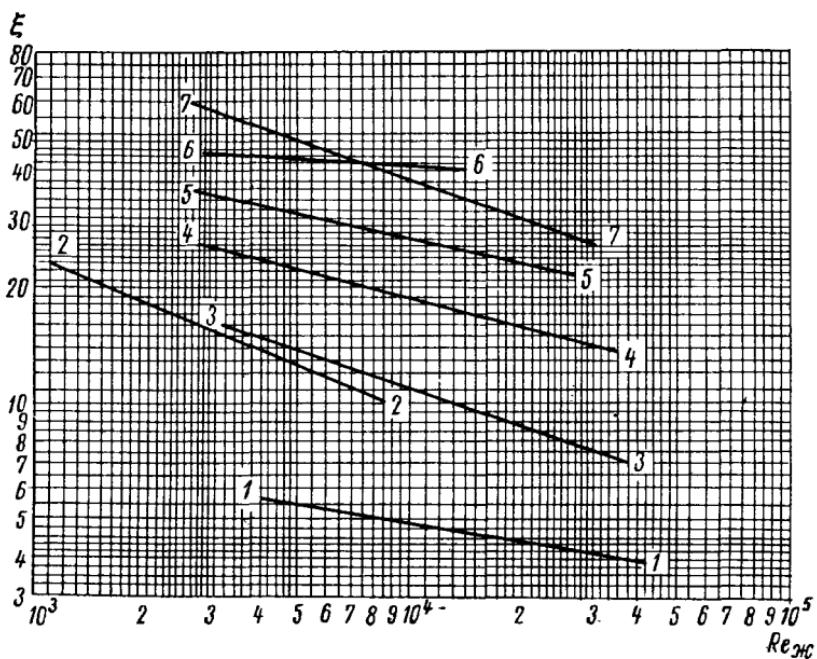


Рис. 88. Коеффициент гидравлического сопротивления для различных поверхностей теплообмена при движении газовых теплоносителей

1 — поток внутри круглых гладких трубок; 2 — пластинчатые аппараты с обрением гофрированными листами, имеющими выштамповки на гофрах; 3 — пластинчатые аппараты с овалообразными выступами, поток по волнистым каналам; 4 — попечное обтекание пучка круглых трубок с шахматным расположением ($F_1/d = 1,3$, $F_2/d = 1,3$); 5 — попечное обтекание пучка круглых трубок с коридорным расположением ($F_1/d = F_2/d = 1,3$); 6 — пластинчатые аппараты с проволочным обрением; 7 — пластинчатые аппараты с полусферическими луиками

применение кольцевых или секторных термоэлементов, в то время как плоские теплообменные поверхности более рационально компонуются с термоэлементами, имеющими плоское или цилиндрическое сечение стержней.

Естественно, что многообразие требований, предъявляемых к термоэлектрическим устройствам, едва ли позволит осуществить разработку типовых конструкций тепловых сопряжений. Тем не менее вопросы теплового сопряжения теплообменных поверхностей с термоэлементами не менее важны, чем выбор оптимальной конструкции термоэлементов или поверхностей теплообмена.

§ 13. КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Выбор конструкционных материалов определяется характеристиками теплоносителя и охладителя, используемым источником тепловой энергии (в случае термоэлектрогенератора), рабочими температурами, конструкцией термоэлементов, технологическими и эксплуатационными требованиями, а также рядом других факторов.

$\lambda, \text{вт}/\text{м град}$

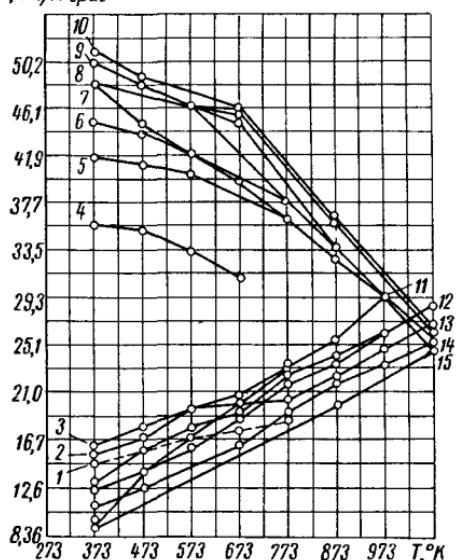


Рис. 89. Коэффициент теплопроводности стали различных марок и титана.

1 — титан; 2 — Х5; 3 — Х18Н9Т; 4 — 30ХМ; 5 — 30Х; 6 — 15М; 7 — сталь 30; 8 — сталь 45; 9 — сталь 40; 10 — сталь 20; 11 — ХН70ВМТ; 12 — ХН80ТБЮ; 13 — ХН77ТЮР; 14 — ХН70ВМТЮ; 15 — ХН70ВМТЮР.

$c_p, \text{кал}/\text{кг град}$

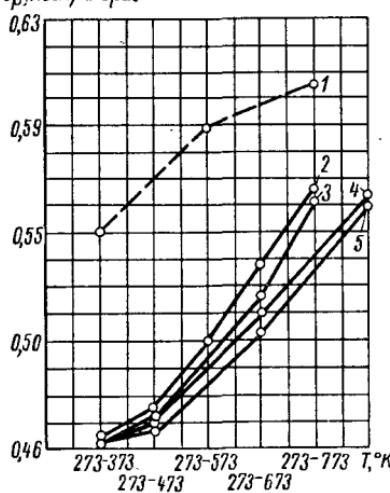


Рис. 90. Средняя теплоемкость стали различных марок и титана.

1 — титан; 2 — 3Х13; 3 — сталь 20; 4 — сталь 3; 5 — сталь 35; сталь 40; 5 — сталь 10.

Главный и определяющий критерий при выборе конструкционных материалов — их совместимость с греющей и охлаждающей средами, а также механические и теплофизические характеристики. На рис. 89 и 94 приведены основные теплофизические и механические характеристики различных металлов и сплавов, наиболее употребимых при разработке конструкций теплообменных аппаратов [18], [31].

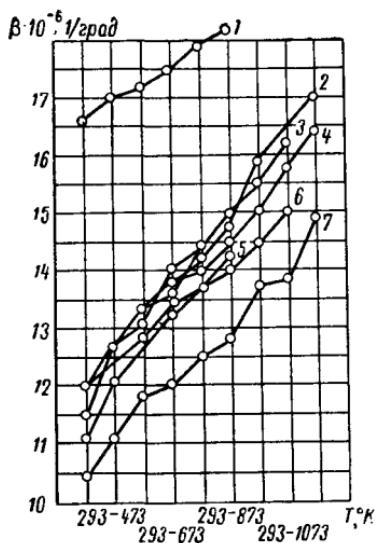


Рис. 91. Коэффициент линейного расширения стали различных марок.

1 — X18H9T; 2 — XН70ВМТЮ; 3 — XН80ТБЮ; 4 — XН70ВМТО; 5 — сталь 20; 6 — XН77ТЮР; 7 — ЭН607ВМТЮ



Рис. 92. График зависимости коэффициента теплопроводности цветных металлов и сплавов от температуры

1 — алюминий Al; 2 — Al 94—96%, Cu 3—5%, Mg 0,5%; 3 — Al 80%, Si 20%; 4 — Al 92%, Mg 8%; 5 — Cu 60%, Zn 40%; 6 — Cu 90%, Zn 10%; 7 — ЛС59-1В; 8 — ЛАН59-3-2; 9 — Cu 67%; Zn 33%; 10 — Cu 70%; Zn 30%

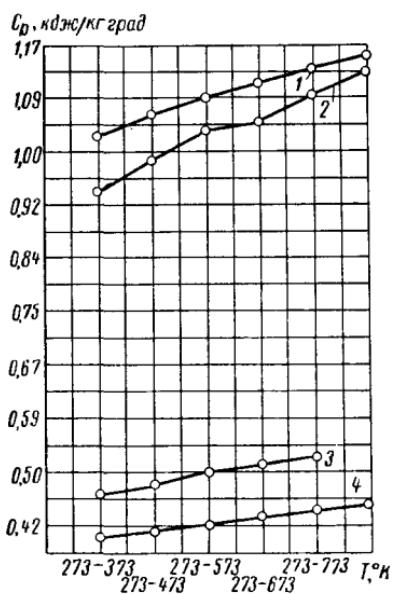


Рис. 93. График зависимости средней теплоемкости цветных металлов от температуры

1 — магний; 2 — алюминий; 3 — никель; 4 — медь.

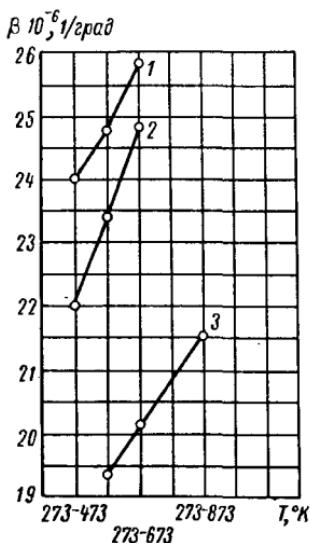


Рис. 94. График зависимости коэффициента линейного расширения цветных металлов от температуры

1 — алюминий, сплав АМц; 2 — сплавы Д-1, Д-18; 3 — сплав Си 70%, Zn 30%

В судовых термоэлектрических устройствах, так же как и в большинстве теплообменных аппаратов, для охлаждения целесообразно использовать морскую воду, температура которой может колебаться в широких пределах: от 271 до 301° К. Известно, что существуют значительные различия в солесодержании морской воды в отдельных районах мирового океана, обусловливающие разницу ее теплофизических характеристик. Поэтому при использовании морской воды необходимо учитывать следующие факторы:

1. Наличие нерастворимых взвесей (ил, песок) и микроорганизмов.

2. Ограничение по температуре нагревания во избежание солеотложений на поверхностях теплообмена.

3. Коррозионное воздействие на конструкционные материалы, зависящее от состава примесей, скорости движения воды и характеристик материалов.

В связи с существенным влиянием воды на интенсивность коррозионных процессов ее скорость обычно приходится ограничивать. Так, при движении морской воды в трубках из сплава МН70-30 (мельхиор) ее скорость не должна превышать 3 м/сек; в трубках из сплава ЛЮ68 (латунь) — 1,8 м/сек и меди МЗС — 0,9 м/сек [3].

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Разработка конструкции и выбор оптимальных электроизоляционных материалов — наиболее сложные задачи, которые необходимо решить при конструировании термоэлектрических устройств. Физические свойства электроизоляционного материала при прочих равных условиях оказывают существенное влияние на величины температурного перепада и токов утечки, конструкционные и эксплуатационные характеристики термоэлектрических устройств.

Поскольку между классами веществ нет твердо установленных границ, к изоляторам относят материалы, проводимость которых примерно в 10^{16} раз меньше, чем проводимость металлических проводников.

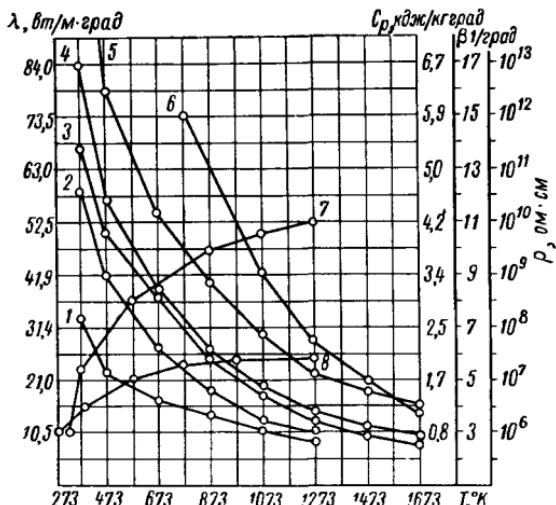
Практически электроизоляционными свойствами могут обладать вещества, находящиеся при нормальных условиях в различных агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном.

Примером твердых изоляторов служат атомные кристаллы серы, ионные кристаллы кварца и слюды, молекулярные кристаллы парафина, аморфное стекло, многие высокомолекулярные вещества: резина, янтарь, целлULOид. К числу жидкких изоляторов относятся углеводороды, кремнийорганические соединения и др. Большинство газообразных веществ также обладает этими качествами.

Следует отметить, что электроизоляционные свойства материалов могут претерпевать существенные изменения под воздействием ряда факторов, особенно температуры. Влияние последней на-

Рис. 95. График зависимости коэффициента теплопроводности, теплоемкости, коэффициента линейного расширения и удельного электрического сопротивления окиси бериллия от температуры.

1 — теплопроводность при удельном весе $1,89 \text{ г/см}^3$; 2 — теплопроводность при удельном весе $2,00 \text{ г/см}^3$; 3 — теплопроводность при удельном весе $2,11 \text{ г/см}^3$; 4 — теплопроводность при удельном весе $2,16 \text{ г/см}^3$; 5 — теплопроводность при удельном весе $2,87 \text{ г/см}^3$; 6 — удельное электрическое сопротивление; 7 — коэффициент линейного расширения; 8 — теплоемкость.



столько существенно, что при высоких ее значениях выбор электроизоляционных материалов превращается в трудноразрешимую проблему.

В термоэлектрических устройствах находят применение почти все известные электроизоляционные материалы, а также элек-

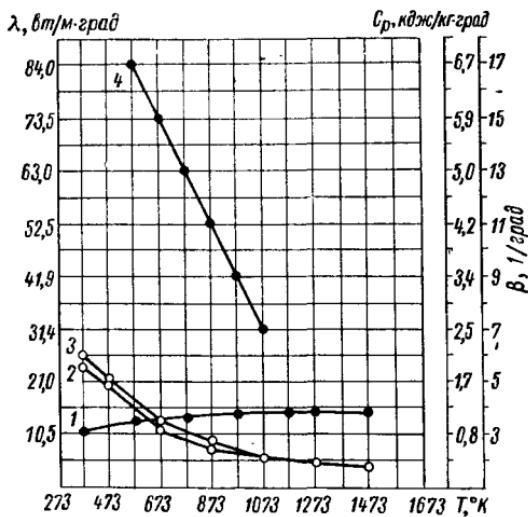


Рис. 96. График зависимости коэффициента теплопроводности, теплоемкости и коэффициента линейного расширения двуокиси алюминия от температуры

1 — теплоемкость; 2 — теплопроводность при удельном весе $3,7 \div 3,81 \text{ г/см}^3$ (пористость $4,5 \div 7,5\%$); 3 — теплопроводность при удельном весе $3,9 \text{ г/см}^3$ (пористость 0%); 4 — коэффициент линейного расширения.

троизоляционные покрытия. Подробный анализ их свойств приводится в специальной технической литературе. Здесь же мы ограничимся иллюстрацией теплофизических характеристик наиболее употребительных электроизоляционных материалов, которые в графическом виде показаны на рис. 95, 96 и приведены в табл. 9 [23], [31], [38], [40].

Таблица 9

**Некоторые теплофизические свойства
отдельных электроизоляционных материалов**

Наименование материала	Удельный вес γ , $\text{г}/\text{см}^3$	Коэффициент теплопроводности λ , $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$	Теплоемкость c' , $\text{кал}/\text{кг}\cdot\text{град}$	Удельное объемное электрическое сопротивление при 293°K ρ , $\text{ом}\cdot\text{см}$	Электрическая прочность, $\text{kV}\cdot\text{мм}$
Бакелит (гетинакс) листовой	1,3÷1,4	0,45÷0,55	0,096	10^{11} — 10^{14}	10—20
Бумага кабельная сухая	0,8	0,103	0,086	10^{13} — 10^{14}	6—9
Карболит	1,1÷1,2	0,102	—	10^{11} — 10^{13}	10—12
Миканит	22	0,155÷0,300	—	10^{15}	15—20
Слюдя	2,8÷3,2	0,344÷0,430	0,0435	10^{14}	80—150
Пресс-материал АГ-4	1,7÷1,8	—	—	10^{12}	13
Полиэтилен марки ПЭ	0,92	0,0009	—	10^{17}	40
Полиэтилен марки НД	0,93	0,0009	—	10^{17}	40
Фторопласт-4	2,15÷2,20	0,18÷0,19	—	10^{17} — 10^{22}	—
Фторопласт-3	2,09÷2,16	0,043	—	$1,2 \cdot 10^{18}$	—
Фторопласт-3М	2,02	—	—	$2,0 \cdot 10^{17}$	23—25

§ 14. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

Управление и регулирование судовой термоэлектрической установкой представляют собой комплекс мероприятий, обеспечивающих ее маневренные характеристики, поддержание в требуемом диапазоне или изменение по заданной программе теплотехнических и электрических параметров, а также предотвращение

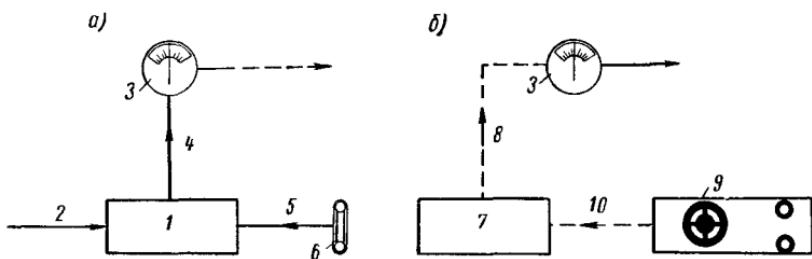


Рис. 97. Структура систем ручного регулирования (a) и управления (b).

1 — объект регулирования; 2 — внешнее воздействие; 3 — показывающий прибор; 4 — регулируемая величина; 5 — регулирующее воздействие; 6 — ручной привод; 7 — объект управления; 8 — контрольное воздействие; 9 — орган ручного воздействия; 10 — управляемое воздействие

или локализацию аварийных ситуаций [9]. В соответствии с этим системы, аппаратура и устройства, предназначенные для управления и регулирования, разбиваются на группы с определенным целевым назначением:

- автоматический контроль;
- автоматическая защита и блокировка;
- автоматическое (дистанционное) управление;
- автоматическое регулирование.

Структура систем регулирования и управления (ручной и автоматической) показана на рис. 97 и 98.

Взаимосвязь отдельных элементов этих систем может быть иллюстрирована на примере конкретных схем применительно к термоэлектрической установке с источником энергии на органическом топливе, которая используется в качестве вспомогательной судовой электротропогенерирующей установки (рис. 99), и атомной

термоэлектрической установки (рис. 100), предназначенной для использования в качестве привода гребного винта.

Объектами регулирования судовых термоэлектрических устройств и установок являются источники энергии и термоэлектрические преобразователи и приемники энергии. К объектам

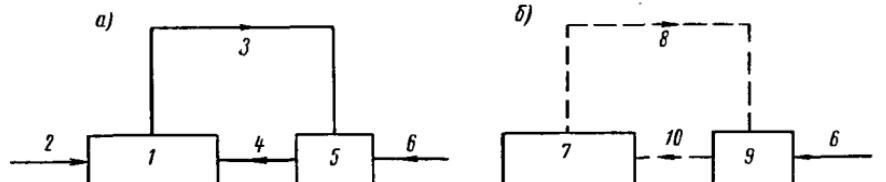


Рис. 98. Структура систем автоматического регулирования (а) и управления (б)

1 — объект регулирования; 2 — внешние воздействия; 3 — регулируемая величина; 4 — регулирующее воздействие; 5 — регулятор; 6 — задающее воздействие; 7 — объект управления; 8 — контрольное воздействие; 9 — орган ручного управления; 10 — управляющее воздействие

регулирования относятся также коммуникации, емкости, аккумуляторы и другие элементы.

Задачей автоматического регулирования является поддержание в заранее оговоренном диапазоне тепловых и электрических параметров объектов регулирования в процессе эксплуатации энергетической установки или устройства.

Выбор той или иной системы управления и автоматического регулирования за-



Рис. 99. Структурная схема автоматического регулирования и управления вспомогательной термоэлектрической установкой на органическом топливе

1 — арматура управления форсунками; 2 — механические форсунки; 3 — газокамерный термоэлектрогенератор; 4 — регулятор напряжения; 5 — регулятор перепада давления топлива; 6 — подогреватель топлива; 7 — топливный насос; 8 — топливный бак; 9 — регулирующий топливный клапан

висит от типа и назначения термоэлектрического устройства или установки, от количества режимов работы и ряда других требований.

Термоэлектрические устройства и установки относительно небольшой мощности, предназначенные для обеспечения электроэнергией навигационных приборов, аппаратуры и некоторых

других систем, работают на каком-то одном режиме, определяемом электрическими характеристиками нагрузки. В этих случаях система автоматического регулирования либо полностью отсутствует, либо поддерживает постоянными электрические параметры режима при изменении внешних условий (температуры забортной воды, воздуха и т. д.).

Несколько более сложные функции имеют системы автоматического регулирования и управления термоэлектрических холо-

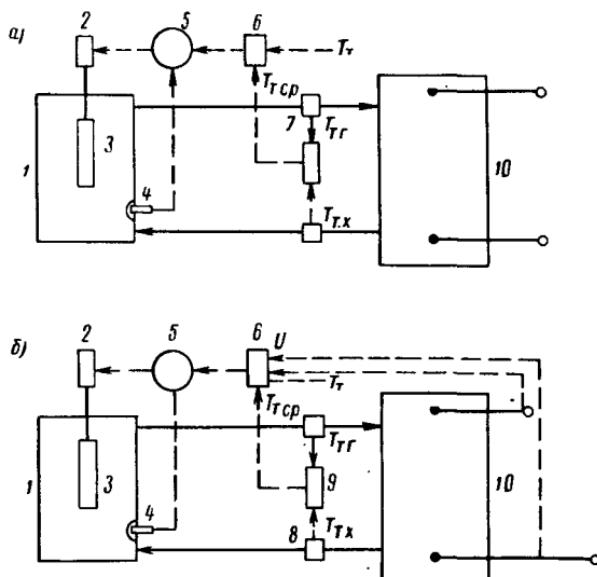


Рис. 100. Структурная схема автоматического регулирования и управления главной термоэлектрической установкой с ядерным источником энергии: *а* — с системой косвенного регулирования; *б* — с системой прямого регулирования
1 — ядерный реактор; 2 — привод регулирующего стержня; 3 — регулирующий стержень; 4 — датчик нейтронного потока (ионизационная камера); 5 — сравнивающее устройство; 6 — регулятор; 7 — измеритель температуры горячего теплоносителя; 8 — измеритель температуры холодного теплоносителя; 9 — датчик средней температуры теплоносителя; 10 — термоэлектропреобразователь.

дильников и установок термоэлектрического кондиционирования. Возможные колебания температур нагреваемой и охлаждающей сред, в ряде случаев весьма значительные, обусловливают необходимость быстрого перехода из режима нагревания в режим охлаждения (установки кондиционирования воздуха) и требуют тщательного выбора статических и динамических характеристик систем автоматического регулирования.

Еще более сложные задачи возлагаются на системы автоматического регулирования и управления судовыми термоэлектрическими установками, предназначенными для использования в качестве вспомогательных судовых электростанций или для обеспечения движения судна с одновременным снабжением электроэнергией

вспомогательных механизмов энергетической установки и общесудовых потребителей.

Для вывода основных теоретических зависимостей, позволяющих обосновать возможные методы регулирования мощности термоэлектрических устройств, рассмотрим их характеристики при различных режимах работы.

Как указывалось ранее, реальные характеристики термоэлектрогенераторов с учетом ряда конструктивных факторов могут отличаться от соответствующих теоретических характеристик [4]. Это различие объясняется тем, что при рассмотрении реальных конструкций приходится учитывать такие явления, как неизотермичность поверхностей теплообмена, зависимость электрического сопротивления полупроводниковых стержней и коммутационных пластин от температуры, возникновение токов утечки вследствие шунтирующего влияния слоев электроизоляционного материала.

Рассмотрим влияние этих факторов на характеристики термоэлектрической цепи.

Будем считать, что неизотермичность поверхностей теплообмена термоэлектрогенератора, обусловленная микронеравномерностями температур, пренебрежимо мала. В таком случае необходимо учитывать лишь неизотермичность, причина которой заключается в разности температур сред на входе и выходе из рассматриваемого участка поверхностей теплообмена.

При движении теплоносителя и охлаждающей среды внутри трубок точное значение усредненной по всему объему потока температуры можно определить по формуле

$$T = \frac{1}{l} \int_0^l \bar{T}(x) dx {}^\circ\text{K},$$

причем

$$\bar{T}(x) = \frac{2}{c_p R_0^2 w} \int_0^{R_0} c_p w T R dR \text{ и } \bar{w} = \frac{2}{\gamma R_0^2} \int_0^{R_0} \gamma w R dR,$$

где c_p — объемная теплоемкость среды, $\text{кдж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$;

R_0 — внутренний радиус трубки, м ;

γ — удельный вес среды, $\text{кГ}/\text{м}^3$;

w — скорость потока, $\text{м}/\text{сек}$;

l — длина трубки, м .

Таким образом, средние температуры спаев термоэлементов с учетом неизотермичности могут быть найдены из соотношений

$$\bar{T}_{\text{тр}} = \frac{1}{l} \int_0^l T_{\text{тепл}}(x) dx - \frac{\bar{q}_{\text{тр}}}{k_{\text{тр}}} {}^\circ\text{K},$$

$$\bar{T}_{\text{х}} = \frac{1}{l} \int_0^l T_{\text{охл}}(x) dx + \frac{\bar{q}_{\text{тх}}}{k_{\text{тх}}} {}^\circ\text{K}.$$

При этом с учетом контактного электрического сопротивления коммутации

$$\bar{z} = \left(\sqrt{\frac{\bar{\sigma}_{sp} + \bar{\sigma}_{sn}}{\frac{\bar{\lambda}_p}{\bar{\sigma}_p + \frac{l_{пп}}{r_{p \text{ конт}}}} + \sqrt{\frac{\bar{\lambda}_r}{\bar{\sigma}_n + \frac{l_{пп}}{r_{n \text{ конт}}}}}}} \right)^2 \text{ 1/град}$$

и

$$q_{Tr} = f_1(\bar{z}); q_{Tx} = f_2(\bar{z}),$$

где $r_{p \text{ конт}}$ и $r_{n \text{ конт}}$ — удельное электрическое контактное сопротивление стержней p - и n -типов, $\text{ом} \cdot \text{см}^2$.

Для вывода зависимостей, характеризующих взаимосвязь величин тока и напряжения термоэлектрической цепи, рассмотрим влияние температур спаев \bar{T}_r и \bar{T}_x на внутреннее электрическое сопротивление термоэлементов.

В реальных конструкциях термоэлектрических устройств внутреннее электрическое сопротивление термоэлементов представляет собой сумму электрических сопротивлений полупроводниковых стержней:

$$r_{пп} = r_{пп, н} \frac{\frac{\bar{\lambda}_p}{\bar{\lambda}_p \sigma_p F_p} + \frac{\bar{\lambda}_n}{\bar{\lambda}_n \sigma_n F_n}}{\frac{\bar{\lambda}_{p, н}}{\bar{\lambda}_{p, н} \sigma_{p, н} F_p} + \frac{\bar{\lambda}_{n, н}}{\bar{\lambda}_{n, н} \sigma_{n, н} F_n}} \text{ ом}$$

и контактных электрических сопротивлений коммутации $r_{p \text{ конт}}$ и $r_{n \text{ конт}}$, которые будем считать постоянными и не зависящими от температуры, и электрических сопротивлений горячей

$$r_k^r = r_{k, н}^r [1 + f_k^r (\bar{T}_r - \bar{T}_{r, н})] \text{ ом}$$

и холодной коммутационных пластин

$$r_k^x = r_{k, н}^x [1 + f_k^x (\bar{T}_x - \bar{T}_{x, н})] \text{ ом},$$

где $r_{пп, н}$ — номинальное электрическое сопротивление полупроводниковых стержней термоэлемента, ом ;

$r_{k, н}^r$, $r_{k, н}^x$, r_k^r , r_k^x — номинальное электрическое сопротивление коммутационных пластин, ом ;

f_k^r , f_k^x — температурный коэффициент электрического сопротивления материала коммутационных пластин, $1/\text{град}$;

$\bar{T}_{r, н}$, $\bar{T}_{x, н}$ — номинальное значение температур спаев, $^{\circ}\text{К}$; $\bar{\lambda}_{p, н}$, $\bar{\lambda}_{n, н}$ — среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности полупроводникового материала в диапазоне температур $T_{r, н} - T_{x, н}$, $\text{вт}/\text{м} \cdot \text{град}$;

$\overline{\lambda_{ph}\sigma_{ph}}$, $\overline{\lambda_{nh}\sigma_{nh}}$ — среднеинтегральная величина произведения коэффициента теплопроводности и удельной электрической проводимости полупроводникового материала в диапазоне температур $T_{g,h} - T_{x,h}$, $a^2/cm^2 \cdot \text{град}$.

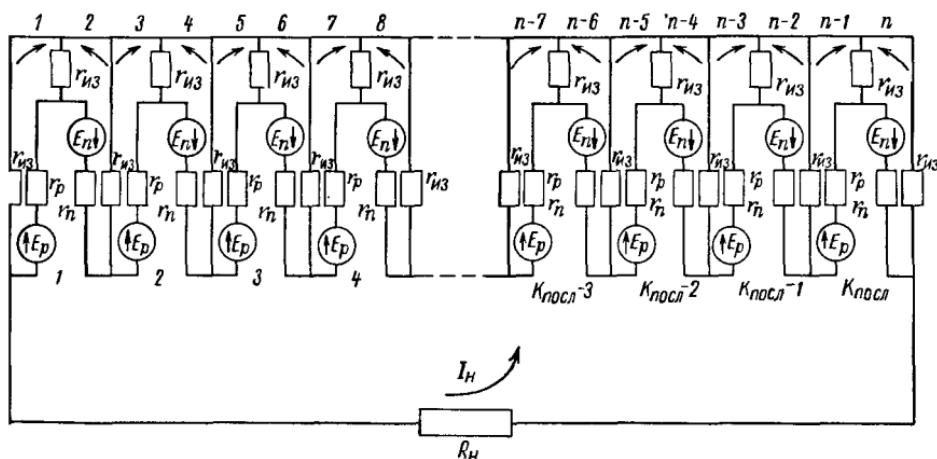


Рис. 101. Эквивалентная электрическая схема термоэлектрогенератора, используемая для расчета токов утечки по методу контурных токов

Таким образом, зависимость электрического сопротивления термоэлемента от температур \bar{T}_r и \bar{T}_x может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \bar{r} &= r_{ph} + r_k^r + r_k^x + r_p \text{ конт} + r_n \text{ конт} = r_{ph} \times \\ &\times \frac{\frac{\bar{\lambda}_p}{\bar{\lambda}_p \sigma_p F_p} + \frac{\bar{\lambda}_n}{\bar{\lambda}_n \sigma_n F_n}}{\frac{\bar{\lambda}_{ph}}{\bar{\lambda}_{ph} \sigma_{ph} F_p} + \frac{\bar{\lambda}_{nh}}{\bar{\lambda}_{nh} \sigma_{nh} F_n}} + \\ &+ r_{k,h}^r [1 + f_k^r (\bar{T}_r - \bar{T}_{g,h})] + r_{k,h}^x [1 + f_k^x (\bar{T}_x - \bar{T}_{x,h})] \text{ ом.} \end{aligned} \quad (83)$$

Рассмотрим далее, как влияют на характеристики термоэлектрогенератора токи утечки. Если представить эквивалентную электрическую схему термоэлектрической батареи с учетом утечки тока через электроизоляцию так, как это показано на рис. 101, то для расчетной оценки можно использовать метод контурных токов, сущность которого применительно к термоэлектрической цепи состоит в следующем. Составим на основании эквивалентной электрической схемы систему из $n = 2k_{\text{посл}}$ уравнений, которая в общей форме имеет вид

$$I_k = \frac{\Delta_{k1}}{\Delta} E_1 + \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} E_2 + \cdots + \frac{\Delta_{kn}}{\Delta} E_n \text{ а,}$$

где

$$E_k = I_1 \bar{r}_{k1} + I_2 \bar{r}_{k2} + \cdots + I_n \bar{r}_{kn} \text{ в;}$$

Δ — определитель системы;

$$\Delta = \begin{vmatrix} \bar{r}_{11} & \dots & \bar{r}_{1k} & \dots & \bar{r}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \bar{r}_{k1} & \dots & \bar{r}_{kk} & \dots & \bar{r}_{kn} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \bar{r}_{n1} & \dots & \bar{r}_{nk} & \dots & \bar{r}_{nn} \end{vmatrix}$$

$\Delta_{k1}, \dots, \Delta_{k2}, \dots, \Delta_{kn}$ — алгебраические дополнения (миноры), получаемые вычеркиванием из Δ k -й строки и n -го столбца с последующим умножением получаемого определителя на $(-1)^{k+n}$.

Если считать далее, что все электрические сопротивления линейны и что

$$\begin{aligned} E_{pi} &= E_{ni} = E \text{ в;} \\ \bar{r}_{pi} &= \bar{r}_{ni} = \bar{r} \text{ ом,} \end{aligned}$$

то из уравнения контурного тока для цепи нагрузки

$$I_u (R_h + 2k_{\text{посл}} \bar{r}) + \bar{r} \sum_{k=1}^{k=n} I_{kk} = 2k_{\text{посл}} E$$

можно получить

$$I_u = \frac{2k_{\text{посл}} E - \bar{r} \left(\frac{\Delta_{k1}}{\Delta} E_1 + \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} E_2 + \cdots + \frac{\Delta_{kn}}{\Delta} E_n \right)}{R_h + 2k_{\text{посл}} \bar{r}} a.$$

Рассмотренный метод расчета токов утечки, позволяющий оценить степень их влияния на характеристики термоэлектрической цепи, практически может быть использован лишь при небольших значениях $k_{\text{посл}}$, что ограничивает возможности его применения. В связи с этим выведем универсальные теоретические зависимости, позволяющие с достаточной для практики точностью рассчитать токи утечки термоэлектрогенератора.

Представим эквивалентную электрическую схему термоэлектрогенератора, показанную на рис. 102. Будем считать, как и ранее, что имеется k последовательно соединенных термоэлементов, состоящих из ветвей p - и n -типов. При этом

$$\begin{aligned} E_{pi} + E_{ni} &= E \text{ в;} \\ \bar{r}_{pi} + \bar{r}_{ni} &= \bar{r} \text{ ом.} \end{aligned}$$

Предположим далее, что термоэдс батареи, равно как и внутреннее электрическое сопротивление термоэлементов, могут быть

условно заменены равномерно распределенными по длине l точечными источниками э. д. с. и электрическими сопротивлениями так, что

$$E_l = \frac{k_{\text{посл}}}{l} E \text{ в/см};$$

$$\bar{r}_l = \frac{k_{\text{посл}}}{l} r \text{ ом/см}.$$

С учетом вышеизложенного составим систему дифференциальных уравнений исходя из приведенной эквивалентной электрической схемы. Нетрудно установить, что изменение напряжения при переходе из точки 2 в точку 1 на участке dx составляет

$$U_2 - U_1 = (U_1 + dU) - U_1 = dU.$$

Следовательно, первое уравнение может быть получено в виде

$$\frac{dU}{dx} + I\bar{r}_l = E_l$$

или окончательно

$$\frac{dU}{dx} + k_{\text{посл}} \frac{\bar{r}}{l} I = \\ = \frac{k_{\text{посл}}}{l} E.$$

Для вывода второго уравнения имеем

$$I_2 - I_1 = \\ = I_2 - (I_2 - dI) = dI.$$

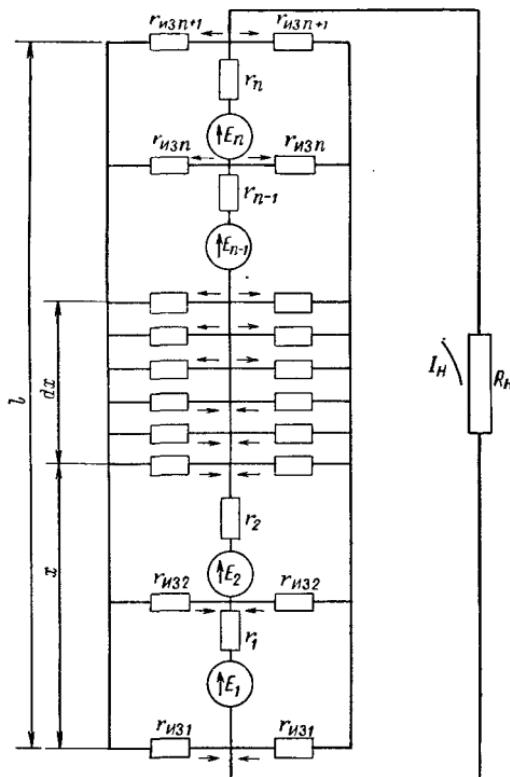
Рис. 102. Эквивалентная электрическая схема термоэлектрогенератора, используемая для расчета токов утечки по универсальным зависимостям

Поскольку изменение силы тока на участке dx вызвано исключительно наличием утечек тока через изоляцию, то

$$dI + \frac{U}{\frac{\rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}{2b_{\text{из}}} dx} = 0$$

или окончательно

$$\frac{dI}{dx} + \frac{2b_{\text{из}}}{\rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}} U = 0,$$



где $\rho_{из}$ — удельное электрическое сопротивление изоляции при рабочей температуре, $\text{ом}\cdot\text{см}$;

$\delta_{из}$ — толщина электрической изоляции, см ;

$b_{из}$ — ширина слоя электрической изоляции (геометрический размер, измеряемый перпендикулярно l), см .

Дифференцируя первое уравнение по x и подставляя в него значение $\frac{dI}{dx}$ из второго уравнения, можно получить линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2U}{dx^2} - 2 \frac{k_{посл} b_{из} r}{\rho_{из} \delta_{из} l} U = 0. \quad (84)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$U = C_1 e^{\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r}{\rho_{из} \delta_{из} l}} x} + C_2 e^{-\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r}{\rho_{из} \delta_{из} l}} x},$$

что для силы тока в любой точке x позволяет получить зависимость

$$I = \frac{E}{r} - \frac{\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r l}{\rho_{из} \delta_{из}}} \times}{k_{посл} r} \times \\ \times \left(C_1 e^{\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r}{\rho_{из} \delta_{из} l}} x} - C_2 e^{-\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r}{\rho_{из} \delta_{из} l}} x} \right).$$

Для определения произвольных постоянных интегрирования C_1 и C_2 введем граничные условия: при $x = 0$ $U = 0$; при $x = l$ $U = I_n \cdot R_n$. Эти условия позволяют для определения произвольных постоянных интегрирования получить систему линейных уравнений первой степени

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 0; \\ C_1 e^{\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r l}{\rho_{из} \delta_{из}}} l} + C_2 e^{-\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r l}{\rho_{из} \delta_{из}}} l}. \end{cases} \quad (85)$$

Решение этой системы дает следующие зависимости:

$$C_1 = -C_2 = \frac{I_n R_n}{e^{\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r l}{\rho_{из} \delta_{из}}} l} - e^{-\sqrt{2 \frac{k_{посл} b_{из} r l}{\rho_{из} \delta_{из}}} l}}.$$

Таким образом

$$U = \frac{I_{\text{н}} R_{\text{н}}}{e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e} \times \\ \times \left(e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}} l}} x - e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}} l}} x \right);$$

$$I = \frac{E}{\bar{r}} - \frac{\frac{I_{\text{н}} R_{\text{н}}}{k_{\text{посл}}} \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}}}{e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e} \times \\ \times \left(e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}} l}} x + e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}} l}} x \right).$$

Введем теперь формулу для определения $I_{\text{н}}$ с учетом утечки тока через изоляцию. Для этого положим $x = l$. При этом $I = I_{\text{н}}$. Тогда

$$I_{\text{н}} = \frac{\frac{k_{\text{посл}} E}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e} \cdot e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}}}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} + e} \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}}};$$

$$R_{\text{н}} + \frac{\frac{k_{\text{посл}} E}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e} \cdot e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}}}}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} + e} \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}} - e \sqrt{\frac{k_{\text{посл}} b_{\text{из}} \bar{l}}{2 \rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}}}$$

или поскольку

$$\bar{r}_{\text{из}} = \frac{\rho_{\text{из}} \delta_{\text{из}}}{2 b_{\text{из}} l}$$

$$I_{\text{н}} = \frac{\frac{k_{\text{посл}} E}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} \bar{r}}{k_{\text{посл}} \bar{r}_{\text{из}}}} - e} \operatorname{th} \left(\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} \bar{r}}{k_{\text{посл}} \bar{r}_{\text{из}}}} \right)}{R_{\text{н}} + \frac{\frac{k_{\text{посл}} E}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} \bar{r}}{k_{\text{посл}} \bar{r}_{\text{из}}}} - e} \operatorname{th} \left(\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} \bar{r}}{k_{\text{посл}} \bar{r}_{\text{из}}}} \right)}}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} \bar{r}}{k_{\text{посл}} \bar{r}_{\text{из}}}} + e} \operatorname{th} \left(\sqrt{\frac{k_{\text{посл}} \bar{r}}{k_{\text{посл}} \bar{r}_{\text{из}}}} \right)}.$$

Наконец введем $k_{\text{экв}} = \frac{k_{\text{посл}} \cdot th \left(\sqrt{\frac{k_{\text{посл}}}{r_{\text{из}}}} \right)}{\sqrt{\frac{k_{\text{посл}}}{r_{\text{из}}}}} \quad (\text{причем } \lim_{\frac{r}{r_{\text{из}}} \rightarrow 0} k_{\text{экв}} = k_{\text{посл}})$. Тогда

$$I_{\text{и}} = \frac{k_{\text{экв}} E}{R_{\text{и}} + k_{\text{экв}} r} = a; \quad U = \frac{k_{\text{экв}} E R_{\text{и}}}{R_{\text{и}} + k_{\text{экв}} r} \theta. \quad (86)$$

Ток утечки может быть определен по формуле

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{и}0} - I_{\text{и}} = \frac{(k_{\text{посл}} - k_{\text{экв}}) E R_{\text{и}}}{(R_{\text{и}} + k_{\text{посл}} r)(R_{\text{и}} + k_{\text{экв}} r)} a$$

или в относительных величинах:

$$\frac{I_{\text{ут}}}{I_{\text{и}0}} = \frac{R_{\text{и}} \left(1 - \frac{k_{\text{экв}}}{k_{\text{посл}}} \right)}{R_{\text{и}} + k_{\text{экв}} r}.$$

Таким образом величина мощности, теряемой вследствие утечек тока через слои электроизоляционного материала:

$$\Delta P = (I_{\text{i}0}^2 - I_{\text{i}}^2) R_{\text{и}} = \frac{(k_{\text{посл}}^2 - k_{\text{экв}}^2) E^2 R_{\text{и}}^3}{(R_{\text{и}} + k_{\text{посл}} r)^2 (R_{\text{и}} + k_{\text{экв}} r)^2} \text{ вт}; \quad (87)$$

$$\frac{\Delta P}{P_{\text{i}0}} = \frac{R_{\text{и}}^2 \left(1 - \frac{k_{\text{экв}}^2}{k_{\text{посл}}^2} \right)}{(R_{\text{и}} + k_{\text{экв}} r)^2}.$$

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Величины утечки тока и эквивалентной потери мощности термоэлектрогенератора зависят от количества последовательно соединенных термоэлементов и отношения внутреннего электрического сопротивления термоэлемента к электрическому сопротивлению изоляции при рабочих температурах.

2. Характер зависимости токов утечки от указанных факторов позволяет утверждать, что при увеличении количества последовательно соединенных термоэлементов и неизменной величине отношения электрических сопротивлений величина токов утечки асимптотически приближается к некоторому предельному значению, которое является максимально возможным для заданных конкретных условий.

В соответствии с полученными выше зависимостями закон Ома для термоэлектрической цепи с учетом рассмотренных факторов может быть представлен в виде уравнения

$$U = \frac{k_{\text{экв}} (\bar{a}_{Sp} + \bar{a}_{Sn})(\bar{T}_r - \bar{T}_x) R_{\text{и}}}{R_{\text{и}} + k_{\text{экв}} r} - L_c \frac{dI}{dt} \theta, \quad (88)$$

где L_c — коэффициент самоиндукции термоэлектрической цепи, гн; t — время, сек.

Отметим также некоторые особенности термоэлектрической цепи, отличающие ее от цепей с другими источниками электроэнергии.

Известно, что в силовых электрических цепях, которые имеют источники электроэнергии с большими э. д. с. и характеризуются относительно небольшими значениями внутренних электрических сопротивлений, весьма опасны режимы короткого замыкания, связанные с возникновением больших токов. В случае термоэлектрической цепи положение обстоит несколько иначе, так как величины внутреннего электрического сопротивления и сопротивления нагрузки имеют здесь один и тот же порядок. Например, при изменении $zT_{\text{ср}}$ от нуля до 1,5 ($T_g = 600^\circ \text{K}$, $T_x = -300^\circ \text{K}$) M_0 меняется в пределах $1,0 \div 1,5$, что ограничивает ток короткого замыкания значениями $2 \div 3I_{n0}$ (рис. 103).

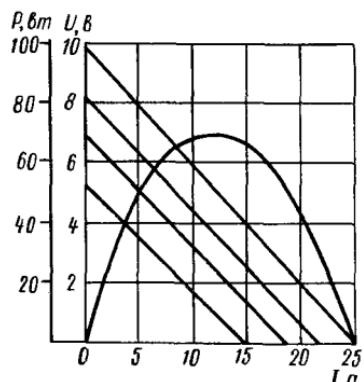


Рис. 103. Статические вольтамперные и нагрузочные характеристики термоэлектрогенератора

щитной аппаратуры, так как используемая в судовой энергетике аппаратура снабжается обычно электромагнитными расцепителями, реагирующими на токи, во много раз превышающие номинальные.

В заключение рассмотрим некоторые особенности термоэлектрической цепи как динамической системы.

В большинстве случаев динамические характеристики электрической цепи определяются величиной индуктивности. В случае термоэлектрической цепи динамические характеристики системы чаще всего определяются теплотехническими процессами, от которых в основном и зависит длительность переходных режимов. К сожалению, несмотря на исключительную важность этих вопросов для судовых термоэлектрогенераторов их расчетная оценка весьма затруднительна ввиду сложной зависимости динамических характеристик от теплотехнических свойств материалов, уровней температур, свойств греющей и охлаждающей сред. Тем более очевидна необходимость тщательной экспериментальной отработки элементов и узлов термоэлектрической системы, особенно в тех случаях, когда она используется в составе главной судовой энергетической установки.

§ 15. ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В зависимости от целевого назначения термоэлектрогенераторы могут быть использованы в качестве:

- источников питания, обеспечивающих длительную непрерывную работу системы при постоянстве основных характеристик;
- источников питания, обеспечивающих поддержание постоянного напряжения в системе;
- источников питания, характеристики которых могут в процессе длительной эксплуатации изменяться в широких пределах.

Во всех этих случаях возникает необходимость использования систем автоматического регулирования и управления, при помощи которых в процессе длительной эксплуатации оказывается возможным поддержание в заданных пределах контролируемых параметров, а также переход системы с одного режима на другой (включая пуск и остановку) по заданной программе.

Практически существуют различные способы регулирования, связанные с изменением значений как теплотехнических, так и электротехнических параметров:

- регулирование изменением температуры горячих спаев термоэлементов;
- регулирование изменением температуры холодных спаев термоэлементов;
- регулирование изменением количества включенных секций термоэлектрогенератора по теплоносителю и охладителю;
- регулирование методом последовательного включения секций термоэлектрогенератора по току;
- регулирование методом параллельного включения секций по току.

Сущность метода регулирования изменением температуры горячих спаев термоэлементов заключается в изменении средней температуры теплоносителя или термического сопротивления на пути теплового потока от теплоносителя к горячим спаям термоэлементов. Изменение термического сопротивления при теплопередаче через газовую или жидкостную прослойку может осуществляться изменением давления среды или иными средствами.

Если термоэлектрогенератор выполнен в виде единого блока с источником тепла (газокамерный термоэлектрогенератор, термоэлектрогенератор, совмещенный с активной зоной ядерного реактора), для изменения его мощности достаточно осуществление регулирования изменением количества выделяемой тепловой энергии с соответствующим изменением температуры горячих спаев термоэлементов.

Будем считать, что во всех этих случаях $T_{\text{охл}} = \text{const}$, что близко к реальным условиям, так как исходя из требований

приемлемой эффективности чаще всего оказывается целесообразным рассчитывать на небольшой нагрев охлаждающей воды.

Выведем некоторые теоретические зависимости изменения мощности термоэлектрогенератора в функции от T_r . Для этого найдем выражение отношения мощностей термоэлемента в функции от теплотехнических характеристик.

Можно установить, что

$$\frac{P}{P_h} = \frac{UI}{U_h I_h} = \frac{(E - Ir) I}{(E_h - I_h r_h) I_h} = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h} \cdot \frac{(M_{0h} + 1)^2}{(M_0 + 1)^2} \cdot \frac{M_0}{M_{0h}} \cdot \frac{\Delta T_{pp}^2}{\Delta T_{pp.h}^2}.$$

Это уравнение в случае регулирования при $U = \text{const}$ может быть записано в виде

$$\frac{P}{P_h} = \frac{I}{I_h} = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h} \cdot \frac{M_{0h} + 1}{M_0 + 1} \cdot \frac{\Delta T_{pp}}{\Delta T_{pp.h}}.$$

Для последующих выводов воспользуемся уравнением энергетического баланса термоэлемента.

В случае, когда регулирование осуществляется изменением величины теплового потока по стороне холодных спаев, можно использовать равенство

$$Q_x = Q_T + Q_{px} + \frac{1}{2} Q_I$$

или

$$k_{T.x}(T_x - T_{oxl}) = k_T \Delta T_{pp} + \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(\alpha_{Sp}^x + \alpha_{Sn}^x)}{(M_0 + 1)r} T_x \Delta T_{pp} + \\ + \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})^2}{2r(M_0 + 1)^2} \Delta T_{pp}^2.$$

Это уравнение после простейших преобразований с помощью зависимости $\frac{P}{P_h} = f\left(\frac{\Delta T_{pp}}{\Delta T_{pp.h}}\right)$ можно привести к виду

$$\frac{T_x}{T_{x.h}} = \frac{k_{T.x} T_{oxl} + a_1 \sqrt{\frac{P}{P_h}} + a_2 \frac{P}{P_h}}{T_{x.h} \left(k_{T.x} - a_3 \sqrt{\frac{P}{P_h}} \right)}, \quad (89)$$

где

$$a_1 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0h} + 1} \sqrt{\frac{M_{0h}}{M_0}} k_T \Delta T_{pp.h};$$

$$a_2 = (\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) \frac{M_{0h}}{2M_0(M_{0h} + 1)^2 r} \Delta T_{pp.h}^2;$$

$$a_3 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(\alpha_{Sp}^x + \alpha_{Sn}^x)}{(M_{0h} + 1)r} \sqrt{\frac{M_{0h}}{M_0}} \Delta T_{pp.h}.$$

Происходящее при этом изменение температуры горячих спаев может быть определено по формуле

$$\frac{T_r}{T_{r,h}} = \frac{T_x + \Delta T_{\text{пп}}}{T_{x,h} + \Delta T_{\text{пп},h}} = \frac{\frac{T_x}{T_{x,h}} + \frac{\Delta T_{\text{пп}}}{\Delta T_{\text{пп},h}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{пп},h}}{T_{x,h}}}{1 + \frac{\Delta T_{\text{пп},h}}{T_{x,h}}}.$$

Используя ранее выведенные соотношения, получим

$$\frac{T_r}{T_{r,h}} = \frac{T_{x,h}}{T_{r,h}} \left[\frac{k_{T,x} T_{\text{окл}} + a_1 \sqrt{\frac{P}{P_h}} + a_2 \frac{P}{P_h}}{T_x \left(k_{T,x} - a_3 \sqrt{\frac{P}{P_h}} \right)} + a_4 \sqrt{\frac{P}{P_h}} \right], \quad (90)$$

где

$$a_4 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0h} + 1} \sqrt{\frac{M_{0h}}{M_0}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{пп},h}}{T_{x,h}}.$$

Для случая регулирования при $U = \text{const}$ коэффициенты в уравнениях (89) и (90) несколько упрощаются:

$$a'_1 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0h} + 1} k_T \Delta T_{\text{пп},h};$$

$$a'_2 = (\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h^2 \frac{\Delta T_{\text{пп},h}^2}{2(M_{0h} + 1)^2 r};$$

$$a'_3 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h (\alpha_{Sp}^x + \alpha_{Sn}^x)}{(M_{0h} + 1)} \Delta T_{\text{пп},h};$$

$$a'_4 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_h}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0h} + 1} \cdot \frac{\Delta T_{\text{пп},h}}{T_{x,h}}.$$

Аналогичные соотношения могут быть получены для случая регулирования мощности изменением теплового потока по стороне теплоносителя. Используя ранее выведенные зависимости $\frac{P}{P_h} = f\left(\frac{\Delta T_{\text{пп}}}{\Delta T_{\text{пп},h}}\right)$ и уравнение энергетического баланса по стороне горячих спаев, получим

$$Q_r = Q_t + Q_{\text{Пт}} - \frac{1}{2} Q_s;$$

$$k_{T,r} (T_{\text{тепл}} - T_r) = k_T \Delta T_{\text{пп}} + \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) (\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r)}{(M_0 + 1) r} T_r \Delta T_{\text{пп},h} - \\ - \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})^2}{2(M_0 + 1)^2 r} \Delta T_{\text{пп}}^2.$$

В окончательном виде

$$\frac{T_r}{T_{r,n}} = \frac{k_{T,r} T_{\text{тепл}} - b_1 \sqrt{\frac{P}{P_n}} + b_2 \frac{P}{P_n}}{T_{r,n} \left(k_{T,r} + b_3 \sqrt{\frac{P}{P_n}} \right)}, \quad (91)$$

где

$$b_1 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0n} + 1} \sqrt{\frac{M_{0n}}{M_0}} k_T \Delta T_{\text{пп.н}};$$

$$b_2 = (\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n \frac{M_{0n}}{2M_0 (M_{0n} + 1)} \Delta T_{\text{пп.н}}^2;$$

$$b_3 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n (\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r)}{(M_0 + 1) r} \sqrt{\frac{M_{0n}}{M_0}} \Delta T_{\text{пп.н}}.$$

Происходящее при этом изменение температуры холодных спаев термоэлемента может быть определено по формуле

$$\frac{T_x}{T_{x,n}} = \frac{T_r - \Delta T_{\text{пп}}}{T_{r,n} - \Delta T_{\text{пп.н}}} = \frac{\frac{T_r}{T_{r,n}} - \frac{\Delta T_{\text{пп.н}}}{T_{r,n}}}{1 - \frac{\Delta T_{\text{пп.н}}}{T_{r,n}}}.$$

Следовательно,

$$\frac{T_x}{T_{x,n}} = \frac{T_r}{T_{x,n}} \left[\frac{k_{T,r} T_{\text{тепл}} - b_1 \sqrt{\frac{P}{P_n}} + b_2 \frac{P}{P_n} - b_4 \sqrt{\frac{P}{P_n}}}{T_{r,n} \left(k_{T,r} + b_3 \sqrt{\frac{P}{P_n}} \right)} \right], \quad (92)$$

где

$$b_4 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0n} + 1} \sqrt{\frac{M_{0n}}{M_0}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{пп.н}}}{T_{r,n}}.$$

При условии $U = \text{const}$ коэффициенты в уравнении (92) определяются следующим образом:

$$b'_1 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0n} + 1} k_T \Delta T_{\text{пп.н}};$$

$$b'_2 = (\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n^2 \frac{\Delta T_{\text{пп.н}}^2}{2(M_{0n} + 1) r};$$

$$b'_3 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n (\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r)}{(M_{0n} + 1) r} \Delta T_{\text{пп.н}};$$

$$b'_4 = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})_n}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})} \cdot \frac{M_0 + 1}{M_{0n} + 1} \cdot \frac{\Delta T_{\text{пп.н}}}{T_{r,n}};$$

Выведенные формулы дают возможность построить графики зависимости отношения мощностей термоэлемента от отношения температур при регулировании изменением теплового потока как по стороне горячих, так и по стороне холодных спаев. Условия работы в данном случае характеризуются постоянным или переменным напряжением в термоэлектрической цепи.

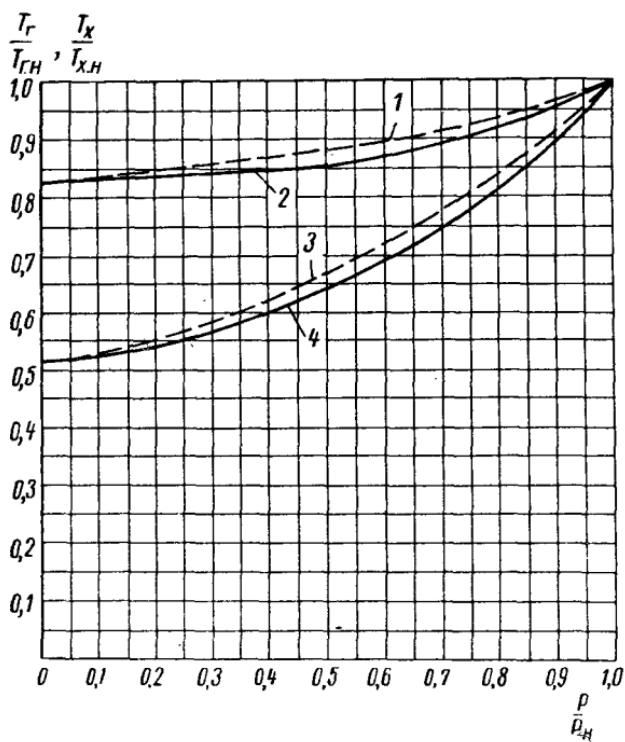


Рис. 104. Зависимость регулировочных характеристик термоэлектрогенератора от величины термического сопротивления по стороне теплоносителя. Теплоноситель — эвтектический сплав PbBi; охладитель — вода; материал ветвей термоэлемента $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -тип) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (n -тип).

$$1) \frac{T_x}{T_{xH}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right) \text{ при } U = \text{const}; \quad 2) \frac{T_x}{T_{xH}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right); \quad 3) \frac{T_g}{T_{gH}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right) \text{ при } U = \text{const}; \\ 4) \frac{T_g}{T_{gH}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right)$$

Такого типа зависимости, полученные расчетным путем для экспериментального термоэлектрогенератора, показаны на рис. 104 и 105.

Рассмотренные способы регулирования мощности термоэлектрогенератора связаны с одновременным изменением температуры как холодных, так и горячих спаев термоэлементов, которое приводит к соответствующему изменению Q_g или Q_x .

Процесс регулирования может быть осуществлен различными способами: изменением температур, расходов теплоносителя, увеличением или уменьшением теплопроводности газовых прослоек на пути теплового потока и др. Полученные зависимости наглядно

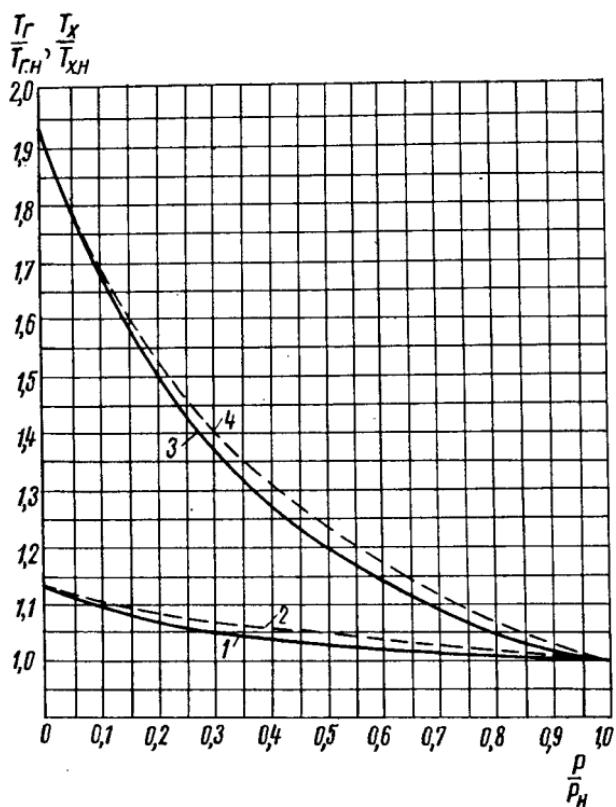


Рис. 105. Зависимость регулировочных характеристик термоэлектрогенератора от величины термического сопротивления по стороне охладителя. Теплоноситель — эвтектический сплав PbBi; охладитель — вода; материал ветвей термоэлемента: $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -тип) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (n -тип).

$$1) \frac{T_x}{T_{xH}} = f \left(\frac{P}{P_H} \right); \quad 2) \frac{T_x}{T_{xH}} = f \left(\frac{P}{P_b} \right) \text{ при } U = \text{const}; \quad 3) \frac{T_r}{T_{rH}} = f \left(\frac{P}{P_H} \right); \quad 4) \frac{T_r}{T_{rH}} = f \left(\frac{P}{P_H} \right) \text{ при } U = \text{const}.$$

показывают, что во всех случаях регулирование мощности изменением температуры горячих спаев наиболее целесообразно. При этом на режимах частичных нагрузок максимальная рабочая температура полупроводникового материала оказывается ниже номинальной. Естественно, что это приводит к увеличению срока службы материалов и обеспечивает более широкий диапазон регулирования.

При регулировании мощности изменением теплового потока по холодной стороне рабочая температура горячих спаев термоэлементов возрастает по сравнению с номинальной, что крайне невыгодно, так как эффективность номинального режима окажется значительно ниже, чем в случае использования оптимальных условий работы термоэлементов. При этом не исключается вероятность появления дополнительных трудностей, связанных с обеспечением прочности конструкций и надежности их работы.

В зависимости от типа источника тепловой энергии и целевого назначения термоэлектрической установки могут оказаться более целесообразными методы теплового регулирования мощности, при которых сохраняется постоянство температур горячих или холодных спаев.

Теоретические зависимости для случая регулирования мощности термоэлемента при $T_g = \text{const}$ могут быть записаны в виде

$$\frac{T_x}{T_{x, \text{н}}} = \frac{T_{g, \text{н}}}{T_{x, \text{н}}} \left(1 - b_4 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{н}}}} \right) \quad (93)$$

(при $U = \text{const}$ вместо b_4 подставляется b'_4) и для случая регулирования при $T_x = \text{const}$

$$\frac{T_g}{T_{g, \text{н}}} = \frac{T_{x, \text{н}}}{T_{g, \text{н}}} \left(1 + a_4 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{н}}}} \right) \quad (94)$$

(при $U = \text{const}$ вместо a_4 подставляется a'_4).

Эти способы регулирования мощности иллюстрируются графиками рис. 106 и 107.

Из приведенных формул видно, что регулирование мощности термоэлектрической установки может осуществляться различными способами посредством изменения $\Delta T_{\text{пп}}$. В большинстве случаев наиболее целесообразен метод регулирования изменением средней температуры теплоносителя, позволяющий осуществлять этот процесс во всем диапазоне температур — от нуля до номинальной. Чаще всего рассматриваемый метод и наиболее экономичный, так как позволяет устанавливать мощность источника тепловой энергии соответственно режимам работы термоэлектрогенератора. При этом возможно использование относительно простой системы автоматического регулирования термоэлектрической установки.

Помимо описанных способов регулирования режимы частичных нагрузок могут осуществляться отключением части поверхности (секций) термоэлектрогенератора. Диапазон регулирования мощности в этом случае зависит от количества автономных секций термоэлектрогенератора, а сам процесс регулирования происходит ступенями.

Кроме того, термоэлектрические установки могут регулироваться изменением электрических параметров.

В общем случае судовой термоэлектрической установки, используемой в качестве главной, при изменении мощности должно поддерживаться постоянство напряжения (секции, обеспечивающие питанием общесудовые потребители, а также затраты энергии на собственные нужды установки) и его плавное изменение

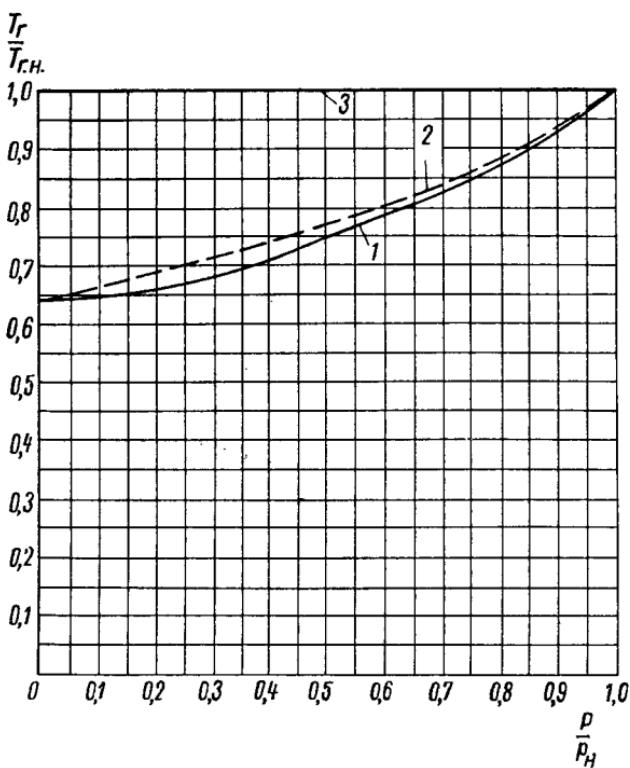


Рис. 106. Зависимость регулировочных характеристик термоэлектрогенератора от величины термического сопротивления по стороне теплоносителя при $T_x = \text{const}$.

Теплоноситель — эвтектический сплав PbBi; охладитель — вода; материал ветвей термоэлемента: $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (*p*-тип) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (*n*-тип).

$$1) T_x = \text{const}, \quad 2) \frac{T_f}{T_{f,H}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right); \quad 3) \frac{T_f}{T_{f,H}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right) \text{ при } U = \text{const}.$$

в широком диапазоне (секции, обеспечивающие питанием электродвигательный комплекс в случае применения систем электродвигатель — гребной винт).

В связи с этим возникает необходимость рассмотрения методов регулирования мощности собственно термоэлектрогенератора как источника электроэнергии, а также методов изменения числа оборотов гребного винта.

Регулирование электрической мощности термоэлектрогенератора осуществляется изменением схемы включения автономных секций термоэлектрогенератора в сеть. При этом могут быть

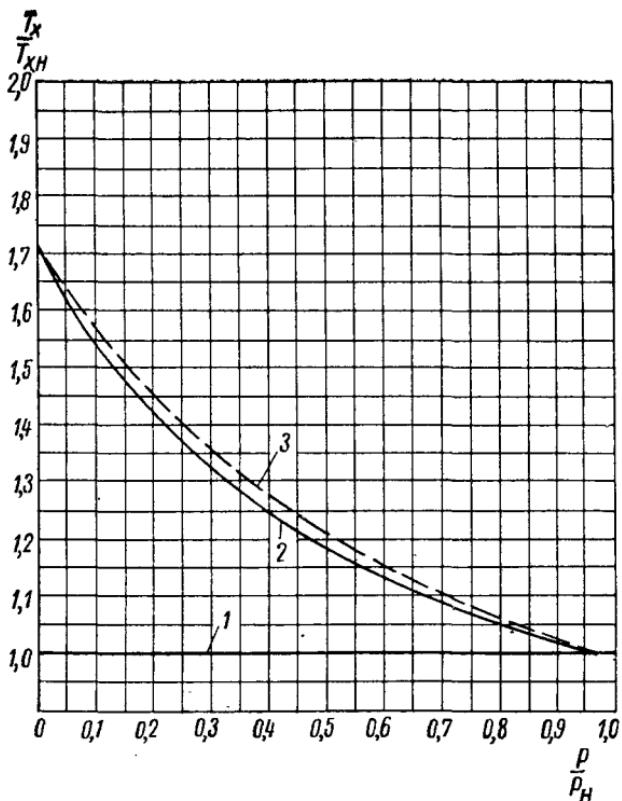


Рис. 107. Зависимость регулировочных характеристик термоэлектрогенератора от величины термического сопротивления по стороне охладителя при $T_g = \text{const}$. Теплоноситель — эвтектический сплав PbBi; охладитель — вода; материал ветвей термоэлемента: $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ (p -тип) и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ (n -тип).

1) $T_g = \text{const}$; 2) $\frac{T_x}{T_{xH}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right)$; 3) $\frac{T_x}{T_{xH}} = f\left(\frac{P}{P_H}\right)$ при $U = \text{const}$.

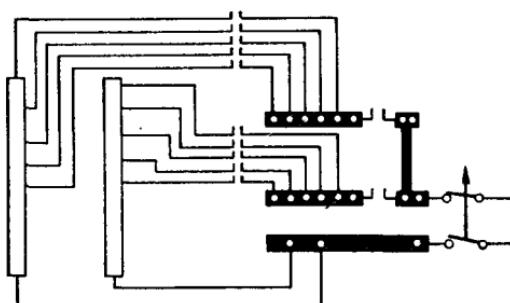


Рис. 108. Схема соединения секций термоэлектрогенератора при регулировании напряжения количеством последовательно включенных секций

использованы метод, основанный на изменении количества последовательно включенных секций (рис. 108), и метод, предусматривающий изменение количества параллельно включенных секций (рис. 109).

В первом случае происходит ступенчатое изменение величины термоэдс и мощности термоэлектрогенератора, в широком диапазоне, зависящем от количества секций.

Однако электрическая схема при этом методе регулирования из-за большого количества коммутационной аппаратуры отличается сложностью, а в случае применения противовключенных секций и непроизводительными потерями энергии.

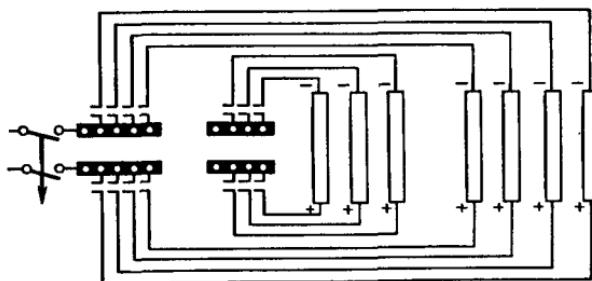


Рис. 109. Схема соединения секций термоэлектрогенератора при регулировании напряжения количеством параллельно включенных секций

Второй метод позволяет изменять мощность при постоянной величине термоэдс. Электрическая схема регулирования при этом методе более проста, так как требует минимального количества коммутационной аппаратуры.

Комбинация двух описанных методов регулирования позволяет создать смешанную схему регулирования термоэлектрогенератора, при помощи которой могут быть осуществлены различные варианты соединений, обеспечивающие широкий диапазон регулирования мощности и напряжения в сети.

К недостаткам смешанной схемы также следует отнести большое количество коммутационной аппаратуры.

Помимо рассмотренных методов регулирования мощности и напряжения термоэлектрогенераторов, работающих на судовую электросеть, необходимо остановиться на вопросах, связанных с регулированием числа оборотов прямодействующих гребных электродвигателей, питание которых осуществляется от термоэлектрогенераторов.

В судовых энергетических установках (например, в установках ледокольных судов) наиболее часто применяются электроэнергетические системы генератор — двигатель. Благодаря возможности плавного регулирования оборотов двигателей в диапазоне 1 : 20,

а в некоторых случаях и 1 : 100 они позволяют обеспечивать высокую маневренность судна.

В случае термоэлектрической установки обычные методы регулирования числа оборотов гребных электродвигателей имеют свои особенности, так как зависят от схемы включения и количества секций термоэлектрогенератора, количества и схемы соединения обмоток якорей электродвигателей и т. д.

В гребных термоэлектрических установках регулирование числа оборотов электродвигателей также может осуществляться изменением количества последовательно или параллельно включенных секций термоэлектрогенератора.

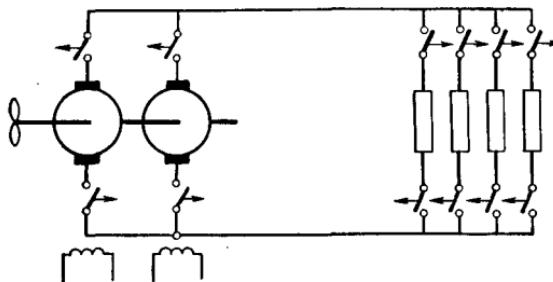


Рис. 110. Схема электроэнергетической системы при регулировании скорости вращения гребного электродвигателя количеством параллельно включенных секций термоэлектрогенератора

Рассмотрим некоторые количественные характеристики этих методов регулирования, приняв для упрощения, что к. п. д. двигателя близок к единице, момент на валу прямо пропорционален силе тока в обмотке якоря, а угловая скорость вращения — напряжению на клеммах.

Будем считать, что принципиальная схема термоэлектрического электродвигательного комплекса, регулируемого методом изменения количества параллельно включенных секций, состоит из четырех параллельно соединенных секций термоэлектрогенератора, характеризующихся расчетными значениями $E_{\text{тэг}} = 1,83U_{\text{n, тэг}}$ и $I_{\text{kz, тэг}} = 2,20I_{\text{n, тэг}}$ и прямодействующего электродвигателя с независимым возбуждением в двухъякорном исполнении (рис. 110). Расчетные характеристики системы иллюстрируются графиками рис. 111.

Анализ этих характеристик позволяет сделать вывод о том, что при постоянном магнитном потоке возбуждения ($\Phi = \text{const}$) угловая скорость вращения электродвигателя в зависимости от количества включенных секций термоэлектрогенератора может изменяться ступенями: ω_n , $0,915\omega_n$, $0,795\omega_n$, $0,600\omega_n$ (точки A_1 , A_2 , A_3 и A_4). Вращающий момент при этом оказывается равным M_n , $0,830M_n$, $0,635M_n$, $0,360M_n$ соответственно.

В диапазоне от ω_n до $0,915\omega_n$ плавное регулирование числа оборотов вниз может быть осуществлено уменьшением магнитного потока возбуждения от Φ_n до $0,51\Phi_n$. Практически возможно и дальнейшее уменьшение величины магнитного потока возбуждения, однако это приведет к значительному возрастанию величины тока в обмотке якоря (в точке $A_2 I = 1,64I_n$). В связи с этим одну из параллельно включенных секций целесообразно отключить,

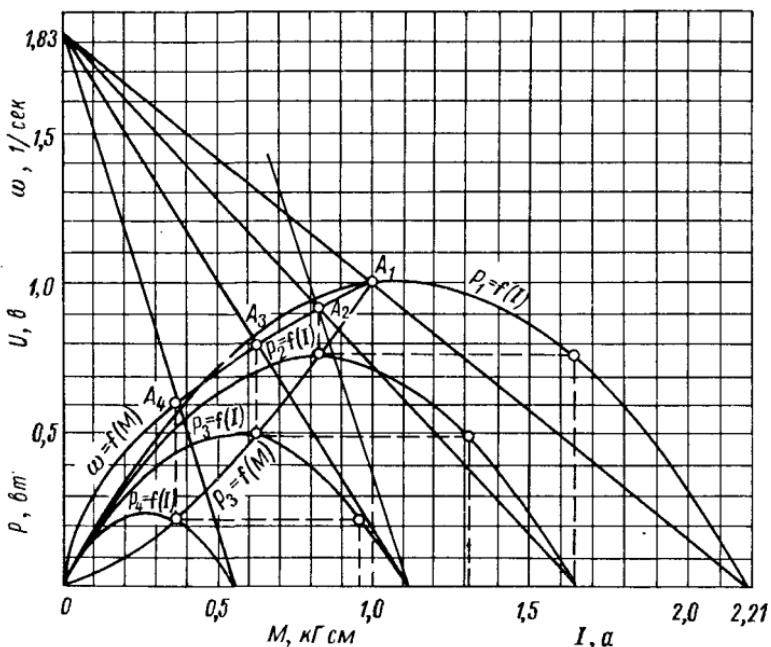


Рис. 111. Характеристики электроэнергетической системы при регулировании скорости вращения гребного электродвигателя количеством параллельно включенных секций термоэлектрогенератора

а магнитный поток возбуждения вновь увеличить до номинального. Плавное регулирование числа оборотов вниз от $0,915\omega_n$ до $0,795\omega_n$ также может осуществляться уменьшением магнитного потока возбуждения до $0,485\Phi_n$, пока в точке A_3 во избежание чрезмерного возрастания силы тока не будет отключена еще одна параллельно соединенная секция, а магнитный поток возбуждения вновь увеличен до номинального и т. д.

На последней ступени от $0,600\omega_n$ до нуля регулирование числа оборотов вниз может осуществляться только уменьшением величины магнитного потока возбуждения, так как даже при стоянке двигателя под током величина последнего в обмотке якоря не превышает $1,10I_n$, что вполне допустимо.

Обратимся к схеме термоэлектрического электродвигательного комплекса, регулирование которого основано на изменении

количества последовательно включенных секций (рис. 112). В этой схеме термоэлектрогенератор также принят секционным и характеризуется следующими величинами ступенчатого изменения значений термоэдс: $1,83U_n$, $1,35U_n$, $0,91U_n$, $0,45U_n$.

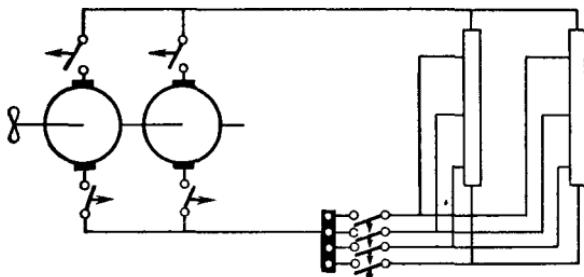


Рис. 112. Схема электроэнергетической системы при регулировании скорости вращения гребного электродвигателя количеством последовательно включенных секций термоэлектрогенератора

Анализ полученных зависимостей (рис. 113) показывает, что уменьшение числа оборотов электродвигателя вниз от номинального может происходить ступенями: ω_n , $0,880\omega_n$, $0,710\omega_n$, $0,420\omega_n$ до нуля.

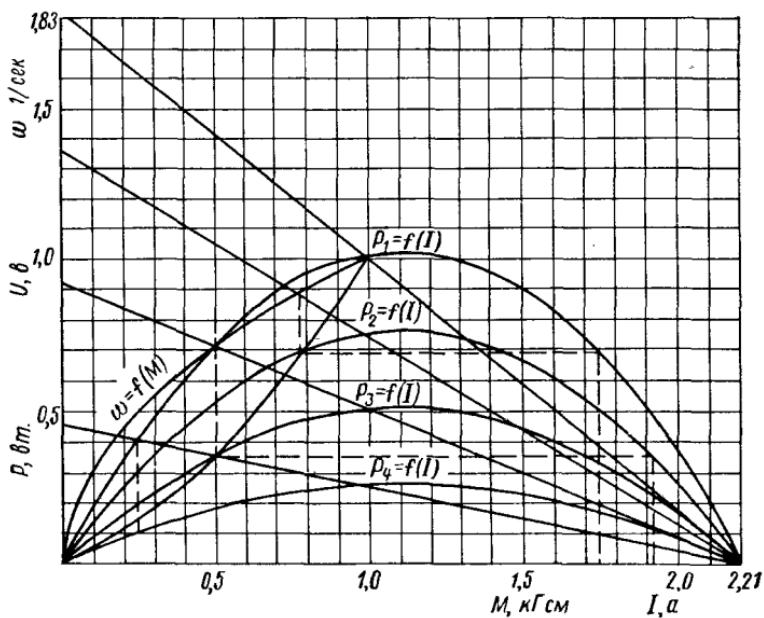


Рис. 113. Характеристики электроэнергетической системы при регулировании скорости вращения гребного электродвигателя количеством последовательно включенных секций термоэлектрогенератора

Для плавного регулирования числа оборотов вниз от номинального до $0,880\omega_n$ магнитный поток возбуждения следует уменьшить до $0,480\Phi_n$, благодаря чему величина тока в обмотке якоря увеличивается до $1,73I_n$. В диапазоне $0,880 \div 0,710\omega_n$

магнитный поток возбуждения должен быть уменьшен до $0,280\Phi_n$ и соответственно ток увеличен до $1,91I_n$. На третьей ступени ($0,710 \div 0,420\omega_n$) уменьшение магнитного потока до $0,100\Phi_n$ приводит к увеличению силы тока до $2,0I_n$. Наконец, на последней ступени уменьшение магнитного потока возбуждения обусловливает дальнейшее уменьшение числа оборотов, и при $\omega = 0$ величина тока в обмотке якоря возрастает до величины тока короткого замыкания $2,20I_n$.

Таким образом, теоретически оба метода регулирования числа оборотов термоэлектрических электродвигательных комплексов вполне осуществимы и позволяют обеспечить необходимые маневренные характеристики энергетической установки.

Однако метод, основанный на изменении количества параллельно включенных секций термоэлектрогенератора практически более целесообразен. Это объясняется тем, что при регулировании количеством последовательно соединенных секций величина тока в обмотке якоря может значительно возрастать, достигая предельного значения тока короткого замыкания. В результате возникают перегрузки по току, ухудшается коммутация двигателя и появляется неустойчивость в работе.

§ 16. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СУДОВЫМ УСТРОЙСТВАМ И УСТАНОВКАМ

Термоэлектрические устройства и установки независимо от типа и назначения должны удовлетворять требованиям, которые обусловливаются судовыми условиями эксплуатации. В этой связи прежде всего следует выделить:

- приемлемую экономичность и габаритно-весовые характеристики;
- надежность;
- низкую первоначальную стоимость и малые эксплуатационные расходы;
- возможность автоматизации регулирования и управления;
- отсутствие вредных выделений и др.

Создание судовых устройств и установок, в максимальной степени удовлетворяющих всем требованиям, связанным с их конкретным назначением, — довольно трудная задача. В абсолютном большинстве случаев только компромиссные решения позволяют добиться приемлемых сочетаний таких противоречивых качеств, как высокая надежность и хорошие габаритно-весовые характеристики, автоматизация регулирования и управления и низкая стоимость, и т. д.

Отыскание такого рода компромиссных решений, являясь само по себе чрезвычайно сложной задачей, еще более усугубляется тем, что при рассмотрении термоэлектрических устройств и установок приходится иметь дело с комплексом теплотехнического и электротехнического оборудования и аппаратуры, который включает источники тепловой энергии и преобразователи тепловой энергии в электрическую; приемники электрической энергии и устройства для отвода теплоты; вспомогательные механизмы, оборудование и т. д.

Особенно многочисленны и противоречивы требования, предъявляемые к термоэлектрическим установкам в случае их использования в качестве главных судовых энергетических установок, обеспечивающих движение судна и работу судовой аппаратуры,

оборудования и устройств. К этой группе требований, определяемых прежде всего типом электродвигательного комплекса, назначением судна и влиянием морских условий, наряду с общими требованиями относятся:

- надежность;
- высокая маневренность;
- максимальная экономичность на всех режимах;
- простота эксплуатации;
- минимальное количество обслуживающего персонала.

Надежность энергетической установки может быть охарактеризована длительностью ее непрерывной работы в эксплуатационных условиях. Это понятие охватывает моторесурс установки, степень вероятности возникновения аварийных ситуаций в ее элементах и безопасность эксплуатации. Основными предпосылками, обеспечивающими высокую надежность судовой термоэлектрической установки, являются:

- минимальная номенклатура и количественный состав оборудования, устройств, трубопроводов и аппаратуры;
- минимальная протяженность коммуникаций;
- автоматизация регулирования и управления с применением наиболее простых схем и устройств;
- хорошо обеспеченный доступ к основным элементам, а также возможность исправления дефектов и быстрой смены отдельных блоков, деталей и узлов;
- умеренные тепловые, механические и электрические нагрузки;
- отсутствие высокоагрессивных сред;
- безопасная и спокойная работа всех без исключения узлов и деталей;
- действенный контроль и сигнализация о характере работы механизмов и оборудования.

Маневренные характеристики судовой термоэлектрической установки включают в себя следующие качества:

- продолжительность подготовки и пуска установки с выходом на заданный режим;
- диапазон устойчивых режимов;
- мощность заднего хода, продолжительность реверса и отсутствие ограничений по количеству реверсов;
- продолжительность перехода с одного режима на другой;
- продолжительность остановки и вывода установки из эксплуатации.

Продолжительность подготовки и пуска установки складывается из длительности ряда операций. Основной составляющей этой продолжительности является время, затрачиваемое на подготовку и пуск источника тепловой энергии. Эта величина зависит от номинальных тепловых и электрических параметров, количества теплоты, аккумулируемой металлическими конструкциями,

объёмов теплоносителя и охладителя. Продолжительность подготовки и пуска установки определяется также временем, необходимым для прогрева коммуникации, металлических конструкций термоэлектрогенератора, создания на термоэлементах требуемого для заданного режима перепада температур. Наконец, еще одной составляющей продолжительности подготовки и пуска установки является время, затрачиваемое на подготовку и пуск исполнительных механизмов, на преодоление моментов инерции вращающихся масс, и т. д.

Весьма важная характеристика маневренности судовой термоэлектрической установки — диапазон устойчивых режимов ее работы. В случае главной термоэлектрической установки, предназначенной для обеспечения движения судна, предполагается, что такая установка должна рассматриваться как всережимная, т. е. обеспечивающая как номинальные режимы работы движителя, так и возможность изменения мощности последнего от нуля до 100%.

Практически как источник энергии, так и термоэлектрический преобразователь энергии не налагают никаких ограничений на устойчивость работы установки во всем возможном диапазоне нагрузок. Диапазон устойчивых режимов работы установки, таким образом, определяется в основном характеристиками электродвигательного комплекса.

Мощность заднего хода, продолжительность реверса и отсутствие ограничений по количеству реверсов — характеристики энергетической установки, непосредственно влияющие на маневренные качества судна. Эти характеристики определяются главным образом типом электродвигательного комплекса и систем управления.

Длительность операций, в результате которых осуществляется перевод термоэлектрической установки из одного режима работы в другой, характеризуется величиной, которая зависит от скорости изменения тепловых и электрических параметров установки, времени работы на заданных режимах, требований экономичности и т. д. В отличие от ранее упомянутых характеристик она может изменяться в широком диапазоне в зависимости от конкретных требований.

Наконец, такая характеристика маневренности, как продолжительность остановки и вывода системы из эксплуатации, зависящая в основном от тех же факторов, что и продолжительность подготовки и пуска, может рассматриваться как совокупность трех последовательных операций: остановки электродвигательного комплекса, остановки и охлаждения термоэлектрического преобразователя, источника энергии и обслуживающего оборудования и систем, а также дополнительных мероприятий, определяемых заданной длительностью последующего ввода установки в эксплуатацию.

Требование максимальной экономичности судовой энергетической установки диктуется необходимостью получения высоких технико-экономических показателей. Однако в ряде случаев она рассматривается как необходимое условие разработки и создания компактной и легкой энергетической установки.

В случае термоэлектрической установки с ядерным источником энергии, которая предназначена для обеспечения движения судна и снабжения электроэнергией общесудовых потребителей, приближенная количественная оценка эффективности может быть получена на основании следующих зависимостей:

$$\eta_0 = \eta_{\text{эфф}} \eta_{\text{м. вал}} \eta_{\text{дв. пр}},$$

где η_0 — итоговый к. п. д. энергетической установки и электродвигательного комплекса;

$\eta_{\text{эфф}}$ — эффективный к. п. д. энергетической установки;

$\eta_{\text{м. вал}}$ — коэффициент механических потерь на трение в подшипниках и дейдвудных сальниках валопровода;

$\eta_{\text{дв. пр}}$ — пропульсивный к. п. д. движителя.

Для ориентировочных оценок могут быть приняты

$$\eta_{\text{м. вал}} = 0,990 \div 0,995; \quad \eta_{\text{дв. пр}} = 0,50 \div 0,70.$$

Эффективный к. п. д. энергетической установки запишем в виде произведения

$$\eta_{\text{эфф}} = \eta_{\text{ист}} \eta_{\text{труб}} \eta_{\text{преобр}} \eta_{\text{с. н}} \eta_{\text{сети}} \eta_{\text{двиг}},$$

где $\eta_{\text{ист}}$ — к. п. д. источника, характеризующий величину тепловых потерь в окружающую среду:

$$\eta_{\text{ист}} = 0,990 \div 0,995;$$

$\eta_{\text{труб}}$ — к. п. д. контура теплоносителя, характеризующий потерю теплоты при транспортировке теплоносителя от источника энергии к термоэлектрогенератору:

$$\eta_{\text{труб}} = 0,980 \div 0,990;$$

$\eta_{\text{преобр}}$ — приближенный к. п. д. процесса термоэлектрического преобразования энергии

$$\eta_{\text{преобр}} = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} - 1}{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} + \frac{T_x}{T_r}};$$

$\eta_{\text{с. н}}$ — коэффициент, учитывающий затраты энергии, необходимой для обеспечения работы механизмов, оборудования и аппаратуры энергетической установки:

$$\eta_{\text{с. н}} = 0,900 \div 1,00;$$

$\eta_{\text{сети}}$ — коэффициент, учитывающий потери энергии в кабелях (Джоулевы потери на нагревание кабелей):

$$\eta_{\text{сети}} = 0,950 \div 0,970;$$

$\eta_{\text{двиг}}$ — к. п. д. двигателя постоянного тока в обычном конструктивном исполнении

$$\eta_{\text{двиг}} = 0,900 \div 0,950.$$

Таким образом, для сугубо ориентировочных оценок эффективности главной судовой термоэлектрической установки могут быть использованы следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= (0,37 \div 0,63) \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} - 1}{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} + \frac{T_x}{T_r}}; \\ \eta_{\text{зф}} &= (0,75 \div 0,90) \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} - 1}{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} + \frac{T_x}{T_r}}. \end{aligned} \quad (95)$$

С точки зрения сокращения численности персонала, обслуживающего энергетическую установку, решающими факторами являются минимальный количественный состав и номенклатура оборудования и механизмов, а также возможность автоматизации регулирования и управления энергетической установкой.

С учетом этих требований целесообразнее использовать комбинированные энергетические блоки, естественную или самопроточную циркуляцию теплоносителя и охлаждающей забортной воды, источников энергии, обладающих способностью к саморегулируемости, и т. д.

Перечисленные требования, большинство которых по отношению к судовым термоэлектрическим установкам в настоящее время трудно характеризовать количественно, далеко не исчерпывают тех качеств, которыми должна обладать такая установка.

§ 17. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА СУДАХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Постоянное увеличение энергоооруженности судов обусловливается не только увеличением скоростей движения, но и возрастанием расходов энергии на оборудование и устройства, предназначенные для обеспечения наиболее эффективного выполнения судном своих задач, создания лучших условий для работы и отдыха команды и т. д. Как в составе судовой энергетической установки, так и в составе оборудования общесудового назначения широко используются всевозможные теплообменные аппараты —

испарители, охладители и подогреватели. Для нормальной жизнедеятельности команды на судах устанавливаются холодильные установки, устройства для кондиционирования воздуха, испарительные установки и другая аппаратура.

Все эти системы и устройства помимо теплообменных аппаратов имеют в своем составе насосы, вентиляторы и трубопроводы, подчас отличающиеся сложностью и громоздкостью.

В этой связи использование термоэлектрического метода преобразования энергии (имеются в виду термоэлектрические тепловые насосы, охлаждающие устройства и установки кондиционирования воздуха) в целом ряде случаев может оказаться весьма заманчивым и перспективным.

Устройства и установки такого типа обладают рядом серьезных преимуществ перед устройствами и установками аналогичного назначения, которые используются в настоящее время. Прежде всего следует отметить простоту их схем и надежность в эксплуатации; простоту регулирования, управления, изменения режимов работы и большой моторесурс; возможность быстрого пуска и остановки и простоту обслуживания.

Несмотря на отдельные недостатки, в частности меньшую по сравнению с обычными устройствами эффективность и относительно высокую стоимость, рассмотренные устройства в ряде случаев могут оказаться определяющими [96], [99].

Особенности судовых термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов можно уяснить, рассмотрев конструкции таких устройств, применяемых в настоящее время в стационарной энергетике и на судах.

Методы термоэлектрического охлаждения или нагрева находят широкое применение в различных областях промышленности и энергетики. Всевозможные высоковакуумные ловушки для диффузионных насосов, термостаты, холодильники, установки кондиционирования воздуха, отопительно-охладительные агрегаты, испарители — далеко не полный перечень термоэлектриче-

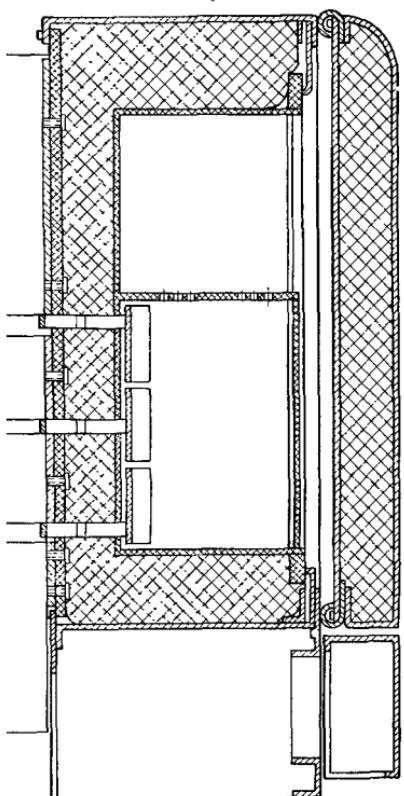


Рис. 114. Конструкция бытового термоэлектрического холодильника

ских устройств и установок, представляющих практический интерес. Первые отечественные термоэлектрические охлаждающие устройства были созданы коллективом Института полупроводников АН СССР в начале 50-х годов. На рис. 114 показана одна из первых моделей отечественного бытового термоэлектрического холодильника с холодильной камерой, объем которой 91 л [17], [30]. Холодильник разделен на две части — верхнюю, в которой температура может быть понижена до значений $276 \div 278^{\circ}$ К, и нижнюю, где температура может поддерживаться в диапазоне $267 \div 269^{\circ}$ К. Отвод теплоты от холодильника осуществляется при помощи воздушных радиаторов, расположенных вертикально на стенке корпуса. Поверхности теплообмена выполнены из алюминия.

Термоэлектрический блок холодильника, показанный на рис. 115, состоит из 45 последовательно соединенных термоэлементов, каждый из которых имеет холодоизделийность равную 0,465 вт. Питание термоэлектрических батарей осуществляется от сети переменного тока через выпрямитель, входящий в комплект холодильника. В режиме максимальной холодоизделийности величина оптимального тока составляет 25 а, а падение напряжения на термоэлементах 3,3 в. С учетом потерь в выпрямителе затраты энергии при работе холодильника составляют 96 \div 100 вт.

Несомненный интерес представляют конструкции отопительно-охладительных агрегатов, предназначенных для обогрева помещений в зимнее и охлаждения в летнее время, разработанные Научно-исследовательским институтом сантехники Академии строительства и архитектуры СССР совместно с Институтом полупроводников АН СССР в период с 1957 по 1960 г.

Принципиальная схема агрегата, в основу которого положен метод термоэлектрического преобразования энергии, показана на рис. 116, а внешний вид двух моделей — на рис. 117 и 118. На рис. 119 дана конструкция термоэлектрической батареи.

Отопительно-охладительный агрегат помимо термоэлектрических батарей включает теплообменники, вентиляторы, конструктивные узлы, воздухопроводы и трубопроводы воды [30].

Термоэлектрические холодильные установки, по данным зарубежной печати [16], [60], [122], [153], уже находят применение,

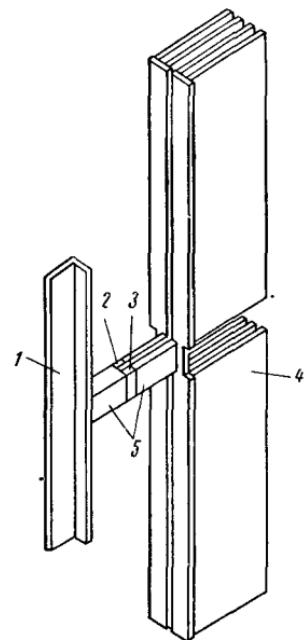


Рис. 115. Конструкция термоэлектрического блока холодильника.

1 — «холодные» радиаторы; 2 — ветви р-типа; 3 — ветви н-типа; 4 — «горячие» радиаторы; 5 — теплопроводы.

в частности на подводных лодках. В качестве примера можно привести термоэлектрическую холодильную установку, разработанную фирмой Whirlpool Corp., опытный образец которой проходит

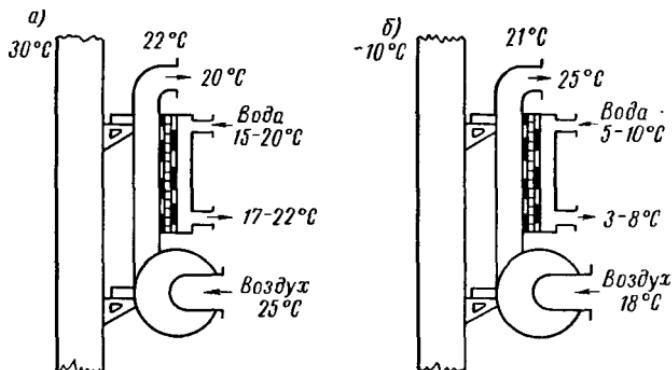


Рис. 116. Принципиальная схема отопительно-охладительного агрегата, работающего в режиме охлаждения (а) или в режиме обогрева (б)

испытания на экспериментальной подводной лодке «Dolfin» ВМФ США. Установка, конструктивная схема которой показана

на рис. 120 и 121, предназначена для использования в провизионной камере подводных лодок. В камере объемом 14,2 м³ при работе такой установки может поддерживаться температура до —18° С (255° К) [111]. Исследования показали, что термоэлектрические холодильные

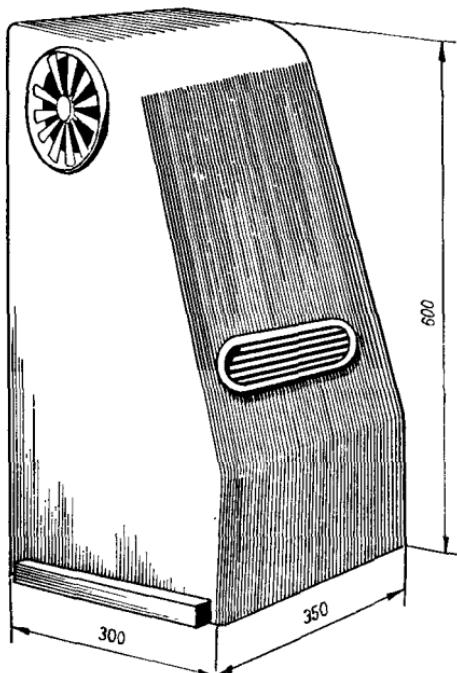


Рис. 117. Внешний вид отопительно-охладительного агрегата теплопроизводительностью 3500 вт

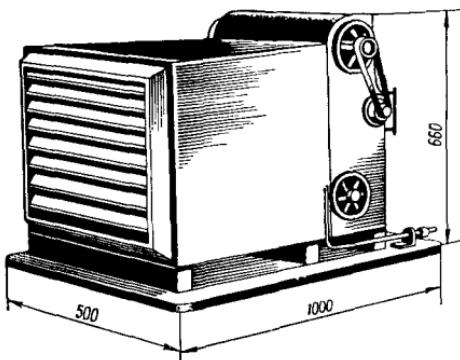


Рис. 118. Внешний вид отопительно-охладительного агрегата теплопроизводительностью 1160 вт

установки обладают рядом преимуществ перед установками аналогичного назначения, но основанными на других принципах действия, которые используются в настоящее время.

Если первые образцы термоэлектрических холодильников уступали фреоновым холодильным установкам по своим габаритам, затратам энергии и стоимости, то проектные разработки новых

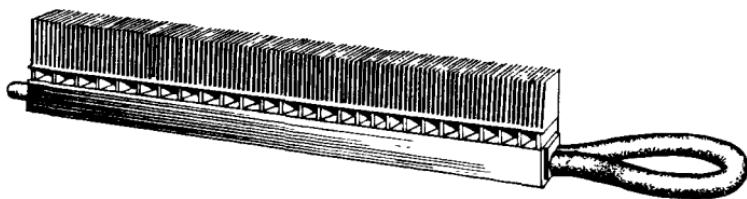


Рис. 119. Конструкция термоэлектрической батареи отопительно-охладительного агрегата

термоэлектрических холодильных установок в ряде случаев облашают сопоставимыми характеристиками [75], [111], [154].

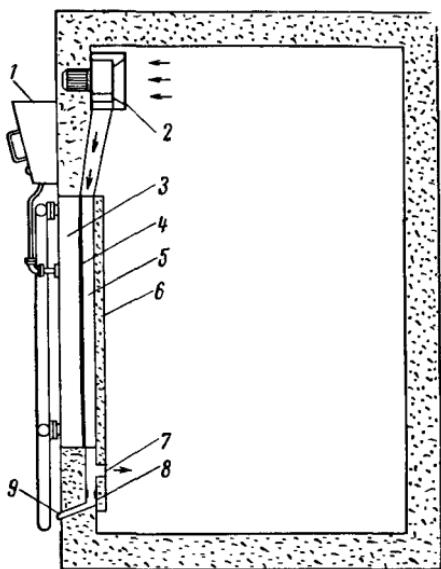


Рис. 120. Конструкция холодильной установки, предназначенной для использования в провизионных камерах подводных лодок (разрез).

1 — энергетический блок; 2 — воздуходувка; 3 — полость охлаждающей воды; 4 — термоэлектрические батареи; 5 — воздухопровод; 6 — теплоизоляция; 7 — выход охлажденного воздуха; 8 — ленточный электронагреватель; 9 — влагоудаление

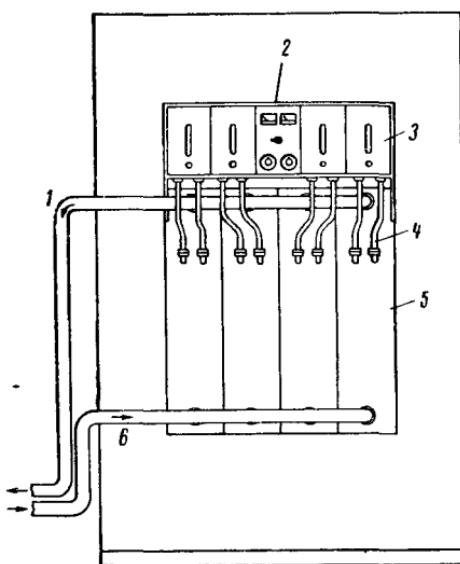


Рис. 121. Конструкция холодильной установки, предназначенной для использования в провизионных камерах подводных лодок (общий вид).

1 — выход охлаждающей воды; 2 — автоматический регулятор; 3 — энергетический блок; 4 — кабель питания; 5 — термоэлектрические батареи; 6 — вход охлаждающей воды

По сравнению с установками обычного типа термоэлектрические холодильные установки характеризуются простотой конструкции и обслуживания, отсутствием вредных газовыделений,

компактностью и минимальным количеством движущихся механизмов. Эти качества в сочетании с перспективами значительного уменьшения построенной стоимости позволяют считать целесообразным их применение на судах уже в ближайшем будущем.

На небольших судах, в частности исследовательских глубоководных аппаратах, могут применяться небольшие комбинированные термоэлектрические камбузные плиты-холодильники (рис. 122) [74].

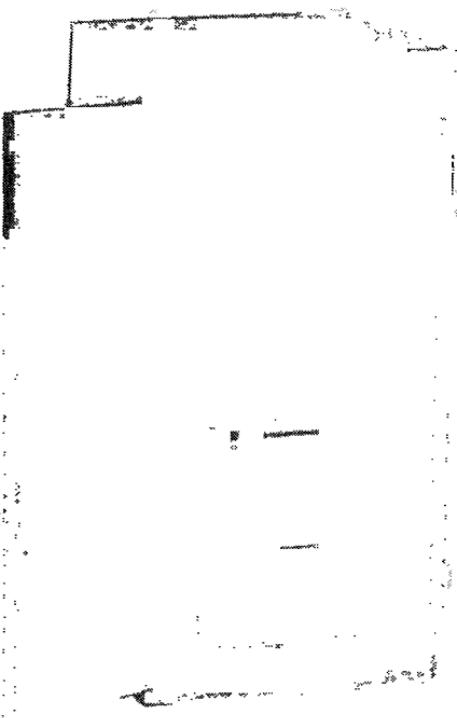


Рис. 122. Общий вид комбинированной термоэлектрической плиты-холодильника

Принцип действия этих агрегатов достаточно прост. Продукты питания, размещенные в камере, при работе термоэлектрической батареи в режиме охлаждения находятся в замороженном состоянии. Простым переключением направления тока отдельные автономные секции холодильной камеры превращаются в электрические плиты, на которых разогреваются продукты питания перед употреблением.

Другим примером комбинированного термоэлектрического устройства может служить аппарат для получения пресной воды (рис. 123). Принцип его действия также основан на термоэлектрическом методе направленного переноса теплоты и заключается в том, что подвод теплоты к морской воде осуществляется со стороны горячих спаев термоэлементов,

а со стороны холодных спаев происходит конденсация образовавшегося вследствие испарения воды пара.

Такая термоэлектрическая испарительная установка отличается от используемых в настоящее время установок аналогичного назначения исключительной простотой, надежностью и компактностью. Поэтому ее применение в судовых условиях весьма заманчиво.

Перспективы практического использования термоэлектрического охлаждения и нагрева в судовых устройствах не ограничиваются приведенными примерами. Весьма благоприятны

в этом отношении возможности использования термоэлектрических устройств и для других целей, в частности для целей кондиционирования воздуха [169].

Кондиционирование воздуха, т. е. очистка и поддержание его температуры и влажности в заданных пределах, необходимых для создания в помещении условий комфорта, — одно из требований, обеспечивающих нормальную жизнедеятельность команды и пассажиров судна [33]. Установки для кондиционирования воздуха представляют собой комплекс аппаратуры и оборудования, выполняющих функции нагрева или охлаждения, осушения или увлажнения воздуха, а также его очистки.

Термоэлектрические установки кондиционирования воздуха в настоящее время уже находят применение. Интересны в этом отношении разработки термоэлектрических кондиционеров для подводных лодок фирм Carrier Corp., Reido Corp. of America, Westinghouse Corp. [90], [93], [122], [139], [154], [161].

На рис. 124 показана установка кондиционирования воздуха производительностью 3500 вт, опытный образец которой в 1962 г. был передан флоту. Установка разработана фирмой Carrier Corp. применительно к атомным подводным лодкам и рассчитана на поддержание в отсеке постоянной температуры 303° К при влажности 50%. Конструкция установки выполнена в виде шести одинаковых секций, имеющих размеры 305×178×57 мм. Полный вес установки 81 кг, занимаемый объем 0,028 м³ (рис. 125).

Как видно из рисунка, кондиционируемый воздух продувается вентилятором через пластинчатые ячейки, где он отдает теплоту холодным спаям термоэлементов. Выделяющаяся на горячих спаях теплота, в свою очередь, воспринимается пресной водой, циркулирующей в замкнутом контуре. Охлаждение пресной воды осуществляется забортной водой в обычном теплообменном аппарате.

Разработка опытного образца термоэлектрического кондиционера предшествовала экспериментальная проверка двух типов термоэлектрических модулей. Один из таких модулей состоит из 48 соединенных последовательно термоэлементов, цилиндрические ветви которых имеют диаметр 12,7 мм и длину 6,3 мм. Величина

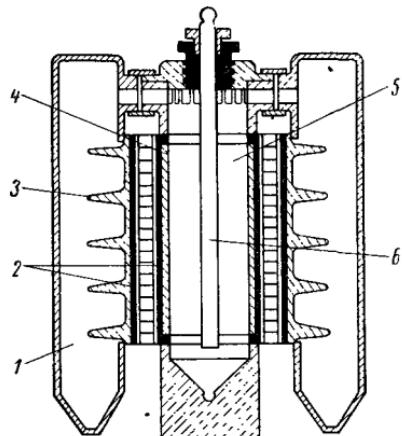


Рис. 123. Конструкция термоэлектрического опреснителя воды

1 — конденсатор; 2 — электрическая изоляция; 3 — термоэлементы; 4 — графитовый цилиндр; 5 — испаритель; 6 — противонакипный электрод

ΔT_{\max} по результатам замеров составляет 66,2 град и соответствует величине $z = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Во втором варианте модуля использованы термоэлементы длиной 5 мм вместо 6,3 мм. Это позволило сократить расход полупроводникового материала на 13,4%.

При этом основные характеристики модуля практически остались неизменными.

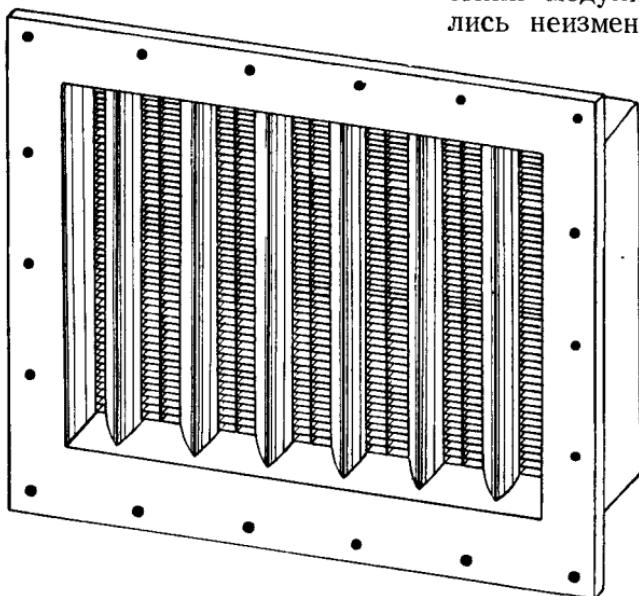


Рис. 124. Общий вид термоэлектрического кондиционера, предназначенного для атомной подводной лодки.

Производительность 3500 вт

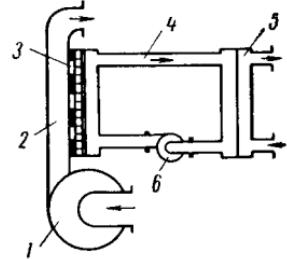


Рис. 125. Принципиальная схема термоэлектрической установки кондиционирования воздуха.

1 — вентилятор; 2 — воздухопровод; 3 — батарея термоэлементов; 4 — система пресной воды; 5 — система забортной воды; 6 — насос пресной воды

В качестве материала ветвей термоэлементов использовались теллуриды, а в качестве электрической изоляции — пленка из окиси алюминия толщиной 12,5 мк.

Термоэлектрическая установка кондиционирования воздуха питается от судовой сети переменного тока через блок питания и управления, имеющий габариты $455 \times 280 \times 280$ мм и вес 230 Г. Для питания и управления применена полупроводниковая аппаратура.

После наладочных испытаний и доработки конструкции (замена окиси алюминия металлокерамической изоляцией, изменение технологии коммутации и др.) описываемая установка фирмы Carriger Corp. была приведена в полное соответствие с поставленными требованиями.

Аналогичные разработки термоэлектрических устройств кондиционирования воздуха по заказу ВМФ США выполнены фирмой Reidio Corp. of America, создавшей экспериментальный образец кондиционера производительностью 3500 вт (рис. 126).

Аппарат состоит из 30 трубчатых блоков, имеющих длину 1,520 м и располагающихся в герметичном цилиндре диаметром 0,254 м. Каждый блок состоит из 48 термоэлектрических батарей,

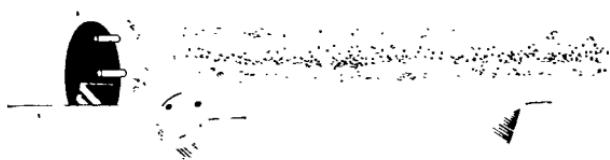


Рис. 126. Общий вид экспериментального термоэлектрического кондиционера. Производительность 3500 вт

содержащих по 18 термоэлементов каждая. Материал термоэлементов — теллуриды; длина 5 мм, диаметр 7 мм. Один из вариантов компоновки трубчатых блоков кондиционера показан на рис. 127 [122].

В 1964 г. фирмой была создана и после испытаний в течение 500 час. передана ВМФ США термоэлектрическая установка произ-

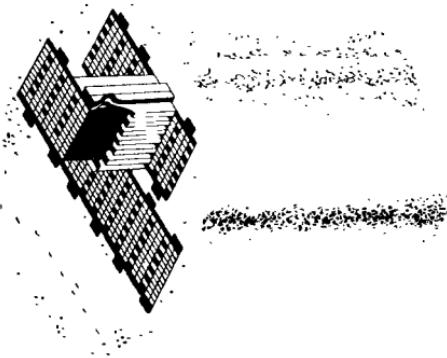


Рис. 127. Вариант компоновки трубчатых блоков термоэлектрического кондиционера

водительностью $1,7 \cdot 10^{-3}$ м³/сек воздуха. Габариты установки: 1220 × 915 × 305 мм.

Нельзя также не упомянуть интересные разработки судовых термоэлектрических кондиционеров фирмы Westinghouse Corp., которая создала универсальную секцию термоэлектрического кондиционера (рис. 128) производительностью 580 вт. Из этих секций можно собирать кондиционеры большей производительности.



Рис. 128. Конструкция секции термоэлектрического кондиционера

1 — штуцер для подвода теплой воды;
2 — поверхность теплообмена вода — воздух;
3 — клеммы; 4 — штуцер для подвода холодной воды;
5 — штуцер для отвода теплой воды;
6 — поверхность теплообмена вода — воздух;
7 — штуцер для отвода холодаией воды

Каждая секция весом 20 кГ состоит из 432 цилиндрических термоэлементов длиной 63,5 мм, имеющих диаметр 107 мм. Горячие спаи термоэлементов в отличие от других конструкций охлаждаются непосредственно забортной водой. Это позволило значительно упростить установку.

После экспериментальных исследований в течение 1250 час. фирмой был внесен ряд конструктивных изменений и в настоящее время проводятся работы по дальнейшему совершенствованию термоэлектрического кондиционера.

§ 18. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И УСТАНОВОК В КАЧЕСТВЕ СУДОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Универсальность термоэлектрических генераторов открывает широкие возможности их использования в качестве источников электроэнергии на судах различных типов.

В настоящее время едва ли представляется возможным четко ограничить области применения термоэлектрогенераторов на судах.

Это объясняется тем, что судовые потребители электроэнергии отличаются большим разнообразием как по своей мощности, так и по ряду требований, предъявляемых к источникам питания. Кроме того, предполагаемые области применения термоэлектро-генераторов в качестве источников электроэнергии на судах в значительной мере зависят от степени их эффективности, а также стоимости и дефицитности материалов, производственной базы и других показателей, не являющихся постоянными.

Тем не менее, достигнутый уровень развития термоэлектричесства позволяет говорить о целесообразности применения термоэлектрогенераторов мощностью до сотен ватт в качестве источников питания навигационной аппаратуры и средств связи и мощностью до сотен киловатт в качестве аварийных и вспомогательных электрогенераторов.

В этой связи интересно рассмотреть следующие типы судовых термоэлектрических источников электроэнергии:

а) автономные термоэлектрические установки с источниками энергии на органическом топливе;

б) автономные термоэлектрические установки с радиоизотопными источниками энергии;

в) термоэлектрогенераторы в составе цикла пар — конденсат паротурбинных установок;

г) термоэлектрогенераторы в составе цикла газотурбинных и дизельных установок.

АВТОНОМНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ТОПЛИВЕ

Первые маломощные термоэлектрогенераторы, предназначавшиеся для питания радиопередатчиков, разработаны в 1941 г. в Физико-техническом институте АН СССР в Ленинграде.

Эти термоэлектрогенераторы были еще очень несовершенны и сложны, однако работали достаточно надежно. В дальнейшем в СССР разрабатывались различные модели термоэлектрогенераторов в диапазоне от 1,6 до 500 вт, в которых использовалась лучистая теплота керосиновых ламп, продуктов сгорания дров и другие виды тепловой энергии.

В 1953 г. было начато серийное производство термоэлектрогенераторов ТГК-3 мощностью 3 вт, предназначенных для питания радиоприемников. В качестве источника тепловой энергии ТГК-3 использовалась 20-линейная керосиновая лампа «Молния» [14], [30].

В дальнейшем в Советском Союзе было разработано несколько типов термоэлектрогенераторов ТГУ-1 мощностью 15 вт для питания радиостанций «Урожай», термоэлектрогенератор мощностью 1 квт и др. [30].

Таким образом, нашей стране по праву принадлежит приоритет в вопросах разработки и практического применения термоэлектрогенераторов.

Отечественные работы в рассматриваемой области и быстрое развитие исследований полупроводниковых материалов послужили основой для широкого применения термоэлектрогенераторов [66], [134], [138], [150], [155—159], [160]. В настоящее время термоэлектрогенераторы, использующие энергию продуктов сгорания органического топлива, находят применение и в качестве источников питания небольшой мощности на судах различных типов. Например, по заказу ВМФ США фирма Westinghouse Corp. в 1960 г. разработала экспериментальную модель термоэлектрогенератора мощностью 5 квт. Конструктивно эта модель выполнена из двух секций (рис. 129), имеющих диаметр 262 мм и высоту 562 мм [78, 79], [101]. Горячие спаи термоэлементов, примыкающие к камере сгорания, в которой сжигается органическое топливо (керосин, пропан), могут быть нагреты до 923° К, а холодные, охлаждаемые водой, поддерживаются при температуре 283° К. Фирмой были проведены экспериментальные исследования различных типов термоэлементов



Рис. 129. Экспериментальный термоэлектрогенератор на органическом топливе мощностью 5 квт

и термоэлектрических батарей. Одна из этих батарей показана на рис. 130 [44].

Более подробные сведения относительно конструкции и характеристик разработанного в США термоэлектрогенератора мощностью около 100 *вт* приводятся в работах [68—70].

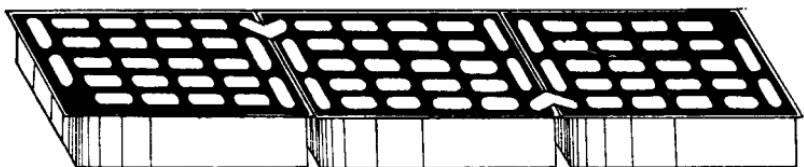


Рис. 130. Конструкция термоэлектрической батареи экспериментального термоэлектрогенератора мощностью 5 *квт*

Характеристики газокамерного термоэлектрогенератора

$$P = 100 \text{ вт}$$

Эффективная электрическая мощность, <i>вт</i>	102,5
Внутреннее электрическое сопротивление термобатарей при комнатной температуре, <i>ом</i>	0,34
Внутреннее электрическое сопротивление термобатарей при рабочей температуре, <i>ом</i>	0,96
Температура горячих спаев, $^{\circ}\text{К}$	855
Температура холодных спаев, $^{\circ}\text{К}$	426
К. п. д. (без учета потерь тепла с уходящими газами), %	3,7
Эффективный к. п. д. (с учетом потерь тепла с уходящими газами), %	2,4
Общий вес термоэлектрогенератора, <i>кг</i>	21,3

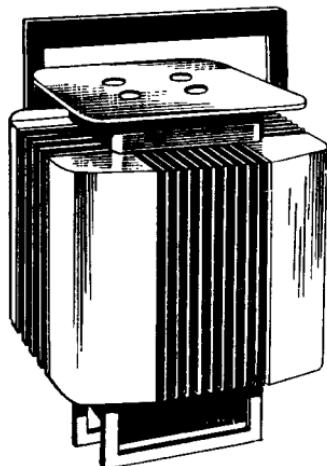


Рис. 131. Общий вид термоэлектрогенератора на органическом топливе мощностью 100 *вт*

Демонстрационная модель термоэлектрогенератора показана на рис. 131.

При разработке термоэлектрогенератора особое значение придавалось обеспечению максимальной эффективности при минимальных габаритах и весе. Для этого был проведен тщательный выбор полупроводниковых веществ, обеспечивающих возможность получения высокоэффективных термоэлементов на перепад температур $150 \div 600$ град. В окончательном варианте для верхнего каскада *p*-ветви ($873 \div 723^{\circ}\text{K}$) был принят сплав GeTe, для нижнего ($723 \div 423^{\circ}\text{K}$) — сплав ZnSb. Максимальный к. п. д. составил 6,5%.

Конструктивно термоэлементы выполнены плоскими и состоят из ветвей цилиндрического сечения. Коммутация

по горячей стороне осуществлена пайкой, по холодной — посредством пружинных контактов с гибкими металлическими теплоэлектропроводами. Во избежание взаимодействия полупроводникового вещества с атмосферой термоэлементы покрывались специальным цементным составом. Батареи были помещены в полости с контролируемой газовой средой.

Серьезное внимание при разработке было уделено конструкции камеры сгорания и поверхностей теплообмена, которые должны были удовлетворять требованиям высокой эффективности в соче-

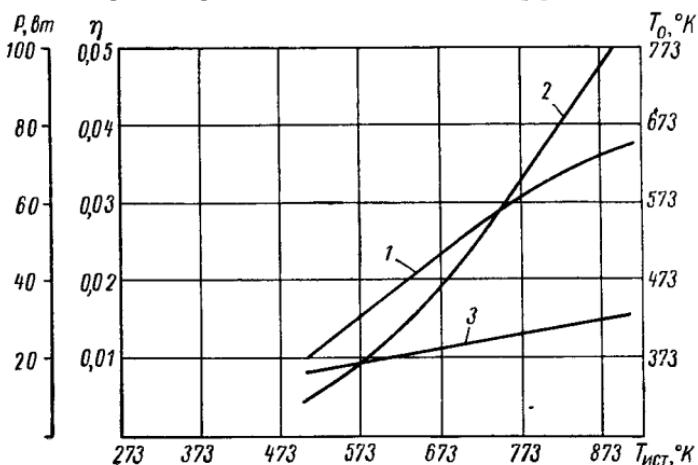


Рис. 132. Графики зависимости мощности, к. п. д. и температуры на горячей стороне поверхности теплообмена от температуры источника для термоэлектрогенератора мощностью 100 вт.

1) $\eta = f(T_0)$; 2) $P = f_1(T_0)$; 3) $T_0 = f(T_{ист})$

тании с компактностью. Следовало обеспечить равномерность распределения температур по поверхности термобатарей и требуемые значения удельных тепловых потоков при наименьшей величине поверхности теплопередачи.

Было разработано и испытано шесть вариантов камер сгорания ($100 \times 100 \times 280$ мм), обеспечивавших на внутренней поверхности обечайки (нержавеющая сталь толщиной 3 мм) температуры в диапазоне $853 \div 893^\circ K$.

В окончательном варианте камера сгорания имеет четыре форсунки, работающие на пропане.

Для улучшения теплоотдачи по холодной стороне испытывались конструкции теплопередающей поверхности плавникового и штыревого типов. Конструкции штыревого типа при использовании принудительной циркуляции охлаждающего воздуха оказались наиболее эффективными.

Результаты испытаний термоэлектрогенератора показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных характеристик (рис. 132). Однако невозможность обеспечить изотермический

подвод и отвод теплоты, несколько большее расчетного термическое сопротивление конструкционных элементов и тепловые мостики понизили теоретически определенное значение эффективности на 10÷22% [68].

В начале 60-х годов в США разработано, в том числе по заказам флота, большое количество термоэлектрогенераторов на органическом топливе, например термоэлектрогенератор мощностью 260 *вт*, конструкции которых аналогичны рассмотренным выше.

Характеристики газокамерного термоэлектрогенератора

$$P = 260 \text{ вт}$$

Эффективная электрическая мощность, <i>вт</i>	260
Полная электрическая мощность, <i>вт</i>	298
Мощность, затрачиваемая на собственные нужды (вентилятор), <i>вт</i>	38
Напряжение на номинальном режиме, <i>в</i>	27,1
Сила тока на номинальном режиме, <i>а</i>	9,6
Температура горячих спаев, $^{\circ}\text{К}$	860
Температура холодных спаев, $^{\circ}\text{К}$	424
Эффективный к. п. д., %	2,42
Удельная мощность, $\text{вт}/\text{кГ}$	17,3
Расход пропана, $\text{кг}/\text{сек}$	$0,19 \cdot 10^{-6}$
Общий вес термоэлектрогенератора, <i>кГ</i>	15

В заключение рассмотрим типовой термоэлектрический генератор небольшой мощности, разработанный в США и предназначенный для использования в качестве автономного источника электроэнергии, работающего на жидком топливе [28]. Конструкция термоэлектрогенератора и отдельных его узлов показана на рис. 133. В рассматриваемом конструктивном исполнении этот термоэлектрогенератор может быть спроектирован на различные мощности.

Характеристики газокамерного термоэлектрогенератора

$$P = 30 \text{ вт}$$

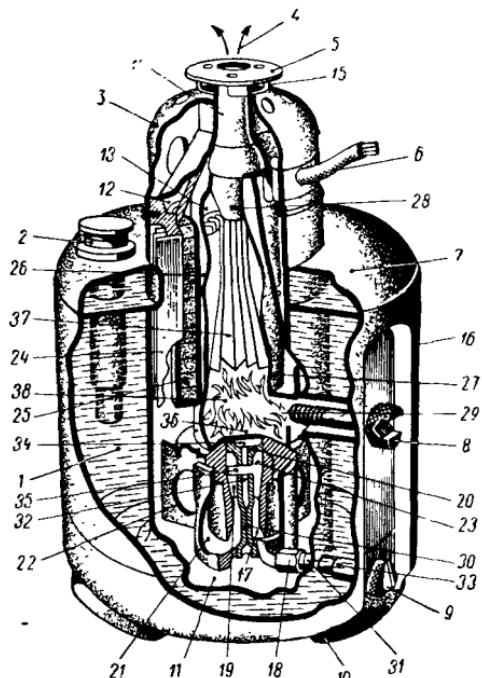
Эффективная электрическая мощность, <i>вт</i>	30
Напряжение на номинальном режиме, <i>в</i>	6
Температура горячих спаев, $^{\circ}\text{К}$	775
Температура холодных спаев, $^{\circ}\text{К}$	477
Материал ветвей термоэлемента (<i>p</i> - и <i>n</i> -типов)	PbTe
Размер ветвей термоэлемента, <i>мм</i>	$7,94 \times 6,35 \times 6,35$
Температура газовой смеси в камере сгорания, $^{\circ}\text{К}$	533
Температура пламени, $^{\circ}\text{К}$	3173
Температура уходящих газов, $^{\circ}\text{К}$	1713
Средняя температура ребер радиатора, $^{\circ}\text{К}$	433
Температура охлаждающего воздуха на выходе, $^{\circ}\text{К}$	363
Средняя скорость охлаждающего воздуха, <i>м/сек</i>	0,3
Давление газовой смеси в камере сгорания, $\text{кГ}/\text{см}^2$	1,09
Длительность непрерывной работы без заправки топливом, часы	4
Моторесурс, часы	1000
Длительность выхода на режим номинальной мощности, <i>сек</i>	300
Общий вес термоэлектрогенератора (без веса топлива), <i>кГ</i>	3,2

В качестве источника тепловой энергии могут быть использованы пропан, бензин, керосин, дизельные топлива и некоторые другие виды жидкого топлива.

Принцип работы термоэлектрогенераторов заключается в следующем. Для заполнения топливом бака 7 удаляется насос 2; после чего бак заполняется, и насос устанавливается на место. Далее с помощью насоса в баке создается некоторое избыточное давление.

Рис. 133. Конструкция термоэлектрогенератора, предназначенного для работы на жидким топливе.

1 — жидкое топливо; 2 — топливный насос; 3 — кожух; 4 — выхлопное отверстие; 5 — крышка; 6 — токоотводы; 7 — топливная емкость; 8 — запальное устройство; 9 — клапан; 10 — опоры; 11 — отверстие для входа воздуха; 12 — отверстия для выхода воздуха; 13 — конфузор; 14 — выхлопной патрубок; 15 — фланец; 16 — обечайка корпуса; 17 — канал для прохода топлива; 18 — регулирующий клапан; 19 — эжекционные каналы; 20 — днище смесительной камеры; 21 — воздушная полость; 22 — ребра жесткости; 23 — колпачковый топливопровод; 24 — поверхность охлаждения; 25 — термобатареи; 26 — поверхность нагрева; 27 — обечайка камеры сгорания; 28 — профилированный конус; 29 — запал; 30 — канал для прохода воздуха; 31 — топливопровод; 32 — эжектор; 33 — жиклер; 34 — осевой топливный канал; 35 — радиальные топливные каналы; 36 — днище камеры сгорания; 37 — камера сгорания; 38 — смесительная камера



Запал 8 устанавливается в держатель, и запальное устройство вставляется в гнездо так, чтобы запал через отверстие вошел в камеру сгорания 37. Подача топлива осуществляется по топливному трубопроводу 31 через регулирующий клапан в смесительную камеру, где образуется газовоздушная смесь. Благодаря испарению топлива происходит подсос воздуха. Газовоздушная смесь поступает в камеру сгорания 37, где воспламеняется от запального устройства. Горячие газы, отдавая тепло ребрам 26, попадают в выхлопной патрубок 14 и далее через отверстие 4 выбрасываются в атмосферу.

Циркуляция охлаждающего воздуха осуществляется за счет разности давлений в каналах 11 и 12, которая образуется вследствие некоторого понижения давления в каналах 4 благодаря эжекционному воздействию потока уходящих газов.

АВТОНОМНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С РАДИОИЗОТОПНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Термоэлектрические установки, предназначенные для генерирования электроэнергии и работающие в сочетании с радиоизотопными источниками теплоты, представляют собой весьма удачное сочетание элементов, обеспечивающих создание простых и компактных источников питания. Значительным преимуществом таких установок является отсутствие теплоносителя и возможность передачи теплоты к горячим спаям теплопроводностью. Отвод теплоты может осуществляться различными способами: конвекцией, излучением или одновременно и тем и другим способом [104], [106], [107].

Эти преимущества термоэлектрических установок с радиоизотопными источниками энергии в целом ряде случаев позволяют считать их использование наиболее целесообразным.

Однако несмотря на возможность создания компактных устройств, позволяющих без вмешательства человека эксплуатировать их годами, термоэлектрические установки рассматриваемого типа могут найти применение лишь как источники питания небольшой мощности (от нескольких до сотен ватт). Это объясняется относительно небольшой энергоемкостью и высокой стоимостью радиоизотопных источников тепла [123], [164]. Однако в отдельных случаях подобные устройства незаменимы, тем более что в диапазоне малых мощностей ядерные реакторы, критическая масса топлива которых исключает возможность их применения на мощности меньше некоторой определенной величины, оказываются неприемлемыми. Вышеизложенное позволяет понять те причины, по которым радиоизотопные термоэлектрические установки нашли применение в качестве бортовых электроэнергетических станций спутников Земли и других космических объектов. Однако они представляют несомненный интерес и как источники энергии для питания приборов автоматических метеорологических станций, радиомаяков, гидрографического оборудования, а также судовой навигационной аппаратуры.

Одна из первых установок такого типа — отечественная установка «Бета-3», где источником тепловой энергии служил β -радиоактивный изотоп Ce^{144} , предназначалась для питания автоматической метеорологической станции с помощью накопителей, обеспечивающих электроэнергией радиопередатчик мощностью около 150 вт.

В настоящее время в мире успешно эксплуатируется несколько десятков радиоизотопных термоэлектрических установок мощностью от нескольких до сотен ватт. Особенности этих устройств хорошо видны на схеме типовой конструкции, показанной на

рис. 134, и могут быть рассмотрены также на примере устройства SNAP-3 *, разработанного в США (рис. 135) [44, 45], [81].

В качестве источника тепловой энергии в установке использовался изотоп Po^{210} , имеющий период полураспада 138 дней. Выбор этого источника определился достаточно приемлемой плотностью энерговыделения. Радиоактивный изотоп помещался в капсулы из нержавеющей стали, которые устанавливались в нагре-

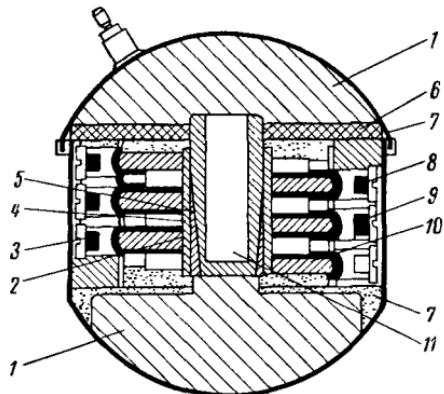


Рис. 134. Конструкция термоэлектрогенератора с радиоизотопным источником энергии.

1—тепловая изоляция; 2—«горячая» коммутационная пластина; 3—обечайка; 4—термоэлементы; 5—цилиндр с радиоизотопным источником; 6—уплотнительная изоляционная прокладка; 7—сферическое днище; 8—пружина; 9—«холодная» коммутационная втулка; 10—теплоэлектроизоляционные кольца; 11—радиоизотопный источник



Рис. 135. Общий вид экспериментального образца термоэлектрической установки SNAP-3

вательном цилиндре. Последний закрывался резьбовой крышкой, привариваемой к корпусу после заполнения капсулами.

Между наружным корпусом и нагревательным цилиндром

были размещены термоэлементы, имеющие одинаковую длину (25,4 мм) и диаметры: 5,3 мм — ветвь *n*-типа и 5,7 мм — ветвь *p*-типа. 27 термоэлементов располагались радиально в шести вертикальных рядах. Коммутация по горячей стороне осуществлялась прижимом термоэлементов к коммутационному кольцу, внутренняя поверхность которого была покрыта двуокисью алюминия, примененного в качестве электроизоляции. Прижимное усилие каждой ветви термоэлемента составляло около 1 кГ и обеспечивалось пружиной и регулировочным винтом. В качестве изоляции на холодных спаях было применено оксидное покрытие, нанесенное

* SNAP—System for Nuclear Auxiliary Power — системы вспомогательных источников энергии. Нечетные номера присваиваются системам с радиоизотопными, четные — системам с ядерными источниками тепловой энергии [142, 143], [156], [166—168].

на алюминиевые втулки, помещенные между термоэлементами и прижимными пружинами.

Все пространство, не занятное термоэлементами, было заполнено тепловой изоляцией, препятствующей рассеянию энергии в окружающее пространство.

Термоэлектрическая установка SNAP-3 прошла серию экспериментальных исследований, с помощью которых удалось определить степень влияния на ее работу окружающих условий, действия вибраций, ударных нагрузок и других факторов. Результаты испытаний оказались вполне удовлетворительными.

После некоторых усовершенствований термоэлектрические станции SNAP-3 были установлены на космических кораблях ВМФ США, которые в 1961 г. были выведены на орбиту [56], [110].

Термоэлектрическая станция SNAP-3 — одна из первых установок, предназначенных для использования на космических объектах и объектах ВМФ США.

Характеристики экспериментального термоэлектрогенератора SNAP-3 с радиоизотопным источником энергии

$$P = 2,4 \text{ вт}$$

Эффективная электрическая мощность, вт	2,4
Материал ветвей термоэлемента (<i>p</i> - и <i>n</i> -типов)	PbTe
Радиоактивный изотоп	Po ²¹⁰
Температура горячих спаев, °К	655,2
Температура холодных спаев, °К	352,4
Диаметр корпуса термоэлектрогенератора, м	0,120
Высота корпуса термоэлектрогенератора, м	0,140
Эффективный к. п. д., %	5
Общий вес термоэлектрогенератора с топливом, кГ	2,27

Одна из термоэлектрических станций SNAP-3, в которой вместо изотопа Po²¹⁰ был применен изотоп Sr⁹⁰, использовалась в качестве источника энергии для арктической метеостанции (рис. 136). Установка имела полезную электрическую мощность 5 вт и успешно эксплуатировалась без замены топлива в течение двух лет [52].

Аналогична рассмотренной и термоэлектрическая установка SNAP-7A мощностью 10 вт, рассчитанная на непрерывную эксплуатацию в течение 10 лет. Установка предназначена для питания световой аппаратуры навигационного буя, конструкция которого показана на рис. 137 [53].

Начиная с 1960 г. американская фирма Martin-Marietta Corp. разработала по программе SNAP серию термоэлектрических установок полезной мощностью 7÷60 вт.

Конструкция одной из них — SNAP-7B показана на рис. 138.

В качестве источника тепловой энергии в этой установке использовались 14 капсул, заполненных таблетками изотопа Sr⁹⁰ в количестве $2,25 \cdot 10^5$ кюри.

При номинальной мощности 60 *вт* установка SNAP-7B имеет к. п. д. 5% и может функционировать на одной загрузке в течение 10 лет. Установка введена в строй в 1964 г. в качестве источника питания световой и акустической аппаратуры маяка.

В конструктивном отношении близки к рассмотренным и другие термоэлектрические установки типа SNAP-7. Установка SNAP-7E мощ-

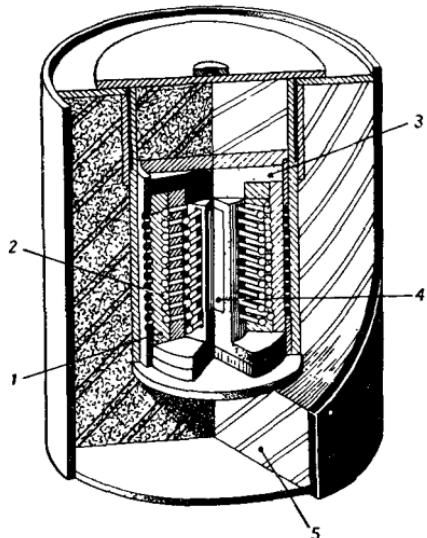


Рис. 136. Общий вид радиоизотопной термоэлектрической установки SNAP-3 для арктической метеостанции.

1 — электрическая изоляция; 2 — термоэлементы; 3 — тепловая изоляция; 4 — источник энергии (титанат стронция $\text{SrTiO}_3 \cdot \text{SrO}$); 5 — стальной цилиндр

ностью 7 *вт*, рассчитанная на работу в течение 10 лет на одной загрузке топлива, в 1962 г. установлена в Антарктиде и служит для питания приборов автоматической метеостанции, а также используется на глубоководных акустических буях (рис. 139) [51—52], [91]. Для питания приборов автоматической плавучей гидрометеостанции используется термоэлектрическая установка SNAP-7D, введенная в строй в 1964 г. и при мощности 60 *вт* имеющая такой же срок службы (рис. 140) [125], [131], [133].

Возможность длительной эксплуатации без какого-либо обслуживания и компактность термоэлектрических установок небольшой мощности с радиоизотопными источниками энергии

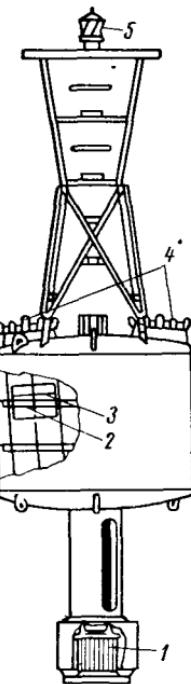


Рис. 137. Общий вид навигационного буя с радиоизотопной термоэлектрической установкой SNAP-7A мощностью 10 *вт*.

1 — радиоизотопная термоэлектрическая установка; 2 — токопреобразователь; 3 — аккумуляторная батарея; 4 — герметически закрывающиеся горловины; 5 — навигационный фонарь

позволили им найти применение и в качестве источников электроэнергии для подводных навигационных устройств. Конструктивно термоэлектрические установки, предназначенные для работы под водой, отличаются от рассмотренных лишь наличием прочного корпуса (рис. 141). Установка такого типа может обеспечить дли-

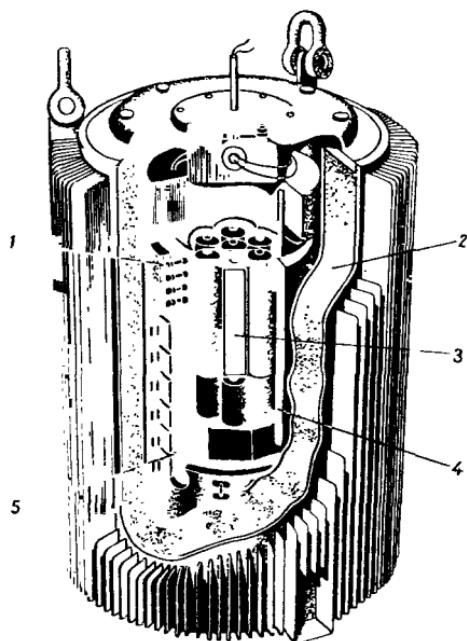


Рис. 138. Общий вид радиоизотопной термоэлектрической установки SNAP-7B мощностью 60 вт.

1 — термоэлектрические батареи; 2 — оболочка из U²³⁸; 3 — капсулы с радиоактивным изотопом; 4 — топливный блок; 5 — тепловая изоляция

тельную работу навигационной аппаратуры глубоководного маяка [74], [102], [149].

Установка типа SNAP-7E мощностью 7 вт, рассчитанная на длительность непрерывной работы в течение двух лет, введена в эксплуатацию в 1964 г. Установка работает на глубине 4500 м, обеспечивая электроэнергией аппаратуру подводного навигационного маяка.

В ноябре 1965 г. в качестве источника электроэнергии навигационного маяка была введена в строй термоэлектрическая установка SNAP-7F мощностью 60 вт.

Следует отметить, что все рассмотренные термоэлектрические установки имеют несомненные положительные качества и обнадеживающие эксплуатационные характеристики, однако они далеко

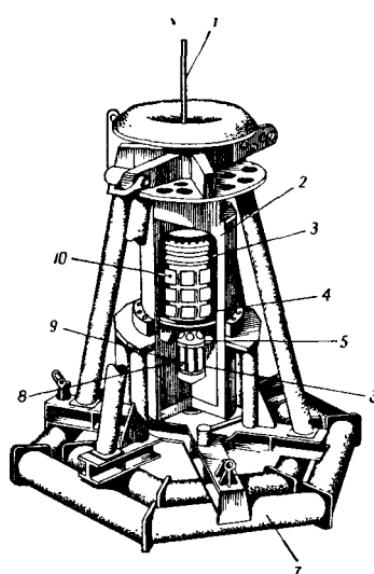


Рис. 139. Конструкция энергетического блока глубоководного навигационного боя с радиоизотопной термоэлектрической установкой SNAP-7E мощностью 7 вт.

1 — кабель; 2 — корпус; 3 — капсула с аппаратурой; 4 — токопреобразователь; 5 — защита из U²³⁸; 6 — термоэлектрическая батарея; 7 — фундаментная рама; 8 — контейнер; 9 — капсулы с титанатом стронция; 10 — аккумуляторная батарея

не исчерпывают всех возможностей термоэлектричества. В связи с этим за рубежом, особенно в США, ведутся большие исследовательские работы по программам SNAP-21 и SNAP-23 [125]. В результате осуществления этих программ начиная с 1966 г. в США предполагалось ввести в строй большое количество радиоизотопных термоэлектрических установок мощностью от 10 до

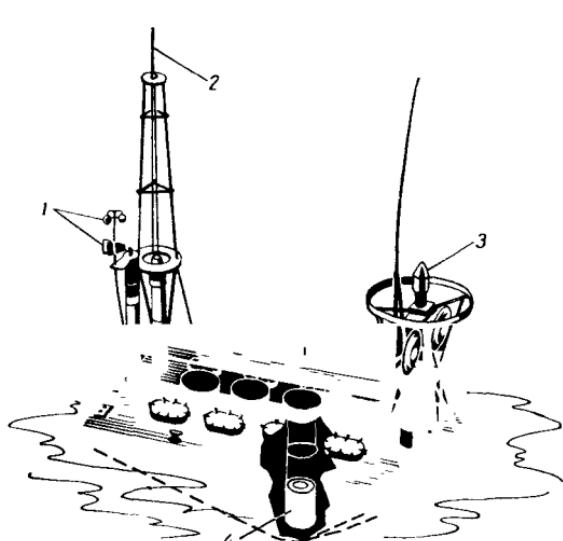


Рис. 140. Плавучий навигационный маяк с радиоизотопной термоэлектрической установкой SNAP-7D мощностью 60 вт.

1—метеорологические приборы; 2—антенна; 3—сигнальный фонарь; 4—термоэлектрическая установка

200 вт, рассчитанных на срок службы не менее 5 лет на одной загрузке радиоизотопного топлива. Эти установки, имеющие значительно меньшие габаритно-весовые характеристики и стоимость, предполагается использовать для обеспечения энергией глубоководной аппаратуры, а также аппаратуры плавучих и береговых навигационных станций.

Одновременно с рассмотренными установками в США по программе SNAP созданы и разрабатываются различные термоэлектрические системы с радиоизотопными источниками, предназначенные для использования в космическом пространстве, в наземных условиях и т. д. [54] (табл. 10).

Область применения термоэлектрических установок рассматриваемого типа по мере уменьшения их стоимости, габаритов и веса, а также накопления опыта эксплуатации будет, очевидно, непрерывно расширяться.

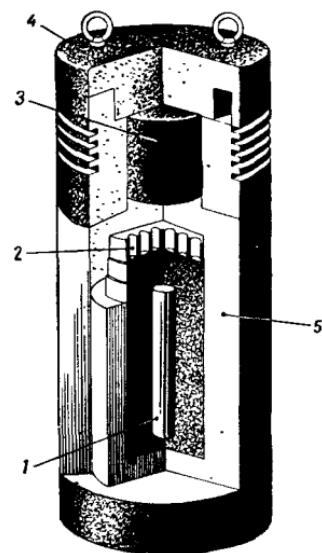


Рис. 141. Конструкция радиоизотопной термоэлектрической установки, предназначенной для питания глубоководной аппаратуры.

1—капсулы с Cs¹³⁷; 2—термоэлементы; 3—токопреобразователь; 4—прочный корпус; 5—тепловая изоляция

Основные характеристики термоэлектрических установок разработанных в США

Термоэлектрическая установка	Область применения	Источник тепловой энергии	Количество радиоактивного изотопа, кюри	Длительность непрерывной работы на одной загрузке, годы	Электрическая мощность, вт
SNAP-1A	Экспериментальный образец	Ce ¹⁴⁴	880	—	125
SNAP-3	То же	Po ²¹⁰	2,3	5	2,4
—	Питание аппаратуры спутников «Transit-IVa» и «Transit-IVb»	Pu ²³⁸	1,6	—	2,7
SNAP-7A	Питание аппаратуры плавучего сигнального буя	Sr ⁹⁰	40,8	10	10
SNAP-7B	Питание аппаратуры берегового маяка	Sr ⁹⁰	225	10	60
SNAP-7C	Питание аппаратуры метеорологической станции	Sr ⁹⁰	40,8	10	10
SNAP-7D	Питание аппаратуры плавучей метеорологической станции	Sr ⁹⁰	225	10	60
SNAP-7E	Питание аппаратуры подводного буя	Sr ⁹⁰	31,0	10	6,5
—	Питание аппаратуры арктической метеорологической станции	Sr ⁹⁰	17,5	—	4,5
SNAP-7F	Питание аппаратуры навигационного буя	Sr ⁹⁰	240	10	60
SNAP-9A	Питание аппаратуры спутников	Pu ²³⁸	—	5	25
SNAP-11	Питание аппаратуры космического корабля «Surveyor»	Cm ²⁴²	—	0,25	25
SNAP-15	Экспериментальный образец	Pu ²³⁸	—	4	0,1
SNAP-17	То же	Sr ⁴⁴	—	5	30
SNAP-19	Питание аппаратуры космического корабля	Pu ²³⁸	—	3	22
SNAP-21	Питание различной береговой и морской аппаратуры	Sr ⁴⁴	—	5	10
SNAP-23	То же	Sr ⁴⁴	—	5	60

Таблица 10

с радиоизотопными источниками энергии,
программе SNAP в 1959—1965 гг.

Термоэлементы		Напряжение на номинальном режиме, в	Сила тока на номинальном режиме, а	К. п. д., %	Суммарный вес с биологической защитой, кГ	Габариты	
Материал	Количество					Высота, м	Диаметр, м
PbTe	277	—	—	5,0	79,3	0,860	0,610
PbTe	27	2,4	1,0	5,8	1,7 (без защиты)	0,139	0,120
PbTe	27	—	—	—	2,1 (без защиты)	0,139	0,120
PbTe	60	5,0	2,0	5,1	850	0,533	0,508
—	120	—	—	5,0	2090	0,880	0,558
PbTe	60	5,0	2,0	5,1	850	0,533	0,508
—	120	—	—	5,0	2090	0,880	0,558
PbTe	60	4,0	1,75	—	3630	1,420	0,760
PbTe	60	—	—	—	770	0,510	0,457
PbTe	—	—	—	4,4	2090 (без защиты)	—	—
PbTe	36	—	—	—	12,3 (без защиты)	0,241	0,508
—	30	—	—	—	—	0,229	0,152
—	—	10	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	8÷10	230	0,685	0,381
—	—	—	—	8÷10	410	0,635	0,635

ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ УТИЛИЗАЦИОННОГО ТИПА

В настоящее время в судовой энергетике широко применяются паротурбинные, газотурбинные и дизельные энергетические установки, обеспечивающие движение судна и удовлетворяющие потребность в различных видах энергии для механизмов, оборудования и аппаратуры общесудового назначения.

В таких установках процесс преобразования химической энергии органического топлива в механическую и электрическую,

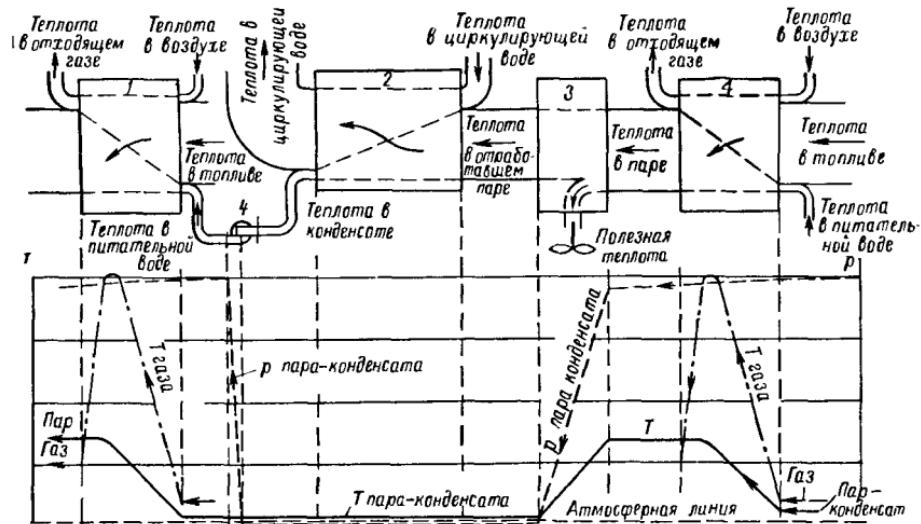


Рис. 142. Диаграмма энергетического баланса судовой паротурбинной энергетической установки.

1 — паровой котел; 2 — конденсатор; 3 — паровая турбина; 4 — питательный насос

как правило, оказывается многоступенчатым. Этот характер процесса обуславливает возникновение многочисленных потерь энергии. В паровом цикле обычно наблюдается два основных вида потерь энергии: потери теплоты с уходящими газами котельной установки и потери теплоты в конденсаторах.

Суммарная величина этих потерь составляет $70 \div 75\%$.

Потери тепла в газовом цикле имеют несколько меньшие значения: $60 \div 65\%$ и складываются из потерь теплоты с уходящими газами и потерь теплоты в теплообменниках.

Однако из диаграмм рис. 142 и 143 видно, что в газовых циклах при высокой температуре теряется значительно больше теплоты, чем в паровых циклах [36], [39].

Большие потери энергии в паровом и газовом циклах судовых энергетических установок вызывают естественное стремление найти такие технические решения, которые бы позволили существенно их уменьшить.

Несомненный интерес с этой точки зрения может представить утилизация различных видов тепловой энергии в термоэлектрических генераторах.

Рассмотрим возможность и целесообразность утилизации теплоты уходящих газов и теплоты, передаваемой охлаждающей воде, в конденсаторах и теплообменных аппаратах. Температура газа, выбрасываемого в атмосферу, может достигать 300—400° С (573—673° К). Использование в качестве холодного источника

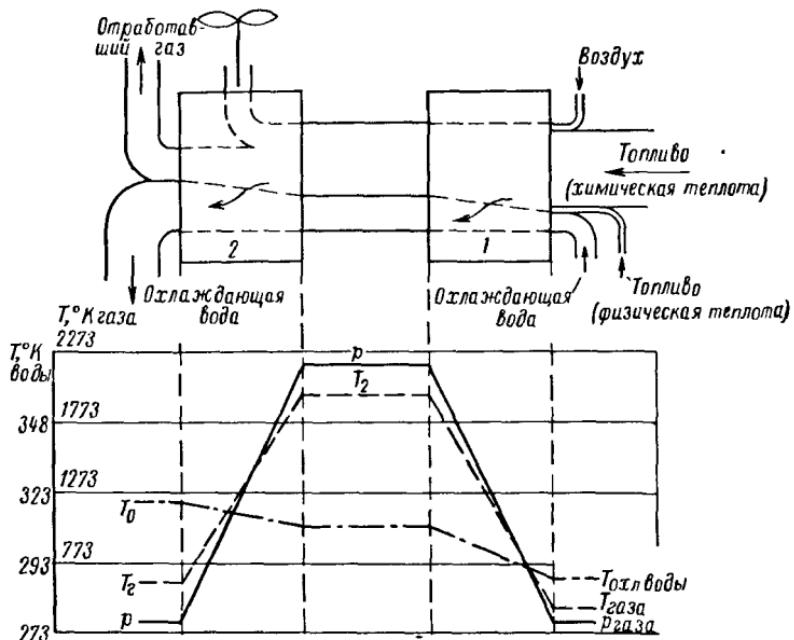


Рис. 143. Типовая диаграмма энергетического баланса судовой газотурбинной (дизельной) энергетической установки.

1 — камера сгорания; 2 — газовая турбина

забортной воды, максимальная температура которой не превышает 30° С (303° К), позволяет рассчитывать на возможность получения на термоэлементах перепада температур не менее 270—370 град.

При современном состоянии развития термоэлектричества эта величина температурного перепада, по-видимому, обеспечит возможность утилизации около 2÷3% тепловой энергии, бесполезно теряемой в судовых энергетических установках. Правда, абсолютная величина выигрыша при этом может оказаться несколько меньшей. Это, во-первых, объясняется возникновением дополнительных затрат энергии на прокачку забортной воды, необходимой для охлаждения холодных спаев термоэлементов, и, во-вторых, некоторым увеличением гидравлического сопротивления газового тракта.

Кроме того, термоэлектрогенератор утилизационного типа, безусловно, вызовет увеличение построечной стоимости энергетической установки.

Совершенно естественно, что все эти вопросы требуют тщательного технико-экономического анализа с учетом конкретных исходных данных экономической эффективности, необходимости в надежном статическом источнике электроэнергии и ограничений по температуре уходящих газов, а также многих других факторов. Тем не менее, следует указать, что существенное уменьшение стоимости и постепенное увеличение к. п. д. термоэлементов позволяют считать вполне обоснованным самое серьезное внимание, которое следует уделить вопросу термоэлектрической утилизации теплоты уходящих газов судовых энергетических установок.

Утилизация низкотемпературной тепловой энергии в конденсаторах паровых установок и теплообменных аппаратах газовых установок принципиально может рассматриваться как одна из возможных областей применения термоэлектричества. Однако при современной эффективности термоэлектрического метода преобразования энергии эта область может представлять лишь теоретический интерес [128].

Действительно, если бы в термоэлектрогенераторах, например в конденсаторе паротурбинной установки, было возможно использовать часть тепловой энергии, отдаваемой забортной воде, это позволило бы увеличить эффективную мощность энергетической установки без дополнительных затрат энергии топлива.

Однако при этом нельзя забывать о влиянии термоэлектрогенератора, встроенного в конденсатор, на общие характеристики паротурбинной установки. При проектировании паротурбинных установок применительно к торговым судам для повышения термического к. п. д. цикла температура конденсации пара принимается не более $299 \div 307^\circ\text{C}$, что соответствует давлению $0,03 \div 0,05 \text{ atm}$ [39].

При средней температуре охлаждающей забортной воды $23 \div 25^\circ\text{C}$ ($296 \div 298^\circ\text{K}$) и конечной разности температур этой воды и конденсата около 10 град оказывается возможным получение приемлемых габаритно-весовых характеристик как конденсатора, так и турбины низкого давления.

Любое отклонение от оптимальных условий в этом случае приведет либо к уменьшению термического к. п. д. цикла, либо к возрастанию габаритов и веса оборудования и механизмов низкотемпературной части парового цикла. Размещение термоэлементов на пути теплового потока от конденсирующегося пара к забортной воде с теплотехнической точки зрения эквивалентно увеличению термического сопротивления поверхности теплообмена. Величина этой поверхности в первом приближении прямо пропорциональна отношению теплопроводностей материала типовых трубок конденсаторов ($1,1 \div 1,2 \text{ W/cm} \cdot \text{град}$) и полупро-

водянико́вого ве́щества тё́рмоэлёмéнтов ($0,02 \div 0,03 \text{ кт}/\text{см} \cdot \text{град}$).

В этом случае термическое сопротивление, а следовательно, и теплопередающая поверхность конденсатора при возрастании полезной мощности энергетической установки всего на десятые доли процента при прочих равных условиях увеличиваются в $40 \div 50$ раз.

Столь значительное увеличение поверхности, так же как и увеличение температуры конденсации при сохранении неизменной поверхности теплообмена конденсатор—термоэлектрогенератор, позволяет считать термоэлектрический метод утилизации теплоты в конденсаторах паровых установок экономически не оправданным, по крайней мере до тех пор, пока не произойдет существенного увеличения эффективности термоэлектрических материалов.

Аналогичные выводы можно сделать и применительно к методу использования в термоэлектрогенераторах теплоты, передаваемой зaborтной воде в теплообменных аппаратах газотурбинных и дизельных установок.

Следовательно, термоэлектрический метод утилизации теплоты судовых энергетических установок в ближайшем будущем, очевидно, может быть применен лишь в установках, характеризующихся относительно большими потерями теплоты с уходящими газами, и то при условии положительных результатов технико-экономического анализа.

Конструктивные особенности термоэлектрогенераторов, в которых используется теплота уходящих газов, определяются специфическими методами организации теплообмена. В этих случаях термоэлектрогенератор неразрывно связан с газовым циклом установки.

В большинстве случаев для использования части энергии отработавших газов судовых двигателей внутреннего сгорания применяются утилизационные котлы. Генерируемый ими пар используется в системах общесудового назначения (отопление, кондиционирование, камбуз, палубные механизмы и т. д.) и во вспомогательных турбогенераторах.

Однако в ряде случаев более целесообразным может оказаться способ утилизации энергии отработавших газов судовых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок при помощи термоэлектрогенераторов.

Последние даже при несколько меньшей эффективности по сравнению с системой утилизационный котел — турбогенератор обладают рядом несомненных преимуществ:

- простотой конструкции;
- бесшумностью работы;
- отсутствием движущихся частей;
- возможностью длительной эксплуатации без обслуживания;
- возможностью размещения термоэлектрогенераторов непосредственно на газовых хлопном тракте (в любой его части).

Весьма важен и тот факт, что для охлаждения термоэлектрогенераторов может быть использовано оборудование системы охлаждения двигателей (рис. 144).

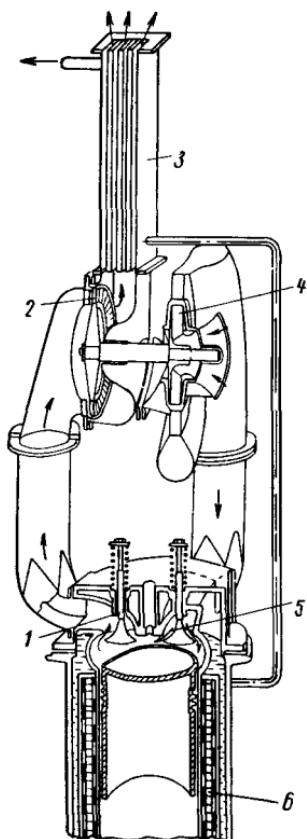


Рис. 144. Схема размещения термоэлементов, предназначенных для утилизации тепла двигателя внутреннего сгорания с газотурбинным наддувом.

1 — выпускной клапан; 2 — газовая турбина; 3 — батарея термоэлементов, использующих тепло выхлопных газов и охлаждаемых водой; 4 — нагнетатель; 5 — выпускной клапан; 6 — батарея термоэлементов, использующих тепло, отводимое от рубашек цилиндра и охлаждаемых водой

Принципиально осуществляется также возможность утилизации теплоты, отводимой охлаждающей водой, например от рубашек цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

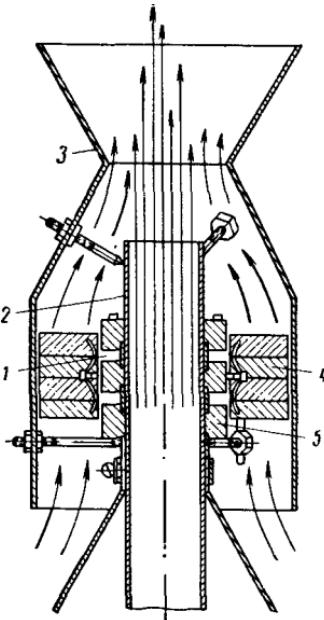


Рис. 145. Конструктивная схема термоэлектрогенератора, предназначенного для дизелей мощностью 5 квт.

1 — термоэлементы; 2 — выхлопная труба; 3 — диффузор; 4 — ребра; 5 — корпус

В настоящее время в США уже проведены испытания ряда опытных образцов термоэлектрических утилизаторов, предназначенных для дизелей, которые характеризуются температурой выхлопных газов около $900 \div 1000^{\circ}$ К (рис. 145). Такая температура газов дает возможность использовать для изготовления термоэлементов один из лучших термоэлектрических материалов — сплавы PbTe *p*- и *n*-типов и обеспечить при этом приемлемые

значения к. п. д. (5—6%) процесса термоэлектрического преобразования энергии при температурах горячего и холодного спаев термоэлементов $T_g = 873 \div 923^\circ\text{K}$, $T_x = 311^\circ\text{K}$.

Однако термоэлектрогенераторы утилизационного типа в настоящее время применяются недостаточно широко. Это объясняется прежде всего их относительно высокой стоимостью, которая, однако, может быть существенно уменьшена в случае серийного производства термоэлектрических батарей. Кроме того, в случае замены утилизационного котла термоэлектрогенератором возникает необходимость в электрификации ряда общесудовых потребителей. Это неизбежно приведет к значительным капитальным затратам, которые необходимо учитывать при выполнении технико-экономического анализа.

§ 19. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Термоэлектрический метод прямого преобразования энергии в главных энергетических установках судов позволяет:

- значительно сократить номенклатуру и количественный состав механизмов и оборудования энергетической установки;
- увеличить надежность;
- автоматизировать процессы регулирования и управления;
- увеличить маневренность (мощность заднего хода, скорость реверса, длительность перехода с одного режима на другой) и другие технико-экономические показатели, обусловливаемые использованием электродвигательных комплексов постоянного тока;
- увеличить простоту и улучшить условия обслуживания (меньшие величины тепловыделений и др.).

Эти качества, даже при несколько меньшей экономичности энергетических термоэлектрических установок, требуют детального изучения. Однако вряд ли возможна разработка каких-то общих рекомендаций, так как требования к установкам в связи с их конкретным применением, а также источники тепловой энергии весьма разнообразны (энергетические установки на органическом топливе или ядерные, паровые или газовые циклы и т. д.).

Рассмотрим возможность использования термоэлектрогенераторов в паровом цикле судовой энергетической установки, в которой используется органическое топливо, с точки зрения экономической целесообразности, включая в это понятие не только величину к. п. д. установки или ее построенную стоимость, но и стоимость получаемой энергии.

Цикл паросиловой установки в координатах $T-S$ (рис. 146) можно разделить на три области частичных циклов:

- I — цикл, соответствующий жидкости;
 II — цикл, соответствующий парообразованию и конденсации;
 III — цикл, соответствующий перегреву и расширению пара.

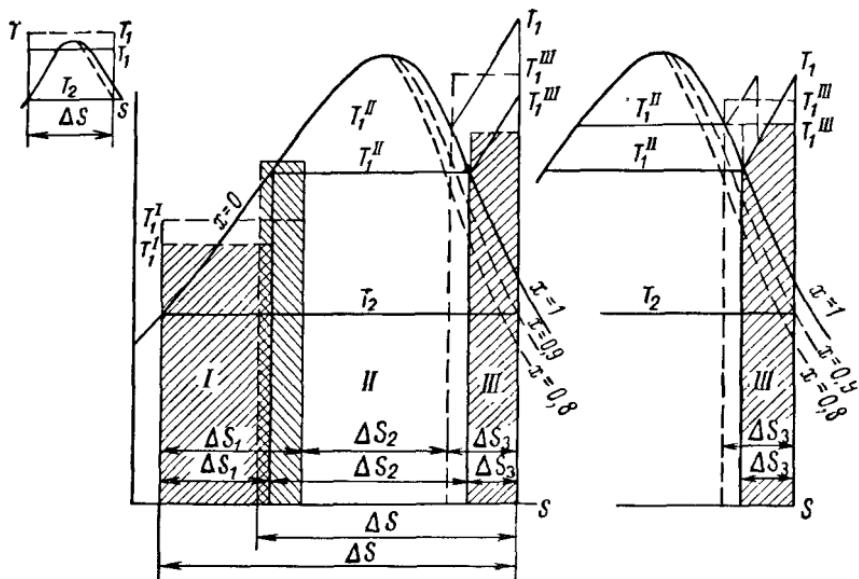


Рис. 146. Диаграмма цикла судовой паротурбинной установки в координатах Т—S.

I — частичный цикл, соответствующий области жидкости; II — частичный цикл, соответствующий области парообразования; III — частичный цикл, соответствующий области перегрева пара

При этом легко доказать, что средний к. п. д. паросилового цикла (цикла Ренкина) оказывается меньшим, чем к. п. д. цикла Карно в заданном интервале температур, т. е.

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{\eta_I F_I + \eta_{II} F_{II} + \eta_{III} F_{III}}{F_I + F_{II} + F_{III}} = \frac{T_{1cp} - T_2}{T_{1cp}} < \eta_{\text{Карно}}, \quad (96)$$

где T_{1cp} — средняя температура, при которой осуществляется подвод теплоты:

$$T_{1cp} = \frac{T_1^I \Delta S_1 + T_1^{II} S_2 + T_1^{III} \Delta S_3}{\Delta S} < T_1;$$

F_I, F_{II}, F_{III} — площади диаграмм частичных циклов;
 $\eta_I, \eta_{II}, \eta_{III}$ — термические к. п. д. частичных циклов,
 или

$$\eta_{\text{терм}} = a \eta_{\text{Карно}}, \quad (97)$$

где a для любой части термодинамического цикла современных паротурбинных установок можно считать лежащим в диапазоне $0,6 \div 0,7$ [39].

Следовательно, если говорить о возможности полной замены парогенераторов, турбин и конденсаторов термоэлектрогенератором, к. п. д. процесса преобразования энергии должен находиться в диапазоне $0,6 \div 0,7$ (без учета большего по сравнению с главной турбиной к. п. д. гребного электродвигателя постоянного тока). Однако, как следует из графика рис. 147, величина zT для рассматриваемого случая должна быть не менее $7 \div 10$. Современные же термоэлектрические материалы характеризуются величиной $zT = 1,0 \div 1,2$ и обеспечивают возможность получения значений термического к. п. д. не более $18 \div 20\%$ величины к. п. д.

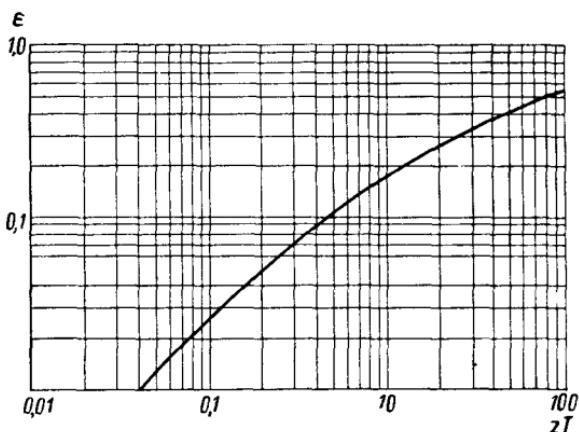


Рис. 147. График зависимости доли к. п. д. цикла Карно ϵ от величины zT

цикла Карно в рассматриваемом диапазоне температур. Естественно, такие показатели не дают оснований для утверждения экономической целесообразности частичной или полной замены оборудования паросиловой установки термоэлектрогенераторами.

Если на основании количественных характеристик диаграмм рис. 148 выполнить аналогичные расчеты для различных газовых циклов, можно убедиться, что и здесь величина a должна находиться в диапазоне $0,41 \div 0,68$. Таким образом, использование термоэлектрогенераторов вместо оборудования газотурбинных или дизельных установок экономически нецелесообразно.

В приведенных рассуждениях речь шла о полной или частичной замене парового или газового цикла. Однако существует еще одна возможность использования термоэлектрогенераторов в составе паротурбинных и газотурбинных судовых установок — применение так называемых предвключенных термоэлектрогенераторов.

В судовых паротурбинных установках температура пара ограничивается значениями $793 \div 803^\circ\text{K}$ (давление пара $60 \div 70\text{ atm}$)

при использовании низколегированных сталей перлитного класса или $883 \div 903^\circ\text{K}$ (давление пара $100 \div 120$ ата) в случае высоко-легированных сталей аустенитного класса. При больших температурах стойкость этих материалов вследствие ползучести и коррозии резко уменьшается. Кроме того, дальнейшее возрастание температуры пара дает весьма незначительный выигрыш в к. п. д. цикла Ренкина, который не может скомпенсировать возникающие при этом серьезные трудности.

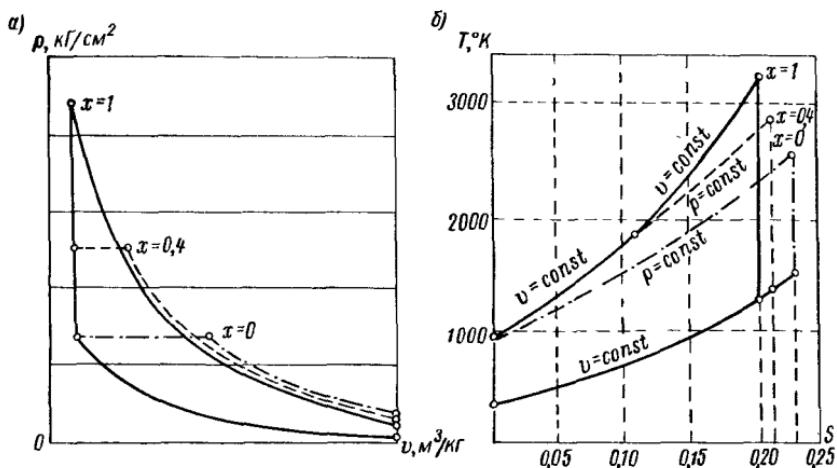


Рис. 148. Диаграммы циклов судовых газотурбинных установок в координатах $p-v$ (а) и $T-S$ (б)

Такого же рода ограничения максимальной температуры рабочего агента имеют место и в газотурбинных установках. При этом увеличение максимальной температуры газа до значений выше 1273°K ограничено прочностью материала лопаток турбины.

Таким образом, как в паровом, так и в газовом цикле максимальные температуры рабочих агентов практически ограничены значениями $1073 \div 1273^\circ\text{K}$.

Температура же газового пламени при сжигании органического топлива составляет не менее 1873°K и таким образом обеспечивает возможность дополнительного использования температурного интервала примерно от 1273 до 1673°K .

Использование в этом интервале температур прёдвыключенного термоэлектрогенератора с точки зрения общего к. п. д. цикла вполне оправдано, так как тепловая энергия топлива в этом случае частично преобразуется в электрическую энергию, а оставшаяся ее часть в турбинной установке реализуется в механическую энергию. Таким образом, достигается чистый выигрыш по мощности установки, прямо пропорциональный величине к. п. д. процесса прямого преобразования энергии в термоэлектроген-

раторе. Возникающие при этом трудности, связанные с подбором конструкционных материалов для термоэлектрогенераторов, можно преодолеть значительно легче, чем в случае котельных или газотурбинных установок. Это объясняется тем, что конструкции поверхности теплообмена термоэлектрогенератора по горячей стороне взаимодействуют лишь с газовой средой и не подвержены одновременному воздействию больших перепадов давлений в условиях контакта с газом, водой или паром. В результате создаются предпосылки для выбора наиболее подходящих к рассматриваемым условиям конструкционных материалов.

Таким образом, с термодинамической точки зрения использование предвключенных термоэлектрогенераторов в составе цикла паротурбинной или газотурбинной установки, по-видимому, следует считать оправданным. Однако экономическая целесообразность такого решения требует оценки степени увеличения построечной стоимости установки, которая обусловливается введением термоэлектрогенератора и одновременным увеличением габаритов, а следовательно, и стоимости котельной установки (в случае газотурбинной установки построечная стоимость возрастает лишь на величину стоимости термоэлектрогенератора).

Выводы относительно экономической целесообразности применения на судах атомных термоэлектрических установок в значительной степени определяются специфическими особенностями ядерного источника энергии и имеют лишь частный характер ввиду многообразия типов и конструкций ядерных реакторов.

Практически могут быть рассмотрены три схемы, основанные на принципе сочетания ядерного источника и термоэлектрического преобразователя энергии:

- ядерный реактор и отдельный термоэлектрогенератор;
- ядерный реактор со встроенным термоэлектрогенератором, размещаемым непосредственно в активной зоне;
- ядерный реактор со встроенным и отдельным термоэлектро-генераторами.

Первая схема может быть признана экономически целесообразной, видимо, при тех же условиях, которые были получены при анализе парового цикла с котельной установкой, т. е. при условии значительного увеличения эффективности термоэлектрических материалов. При использовании второй и третьей схем к эффективности термоэлектрических материалов с этой точки зрения могут быть предъявлены несколько меньшие требования. Последнее объясняется возможностью некоторого уменьшения построечной стоимости установки по сравнению со стоимостью атомной энергетической установки обычного типа.

Поскольку топливная составляющая стоимости атомных установок имеет меньшую величину, чем установок, работающих на органическом топливе, экономическая целесообразность их применения в судовой энергетике может быть достигнута при меньшей

эффективности процесса прямого преобразования энергии, чем в случае установок, в которых используется органическое топливо. Следует также отметить, что в целом ряде случаев даже при больших затратах атомные термоэлектрические установки благодаря ряду неоспоримых преимуществ уже в настоящее время могут оказаться предпочтительнее.

Преимущества атомных термоэлектрических установок складываются из преимуществ энергетических установок с ядерным источником энергии и энергетических установок с прямым преобразованием энергии и электродвигательным комплексом.

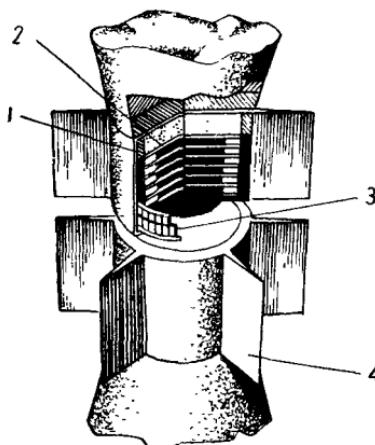


Рис. 149. Конструктивная схема атомной термоэлектрической установки SNAP-10

1 — отражатель (Be); 2 — ядерное топливо ($U + ZrH$); 3 — термоэлектрогенератор (GeSi); 4 — обогретая поверхность теплообмена

Первая атомная термоэлектрическая установка с ядерным источником энергии «Ромашка» создана в СССР в 1964 г. [19].

Характеристики атомной термоэлектрической установки «Ромашка»

Тепловая мощность ядерного реактора, квт	40
Эффективная электрическая мощность, вт	500÷800
Ядерное топливо и замедлитель	UC ₂ (графит)
Загрузка ядерного топлива, кГ	4,90
Материал отражателя	Be
Температура наружной поверхности отражателя °К	1253
Температура основания излучающих ребер, °К	823
Величина нейтронного потока (в центре и на границе активной зоны), <i>нейtron/cm²·сек</i>	10·10 ¹³ —7·10 ¹²
Материал термоэлементов	GeSi
К. п. д. энергетической установки, %	1,25÷2,0

Особенности конструкции элементов установки «Ромашка» определяются следующими факторами:

— использованием ядерного реактора с твердым замедлителем;

— осуществлением подвода теплоты к горячим спаям термоэлементов теплопроводностью;

— отводом теплоты от холодных спаев термоэлементов излучением.

Атомная термоэлектрическая установка «Ромашка» была выведена на режим в 1964 г. и успешно эксплуатировалась в течение длительного времени. Эксплуатация установки позволила накопить немалый опыт, весьма полезный для дальнейшего проектирования электроэнергетических систем такого типа.

В конструктивном отношении близка к «Ромашке» атомная термоэлектрическая установка SNAP-10, разработанная в США (рис. 149) [118], [145].

Характеристики атомной термоэлектрической установки SNAP-10

Эффективная расчетная электрическая мощность, вт	500
Экспериментально достигнутая электрическая мощность, вт	300
Материал ветвей термоэлементов (<i>p</i> - и <i>n</i> -типов)	GeSi
Эффективный к. п. д. установки, %	2,5

Эта установка, рассчитанная на мощность 500 вт, включает термоэлектрогенератор, состоящий из 786 термоэлементов (сплавы PbTe и GeBiTe). В процессе испытаний при к. п. д. 2,5% установка SNAP-10 развила мощность около 0,3 квт.

Ядерный реактор установки с замедлителем из гидрида циркония представляет собой двухзонную сборку, критичность которой достигается уменьшением зазора между этими сборками. В целях обеспечения безопасности эксплуатации реактор спроектирован с большим отрицательным температурным коэффициентом реактивности.

Атомная термоэлектрическая установка SNAP-10 практического применения не нашла, так как требовала значительной доработки. Полученные при ее опытной эксплуатации данные были использованы для разработки более совершенной бортовой электростанции SNAP-10A космического корабля, которая в 1965 г. в течение нескольких десятков часов работала на борту объекта [163], [165].

На рис. 150 показана принципиальная схема, на рис. 151 — общий вид установки SNAP-10A. В качестве источника тепловой энергии в установке был использован гомогенный ядерный реактор на тепловых нейтронах мощностью 35 квт, в качестве замедлителя — гидрид циркония [125]. Отвод тепла из активной зоны ядерного реактора и его подвод к горячим спаям термоэлементов осуществлялись теплоносителем — эвтектическим сплавом Na—K, а принудительная циркуляция теплоносителя — при помощи электромагнитных насосов, получавших питание от автономных секций термоэлектрогенератора.

Отвод тепла от холодных спаев производился излучением. Термоэлектрогенератор установки, состоящий из GeSi-термоэлементов, скоммутирован методом пайки.

На базе энергетических систем SNAP-10 и SNAP-10A в США разрабатывается ряд электроэнергетических установок, предназначенных для использования на глубоководных объектах. В частности, предполагается создание атомной термоэлектрической

установки с реактором типа SNAP-10, рассчитанной на эффективную электрическую мощность 350 *вт*, для питания различной глубоководной аппаратуры. Термоэлектрогенератор установки спроектирован в виде батарей, расположенных по периферии активной зоны ядерного реактора и состоящих из 1000 термоэлементов (материал ветвей термоэлементов — сплав PbTe *p*- и *n*-типов). Термоэлементы рассчитаны на работу при температурах спаев 700 и 533° К. Отвод тепла должен осуществляться морской водой через слой электрической изоляции и герметизирующую металлическую стенку. Биологическая защита установки, в частности слой свинца толщиной 5 см, рассчитана из условия уменьшения уровней излучения на расстоянии 7,5 м от установки через 10 час. после остановки реактора до значений 60 *мр/час*.

На основе системы SNAP-10А в настоящее время в США разрабатываются электроэнергетические

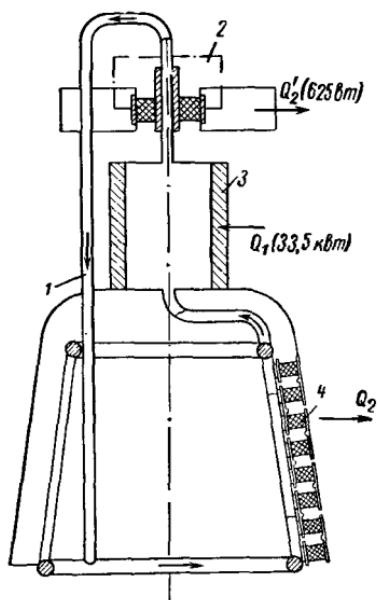
Рис. 150. Принципиальная схема атомной термоэлектрической установки SNAP-10A

1 — система теплоносителя; 2 — электромагнитный насос; 3 — ядерный реактор; 4 — батареи термоэлементов

установки эффективной электрической мощностью 500÷2000 *вт*, предназначенные для питания различной глубоководной аппаратуры на глубинах до 3650 м при непрерывной работе без обслуживания в течение 5 лет. Установки предполагается разместить в двух сферических контейнерах из титанового сплава диаметром 910 мм.

Нижний контейнер предназначается для размещения энергетического оборудования, верхний — для аппаратуры и систем автоматического регулирования и управления. В качестве биологической защиты применены гидрид лития, заполняющий свободный объем контейнеров, и слой свинца толщиной 5 см, обеспечивающие безопасный доступ к установке непосредственно после выключения ядерного реактора.

В случае использования на обитаемых подводных аппаратах установка может быть оснащена дополнительной нейтронной за-



щитой в виде емкости, заполненной водой, и устройством для компенсации изменений забортного давления, а также, если это необходимо, быть форсирована до значительно больших мощностей (табл. 11).

Таблица 11

**Зависимость расчетных весовых характеристик
атомной термоэлектрической установки SNAP-10A
от эффективной электрической мощности и температуры
теплоносителя на выходе из реактора**

Темпера- тура тепло- носителя на выходе из реактора, °К	Эффективная электрическая мощность (<i>вт</i>) при различном весе установки, кГ				
	385	475	565	655	1055
793	500	750	1000	1250	—
868	800	1200	1550	1900	—
923	1000	1450	1900	—	—
973	1350	2000	—	—	12 000

На основе энергетических систем SNAP-8, SNAP-10 и SNAP-10A в США разработан проект глубоководной атомной термоэлектрической установки «Neptune» эффективной электрической мощностью 15 квт. Установка рассчитана на непрерывную работу в течение 5 лет. В дальнейшем длительность ее работы на полной мощности без замены активной зоны будет доведена до 10 лет. Установка полностью автоматизирована. Предполагается, что время пуска из холодного состояния до выхода на полную мощность составит около 8 час. В качестве источника энергии в установке используется жидкometаллический ядерный реактор. Циркуляция теплоносителя (Na—K) осуществляется с помощью электромагнитных насосов. Температура теплоносителя на входе и на выходе из активной зоны составляет 718 и 840° К соответственно. Отвод тепла от термоэлементов осуществляется водой высокой чистоты, естественная циркуляция которой обеспечивается благодаря процессам испарения в термоэлектрогенераторе и конденсации в теплообменнике, охлаждаемом забортной водой.

**Характеристики атомной термоэлектрической установки
SNAP-10A**

Тепловая мощность ядерного реактора, квт	33,5
Эффективная электрическая мощность, вт	540
Ядерное топливо и замедлитель	Гомогенная смесь U—ZrH
Загрузка ядерного топлива, кГ	4,3
Материал отражателя	Be

Теплоноситель	Сплав Na-K
Температура горячих спаев термоэлементов, $^{\circ}\text{К}$	758
Температура холодных спаев термоэлементов, $^{\circ}\text{К}$	588
Величина нейтронного потока, $\text{нейtron}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$	$1,7 \cdot 10^{11}$
Материал термоэлементов	Сплав GeSi
Среднеинтегральное значение коэффициента добротности, $1/\text{град}$	$0,58 \cdot 10^{-3}$
К. п. д. энергетической установки, %	1,63
Напряжение на номинальном режиме, в	28,5
Сила тока на номинальном режиме, а	19,0
Высота установки, м	0,400
Диаметр установки, м	0,350
Вес ядерного реактора, кГ	125
» радиационной защиты (гидрид лития), кГ	98
» термоэлектрогенератора, кГ	70
» электромагнитных насосов, кГ	8,9
» теплоносителя, кГ	33
» титановых конструкций, кГ	38
» тепловых экранов, кГ	14
» приборов и аппаратуры, кГ	48
Суммарный вес энергетической установки, кГ	435

В установке предполагается использовать термоэлектрогенератор, состоящий из 12000 термоэлементов, изготовленных из сплава PbTe. Все оборудование будет размещено в прочно-плотном вертикальном цилиндрическом контейнере из титанового сплава с толщиной стенки 5 см. В нижней части контейнера расположены реактор и биологическая защита, над которыми установлены электроприводы системы регулирования и электромагнитные насосы. В средней части контейнера помещен термоэлектрогенератор и, наконец, в верхней части, охлаждаемой забортной водой, теплообменный аппарат.

На рис. 152 показан в общем виде проект атомной термоэлектрической установки эффективной электрической мощностью 100 квт, разработанный в США фирмой Martin-Marietta Corp. для использования на различных военных объектах [29], [72], [115].

Характеристики атомной термоэлектрической установки с органическим теплоносителем фирмы Martin-Marietta Corp.

Эффективная электрическая мощность, квт	100
Теплоноситель	P ₄ S ₃
Ядерное топливо и замедлитель	Гидрид циркония и уран
Температура теплоносителя (постоянная по контуру), $^{\circ}\text{К}$	813
Эффективный к. п. д. термоэлектрогенератора, %	10,6

Эффективный к. п. д. установки, %	8
Материал ветвей термоэлемента (<i>p</i> - и <i>n</i> -типов)	PbTe
Кампания на одной загрузке ядерного топлива, годы	5
Габаритная высота, м	5,8
Габаритный диаметр, м	1,2
Общий вес, кг	8470

Ядерный реактор установки отличается оригинальным методом регулирования, сущность которого заключается в том, что конструкция тепловыделяющих элементов выполнена двухслойной: внутренний слой (тепловыделяющий) — из сплава урана с гидридом циркония, наружный слой (замедляющий) — из гидрида циркония.

При изменении количества отводимой теплоты изменяется соответственно количество атомов водорода, мигрирующих из внутреннего в наружный слой. В результате нарушается нейтронный баланс активной зоны и меняется мощность реактора. Таким образом осуществляется полное саморегулирование ядерного реактора.

В качестве теплоносителя в установке используется трехсернистый фосфор (P_4S_3), характеризующийся относительно слабой активируемостью в радиационном поле и устойчивостью к облучению. Процессы отвода и подвода теплоты в контуре теплоносителя происходят при кипении и конденсации теплоносителя, что при вертикальном расположении элементов установки обеспечивает возможность естественной циркуляции теплоносителя. Для охлаждения холодных спаев термоэлементов используется воздух, прокачиваемый воздуходувкой. Установка рассчитывается на кампанию при полной нагрузке в течение 5 лет [109].

На рис. 153 показана атомная термоэлектрическая установка фирмы Martin-Marietta Corp. мощностью 100 квт, предназначенная для питания различной морской аппаратуры [47], [97].

Характеристики атомной термоэлектрической установки с водяным теплоносителем фирмы Martin-Marietta Corp.

Эффективная электрическая мощность, квт	100
Тепловая мощность ядерного реактора, квт	2500
Ядерное топливо и замедлитель	UO_2 и H_2O
Теплоноситель	Кипящая вода
Материал ветвей термоэлемента	PbTe
Эффективный к. п. д. термоэлектрогенератора (расчетный), %	6

Замедлителем и теплоносителем ядерного реактора служит вода, движение которой в первом контуре осуществляется по принципу естественной циркуляции. Для обеспечения циркуляции, а также компенсации изменений объема теплоносителя в активной зоне допускается кипение. При этом одновременно достигается высокий отрицательный температурный коэффициент реактивности, обеспечивающий саморегулируемость системы. Регулирующие стержни служат лишь для пуска и остановки реактора.

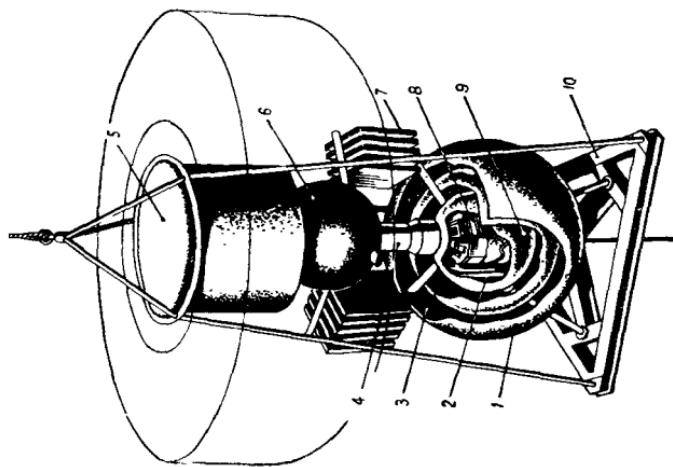


Рис. 153. Общий вид атомной термоэлектрической установки, предназначенный для использования в качестве источника питания глубоководной аппаратуры, мощностью 100 кВт

1 — защитное антикоррозионное покрытие; 2 — теплонапылочная; 3 — защищая оболочка; 4 — соединительный цилиндр; 5 — отсек аппарата и приборов; 6 — компенсатор объема — парогенератор; 7 — верхняя торцевая защита; 8 — ядерный реактор; 9 — нижняя обечайка торцевая защита; 10 — наружная обечайка

8 — активная зона ядерного реактора; 9 — прочный корпус; 10 — опоры

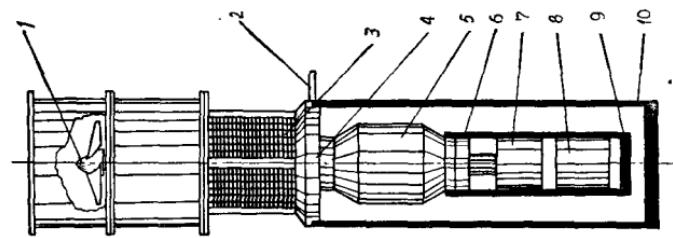


Рис. 152. Конструкция атомной термоэлектрической установки мощностью 100 кВт

1 — вентилятор; 2 — токоотводы; 3 — система питания постоянного тока; 4 — электрогенератор; 5 — муфта перемещения защитного экрана; 6 — капсула ядерного реактора; 7 — верхняя торцевая защита; 8 — ядерный реактор; 9 — нижняя торцевая защита; 10 — наружная обечайка

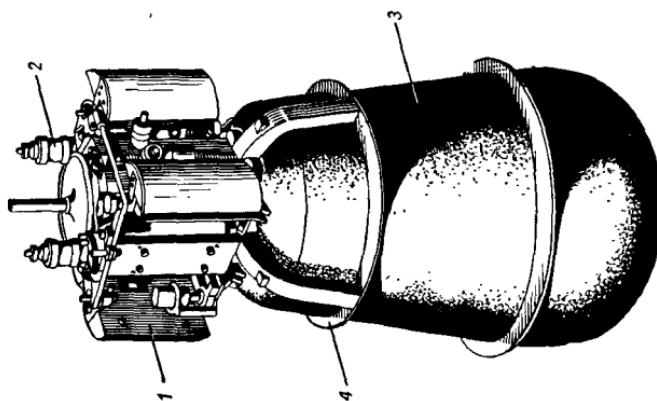


Рис. 151. Конструкция блока реактора — термоэлектроиздатель атомной термоэлектрической установки SNAP-10A.

1 — ядерный реактор и отражатель; 2 — электромагнитный насос; 3 — защита; 4 — опоры

Аппаратура и оборудование установки размещены в трех корпусах: нижнем, где установлена активная зона реактора, среднем, который служит коллектором теплоносителя и одновременно компенсатором объема, и верхнем, где расположены аккумуляторная батарея, статический токопреобразователь и другая аппаратура.

Термоэлектрический генератор установки, показанный на рис. 154, расположен по периферии вокруг среднего корпуса и состоит из трех секций, набранных из плоских термобатарей.



Рис. 154. Конструкция термоэлектрогенератора атомной термоэлектрической установки мощностью 100 квт

1 — коллектор отвода конденсата; 2 — распределительный коллектор пара; 3 — медные коммутационные пластины; 4 — термоэлементы; 5 — теплоэлектроизоляция; 6 — трубы теплоносителя; 7 — полоски из Al_2O_3 ; 8 — электроизоляционное покрытие из Al_2O_3

дая секция в свою очередь состоит из семи плоских сборок размером 760×1570 мм. Сборки имеют по 34 последовательно соединенные батареи, состоящие из пяти параллельно соединенных термоэлементов каждая.

Установка предназначена для использования на навигационных подводных маяках, станциях обнаружения подводных лодок и других объектах. Вместе с тем, по сообщениям зарубежной печати [97], ведутся работы по использованию такого типа атомных термоэлектрических установок в качестве главных энергетических установок глубоководных аппаратов.

В этом случае благодаря статическому источнику и преобразователю энергии достигается исключительная простота установки, надежность, высокая степень автоматизации и большая автономность. Использование принципа электродвижения, кроме того, позволяет исключить дейдвудные сальники гребных валов [74].

Схема размещения установки такого типа (фирмы General Atomics) на глубоководном аппарате показана на рис. 155.

Результаты исследований, выполненных в США, позволяют сделать вывод о том, что наиболее широкое применение термоэлектрические установки могут найти на глубоководных аппаратах и станциях.

На основании расчетно-теоретического анализа можно сказать, что область применения термоэлектрических установок с точки зрения их габаритно-весовых характеристик при необходимой длительности непрерывной работы в течение нескольких месяцев

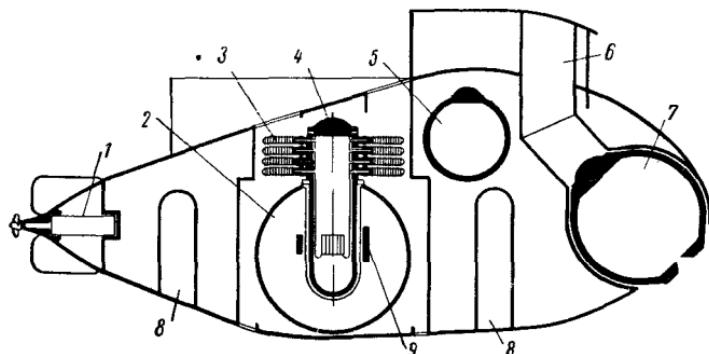


Рис. 155. Схема размещения атомной термоэлектрической установки на самоходном глубоководном аппарате

1 — гребной электродвигатель; 2 — биологическая защита; 3 — батарея термоэлементов; 4 — ядерный реактор; 5 — приборный отсек; 6 — входная шахта; 7 — отсек команды; 8 — балластные емкости; 9 — свинцовые экраны

и более определяется прежде всего их эффективной мощностью. Так, при мощности 10—100 вт наиболее целесообразно применение установок с радиоизотопными источниками энергии. При мощности 100 вт — 2 квт — атомных термоэлектрических установок. И, наконец, при мощности 2—100 квт — атомных термоэлектрических установок и атомных установок с реакторами кипящего типа и турбогенераторами в одноконтурном исполнении.

В других условиях выгоднее использовать энергетические установки с электрохимическими генераторами водородно-кислородного типа, а также различные типы аккумуляторных батарей.

Экономический анализ энергетических установок с учетом построечной стоимости, стоимости обслуживания и топливной составляющей позволяет определить наиболее эффективные области их применения. Так, при мощностях установок 10 вт÷100 квт, рассчитанных на длительную работу в течение 3—12 месяцев, стоимость термоэлектрических установок с радиоизотопными или ядерными источниками энергии соизмерима со стоимостью установок с аккумуляторными батареями или с электрохимическими генераторами.

При мощностях $50 \div 5000 \text{ квт}$ стоимость рассматриваемых установок соизмерима уже при длительности непрерывной работы в течение 24 час. — 2 недель.

§ 20. ЭЛЕКТРОДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ СУДОВЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Использование термоэлектрогенераторов в составе главных энергетических установок судов или других самодвижущихся гидротехнических сооружений тесно связано с вопросом преобразования электрической энергии в кинетическую энергию движения судна.

Традиционным и наиболее широко используемым средством, обеспечивающим движение судна с электроэнергетической установкой, является электродвигательный комплекс, состоящий из электродвигателя и гребного винта.

Гребные установки подобного типа широко распространены на ледокольных судах.

Электродвигательный комплекс обладает рядом преимуществ перед другими установками аналогичного назначения:

- позволяет широко и плавно регулировать число оборотов гребного винта;
- характеризуется минимальной длительностью перехода с одного режима на другой;
- допускает быстрый реверс и возможность развития полной мощности на заднем ходу;
- может стоять под током при заклинивании гребного винта во время плавания во льдах, засоренных акваториях и т. д.

Принципиально в составе судовой термоэлектрической установки может быть использован комплекс электродвигатель — гребной винт как на постоянном, так и на переменном токе.

Гребной электродвигатель постоянного тока выполняется с параллельным, последовательным или смешанным возбуждением. С точки зрения регулирования в ряде случаев наиболее приемлемым оказывается использование двигателей с независимым возбуждением в сочетании с термоэлектрическим источником энергии.

Основные достоинства двигателей постоянного тока заключаются в хорошей регулируемости во всем диапазоне нагрузок, возможности безопасной стоянки под током и быстрым реверсе. Кроме того, в аварийных случаях они могут получать питание непосредственно от аварийных источников постоянного тока. Однако наличие коллектора, затрудняющего установку двигателя вне корпуса, значительно снижает его достоинства с точки зрения возможности использования в качестве привода гребных винтов.

на некоторых типах судов. Этот недостаток в последнее время успешно преодолевается благодаря размещению двигателя в кожухе, заполненном электроизоляционной жидкостью (кремнийорганические соединения, масло). В таком, например, исполнении в США разработаны двигатели для привода гребных винтов глубоководного аппарата «Aluminaut», имеющие номинальную мощность около 11 квт (при форсировке около 22 квт) и работающие от сети напряжением 115 в. В установке с подобными двигателями исключается необходимость в токопреобразователях. Аналогичные двигатели постоянного тока, используемые в качестве ре-

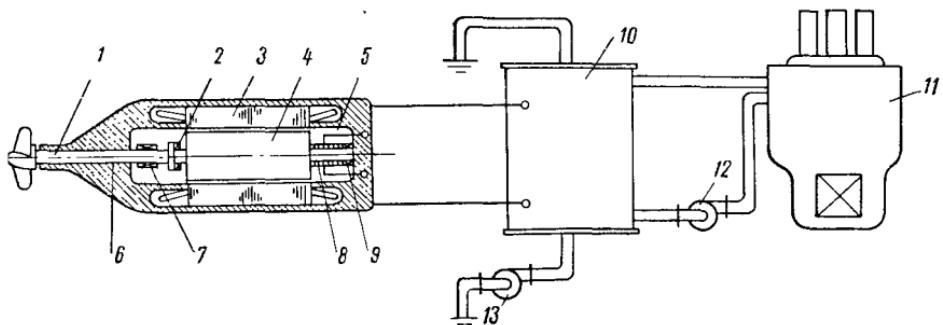


Рис. 156. Схема термоэлектрической установки с гребным электродвигателем переменного тока в забортном исполнении.

1 — гребной вал; 2 — упорный подшипник; 3 — обмотка статора; 4 — короткозамкнутый ротор; 5 — жидкый заполнитель (кремнийорганическая жидкость, масло); 6 — уплотнение; 7 — кормовой опорный подшипник; 8 — статический токопреобразователь; 9 — носовой опорный подшипник; 10 — термоэлектрогенератор; 11 — ядерный реактор; 12 — электронасос теплоносителя; 13 — электронасос забортной воды

зервного электродвигательного комплекса и монтирующиеся на выдвижном валу, находят применение и на атомных подводных лодках США [2].

В качестве привода гребного винта также могут быть использованы двигатели переменного тока, которые отличаются высокой надежностью, небольшими габаритами и весом, а также возможностью размещения в забортной воде (электродвигатели с короткозамкнутым ротором). Наиболее эффективны в качестве привода гребного винта асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (рис. 157).

Однако несмотря на ряд преимуществ, двигатели переменного тока при использовании в электроэнергетических установках с термоэлектрогенераторами уступают двигателям постоянного тока.

Это объясняется, с одной стороны, необходимостью применения токопреобразователей, увеличивающих габариты и вес установки, с другой, сложностью регулирования числа оборотов в широком диапазоне.

Серьезного внимания заслуживают также технические решения, основанные на использовании униполярных электродвигателей

с жидкостным контактом в сочетании с термоэлектрогенераторами [6].

Отличаясь исключительной простотой конструкции и хорошими экономическими показателями, такие электродвигатели характеризуются весьма низкими значениями напряжения при относительно больших значениях силы тока. Термоэлектрогенераторы, применяемые для питания этих электродвигателей, имеют меньшее количество последовательно соединенных термоэлементов и батарей. Кроме того, при прочих неизменных условиях они позволяют существенно уменьшить толщину электрической изоляции батарей термоэлектрогенератора и таким образом увеличить

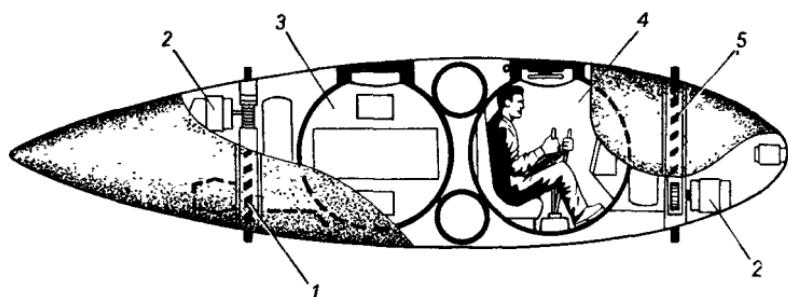


Рис. 157. Конструктивная схема подводного аппарата с лопастным движителем

1 — кормовой двигатель; 2 — гребной электродвигатель; 3 — отсек с аппаратурой; 4 — обитаемый отсек; 5 — носовой двигатель

температурный перепад на термоэлементах с соответствующим увеличением их к. п. д.

При этом, однако, следует учитывать неизбежное увеличение толщины коммутационных пластин, сечений кабелей и шино-проводов, обусловливающееся значительным возрастанием силы тока.

Последнее обстоятельство позволяет считать необходимой разработку таких вариантов компоновки системы термоэлектрогенератор — униполярный электродвигатель, при которых может быть достигнута минимальная длина коммуникаций.

Применение электродвигателей не всегда связано с использованием в электродвигательном комплексе гребного винта. В 1962 г. капитан ВМФ США Хэйзелтон предложил оригинальную конструкцию лопастного движителя, приводимого во вращение электродвигателями [11]. Конструктивная схема малой подводной лодки с таким движителем показана на рис. 157.

Движитель представляет собой два лопаточных венца, расположенных в носу и корме и приводимых во вращение электродвигателями в погруженном исполнении.

Движитель благодаря возможности изменения угла установки, скорости и направления вращения лопаток обеспечивает высокие маневренные качества судна.

Рассмотренные электродвижительные комплексы — не единственное средство, при помощи которого может быть осуществлено преобразование электрической энергии в кинетическую энергию движения судна. Логически было бы целесообразнее создавать такие электродвижительные комплексы, которые одновременно с используемым в судовых термоэлектрических установках методом прямого преобразования тепловой энергии в электрическую позволили бы осуществить прямое преобразование генерируемой электрической энергии в кинетическую энергию движения судна.

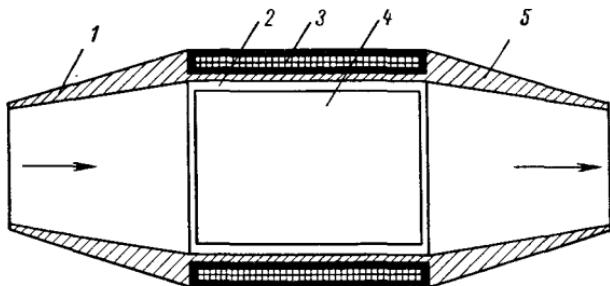


Рис. 158. Конструктивная схема магнитогидроактивного электродвижительного комплекса с внутренним магнитным полем.

1 — диффузор; 2 — цилиндрический участок; 3 — магнитная система; 4 — электрод; 5 — Конфузор

Таким образом было бы доведено до минимума количество ступеней преобразования энергии и значительно упрощены схема и конструкция энергетической установки.

К числу таких средств прямого преобразования электрической энергии в кинетическую энергию движения судна следует отнести различные варианты магнитогидроактивных движителей, электрогидравлические и некоторые другие системы, большинство которых еще недостаточно хорошо изучено.

Магнитогидроактивный электродвижительный комплекс представляет собой устройство, состоящее из диффузора, рабочего канала, конфузора и магнитной системы с обслуживающим оборудованием и механизмами. Основные узлы конструкции такого движителя с внутренним магнитным полем показаны на рис. 159.

Принцип действия движителя достаточно прост. При движении судна забортная вода, имеющая некоторый скоростной напор (в начале движения он равен нулю), поступает в диффузор, где скорость ее уменьшается. Затем в рабочем канале гидростатическое давление жидкости возрастает, а на конфузорном участке гидравлического тракта скорость жидкости вновь увеличивается. Благодаря изменению количества движения жидкости на входе и выходе из канала обеспечивается создание требуемого упора.

Анализ теоретических зависимостей, используемых при расчетах магнитогидродвигательных двигателей, показывает, что к. п. д. комплекса в значительной степени зависит от величины магнитной индукции и скорости движения судна. В первом случае зависимость прямая, во втором — обратная. Одновременно к. п. д. зависит от геометрических размеров системы. Если изменение площади поперечного сечения рабочего канала оказывается на величине к. п. д. незначительно, то изменение длины оказывает на его величину существенное влияние. При прочих равных условиях к. п. д. комплекса прямо пропорционален длине рабочего канала.

Создание магнитогидродвигательных двигателей возможно при условии использования сверхпроводящих обмоток системы возбуждения ($B = 15 \div 20$ тл и более) и решения проблем компенсации магнитного давления, удаления из рабочего канала продуктов электролиза морской воды, регулирования мощности и др.

Конструктивно магнитогидроактивный электродвигательный комплекс может быть выполнен в тунNELном варианте с внутренним или внешним магнитным полем, при котором двигатель как таковой исчезает, а силы реакции жидкости передаются непосредственно корпусу судна.

В 1966 г. сотрудник Калифорнийского университета С. Вэй испытал трехметровую действующую модель подводной лодки с магнитогидродвигательным комплексом, создающим внешнее магнитное поле. Конструктивная схема модели показана на рис. 159.

В качестве источника энергии, обеспечивающего движение модели, использована аккумуляторная батарея, питающая сверхпроводящие магнитные обмотки и поддерживающая напряжение на электродах.

Модель подводной лодки успешно маневрировала под водой на глубине около 1 м, развивая максимальную скорость около 2 узлов.

Помимо рассмотренных, возможны и некоторые другие схемы магнитогидродвигательных электродвигательных комплексов [2].

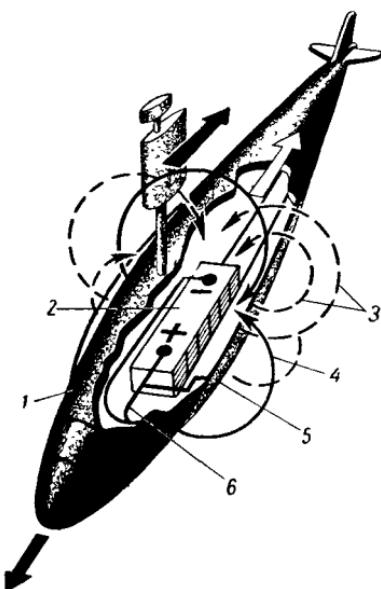


Рис. 159. Конструктивная схема модели подводной лодки с магнитогидродвигательным электродвигательным комплексом, имеющим внешнее магнитное поле.

1 — анод; 2 — аккумуляторная батарея; 3 — силовые линии магнитного поля; 4 — силовые линии электрического поля; 5 — катод; 6 — сверхпроводящая магнитная обмотка

Однако при всех достоинствах они еще недостаточно хорошо исследованы и возможности их совершенствования требуют экспериментального подтверждения. В настоящее же время при весе в 2—3 раза большем и к. п. д. в 1,5 раза меньшем, чем у электродвигательных комплексов двигатель—гребной винт, магнитогидрореактивные движители едва ли могут быть признаны конкурентоспособными.

Другим принципиально возможным методом прямого преобразования электрической энергии в кинетическую энергию движе-

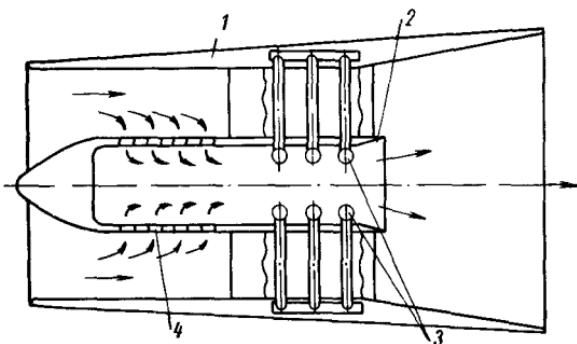


Рис. 160. Конструктивная схема электрогидравлического движительного комплекса.

1 — корпус движителя; 2 — электрогидравлический преобразователь энергии; 3 — электроды; 4 — входные отверстия для воды

ния судна является электрогидравлический движитель, одна из схем которого показана на рис. 160 [2].

Действие движителя основывается на использовании электрогидравлического эффекта, открытого и изученного советским ученым Л. А. Юткиным. Сущность эффекта заключается в том, что при протекании энергии через электрогидравлический преобразователь благодаря воздействию ударных волн, возникающих вследствие последовательно чередующихся электрических разрядов, количество движения забортной воды увеличивается.

Конструктивно электрогидравлический движитель отличается исключительной простотой и позволяет обеспечить прямое преобразование электрической энергии в кинетическую энергию движения судна. Однако низкий к. п. д. и связанные с этим неприемлемо большой вес и габариты, а также другие недостатки не позволяют в настоящее время считать его разработку целесообразной.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П-1

Последовательность расчета термоэлектрогенератора на режим максимального к. п. д.

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Электрическая мощность, генерируемая термоэлектро-нератором:	P	Вт	По заданию		
теплоноситель	—	—	»	»	»
охладитель	—	—	»	»	»
Давление и температура теплоносителя на входе в термоэлектрогенератор	$p_{\text{тепл}}^{\text{вых}}$ $T_{\text{тепл}}^{\text{вых}}$	kPa $^{\circ}\text{K}$	$\kappa T / \text{см}^2$	»	»
Давление и температура теплоносителя на выходе из термоэлектрогенератора	$p_{\text{тепл}}^{\text{вых}}$ $T_{\text{тепл}}^{\text{вых}}$	kPa $^{\circ}\text{K}$	$\kappa T / \text{см}^2$	»	»
Давление и температура охладителя на входе в термоэлектрогенератор	$p_{\text{охл}}^{\text{вых}}$ $T_{\text{охл}}^{\text{вых}}$	kPa $^{\circ}\text{K}$	$\kappa T / \text{см}^2$	»	»
Давление и температура охладителя на выходе из термоэлектрогенератора	$p_{\text{охл}}^{\text{вых}}$ $T_{\text{охл}}^{\text{вых}}$	kPa $^{\circ}\text{K}$	$\kappa T / \text{см}^2$	»	»
Среднее давление и температура теплоносителя в термоэлектрогенераторе	$\rho_{\text{ср}}^{\text{тепл}}$ $T_{\text{ср}}^{\text{тепл}}$	кг/см^2 $^{\circ}\text{K}$	$\kappa T / \text{см}^2$	По формулам, используемым при расчетах суповых теплообменных аппаратов	По формулам, используемым при расчетах суповых теплообменных аппаратов
Среднее давление и температура охладителя в термоэлектрогенераторе	$\rho_{\text{ср}}^{\text{охл}}$ $T_{\text{ср}}^{\text{охл}}$	кг/см^2 $^{\circ}\text{К}$	$\kappa T / \text{см}^2$	То же	То же
Напряжение на клеммах термоэлектрогенератора на режиме номинальной нагрузки	U	В	»	»	»

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Полупроводниковый материал стержней термоэлемента	—	—	По заданию		
Ориентировочные средние значения коэффициентов термодисперсии p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{тепл}} - T_{\text{охл}}$	$\alpha_{Sp}^{\text{ср}}$ $\alpha_{Sn}^{\text{ср}}$	мкВ/град	$\alpha_{Sp} = \alpha_S(T); \alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$		
Ориентировочные средние значения коэффициентов теплопроводности стержней p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{тепл}} - T_{\text{охл}}$	$\lambda_p^{\text{ср}}$ $\lambda_n^{\text{ср}}$	в	По графикам зависимости $\lambda_p = \lambda(T); \lambda_n = \lambda(T)$		
Ориентировочные средние значения коэффициентов удельной электрической проводимости стержней p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{тепл}} - T_{\text{охл}}$	$\sigma_p^{\text{ср}}$ $\sigma_n^{\text{ср}}$	$1/\text{ом} \cdot \text{см}$	По графикам зависимости $\sigma_p = \sigma(T); \sigma_n = \sigma(T)$		
Ориентировочные средние значения коэффициента добротности для термоэлемента в диапазоне температур $T_{\text{тепл}} - T_{\text{охл}}$	$z_{\text{ср}}$	$1/\text{град}$	$z_{\text{ср}} = \left[\sqrt{\frac{\lambda_p^{\text{ср}} + \alpha_{Sp}^{\text{ср}}}{\sigma_p^{\text{ср}}}} + \sqrt{\frac{\lambda_n^{\text{ср}}}{\sigma_n^{\text{ср}}}} \right]^2$		

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Ориентировочное значение оптимального отношения электрических сопротивлений	M'_0	—	$M'_0 = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z_{cp} (T_{tepl}^{cp} - T_{okl}^{cp})}$		
Ориентировочное значение максимального к. п. д. процесса термоэлектрического преобразования энергии	η'_{max}	—	$\eta'_{max} = \frac{T_{tepl}^{cp} - T_{okl}^{cp}}{T_{tepl}^{cp}} \times$ $\times \frac{M'_0 - 1}{M'_0 + \frac{T_{okl}^{cp}}{T_{tepl}^{cp}}}$ $\left(\frac{P}{F} \right)' = \frac{\lambda_p^{cp}}{l_{im}} \cdot \frac{M_0 z_{cp}}{(M'_0 + 1)^2} \times$ $\times (T_{tepl}^{cp} - T_{okl}^{cp}) \times$ $\times \left[\frac{1 + \sqrt{\frac{\lambda_n^{cp}}{\lambda_p^{cp}} \cdot \frac{\sigma_p^{cp}}{\sigma_n^{cp}}}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_p^{cp}}{\lambda_n^{cp}} \cdot \frac{\sigma_p^{cp}}{\sigma_n^{cp}}}} \right]$		

Продолжение табл. П-1

Нанменование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке	$\alpha_{\text{т. г}}$	$\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$	По формулам теплопередачи для данного теплоносителя		
Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне теплоносителя	$\begin{matrix} l_{\text{пл. г}} \\ \lambda_{\text{пл. г}} \end{matrix}$	$\frac{\text{М}}{\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}}$	Принимается по эскизу конструкции		
Толщина и коэффициент теплопроводности электропроводящего материала по стороне теплоносителя	$\begin{matrix} l_{\text{из. г}} \\ \lambda_{\text{из. г}} \end{matrix}$	$\frac{\text{М}}{\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}}$	Принимается по эскизу конструкции бранного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{тепл}}^{\text{ср}}$		
			Принимается по эскизу конструкции бранного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{тепл}}^{\text{ср}}$		
			Принимается по эскизу конструкции бранного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{тепл}}^{\text{ср}}$		

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне теплоносителя	$\frac{l_{\text{к. г}}}{\lambda_{\text{к. г}}}$	$\frac{\text{м}}{\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от $l_{\text{к. г}} \approx 2/l_{\text{ном}}$		
Коэффициент теплопередачи многослойной стенки по стороне теплоносителя	$k_{\text{T. г}}$	$\frac{\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}}{\alpha_{\text{T. г}}}$	Принимается по справочникам для выбранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{тепл}}^{\text{ср}}$	$k_{\text{T. г}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{T. г}}} + \frac{l_{\text{пл. г}}}{\lambda_{\text{пл. г}}} + \frac{l_{\text{нз. г}}}{\lambda_{\text{из. г}}} + \frac{l_{\text{к. г}}}{\lambda_{\text{к. г}}}}$	$k_{\text{T. г}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{T. г}}} + \frac{l_{\text{пл. г}}}{\lambda_{\text{пл. г}}} + \frac{l_{\text{нз. г}}}{\lambda_{\text{из. г}}} + \frac{l_{\text{к. г}}}{\lambda_{\text{к. г}}}}$
Коэффициент теплоотдачи от стекки к охлаждающей среде	$\alpha_{\text{T. х}}$	М	»	По формулам теплопередачи для заданного теплоносителя	По формулам теплопередачи для заданного теплоносителя
Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне охладителя	$l_{\text{пл. х}}$	м	Принимается по эскизу конструкции	Принимается по справочникам для выбранного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{окл}}^{\text{ср}}$	Принимается по справочникам для выбранного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{окл}}^{\text{ср}}$

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Толщина и коэффициент теплопроводности электрического материала по стороне охладителя	$l_{из.х}$	λ	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от температуры $T_{окл}^{ср}$ и э. д. с. $E \approx 2U$	0.001 м	0.0012 м
	$\lambda_{из.х}$	$\frac{W}{m \cdot \text{град}}$	Принимается по справочникам для выбранного электроизоляционного материала в первом приближении при температуре $T_{окл}^{ср}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне охладителя	$l_{к.х}$	λ	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от $l_{из} \approx l_{ном}$	0.001 м	0.0012 м
	$\lambda_{к.х}$	$\frac{W}{m \cdot \text{град}}$	Принимается по справочникам для выбранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{окл}^{ср}$		
Коэффициент теплопередачи многослойной стенки по стороне охладителя	$k_{T,x}$	$\frac{W}{m^2 \cdot \text{град}}$	$k_{T,x} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{T,x}} + \frac{l_{пл.г}}{\lambda_{пл.г}} + \frac{l_{из.г}}{\lambda_{из.г}} + \frac{l_{к.х}}{\lambda_{к.х}}}$	10	12

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Удельный тепловой поток по стороне теплоносителя	$q_{T,r}$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	$q_{T,x} = q_{T,r} \left(1 - \eta'_{\max} \right)$		
Удельный тепловой поток по стороне охладителя	$q_{T,x}$		$q_{T,x} = q_{T,r} \left(\frac{P}{F} \right)'$		
Температура горячих слоев термоэлементов	T_r	$^\circ\text{К}$	$T_r = T_{\text{тепл}} - \frac{q_{T,r}}{k_{T,r}}$		
Температура холодных спаев термоэлементов	T_x		$T_x = T_{\text{окл}} + \frac{q_{T,x}}{k_{T,x}}$		
Перепад температур на полупроводниковых стержнях термоэлемента	ΔT		$\Delta T = T_r - T_x$		
Коэффициент термодес полупроводникового вещества p и n -типов при температуре T_r	α_{Sp}^r	$\text{жкд}/\text{град}$	По графику зависимости $\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$	По графику зависимости $\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$	По графику зависимости $\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$
Коэффициент теплопроводности полупроводникового вещества p - и n -типов при температуре T_r	λ_p^r	$\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	$\lambda_p = \lambda(T)$	$\lambda_n = \lambda(T)$	$\lambda_p = \lambda(T)$
Коэффициент удельной электрической проводимости полупроводникового вещества p - и n -типов при температуре T_r	σ_p^r	$1/\text{ом} \cdot \text{см}$	$\sigma_p = \sigma(T)$	$\sigma_n = \sigma(T)$	$\sigma_p = \sigma(T)$

Продолжение табл. П-1

Нанесование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Коэффициент термомэдс полупроводникового вещества p - и n -типов при температуре T_x	α_{Sp}^x α_{Sn}^x	мкв/град	$\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$ $\alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$		
Коэффициент теплопроводности полупроводникового вещества p - и n -типов при температуре T_x	λ_p^x λ_n^x	вт/м·град	$\lambda_p = \lambda(T)$ $\lambda_n = \lambda(T)$		
Коэффициент удельной электропроводимости полупроводникового вещества p - и n -типов при температуре T_x	σ_p^x σ_n^x	1/ом·см	$\sigma_p = \sigma(T)$ $\sigma_n = \sigma(T)$		
Среднеинтегральное значение коэффициента термоэдс полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	$\bar{\alpha}_{Sp}$	мкв/град	$\bar{\alpha}_{Sp} = \frac{\int_x^r \alpha_S(T) dT}{T_r - T_x}$		
				$\bar{\alpha}_{Sp} = \frac{\int_x^r \alpha_S(T) dT}{T_r - T_x}$	$\bar{\alpha}_{Sn} = \frac{\int_x^r \alpha_S(T) dT}{T_r - T_x}$

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Среднеинтегральное значение коэффициента теплопроводности полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	$\bar{\lambda}_p$	$\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	$\bar{\lambda}_p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} \lambda(T) dT}{T_r - T_x}$	$\bar{\lambda}_p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} \lambda(T) dT}{T_r - T_x}$	$\bar{\lambda}_p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} \lambda(T) dT}{T_r - T_x}$
Среднеинтегральное значение коэффициента удельной электрической проводимости полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	$\bar{\sigma}_p$	$1/\text{ом} \cdot \text{см}$	$\bar{\sigma}_p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} \sigma(T) dT}{T_r - T_x}$	$\bar{\sigma}_p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} \sigma(T) dT}{T_r - T_x}$	$\bar{\sigma}_p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} \sigma(T) dT}{T_r - T_x}$

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Среднеинтегральное значение коэффициента Гомсона полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_g - T_x$	$\bar{\tau}_p$		$\bar{\tau}_p = \frac{\int_{T_x}^{T_g} \tau(T) dT}{T_g - T_x}$		
Оптимальное отношение площадей поперечных сечений стержней p - и n -типов термоэлемента	$\frac{F_p}{F_n}$		$\frac{F_p}{F_n} = \sqrt{\frac{\bar{\sigma}_p}{\bar{\sigma}_n} \cdot \frac{\bar{\lambda}_p}{\bar{\lambda}_n}}$		
Значение коэффициента добротности полупроводникового вещества в диапазоне температур $T_g - T_x$	z	$1/\text{ср/д}$	$z = \left[\sqrt{\frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) 10^{-6}}{\bar{\sigma}_p}} + \sqrt{\frac{\bar{\lambda}_p}{\bar{\sigma}_n}} \right]^2$		
Безразмерный коэффициент	f		$f = \frac{\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r}{\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}}$		

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Отношение температуры холдных спаев к разности температур на термоэлементе	θ	—	$\theta = \frac{T_x}{T_r - T_x}$		
Доля теплоты Джубуля, возвращаемая к горячим спаям стержней p - и n -типов термоэлемента при условии $\lambda = \text{const}$	n_J^p	—	$n_J^p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} T dT}{(T_r - T_x)^2} - \theta$		
Доля теплоты Томсона, возвращаемая к горячим спаям стержней p - и n -типов термоэлемента при условии $\lambda = \text{const}$	n_τ^p	—	$n_\tau^p = \frac{\int_{T_x}^{T_r} T \tau(T) dT}{(T_r - T_x)^2} - \theta$		
	n_J^n	—	$n_J^n = \frac{\int_{T_x}^{T_r} T dT}{(T_r - T_x)^2} - \theta$		
	n_τ^n	—	$n_\tau^n = \frac{\int_{T_x}^{T_r} T \tau(T) dT}{(T_r - T_x)^2} - \theta$		

Продолжение табл. П-1

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Безразмерный коэффициент	a	—	$a = \frac{n_j^p \frac{1}{\sigma_p} + n_j^n \frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{F_p}{F_n}}{\frac{1}{\sigma_p} + \frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{F_p}{F_n}} \times \frac{T_r - T_x}{fT_r}$		
»	b	—	$b = \frac{n_t^p \bar{\tau}_p + n_t^n \bar{\tau}_n}{\alpha_{Sp}^p + \alpha_{Sn}^p} \cdot \frac{T_r - T_x}{T_r}$		
Оптимальное отношение внешнего и внутреннего электрического сопротивления термоэлементов	M_0	—	$M_0 = \sqrt{1 + fz(1 - a - b)T_r}$		
Количество последовательно соединенных батарей	$k_{\text{посл}}$	—	$k_{\text{посл}} = \frac{U(M_0 + 1)}{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn}) M_0 (T_r - T_x)}$		
Количество параллельно соединенных батарей	$k_{\text{пар}}$	—	$k_{\text{пар}} = \frac{P}{UT}$		
Общее количество термоэлементов	k	—	$k = k_{\text{посл}} k_{\text{пар}}$		

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Площадь поперечного сечения стержня <i>p</i> -типа термоэлемента	F_p	M^2	Принимается		
Площадь поперечного сечения стержня <i>n</i> -типа термоэлемента	F_n				
Высота слоя полупроводникового вещества стержней термоэлемента	$l_{\text{пп}}$	M			
Электрическое сопротивление стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термоэлемента	r_p	$\Omega \cdot M$		$r_p = \frac{1}{\bar{\sigma}_p F_p}$	
Суммарное электрическое сопротивление стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термоэлемента	r			$r_n = \frac{1}{\bar{\sigma}_n F_n}$	$r = r_p + r_n$
Среднее значение коэффициента теплопроводности стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термоэлемента	$\bar{\lambda}_{\text{ср}}$	$W/m \cdot \text{град}$			$\bar{\lambda}_{\text{ср}} = \frac{\bar{\lambda}_p \frac{F_p}{F_n} + \bar{\lambda}_n}{1 + \frac{F_p}{F_n}}$

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Величина теплоты Пельтье, отбираемой от горячих спаев термоэлементов	$Q_{\text{Пт}}$	вт	$Q_{\text{Пт}} = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(\alpha_{Sp}^r + \alpha_{Sn}^r) 10^{-12}}{(M_0 + 1) r} \times k T_r (T_r - T_x)$		
Величина теплоты Джоуля, возвращаемой к горячим спаям стержней термоэлементов p -типа	$n_j^p Q_j^p$	»	$n_j^p Q_j^p = \left[\frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(T_r - T_x) 10^{-6}}{(M_0 + 1) r} \times n_j^n kr \right]^2$		
Величина теплоты Джоуля, возвращаемой к горячим спаям стержней термоэлемента n -типа	$n_j^n Q_j^n$	»	$n_j^n Q_j^n = \left[\frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(T_r - T_x) 10^{-6}}{(M_0 + 1) r} \times n_j^n kr \right]^2$		
Величина теплоты Томсона, возвращаемой к горячим спаям стержней термоэлемента p -типа	$n_t^p Q_t^p$	»	$n_t^p Q_t^p = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(T_r - T_x)^2 \cdot 10^{-12}}{(M_0 + 1) r} \times n_t^n \bar{t}_p k$		

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Величина теплоты Томсона, возвращаемой к горячим спа- ям стержней термоэлемента п-типа	$n_{\tau}^n Q_{\tau}^n$	erg	$n_{\tau}^n Q_{\tau}^n = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(T_r - T_x)^2}{(M_0 + 1) r} 10^{-12} \times$ $\times n_{\tau}^n \bar{\tau}_n k$		
Величина теплоты Пельтье, выделяющейся на холодных спаях термоэлемента	$Q_{\Pi, x}$		$Q_{\Pi, x} = \frac{(\bar{\alpha}_{Sp} + \bar{\alpha}_{Sn})(\alpha_{Sp}^x + \alpha_{Sn}^x) 10^{-12}}{k T_x (T_r - T_x)} \times$ $\times k T_x (T_r - T_x)$		
Количество теплоты, пере- даваемой теплопроводностью через стержни термоэлемента	Q_T		$Q_T = \frac{\bar{\lambda}_{cp} (T_r - T_x) k}{l_{\text{пп}}} (F_p + F_n)$		
Количество теплоты, подво- димой теплоносителем к горя- чим спаям термоэлемента	Q_r		$Q_r = Q_{\tau} + Q_{\Pi, r} - n_j^n Q_j^p -$ $- n_j^n Q_j^n - n_{\tau}^p Q_{\tau}^p - n_{\tau}^n Q_{\tau}^n$		
Количество теплоты, отби- раемой охладителем от холод- ных спаев термоэлемента	Q_x		$Q_x = Q_{\tau} - Q_{\Pi, x} + (1 - n_j^n) Q_j^p +$ $+ (1 - n_j^n) Q_j^n + (1 - n_{\tau}^p) Q_{\tau}^p +$ $+ (1 - n_{\tau}^n) Q_{\tau}^n$		
Полезная мощность, выра- батываемая термоэлектроген- ератором	P		$P = Q_r - Q_x$		

Продолжение табл. П-1

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Отношение полезной мощности к суммарной поверхности теплопередачи термоэлементов	$\frac{P}{F}$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	$\frac{P}{F} = \frac{\bar{\lambda}_p}{l_{\text{пп}}} \cdot \frac{M_0 z}{(M_0 + 1)^2} (T_r - T_x) \times$ $\times \left(\frac{1 + \sqrt{\frac{\bar{\sigma}_p \cdot \bar{\lambda}_n}{\bar{\sigma}_n \cdot \bar{\lambda}_p}}}{1 + \sqrt{\frac{\bar{\sigma}_p \cdot \bar{\lambda}_n}{\bar{\sigma}_n \cdot \bar{\lambda}_p}}} \right)$ $\eta_{\text{пах}} := \frac{Q_r - Q_x}{Q_r}$		
Максимальный к. п. д. процесса прямого преобразования энергии	$E_{\text{тэг}}$	ом	$E_{\text{тэг}} := (\alpha_{Sp} \cdot \bar{\alpha}_{Sn}) \times$ $\times (T_r - T_x) k_{\text{посл}}$		
Электродвижущая сила термоэлектрогенератора	$r_{\text{тэг}}$	\gg	$r_{\text{тэг}} := r k_{\text{посл}}$		
Внутреннее электрическое сопротивление термоэлектрогенератора	$R_{\text{тэг}}$	\gg	$R_{\text{тэг}} := M_0 r_{\text{тэг}}$		
Электрическое сопротивление нагрузки на номинальном режиме	$I_{\text{тэг}}$	a	$I_{\text{тэг}} = \frac{E_{\text{тэг}}}{R_{\text{тэг}} + r_{\text{тэг}}}$		
Сила тока на номинальном режиме	$U_{\text{тэг}}$	b	$U_{\text{тэг}} = \frac{P}{I_{\text{тэг}} k_{\text{пар}}}$		
Напряжение на клеммах термоэлектрогенератора на номинальном режиме					

Таблица П-2

**Последовательность расчета термоэлектрического охлаждающего устройства
на режим максимального холодильного коэффициента**

Нанесение величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Числовые значения	
				Первое приближение	Второе приближение
Количество теплоты, подведенной в единицу времени к ходовым слоям термоэлементов	Q_x	Вт	По заданию	—	—
Охлаждаемая среда	—	—	»	»	»
Нагреваемая среда	—	—	»	»	»
Среднее давление и температура охлаждаемой среды в термоэлектрическом охлаждающем устройстве	$p_{\text{охл}}^{\text{ср}}$ $T_{\text{охл}}^{\text{ср}}$	kPa $^{\circ}\text{K}$	»	»	»
Среднее давление и температура нагреваемой среды в термоэлектрическом охлаждающем устройстве	$p_{\text{нагр}}^{\text{ср}}$ $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}}$	kPa $^{\circ}\text{K}$	»	»	»
Напряжение на режиме номинальной нагрузки	U	В	»	»	»
Полупроводниковый материал стержней термоэлемента	—	—	—	—	—

Продолжение табл. П.2

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Ориентировочные средние значения коэффициента термопроводности стержней p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{окл}}$	$\alpha_{Sp}^{\text{ср}}$ $\alpha_{Sn}^{\text{ср}}$	$\frac{W\text{K}}{m^2\text{рад}}$ »	По графикам зависимости: $\alpha_{Sp} = \alpha_s(T)$; $\alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$		
Ориентировочные средние значения коэффициентов теплопроводности стержней p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{окл}}$	$\lambda_p^{\text{ср}}$ $\lambda_n^{\text{ср}}$	$\frac{W}{m \cdot \text{град}}$ »	$\lambda_p = \lambda(T)$; $\lambda_n = \lambda(T)$		
Ориентировочные средние значения коэффициентов удельной электрической проводимости стержней p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{окл}}$	$\sigma_p^{\text{ср}}$ $\sigma_n^{\text{ср}}$	$1/\text{ом} \cdot \text{м}$ »	$\sigma_p = \sigma(T)$; $\sigma_n = \sigma(T)$		
Ориентировочное среднее значение коэффициента добротности для термоэлемента в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{окл}}$	$z_{\text{ср}}$	$1/\text{град}$	$z_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{(\alpha_{Sp}^{\text{ср}} + \alpha_{Sn}^{\text{ср}}) 10^{-6}}{\frac{\lambda_p^{\text{ср}}}{\sigma_p^{\text{ср}}} + \sqrt{\frac{\lambda_n^{\text{ср}}}{\sigma_n^{\text{ср}}}}}}$		

Продолжение табл. П-2

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула ,	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Ориентировочное значение коэффициента электрических сопротивлений	M'_0	—	$M'_0 = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z_{cp} (T_{nагр}^{cp} - T_{окл}^{cp})}$		
Ориентировочное значение холодильного коэффициента	$\mathcal{E}'_{x \text{ max}}$	—	$\mathcal{E}'_{x \text{ max}} = \frac{T_{окл}^{cp}}{T_{нагр}^{cp} - T_{окл}^{cp}} \cdot M' - 1$		
Отношение количества теплоты, подводимой в единицу времени к холодным спаям, к поверхности термоэлементов	$\left(\frac{Q_x}{F}\right)'$	$\text{етн}/\text{м}^2$	$\left(\frac{Q_x}{F}\right)' := \frac{T_{окл}^{cp}}{l_{III}} \cdot \frac{T_{нагр}^{cp} - 1}{T_{окл}^{cp} + 1} \times 2M' \left(M' - \frac{T_{нагр}^{cp}}{T_{окл}^{cp}} \right)$	$\times \frac{M' - 1}{M' - 1} \sqrt{\lambda_p^{cp} \lambda_n^{cp}} \times$	$\sqrt{\frac{\lambda_p^{cp}}{\sigma_p^{cp}}} + \sqrt{\frac{\lambda_n^{cp}}{\sigma_n^{cp}}} \times$

Продолжение табл. П-2

Позиционование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой среды к стенке	α_{Tx}	$\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$	По формулам теплопередачи для заданной среды		
Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне охлаждаемой среды	$l_{пл. x}$ $\lambda_{пл. x}$	М $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции Принимается по справочникам для вы- бранного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{ср}$ охл		
Толщина и коэффициент теплопроводности электропроизводственных материалов по стороне охлаждаемой среды	$l_{из. x}$ $\lambda_{из. x}$	М $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции в за- висимости от $T_{ср}$ и U Принимается по справочникам для вы- бранного электропропицационного материала в первом приближении при температуре $T_{ср}$ охл		
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне охлаждаемой среды	$l_{к. x}$ $\lambda_{к. x}$	М $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции в за- висимости от I Принимается по справочникам для вы- бранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{ср}$ охл		
Коэффициент теплопередачи многослойной стены по стороне охлаждаемой среды	k_{Tx}	$\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$	$k_{Tx} = \frac{1}{\alpha_{Tx}} + \frac{l_{пл. x}}{\lambda_{пл. x}} + \frac{l_{из. x}}{\lambda_{из. x}} + \frac{l_{к. x}}{\lambda_{к. x}}$		

Продолжение табл. П-2

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне нагреваемой среды	a_{Tr} $l_{пл, г}$ $\lambda_{пл, г}$	$W/m^2 \cdot \text{град}$ m $W/m \cdot \text{град}$	По формуле теплопередачи для заданной нагреваемой среды Принимается по эскизу конструкции Принимается по справочникам для выработанного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{nагр}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности электрического коммутационного материала по стороне нагреваемой среды	$l_{из, г}$ $\lambda_{из, г}$	m $W/m^2 \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от $T_{ср}$ и $U_{нагр}$ Принимается по справочникам для выработанного электрического коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{ср}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне нагреваемой среды	$l_{к, г}$ $\lambda_{к, г}$	m $W/m \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от l Принимается по справочникам для выработанного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{нагр}^{ср}$		
Коэффициент теплопередачи многослойной стенки по стороне нагреваемой среды	k_{Tr}	$W/m^2 \cdot \text{град}$	$k_{Tr} = \frac{1}{\alpha_{Tr}} + \frac{l_{пл, г}}{\lambda_{пл, г}} + \frac{l_{из, г}}{\lambda_{из, г}} + \frac{l_{к, г}}{\lambda_{к, г}}$	1	

Продолжение табл. П-2

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Удельный тепловой поток по стороне охлаждаемой среды	q_{Tx}	$\text{вт}/\text{м}^2$	$q_{Tx} = \left(\frac{Q_x}{F} \right)'$		
Удельный тепловой поток по стороне нагреваемой среды термоэлементов	q_{Tr}	»	$q_{Tr} = q_{Tx} \frac{\varepsilon'_x \max + 1}{\varepsilon'_x \max}$		
Температура холодных спаев термоэлементов	T_x	°К	$T_x = T_{0x1}^{\text{cp}} - \frac{q_{Tx}}{\varepsilon'_x \max}$		
Температура горячих спаев термоэлементов	T_r	»	$T_r = T_{\text{нагр}}^{\text{cp}} + \frac{q_{Tr}}{\varepsilon'_x \max}$		
Перепад температур на полупроводниковых стержнях термоэлемента	ΔT	»	$\Delta T = T_r - T_x$		
Среднее значение коэффициента термодополнительного вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	α_{Sp}^{cp}	мкВ/град	$\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$		
Среднее значение коэффициента теплопроводности полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	λ_p^{cp}	$\text{вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	$\lambda_p = \lambda(T)$		

По графикам зависимости:

$$\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$$

$$\alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$$

$$\lambda_p = \lambda(T)$$

$$\lambda_n = \lambda(T)$$

Продолжение табл. П-2

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Среднее значение коэффициента удельной электрической проводимости полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r \rightarrow T_x$	$\sigma_p^{\text{ср}}$ $\sigma_n^{\text{ср}}$	$1/\Omega \cdot m$	$\sigma_p = \sigma(T)$ $\sigma_n = \sigma(T)$	—	—
Оптимальное отношение площадей попечных сечений стержней p - и n -типов термоэлемента	$\frac{F_p}{F_n}$	—	$\frac{F_p}{F_n} = \sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_n} \frac{\lambda_p}{\lambda_n}}$	$z = \left[\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right]^{-2}$	$M = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_r + T_x)}$
Значение коэффициента обратности полупроводникового вещества в диапазоне температур $T_r \rightarrow T_x$	z	$1/\varphi \text{рад}$	—	$U_{\text{эл}} = \frac{(a_{Sp} + a_{Sn})(T_r - T_x)}{M - 1}$	—
Оптимальное отношение электрических сопротивлений	M	—	—	—	—
Падение напряжения на одном термоэлементе	$U_{\text{эл}}$	δ	—	—	—
Количество последовательно соединенных термоэлементов	$k_{\text{посл}}$	—	—	$k_{\text{посл}} = \frac{U}{U_{\text{эл}}}$	—

Продолжение табл. П-2

Нанменование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Площадь поперечного сечения стержня <i>p</i> -типа термоэлемента	F_p	M^2	»	Принимается	
Площадь поперечного сечения стержня <i>n</i> -типа термоэлемента	F_n				
Высота слоя полупроводникового вещества стержней термомодемента	$l_{\text{пп}}$	M	$F_n = F_p \frac{F_n}{F_p}$		
Электрическое сопротивление стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термомодемента	r_p	OM	$I_{\text{пп}} = \frac{(\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn})}{z(M-1)} (\sigma_p + \sigma_n) \times$ $\times (F_p + F_n)(T_r - T_x) 10^{-6}$		
Суммарное электрическое сопротивление стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термомодемента	r		$r_p = \frac{l_{\text{пп}}}{\sigma_p F_p}$		
Суммарное электрическое сопротивление термобатареи	R		$r_n = \frac{l_{\text{пп}}}{\sigma_n F_n}$		
Величина оптимального тока	$I_{\text{опт}}$	A	$r = r_p + r_n$		
			$R = rk_{\text{посл}}$		
			$I_{\text{опт}} = \frac{(\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn})(T_r - T_x)}{R(M-1)}$		

Продолжение табл. П-2

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Среднее значение коэффициента теплопроводности стержней p - и n -типов термоэлемента	λ_{cp}	$\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$	$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_p}{1 + \frac{F_p}{F_n}} + \lambda_n$		
Величина теплоты Пельтье, отбираемой от холодных спаев термоэлементов	$Q_{\Pi,x}$	ет	$Q_{\Pi,x} = (\alpha_{Sp} - \alpha_{Sn}) I_{\text{опт}} T_x k_{\text{посл}}$		
Величина теплоты Джоуля, возвращаемой к холодным спаям термоэлементов	$n_J Q_J$	»	$n_J Q_J = n_J I_{\text{опт}}^2 R$		
Величина теплоты Пельтье, выделяющаяся на горячих спаях термоэлементов	$Q_{\Pi,r}$	»	$Q_{\Pi,r} = (\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn}) I_{\text{опт}} T_r k_{\text{посл}}$		
Количество теплоты, передаваемой теплопроводностью через стержни термоэлементов	Q_T	»	$Q_T = \frac{\lambda_{cp} (T_r - T_x)}{l_{\text{пп}}} (F_p + F_n) k_{\text{посл}}$		
Количество теплоты, отбираемой от охлаждаемой среды холодаными спаями термоэлементов	Q_x	»	$Q_x = Q_{\Pi,x} - Q_T - n_J Q_J$		

Продолжение табл. П-2

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Количество теплоты, отдаваемой нагреваемой среде горячими сняями термоэлементов	Q_r	ет	$Q_r = Q_{\Pi, r} - Q_T + n_J Q_J$		
Мощность, затрачиваемая на работу термоэлектрического охлаждающего устройства	P		$P = Q_r - Q_x$		
Максимальный холодильный коэффициент	$\xi_{x \max}$		$\xi_{x \max} = \frac{Q_x}{Q_r - Q_x}$		
Отношение холодопронводительности к суммарной поверхности теплопередачи термоэлементов	$\frac{Q_x}{F}$	ет/м^2	$\frac{Q_x}{F} = \frac{T_x - T_r - 1}{T_m - T_x + 1} \times$ $\times \frac{2M \left(M - \frac{T_r}{T_x} \right)}{M - 1} \sqrt{\lambda_p \lambda_n} \times$ $\times \frac{\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}}}{\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}}}$		

Таблица П-3

**Последовательность расчета термоэлектрического охлаждающего устройства
на режим максимальной холодопроизводительности**

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Количество теплоты, подводимой в единицу времени к холдным слоям термоэлементов	Q_x	вт	По заданию		
Охлаждаемая среда	—	—	—	»	»
Нагреваемая »	—	—	—	»	»
Среднее давление и температура охлаждаемой среды в термоэлектрическом охлаждающем устройстве	$p_{\text{охл}}^{\text{ср}}$ $T_{\text{охл}}^{\text{ср}}$	kг/см^2 $^{\circ}\text{К}$	»	»	»
Среднее давление и температура нагреваемой среды в термоэлектрическом охлаждающем устройстве	$p_{\text{нагр}}^{\text{ср}}$ $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}}$	kг/см^2 $^{\circ}\text{К}$	»	»	»
Напряжение на режиме номинальной нагрузки	U	в	—	»	»
Полупроводниковый материал стержней термоэлемента	—	—	—	»	»
Коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой среды к стенке	$a_{\text{Tx.}}$	$\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$	По формулам теплопередачи для заданной среды		

Продолжение табл. П-3

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне охлаждаемой среды	$l_{\text{пл.}x}$ $\lambda_{\text{пл.}x}$	m $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции Принимается по справочникам для выбранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{ср}}^{\text{окл}}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности электроизоляционного материала по стороне охлаждаемой среды	$l_{\text{из.}x}$ $\lambda_{\text{из.}x}$	m $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от $T_{\text{ср}}^{\text{окл}}$ и I Принимается по справочникам для выбранного электроизоляционного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{ср}}^{\text{окл}}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне охлаждаемой среды	$l_{\text{к.}x}$ $\lambda_{\text{к.}x}$	m $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от I Принимается по справочникам для выбранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{ср}}^{\text{окл}}$		
Коэффициент теплопередачи многослойной стенки по стороне охлаждаемой среды	k_{Tx}	$\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$	$k_{Tx} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Tx}} + \frac{l_{\text{пл.}x}}{\lambda_{\text{пл.}x}} + \frac{l_{\text{из.}x}}{\lambda_{\text{из.}x}} + \frac{l_{\text{к.}x}}{\lambda_{\text{к.}x}}}$		

Продолжение табл. П-3

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Ориентировочные средние значения коэффициентов термодинамической проводимости p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{ср}}^{\text{нагр}} - T_{\text{окл}}$	$\alpha_{Sp}^{\text{ср}}$ $\alpha_{Sn}^{\text{ср}}$	$\frac{\text{мкВ/град}}{\text{ом}} \cdot \text{град}$ »	$\alpha_{Sp} = \alpha_S(T); \alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$	По графикам зависимости	
Ориентировочные средние значения коэффициентов теплопроводности стержней p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{окл}}$	$\lambda_p^{\text{ср}}$ $\lambda_n^{\text{ср}}$	$\frac{\text{вт/м} \cdot \text{град}}{\text{ом} \cdot \text{м}} \cdot \text{град}$ »	$\lambda_p = \lambda(T); \lambda_n = \lambda(T)$	По графикам зависимости	
Ориентировочные средние значения коэффициентов удельной электрической проводимости стержней p - и n -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{окл}}$	$\sigma_p^{\text{ср}}$ $\sigma_n^{\text{ср}}$	$\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}} \cdot \text{м}$ »	$\sigma_p = \sigma(T); \sigma_n = \sigma(T)$	По графикам зависимости	
Ориентировочное среднее значение коэффициента добротности для термоэлемента в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{окл}}$	$z_{\text{ср}}$	$1/\text{град}$	$z_{\text{ср}} = \left[\frac{(\alpha_{Sp}^{\text{ср}} + \alpha_{Sn}^{\text{ср}}) 10^{-6}}{\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}}} \right]^2$		

Продолжение табл. П-3

Нанменование величины	Обозначение	Размерность	Источник: книга формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Ориентировочное значение коэффициента электрических сопротивлений	M'	—	$M' = \sqrt{1 + \frac{1}{2} \sigma_{cp} (T_{nагр}^{cp} + T_{окл}^{cp})}$		
Ориентировочное значение холодильного коэффициента	ϵ'_x	—	$\epsilon'_x = \frac{T_{окл}^{cp}}{T_{nагр}^{cp} - T_{окл}^{cp}} \cdot \frac{T_{nагр}^{cp}}{M' - 1}$		
				$\left(\frac{Q_x}{F}\right)' = \frac{T_{окл}^{cp}}{l_{пп}} \cdot \frac{M'^2 - \frac{T_{nагр}^{cp}}{T_{окл}^{cp}}}{M' - 1} \times$ $\times \sqrt{\frac{\lambda_p^{cp} \lambda_n^{cp}}{\sigma_p^{cp} \sigma_n^{cp}}} \times \sqrt{\frac{\lambda_p^{cp}}{\sigma_p^{cp}}} + \sqrt{\frac{\lambda_n^{cp}}{\sigma_n^{cp}}}$	
Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среды	a_{Tr}	$W/m^2 \cdot grad$	a_{Tr}	По формулам теплопередачи для заданной нагреваемой среды	

Продолжение табл. П-3

Нанменование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне нагреваемой среды	$\frac{l_{\text{пл.}}}{\lambda_{\text{пл.}}} \text{ г}$	$\frac{\text{м}}{\text{вт/м} \cdot \text{град}}$	Принимается по эскизу конструкции Принимается по справочникам для выбранного конструкционного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{ср}}^{\text{нагр}}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности электрических материалов по стороне нагреваемой среды	$\frac{l_{\text{из.}}}{\lambda_{\text{из.}}} \text{ г}$	$\frac{\text{м}}{\text{вт/м} \cdot \text{град}}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от $T_{\text{нагр}}^{\text{и}} U$ Принимается по справочникам для выбранного электрического материала в первом приближении при температуре $T_{\text{ср}}^{\text{нагр}}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне нагреваемой среды	$\frac{l_{\text{к.}}}{\lambda_{\text{к.}}} \text{ г}$	$\frac{\text{м}}{\text{вт/м} \cdot \text{град}}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от I Принимается по справочникам для выбранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{ср}}^{\text{нагр}}$		
Коэффициент теплопередачи многослойной стенки на стороне нагреваемой среды	k_{Tr}	$\frac{\text{вт/м}^2 \cdot \text{град}}{\alpha_{\text{Tr}}}$	$k_{\text{Tr}} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{пл.}}} + \frac{l_{\text{пл.}}}{\lambda_{\text{пл.}}} + \frac{l_{\text{из.}}}{\lambda_{\text{из.}}} + \frac{l_{\text{к.}}}{\lambda_{\text{к.}}}}$		
Удельный тепловой поток по стороне охлаждаемой среды	q_{Tx}	вт/м^2	$q_{\text{Tx}} = \left(\frac{Q_x}{F} \right)^{''}$		

Продолжение табл. II-3

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Удельный тепловой поток по стороне нагреваемой среды	q_{Tr}	$\text{Вт}/\text{м}^2$	$q_{Tr} = q_{Tx} \frac{\varepsilon'_x + 1}{\varepsilon'_x}$		
Температура холодных спаев термоэлементов	T_x	°К	$T_x = T_{ox,l}^{\text{ср}} - \frac{q_{Tx}}{k_{Tx}}$		
Температура горячих спаев термоэлементов	T_r	»	$T_r = T_{nагр}^{\text{ср}} + \frac{q_{T,r}}{k_{Tr}}$		
Перепад температур на полупроводниковых стержнях термоэлемента	ΔT	»	$\Delta T = T_r - T_x$		
Среднее значение коэффициента термоэдс полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	$\alpha_{Sp}^{\text{ср}}$ $\alpha_{Sn}^{\text{ср}}$	МКВ/град	$\alpha_{Sp} = a_S(T)$ »	$\lambda_p = \lambda(T)$	$\lambda_n = \lambda(T)$
Среднее значение коэффициента теплопроводности полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	$\lambda_p^{\text{ср}}$ $\lambda_n^{\text{ср}}$	$\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$			

Продолжение табл. П-3

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Среднее значение коэффициента удельной электрической проводимости полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_r - T_x$	$\sigma_p^{\text{ср}}$ $\sigma_n^{\text{ср}}$	$1/\text{ом} \cdot \text{м}$ »	$\sigma_p = \sigma(T)$ $\sigma_n = \sigma(T)$	—	—
Оптимальное отношение площадей попречных сечений стержней p - и n -типов термоэлемента	$\frac{F_p}{F_n}$	—	$F_p = \sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_n} \frac{\lambda_p}{\lambda_n}}$	—	—
Значение коэффициента добротности полупроводникового вещества в диапазоне температур $T_r - T_x$	z	$1/\text{рад}$	$z = \left[\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \right]^{-2}$	—	—
Оптимальное отношение электрических сопротивлений	M	—	$M = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_r + T_x)}$	—	—
Падение напряжения на одном термоэлементе	$U_{\text{эл}}$	δ	$U_{\text{эл}} = (a_{Sp} + a_{Sn}) T_r$	—	—
Количество последовательно соединенных термоэлементов	$k_{\text{посл}}$	—	$k_{\text{посл}} = \frac{U}{U_{\text{эл}}}$	—	—

Продолжение табл. П-3

Нанменование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Площадь поперечного сечения стержня <i>p</i> -типа термоэлемента	F_p	м^2	»	$F_n = F_p \frac{F_n}{F_p}$	
Площадь поперечного сечения стержня <i>n</i> -типа термоэлемента	F_n		Принимается		
Высота слоя полупроводникового вещества стержней термоэлемента	$l_{\text{пп}}$	м	$I_{\text{пп}} = \frac{1}{2} (\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn}) (\sigma_p + \sigma_n) (F_p + F_n) \times \times T \times 10^{-6}$		
Электрическое сопротивление стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термоэлемента	r_p r_n	ом	$r_p = \frac{l_{\text{пп}}}{\sigma_p F_p}$ $r_n = \frac{l_{\text{пп}}}{\sigma_n F_n}$		
Суммарное сопротивление стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термоэлемента	r	ом	$r = r_p + r_n$		
Суммарное электрическое сопротивление стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов термоэлемента	R		$R = rk_{\text{пост}}$		
Величина оптимального тока	$I_{\text{опт}}$	a	$I_{\text{опт}} = \frac{(\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn}) T_x}{R}$		

Продолжение табл. П-3

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Среднее значение коэффициента теплопроводности стержней p - и n -типов термоэлемента	λ_{cp}	$\text{вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_p F_p}{F_n} + \lambda_n$ $\lambda_{cp} = \frac{\lambda_p F_p}{1 + \frac{F_p}{F_n}}$		
Величина теплоты Пельтье, отбираемой от холодных спаев термоэлементов	$Q_{\Pi, x}$	вт	$Q_{\Pi, x} = (\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn}) I_{\text{опт}} T_x k_{\text{посл}}$		
Величина теплоты Джоуля, возвращаемой к холодным спаям термоэлементов	$n_J Q_J$	'	$n_J Q_J = n_J I_{\text{опт}}^2 R k_{\text{посл}}$		
Величина теплоты Пельтье, выделяющейся на горячих спаях термоэлементов	$Q_{\Pi, r}$	'	$Q_{\Pi, r} = (\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn}) I_{\text{опт}} T_r k_{\text{посл}}$		
Количество теплоты, передаваемой теплопроводностью через стержни термоэлементов	Q_T	'	$Q_T = \frac{\lambda_{cp} (T_r - T_x)}{l_{\text{пп}}} (F_p + F_n) k_{\text{посл}}$		
Количество теплоты, отбираемой от охлаждаемой среды холодаными спаями термоэлементов	Q_x	'	$Q_x = Q_{\Pi, x} - Q_T - n_J Q_J$		

Продолжение табл. П-3

Нанменование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Количество теплоты, отдаваемой нагреваемой среде горячими спаями термоэлементов	Q_r	erg	$Q_r = Q_{\Pi, r} - Q_x + n_j Q_j$		
Мощность, затрачиваемая на работу термоэлектрического охлаждающего устройства	P		$P = Q_r - Q_x$		
Холодильный коэффициент	ϵ_x		$\epsilon_x = \frac{Q_x}{Q_r - Q_x}$		
Отношение холододриво-дительности к суммарной поверхности теплопередачи термоэлементов	$\frac{Q_x}{F}$	erg/m^2	$\frac{Q_x}{F} = \frac{T_r^2 - T_x^2}{T_{\Pi\Pi}^2 T_r + T_x^2} \sqrt{\lambda_p \lambda_n} \times \\ \times \frac{\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}}}{\sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}}}$		

Таблица П-4

Последовательность расчета термоэлектрического теплового насоса

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Количество теплоты, отведенной в единицу времени от горячих сплав термоэлементов нагреваемая среда	Q_T	erg	По заданию	—	—
Охлаждаемая »	—	—	»	»	»
Среднее давление и температура нагреваемой среды в термоэлектрическом тепловом насосе	$p_{\text{nагр}}^{\text{ср}}$ $T_{\text{nагр}}^{\text{ср}}$	$\text{kг}/\text{см}^2$ $^{\circ}\text{K}$	»	»	»
Среднее давление и температура охлаждаемой среды в тепловом насосе	$p_{\text{охл}}^{\text{ср}}$ $T_{\text{охл}}^{\text{ср}}$	$\text{kг}/\text{см}^2$ $^{\circ}\text{K}$	»	»	»
Напряжение питающего тока на режиме номинальной нагрузки	U	θ	»	»	»
Полупроводниковый материал стержней термоэлемента	—	—	»	»	»

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Ориентировочные средние значения коэффициентов термоэдс стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{охл}}^{\text{ср}}$	$\alpha_{Sp}^{\text{ср}}$ $\alpha_{Sn}^{\text{ср}}$	мкВ/град »	$\alpha_{Sp} = \alpha_S(T); \alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$	По графикам зависимости $\lambda_p = \lambda(T); \lambda_n = \lambda(T)$	
Ориентировочные средние значения коэффициентов теплопроводности стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{охл}}^{\text{ср}}$	$\lambda_p^{\text{ср}}$ $\lambda_n^{\text{ср}}$	вт/м·град »	По графикам зависимости $\sigma_p = \sigma(T); \sigma_n = \sigma(T)$	По графикам зависимости $\sigma_p = \sigma(T); \sigma_n = \sigma(T)$	
Ориентировочные средние значения коэффициентов удельной электрической проводимости стержней <i>p</i> - и <i>n</i> -типов в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{охл}}^{\text{ср}}$	$\sigma_p^{\text{ср}}$ $\sigma_n^{\text{ср}}$	$1/\text{ом}\cdot\text{м}$ »	По графикам зависимости $z_{\text{ср}} = z(T)$	По графикам зависимости $z_{\text{ср}} = z(T)$	
Ориентировочное среднее значение коэффициента добротности для термоэлемента в диапазоне температур $T_{\text{нагр}}^{\text{ср}} - T_{\text{охл}}^{\text{ср}}$	$z_{\text{ср}}$	$1/\text{зрад}$	$z_{\text{ср}} = \left[\sqrt{\frac{\lambda_p^{\text{ср}}}{\sigma_p^{\text{ср}}}} + \sqrt{\frac{\lambda_n^{\text{ср}}}{\sigma_n^{\text{ср}}}} \right]^2$	$z_{\text{ср}} = \left[\sqrt{\frac{\lambda_p^{\text{ср}} + \lambda_n^{\text{ср}}}{\sigma_p^{\text{ср}} + \sigma_n^{\text{ср}}}} \right]^2$	

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численные значения	
				Первое приближение	Второе приближение
Ориентировочное значение коэффициента электрических сопротивлений	M'	—	$M' = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z_{cp} (T_{narg}^{cp} + T_{oxl}^{cp})}$		
Ориентировочное значение коэффициента эффективности теплового насоса	$\mathcal{E}'_T \text{ опт}$	—	$\mathcal{E}'_T \text{ опт} = \frac{T_{narg}^{cp}}{T_{narg}^{cp} - T_{oxl}^{cp}} \times$ $\times \left[1 - \frac{1}{2M'} \cdot \frac{T_{narg}^{cp} + T_{oxl}^{cp}}{T_{narg}^{cp}} - \right.$ $\left. - \frac{(M' - 1)^2}{M' z_{cp} T_{narg}^{cp}} \right]$ $\left(\frac{Q_r}{F} \right)' = \frac{T_{oxl}^{cp}}{I_{pp}} \frac{T_{narg}^{cp} - 1}{T_{oxl}^{cp} + 1} \frac{2M'}{M' - 1} \times$ $\times \left(\frac{T_{narg}^{cp}}{T_{oxl}^{cp}} M' - 1 \right) \sqrt{\lambda_p^{cp} \lambda_n^{cp}} \times$ <p>Отношение количества теплоты, отдаваемой нагреваемой среде в единицу времени, к поверхности термозлементов</p>	$\sqrt{\frac{\lambda_p^{cp}}{\sigma_p^{cp}} + \sqrt{\frac{\lambda_n^{cp}}{\sigma_n^{cp}}}}$ $\times \sqrt{\frac{\lambda_p^{cp}}{\sigma_n^{cp}} + \sqrt{\frac{\lambda_n^{cp}}{\sigma_p^{cp}}}}$	

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне нагреваемой среды	a_{Tr} $l_{пл, г}$ $\lambda_{пл, г}$	$W/m^2 \cdot \text{град}$	По формулам теплопередачи для заданной среды Принимается по эскизу конструкции		
Толщина и коэффициент теплопроводности электроизоляционного материала по стороне нагреваемой среды	$l_{из, г}$ $\lambda_{из, г}$	$W/m \cdot \text{град}$	Принимается по справочникам для выбранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{ср}^{nагр}$		
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне нагреваемой среды	$l_{к, г}$ $\lambda_{к, г}$	$W/m \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от $T_{ср}^{nагр}$ и U Принимается по справочникам для выбранного коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{ср}^{nагр}$		

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Коэффициент теплопередачи многослойной стенки по стороне нагреваемой среды	k_{Tr}	$\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$	$k_{Tr} = \frac{1}{\frac{1}{a_{Tr}} + \frac{l_{пл, г}}{\lambda_{пл, г}} + \frac{l_{из, г}}{\lambda_{из, г}} + \frac{l_{к, г}}{\lambda_{к, г}}}$		
Коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой среды к стенке	a_{Tx}	"	По формуле теплопередачи для заданной охлаждаемой среды		
Толщина и коэффициент теплопроводности герметизирующей пластины по стороне охлаждаемой среды	$l_{пл, х}$ $\lambda_{пл, х}$	$\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по эскизу конструкции	Принимается по эскизу конструкции	Принимается по эскизу конструкции
Толщина и коэффициент теплопроводности электропроводящего материала по стороне охлаждаемой среды	$l_{из, х}$ $\lambda_{из, х}$	М $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Зависимости от $T_{ср}$ и U	Зависимости от $T_{ср}$ и U	Зависимости от $T_{ср}$ и U

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Толщина и коэффициент теплопроводности коммутационных пластин по стороне охлаждаемой среды	$l_{\text{к. х}}$	м	Принимается по эскизу конструкции в зависимости от l		
Коэффициент теплопередачи многослойной стенки по стороне охлаждаемой среды	k_{Tx}	$\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	Принимается по справочникам для раннего коммутационного материала в первом приближении при температуре $T_{\text{окл}}^{\text{ср}}$		
Удельный тепловой поток по стороне нагреваемой среды	q_{Tr}	$\text{Вт}/\text{м}^2$			
Удельный тепловой поток по стороне охлаждаемой среды	q_{Tx}	$\text{Вт}/\text{м}^2$			
Температура горячих спаев термоэлементов	$T_{\text{г}}$	$^{\circ}\text{К}$			
Температура холодных спаев термоэлементов	T_{x}	$^{\circ}\text{К}$			
Перепад температур на полупроводниковых стержнях термоэлемента	ΔT	К			

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Среднее значение коэффициента термодес полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_g - T_x$	α_{Sp}^{cp} α_{Sn}^{cp}	$JK/\text{град}$ »	По графикам зависимостей: $\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$ $\alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$	$\alpha_{Sp} = \alpha_S(T)$ $\alpha_{Sn} = \alpha_S(T)$	
Среднее значение коэффициента теплопроводности полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_g - T_x$	λ_p^{cp} λ_n^{cp}	$W/m \cdot \text{град}$ »	$\lambda_p = \lambda(T)$ $\lambda_n = \lambda(T)$	$\lambda_p = \lambda(T)$ $\lambda_n = \lambda(T)$	
Среднее значение коэффициента удельной электрической проводимости полупроводникового вещества p - и n -типов в диапазоне температур $T_g - T_x$	σ_p^{cp} σ_n^{cp}	$1/ом \cdot м$ »	$\sigma_p = \sigma(T)$ $\sigma_n = \sigma(T)$	$\sigma_p = \sigma(T)$ $\sigma_n = \sigma(T)$	
Оптимальное отношение площадей поперечных сечений стержней p - и n -типов термоэлемента	$\frac{F_p}{F_n}$	—	$\frac{F_p}{F_n} = \sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_n} \frac{\lambda_p}{\lambda_n}}$	$\frac{F_p}{F_n} = \sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_n} \frac{\lambda_p}{\lambda_n}}$	
Значение коэффициента доброкачества полупроводникового вещества в диапазоне температур $T_g - T_x$	z	$1/\text{град}$	$z = \left[\sqrt{\frac{\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn}}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} \right]^{-2}$	$z = \left[\sqrt{\frac{\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn}}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} \right]^{-2}$	

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Оптимальное отношение электрических сопротивлений	M	—	$M = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_r + T_x)}$		
Падение напряжения на одном термоэлементе	$U_{\text{эл}}$	σ	$U_{\text{эл}} = \frac{(\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn})(T_r - T_x)}{M - 1}$		
Количество последовательно соединенных термоэлементов	$k_{\text{посл}}$	—	$k_{\text{посл}} = \frac{U}{U_{\text{эл}}}$		
Площадь поперечного сечения стержня p -типа термоэлемента	F_p	M^2	Принимается		
Площадь поперечного сечения стержня n -типа термоэлемента	F_n	»	$F_n = F_p \frac{F_n}{F_p}$		
Высота слоя полупроводникового вещества стержней термоэлемента	$l_{\text{пп}}$	M	$l_{\text{пп}} = \frac{(\alpha_{Sp} + \alpha_{Sn})}{2(M-1)} (\sigma_p + \sigma_n)(F_p + F_n) \times (T_r - T_x) 10^{-6}$		
Электрическое сопротивление стержней p - и n -типов термоэлемента	r_p	$\Omega \cdot M$	$r_p = \frac{l_{\text{пп}}}{\sigma_p F_p}$		
	r_n	»	$r_n = \frac{l_{\text{пп}}}{\sigma_n F_n}$		

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Суммарное электрическое сопротивление стержней p - и n -типов термоэлемента	r	$\Omega \cdot M$	$r = r_p + r_n$		
Суммарное электрическое сопротивление	R		$R = rk_{\text{посл}}$		
Величина оптимального тока	$I_{\text{опт}}$	a	$I_{\text{опт}} = \frac{(a_{Sp} + a_{Sn})(T_r - T_x)}{R(M-1)}$		
Среднее значение коэффициента теплопроводности стержней p - и n -типов термоэлемента	$\lambda_{\text{ср}}$	$\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$	$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_p F_p}{F_n} + \lambda_n$		
Величина теплоты Пельтье, выделяющейся на горячих спаях термоэлементов	$Q_{\Pi, r}$	Вт	$Q_{\Pi, r} = (a_{Sp} + a_{Sn}) I_{\text{опт}} T_r k_{\text{посл}}$		
Величина теплоты Джоуля, возвращаемой к горячим спаям термоэлементов	$n_J Q_J$		$n_J Q_J = n_J I_{\text{опт}}^2 R k_{\text{посл}}$		
Величина теплоты Пельтье, поглощаемой на холодных спаях термоэлементов	$Q_{\Pi x}$		$Q_{\Pi, x} = (a_{Sp} + a_{Sn}) I_{\text{опт}} T_x k_{\text{посл}}$		
Количество теплоты, передаваемой термопроводностью через стержни термоэлементов	Q_T		$Q_T = \frac{\lambda_{\text{ср}}(T_r - T_x)}{I_{\text{пп}}} (F_p + F_n) k_{\text{посл}}$		

Продолжение табл. П-4

Наименование величины	Обозначение	Размерность	Источник или формула	Численное значение	
				Первое приближение	Второе приближение
Количество теплоты, отбираемой от горячих слоев термоэлементов	Q_r	erg	$Q_r = Q_{\Pi,r} - Q_T + n_J Q_J$		
Количество теплоты, отдаваемой охлаждаемой средой холодным слоям термоэлементов	Q_x	»	$Q_x = Q_{\Pi,x} - Q_T - n_J Q_J$		
Мощность, затрачиваемая на работу термоэлектрического генератора	P	»	$P = Q_r - Q_x$		
Оптимальный коэффициент эффективности теплового насоса	$\varepsilon_{T \max}$	—	$\varepsilon_{T \max} = \frac{Q_r}{Q_r - Q_x}$		
Отношение количества теплоты, отбираемой от горячих слоев, к суммарной поверхности термоэлементов	$\frac{Q_r}{F}$	erg/M^2	$\begin{aligned} \frac{Q_r}{F} &= \frac{T_x}{T_{\text{пп}}} \frac{T_r - 1}{T_x + 1} \left(\frac{T_r}{T_x} M - 1 \right) \times \\ &\times \frac{2M}{M - 1} \sqrt{\lambda_p \lambda_n} \times \\ &\times \sqrt{\frac{\lambda_p}{\sigma_p}} + \sqrt{\frac{\lambda_n}{\sigma_n}} \end{aligned}$		

1. Алексеев Г. Н. Непосредственное превращение различных видов энергии в электрическую и механическую, Л., Госэнергоиздат, 1963.
2. Алексеев Г. Н., Мурков В. С. Морские подводные двигатели, Л., «Транспорт», 1964.
3. Баринов С. Ф. Судовые компактные теплообменные аппараты, Л., «Судостроение», 1965.
4. Баранов А. П. Новые источники электрической энергии для судов, Л., «Судостроение», 1965.
5. Беляев Н. М. Сопротивление материалов, М.—Л., Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1950.
6. Бертинов А. И., Алиевский Б. А., Троицкий С. Р. Униполярные электрические машины, М., «Энергия», 1966.
7. Бурштейн А. Н. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств, М., Физматгиз, 1962.
8. Брынских Н. А. Влияние неравномерного нагрева термоэлементов батареи на ее коэффициент полезного действия, Изв. АН УзССР. Серия физ.-мат. наук, 1962.
9. Войтекий В. В., Гарбер Е. Д. Основы автоматизации и регулирования судовых силовых установок, Л., «Судостроение», 1966.
10. Даниэль-Бек В. С., Рогинская Н. С. Термоэлектрогенераторы, М., Связьиздат, 1961.
11. Диомидов М. Н., Дмитриев А. Н. Покорение глубин, Л., «Судостроение», 1964.
12. Жузе В. П., Гусенкова Е. Н. Библиография по термоэлектричеству (термоэлектрогенераторы и охлаждающие устройства), М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963.
13. Защита ядерных реакторов, М., Изд-во иностр. лит., 1958.
14. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1960.
15. Иоффе А. Ф., Можес Б. Я., Стильбанс Л. С. Об энергетических применениях термоэлементов, «Физика твердого тела», 1960, № 11.
16. Келли К. М. Термоэлектрические генераторы. В кн. «Исследования при высоких температурах», Изд-во иностр. лит., 1962.
17. Коленко Е. А. Термоэлектрические охлаждающие приборы, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963.
18. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче, М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
19. Милионщикова М. Д. и др. Высокотемпературный реактор-преобразователь «Ромашка», «Атомная энергия», 1964, т. 17, вып. 5.
20. Моисеев А. А. Конструктивные расчеты турбоагрегатов, Л., Судпромгиз, 1948.
21. Можес Б. Я. Влияние температурной зависимости параметров материалов на эффективность термоэлектрических генераторов и холодильников, «Физика твердого тела», 1960, т. II, вып. 4.
22. Новые источники энергии для электродвижения судов, Экспресс-информация ВНИТИ АН СССР, серия «Судостроение и водный транспорт», 1962, № 35.
23. Петров П. А. Ядерные энергетические установки, М., Госэнергоиздат, 1958.

24. Полупроводники в науке и технике. Под редакцией А. Ф. Иоффе, АН СССР, 1957, 1; 1958, 2.
25. Полупроводники, М., Изд-во иностр. лит., 1962.
26. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Сб. статей, М., Госатомиздат, 1961.
27. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, Информационный бюллетень ВИНИТИ АН СССР, 1964, вып. 5 (22).
28. Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую, Информационный бюллетень ВИНИТИ АН СССР, 1965, вып. 7 (36).
29. Реакторная система с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую для военных целей, Экспресс-информация ГК по ИАЭ СССР, 1965, вып. 37 (466).
30. Соминский М. С. Полупроводники, М.—Л., Изд-во физ.-мат. лит., 1961.
31. Справочник машиностроителя, т. 2, Машгиз, 1960.
32. Справочник машиностроителя, т. 6, М., «Машиностроение», 1964.
33. Сурвилло В. Л. Судовые холодильные установки, М., Речиздат, 1959.
34. Термоэлектрические материалы и преобразователи, М., «Мир», 1964.
35. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов, ч. 1, ОНТИ, Л.—М., Госуд. техн.-теор. изд-во, 1934.
36. Титов П. И. Судовые силовые установки, Л., Судпромгиз, 1951.
37. Чанг Ш. Преобразование энергии, М., Атомиздат, 1965.
38. Чегодаев Д. Д., Наумова З. К., Дунавская Ц. С. Фторопласти, Л., Госхимиздат, 1960.
39. Чернов А. Д., Поздеев А. В., Васильев Л. Г. Паротурбинные установки морских транспортных судов, Л., Судпромгиз, 1958.
40. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов, М., Физматгиз, 1959.
41. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А. Контактный теплообмен, М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
42. Штрауб Е. А. Курс физики, т. II, Л., Судпромгиз, 1962.
43. Эрзин Н. И., Маков Н. В. Коммутация термоэлектрических ветвей в термоэлектрических устройствах, «Гелиотехника», 1965, № 5.
44. Advanced Energy Conversion Symposium on thermoelectric energy conversion, Dallas, 1961, «An International Journal», vol. 2, Januar—June 1962.
45. AEC funding cut hits SNAP-4 undersea power unit. — «Missiles and Rockets», 1961, 8, 10.
46. Anderson J. R. Thermoelectric Air-Conditioner for submarines. — «RCA Review», 1961, XXII, 2.
47. A 100 kw power system. — «Nuclear Engineering», 1965, 10, 114.
48. Argelio S. J. Recent progress in thermoelectricity. — «Electrical Engineering», 1960, 79, 5.
49. Argelio S. J. Solid-state energy conversion devices. — «Trans. IRE», Educ., 1960, 3, 4.
50. Anomalous Thermoelectric Properties of Cadolinium Selenide. — «Nature», 1961, April, 22.
51. Atomic weather station to aid U. S. — «Electronic Design», 1961, 9, 16.
52. Atomic Automatic Weather Station. — «Electrical Engineering», 1961, 8, 1.
53. Atomic-Powered navigation buoy. — «Shipbuilding and Shipping Record», 1963, 101, 19.
54. «Aviation Week and Space Technology», 1964, June, 8.
55. Balke S. Wirtschaftliche Aussichten der Energie-Direktumwandlung. — «Brennstoff—Wärme—Kraft», 1964, 16, 7.
56. Baum B. H. Exploratory study of thermoelectric power generation for space flight applications. — «NASA TWD-336», 1960.
57. Bollmeyer E. W. An elementary design discussion of thermoelectric generation. — «Electrical Engineering», 1959, 78, 10.

58. B o l l m e i e r E. W. An elementary design discussion of thermoelectric generation. — «Appl. and Ind.», 1960, 46.
 59. B r a t s b e r g H. Kan varmekraftmaskiner baseres pa termo'electriske effekter. — «Era fys. Verden», 1955, 17, 2.
 60. B u r n e t t T. B., L o r s c h H. O., T h o m p s o n J. E. Some problems in the development of a commercial thermoelectric refrigerator. — «Brit. Journal Applied Phys.», 1961, 12, 11.
 61. B u s s e C. Thermoelectricity, «Electronics», 1961, 34, 25.
 62. C e l l e n t C. M. Thermoelectricity state of the art, «Electronic Industrial», 1959, 18, 7.
 63. C e l l e n t C. M. Unconventional power converters, «Electronic Industrial», 1960, 19, 9.
 64. C l i n g m a n W. H. New Concepts in Thermoelectric device design, «Proceedings of the IRE», 1961, vol. 47, No 7.
 65. Combinative van verbeterde techniken en materialen geet nieuw gebruik van thermo-electrische effecten, «Elektronica», 1961, 345.
 66. Commercial thermoelectric generator, «Electrical Engineering», 1960, 79, 5.
 67. Compact Nuclear Reactor Power System in Orbit, «The Engineer», 1965, 219, 5700.
 68. C o r r y T., M o r e l a n d W., S t r i c l a n d E. Design of 100-watt Thermoelectric Generator, «Electrical Engineering», 1960, vol. 79, No 60.
 69. C o r r y T., S p i r a G. Thermoelectric generator design performance and application, «IRE Trans. Military Electronics», 1962, MIL-6, 1.
 70. C o r r y T., S p i r a G. Thermoelectric generator design, «Electro-Technologie», 1962, 70, 3.
 71. D a v i s o o n I. K., P a s t e r n a k J. Thermoelectricity, U. S. Govt. Res. Repts., Oktober 1960.
 72. D u f r a n e K. H. An 100-kwe Underwater Thermoelectric Reactor Plant: Conceptual Design, «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1963, No 2.
 73. D u n c a n C. S. Thermoelectric cooling and power generation. State of development and applications of thermoelectric devices, «Agric. Engineering», 1960, 41, 5.
 74. E g l i P. H. Thermoelectricity, Proc. of the conference on thermoelectricity sponsored by the Naval Res. Lab., 1958, N. Y., London, J. Wiley and Sons, X, 1960.
 75. E i c h h o r n R. L. Review of Thermoelectric Refrigeration, «JEEE Proceedings», 1963, 51, 5.
 76. F i s c h e r E. Thermoelectrical, Fys. tidsskr., 1960, 58, 2/3.
 77. F r i t t s R. W. The development of thermoelectric Power Generators, «Proceedings of the JEEE», May 1963.
 78. 5000-watt thermoelectric generator, «Instrum. Practice», 1959, 13, 7.
 79. 5 kw Thermoelectric Generator developed vor the U. S. Navy, «The English Electrical Journal», 1960, 165, 8.
 80. F u s c h i l l o N. A proposal for expanding the thermoelectric effects research program, Philadelphia Pa, Franklin Inst., 1958.
 81. G a j e w s k i I. Eksperimentalny generator thermoelectryczny SNAP-3, «Przegiad electrotechniczny», 1962, 38, 6.
 82. G a r d n e r I. W. Liquids for thermoelectric generation?, «English Electrical Journal», 1963, vol. 18, No 4.
 83. G o l d s m i d H. J. Applications of thermoelectricity, London, Methuen, N. Y., J. Wiley and Sons, XV, 1960.
 84. G l a s s b u r n C. W., H e n d e r s o n C. M., High temperature Thermoelectric Research, «JEEE Transactions on Aerospace», 1964, 2.
 85. G r a y P. E. Static analysis of radiation-powered thermoelectric generators, Proc. Nat. Electronics Conf., 1960, vol. 16, Chicago, Illinois.
 86. G r e e f f M. B. A note on thermoelectric generation of current, «Journal Applied Physics», 1950, 21, 9.
 87. G r e n v i l l e B. Thermoelectric generator design, «Electrical Engineering», 1948, 67, 7.

88. Heat «sandwich» gives double power, «Electrical Journal», 1961, 166, 4.
89. H e r i n c k x C. Applications des propriétés thermoelectriques des semi-conducteurs, «Revue El.», 1960, 3, 2.
90. H u d e l s o n G. D. Thermoelectric air conditioning of totally enclosed environments, «Electrical Engineering», 1960, 79, 6.
91. 1000 km vom Südpol entfernt wurde am 8. Februar 1962 atomare SNAP-7C Generator unter dem ewigen Eis verankert, «Flugwelt», 1963, vol. 15, No 9.
92. I n n a n B. Thermal generation of electricity and thermoelectric heat pumps, «Armed Forces Chem. Journal», 1959, 13, 6.
93. J u s t i E. Die physischen Grundlagen und werkstoffkundlichen Fortschritte der Peltier-Kühlung, «Kältetechnik», 1960, 12, 5.
94. K a t z K. Thermoelectric conversion with emphasis for applications to nuclear reactor heat, «IRE Convent. Rec.», 1960, 9.
95. K a y e J., W e l t s c h J. A. Direct conversion of heat to electricity, N. Y., London, Chapman and Hall, 1961.
96. K e l l y J., Thermoelectric applications to industrial problems, «IRE Trans. on Industrial Electronics», 1962, 9, 1.
97. K e n n e t h D. H. An-100-kwe underwater thermoelectric reactor plant: conceptual design. Summary of a paper., «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1963, vol. 6, No 2.
98. K e r r D. L. Design calculations for thermoelectric generators, Thermoelectric materials and devices, N. Y., Reinold Publ., 1960.
99. La conversione thermoelettrica, «Techn. ital.», 1961, 26, 1.
100. L a n g p a p e R. Kombinationsmöglichkeiten von thermoionischen und thermoelectrischen Generatoren, «ETZ», 1964, 85, 21.
101. Largest TE generator built by Westinghouse, «Missiles and Rockets», 1961, 6, 21.
102. L a u c k E., U e h a r o O. A. New power source aren't apt to put old standbys off shelf, «SAE Journal», 1962, 70, 4.
103. L a u r i l a E. Lämpösähköisten ilmiöiden teknillisistä sovellutuksista, «Arkhimedes», 1957, 1.
104. M a c D o n a l d D. K. C. Thermoelectricity. An introduction to the principles, N. Y., J. Wiley and Sons, 1962.
105. M a r t i n s . SNAP-7B nuclear generator now powers the historic Baltimore Light, «Nuclear Engineering», 1964, 9, 98.
106. M i c h e n e r W. H. Apparatus review: thermoelectric generator, «Amer. Journal Physics», 1961, 29, 4.
107. M o n t i R. Contributo allo studio dei sistemi termoelettrici di conversione di energia, «P. I. Missili Riv. Assoc. Ital. Razzi», 1962, 4, 1.
108. M o r s e J. G., H a r v e y D. G. Isotopic power sources coupled with thermoelectric converters, 3rd U. N. Intern. Conf. Peaceful Uses Atom. Energie, 1964.
109. M u r p h y C. E. P_4S_3 -Cooled Thermoelectric Reactor Plant: Conceptual Design, «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1963, № 2.
110. Nachrichtensatellit Telstar, «Technische Rundschau», 1962, № 33, vom. 3, 8.
111. N e i l l A. B., S c h n e i d e r W. E., H e n n e k e E. G. Application study of Submarine, «ASHRAE Journal», 1965, 7, 2.
112. New thermoelectric generator converts heat to power, «Canadian Gas Journal», 1960, 53, 11.
113. New thermoelectric developments in research and engineering show promise, «Electrical Engineering», 1962, 1, 1.
114. Nieuwe toepassingen van halfgeleiders. Thermoelektrische generatoren en Koelmachines, «Ingenieur», 1959, 71, 40.
115. N o r w o o d M. H. A comparison of theory and experiment for a thermoelectric cooler, «Journal Applied Physics», 1961, vol. 32, 12.
116. Nuclear-thermoelectric generator, «Australian Journal of Instrument Technologie», 1961, 17, 4.
117. Nuclear-thermoelectric generator developed, «Electrical Engineering», 1961, 8, 5.

118. Nuclear thermoelectrischer Stromerzeuger ohne bewegliche Teile für die Verwendung im Weltraum, «ETZ-A», 1963, Bd. 84, 12.
119. Oak Ridge Details Sr-90 Production, «Chemical and Engineering News», 1963, vol. 15, No 9.
120. Penfield P. Available power from a nonideal Source, «Journal, Appl. Phys.», 1961, 32, 9.
121. Perkins J. Optimal loading of a thermoelectric generator, «Journal Appl. Phys.», 1954, 25, 8.
122. Phillips A. F. Thermoelectric air-conditioning and Refrigeration for Submarines, «Bureau of Ships Journal», 1963, 12, 1.
123. Report Breakthrough in thermoelectricity, «Electronics», 1960, 33.
124. Röllinger C. N., Sundelaan J. E., The performance of a convectively cooled thermoelement used power generation, «Solid-State Electronics», 1961, 3, 3—4.
125. Robert A. L'état actuel des recherches dans le domaine de la conversion directe de la chaleur en énergie électrique, «Revue technique suisse», 1965, 62, 12.
126. Schoupp W. E. Thermoelectric direct conversion i Nuclear reactors, «Mechanical World and Engineering Record», 1961, 141, 3499.
127. Sherman B., Heikes R. R., Ure R. W. Calculation of efficiency of thermoelectric devices, «Journ. Appl. Physics», 1960, 31, 1.
128. Shields T. Thermoelectric generation, «Brit. Power Engineering», 1961, 2, 2.
129. Smith G. E., Wolfe R. Thermoelectric Properties of Bismuth-Antimony Alloys, «Journal Appl. Physics», 1962, 33, 3.
130. SNAP-7D plans: Use on Oil Rigs Weighed, «Nucleonics», 1965, 23, 1.
131. SNAP-7D. Now in the Gulf of Mexico supplying power for Nomad, «Nucleonics», 1964, vol. 22, № 3.
132. SNAP-9 im Weltraum, «Kerntechnik», 1964, Bd. 6, № 1.
133. SNAP Expenditures, E. Y., 1962—1965, «Missiles and Rockets», 1964, 14, 22.
134. Soderholm L. G. Propane-fired thermoelectric generator powers remote radio relay, «Design News», 1964, 19, 11.
135. Somers E. W., Swanson B. W. Optimization of a conventional fuel-fired thermoelectric generator, Direct conversion of heat to electricity, N. Y. Mass. Inst. Techn., 1960.
136. Somers E. W., Swanson B. W. Some heat transfers problems in thermoelectric devices, Thermoelectricity, Science and Engineering, N. Y., London, Interscience Publ., 1961.
137. Somers E. W., Kelly I. C. Thermoelectric power, «Mech. Engineering», 1960, 82, 7.
138. Sorensen A. A. Applying thermoelectric generators, «Product Engineering», 1961, 32, 36.
139. Soumerai H. Evaluation of refrigerant 502 in integral horsepower Commercial refrigeration Compressors, «ASHRAE Journal», 1964, 6, 3.
140. Spring K. H. Generation of electricity without the use of rotating machinery, «Nature», 1961, 190.
141. Strempler E. G., Gray P. E. The initial transient behavior of a thermoelectric generator, «Communication and Electronics», 1961, 56.
142. Stivers G. Radioisotope Thermoelectric Space power supplies, «IEEE Trans. on Aerospace», 1964, 2, 2.
143. Stammler H. H. Radionuclid-Batterien für die Raumfahrt, Weltraumfahrt, «Zeitschrift für Astronautic and Rockettechnik», 1963, Heft 4.
144. Swanson B. W. Designing a thermoelectric generator, «Power», 1961, 105, 2.
145. Strauss S. D. Romashka in Perspective «Nucleonics», Dezember, 1964.
146. Talat M. E. Electric analog of transport phenomena in thermoelectric generator, «Communication and Electronics», 1961, 56.

147. T a l a a t M. E., Synthesis of thermoelectric generators, «Electrical Engineering», 1960, 79, 6.
148. Thermoelectric generator drives propeller, «Aviation Week», 1959, 70, 4.
149. Thermoelectric generator to power weather buoy, «Electronic Design», 1960, 8, 26.
150. Thermoelectric generator. Small power plant runs for a year on 10 worth of propane, «Electronical Comp. and Systems Design», 1960, 4, 6.
151. Thermoelectric generators made available in commercial line, «Electrical Engineering», 1962, 81, 5.
152. Thermoelectric space panels yield 20 watt per pound, «Electron. Design», 1964, 12, 8.
153. Thermo-electric cooling at sea, «European Shipbuilding», 1964, No 4.
154. Thermoelectric Air conditioner for people tested, «Electrical Engineering», 1962, 87, 1.
155. Thermoelectric generator, «Shipbuilding and Shipping record», 1965, 106, 2.
156. Thermoelectric generators, «Missiles and Rockets», 1961, 7, 44.
157. Thermoelectric generators, burn any type of fuel, «Steel», 1961, 148, 4.
158. Thermoelectric generators take on new loads, «Power», 1961, 105, 5.
159. Thermoelectricity may be used to provide navigation aids, «Electrical Engineering», 1961, 80, 2.
160. Thermoelectric cooling (Heating modules), «Semicond. Prod.», 1962, 4, 10.
161. Thermoelectric air conditioning systems vor submarines, Progress Reports to Bureau of Ships from Research and Development Deviation Carrier Corporation, N. Y., 1961.
162. Thermoelectric generator has improved life performance, «IEEE Spectrum», 1964, 1, 3.
163. The Atomic Energie Comission SNAP-10A Programme, «Nuclear Energie», August, 1965.
164. T h i r d S. M., H a r e G. E. Experimental thermoelectric generator, «Proc. Inst. Electr. Engrs.», 1963, 110, 10.
165. Y a f f e e M. L. RCA Delivers SNAP-10A Power modules, «Product. Engineering», 1961, 32, 36.
166. Y a f f e e M. L. USAF Effort Aimed at Thermoelectrics, «Aviation Week and Space Technologie», 1964, June, 8.
167. Van Dong N g u y e n. Effects des neutrons rapides sur les proprietes thermoelectriques des semiconducteurs, «On de electr.», 1963, 43, 441.
168. Volume demand seen for advanced Terrestrial SNAP's, «Nucleonics», 1964, 8.
169. V o l k e r E. Semiconductors and electronic cooling, «Refr. Journal», 1960, 13, 8.
170. W e b b E. L. R. Equivalent circuits for a thermoelectric converter, «Proc. IRE», 1961, 49, 5.
171. W e t c h J. R. Reactors: Key to large scale underwater operations, «Nucleonics», 1966, 24, 6.
172. Z e n e r C. The impact of thermoelectricity upon science and technologie, Thermoelectricity, N. Y., London, J. Wiley and Sons, 1960.
173. Z e n e r C. Putting electrons to work, «Trans. Amer. Soc. Metals», 1961, 53, 2.

	Стр.
От автора	3
Основные обозначения	5
Введение	7
Глава I. Основы теории термоэлектрических процессов	9
§ 1. Термоэлектрические процессы и их физическая сущность	—
§ 2. Принцип действия термоэлектрических генераторов, охлаждающих устройств и тепловых насосов	26
§ 3. Основные теоретические зависимости для термоэлектрических генераторов, охлаждающих устройств и тепловых насосов	29
§ 4. Твердые, жидкие и газообразные термоэлектрические материалы	52
§ 5. Термоэлектрические характеристики некоторых полупроводниковых материалов	58
§ 6. Основы расчета термоэлектрических генераторов, охлаждающих устройств и тепловых насосов	61
Глава II. Конструкции основных элементов термоэлектрических устройств и установок	75
§ 7. Конструкции термоэлементов и термоэлектрических батарей	—
§ 8. Некоторые особенности конструирования термоэлектрических батарей	95
§ 9. Характер напряжений в плоских и кольцевых термоэлементах	107
§ 10. Источники энергии термоэлектрических устройств и установок	118
§ 11. Влияние радиоактивного излучения на термоэлектрические характеристики полупроводниковых материалов	126
§ 12. Способы подвода и отвода теплоты от горячих и холодных спаев термоэлектрических батарей	131
§ 13. Конструкционные и электроизоляционные материалы для термоэлектрических генераторов, охлаждающих устройств и тепловых насосов	146
Глава III. Режимы работы и принципы регулирования судовых термоэлектрических установок	151
§ 14. Режимы работы и характеристики термоэлектрогенераторов	—
§ 15. Принципы регулирования судовых термоэлектрических установок	163
Глава IV. Перспективы использования термоэлектрических устройств и установок на судах	177
§ 16. Общие требования, предъявляемые к судовым устройствам и установкам	—
§ 17. Перспективы использования на судах термоэлектрических охлаждающих устройств и тепловых насосов	181
§ 18. Перспективы применения термоэлектрических устройств и установок в качестве судовых источников электроэнергии	190
§ 19. Перспективы использования термоэлектрогенераторов в составе главных судовых энергетических установок	209
§ 20. Электродвигательные комплексы судовых термоэлектрических установок	223
Приложения	229
Литература	277

МАНАСЯН ЮРИЙ ГУРГЕНОВИЧ
СУДОВЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА И УСТАНОВКИ

Рецензенты: канд. техн. наук **А. А. Азовцев**
и канд. техн. наук **И. А. Репин**

Научный редактор канд. физ.-мат. наук
Е. К. Иорданишвили

Редактор **И. А. Фрешко**

Технический редактор **Д. М. Крякова**

Корректоры: **А. И. Дулькина,**
Л. Н. Степнова

Оформление переплета, суперобложки
художника **Б. Н. Осечакова**

Сдано в набор 16/11 1968 г. М-20961 Подписано к печати 23/V 1968 г.
Формат издания 60×90^{1/16} Печ. л. 17,75 Уч.-изд. л. 16,1 Изд. № 2068-67
Зак. № 2005 Тираж 2400 экз. Цена 1 руб. 09 коп. Бумага для глубокой печати

Издательство «Судостроение», Ленинград, Д-65, ул. Гоголя, 8

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Мойсеенко, 10.

