

Автореферат  
Н 17

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ И ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
Кафедра холодильных машин

---

*Инж. В. А. НАЕР*

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

W

# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
доктор технических наук, профессор  
В. С. МАРТЫНОВСКИЙ

ОДЕССА  
1959

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ И ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра холодильных машин

*Инж. В. А. НАЕР*

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

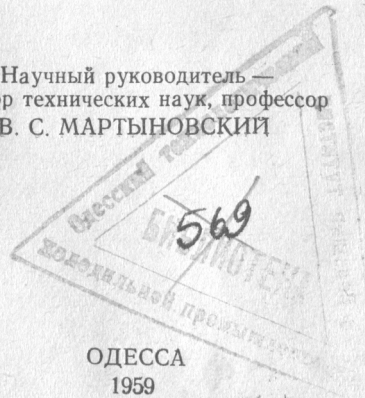
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель —  
доктор технических наук, профессор  
В. С. МАРТЫНОВСКИЙ

xv 1161

ІНСТИТУТ КОЛОДЯ  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА



ОДЕССА  
1959

## ВВЕДЕНИЕ

Прошло 125 лет с тех пор, как был открыт эффект Пельтье. Первоначальные исследования этого явления с целью практического применения термоэлектрических охлаждающих и нагревающих устройств проводились на металлах и не дали положительных результатов. Малые величины термоэдс ( $e$ ) и большие потери, возникающие в результате перетекания тепла по ветвям термопары от горячего спая к холодному, не позволили создать экономичных установок. Закон Видемана-Франца указывал на отсутствие среди металлов пар, имеющих одновременно малые значения электросопротивления ( $\rho$ ) и теплопроводности ( $\lambda$ ).

В 1911 г. Альтенкирх разработал теорию термоэлектрического охлаждения и подогрева и, опираясь на закон Видемана-Франца, пришел к выводу о нецелесообразности применения эффекта Пельтье в промышленных установках из-за малой энергетической эффективности.

В 1930 г. акад. А. Ф. Иоффе указал, что полупроводники, не подчиняющиеся закону Видемана-Франца и имеющие величины термоэдс в десятки раз большие, чем металлы, могут значительно повысить энергетическую эффективность термоэлектрического охлаждения и подогрева. Разработанная им в 1949 г. теория энергетических применений полупроводниковых термоэлементов и проведенные многочисленные эксперименты подтвердили возможность создания полупроводниковых термоэлектрических нагревательных и охлаждающих устройств с высокими коэффициентами преобразования.

За последние годы Институт Полупроводников АН СССР создал и испытал ряд экспериментальных полупроводниковых холодильных установок. Полученные значения холодильных коэффициентов (0,2—0,3) показали, что данные установки уже в настоящее время могут конкурировать по энергетическим показателям с абсорбционными, использующими электрообогрев. Особенно успешным оказалось применение эффекта Пельтье в установках очень малой производительности, измеряемой единицами ккал/час (микророзморозильники и микротермостаты).

Опыт проектирования и эксплуатации первых полупроводниковых установок выявил ряд задач, решению которых посвящена настоящая работа.

1. Появилась необходимость в уточнении существующей теории с целью создания инженерных методов расчета полупроводниковых термобатарей.

а) В теории термоэлектрического охлаждения и подогрева рассматривались внутренние энергетические процессы, происходящие в термопаре. Это позволило выяснить целый ряд важных теоретических зависимостей и наметить пути улучшения термоэлектрических характеристик полупроводниковых материалов. Однако, тепловые и энергетические характеристики термобатарей, построенные по полученным формулам, во многих случаях не совпадали с опытными, т. к. существующая теория не учитывала того, что температуры спаев термопар  $T$  и  $T_0$  зависят от силы тока  $I$ , проходящего через термоэлементы. Вид этой зависимости, находится в прямой связи с условиями теплообмена термопар с окружающими средами.

Необходимо было определить влияние зависимости  $(T, T_0) = f(I)$  на характеристики термобатарей.

б) Расчетные формулы недостаточно точно учитывали переходные и контактные электрические и термические сопротивления в спаях термоэлементов. В применяемых в настоящее время коротких термопарах эти сопротивления существенно влияют на характеристики термобатарей.

в) Необходимо было также выяснить влияние условий теплообмена на вес термобатарей, т. е. на расход полупроводниковых материалов.

2. Особый интерес представляло исследование новых эффективных областей применения полупроводниковых установок.

В частности, важно было исследовать применение полупроводниковых термокомпрессоров в выпарных аппаратах, которые находят широкое применение в химической промышленности (разделение растворов), холодильной технике (абсорбционные машины), пищевой промышленности (получение соков, концентратов) и др.

## ГЛАВА I.

В главе I, состоящей из трех разделов, предлагается метод расчета тепловых, температурных и энергетических характеристик полупроводниковых термобатарей и выясняется влияние условий теплообмена термопар с окружающими средами на расход полупроводниковых материалов.

а) *Влияние теплообмена на характеристики полупроводниковых термобатарей.*

Выше указывалось, что представлять расчетные формулы в зависимости от разности температур на спаях термопар  $(T - T_0)$  нецелесообразно, т. к. эти температуры зависят от силы тока.

В практике проектирования холодильных и теплонасосных установок известны в большинстве случаев температуры сред, отдающей и воспринимающей тепло ( $T_0'$  и  $T'$ ) и коэффициенты теплоотдачи ( $\alpha_0$  и  $\alpha$ ). Поэтому практическое значение имеют расчетные формулы, зависящие от этих величин.

Рассмотрение внутренних энергетических процессов, происходящих в термопаре, в сочетании с внешними условиями теплообмена позволило получить следующую формулу для холодильного коэффициента:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{(\varepsilon' + 1) \left(1 + \frac{ei}{2\alpha_0}\right) + \frac{\lambda}{2l\alpha_0}}{\varepsilon' \left(1 - \frac{ei}{2\alpha}\right) - \frac{\lambda}{2l\alpha}} - 1, \dots \dots \dots (1)$$

где

$$\varepsilon' = \frac{eT_0i - \frac{1}{2}\rho li^2 - \frac{\lambda}{l}(T' - T_0)}{\rho li^2 + ei(T' - T_0)} \dots \dots \dots (2)$$

Здесь обозначено:  $l$  — длина термопары,  $i$  — плотность тока, проходящего через термопару.

Зная выражение для  $\varepsilon$ , легко найти из известного соотношения  $\varphi = \varepsilon + 1$  значение теплового коэффициента  $\varphi$ . Следует отметить, что при  $\alpha_0 \rightarrow \infty$  и  $\alpha \rightarrow \infty$  формула для  $\varepsilon$  совпадает с соответственной формулой теории термоэлектрического охлаждения и подогрева. В этом случае  $\varepsilon \rightarrow \varepsilon'$ .

Расчеты и опыт показывают, что для обеспечения величин  $\varepsilon$ , достаточно близких к  $\varepsilon'$  необходимы высокие значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и  $\alpha_0$ . Например, для термопары, длиной 1 см, работающей в температурных условиях домашнего холодильного шкафа, величины  $\alpha$  и  $\alpha_0$  должны измеряться тысячами  $\text{ккал/м}^2\text{час}^\circ\text{С}$ . Такие значения коэффициентов теплоотдачи в условиях естественной конвекции можно обеспечить только путем интенсивного оребрения спаев термопар. В экспериментальных полупроводниковых шкафах коэффициент оребрения достигал весьма больших величин (400—600).

Особенно трудны условия теплообмена на горячих спаях. С увеличением длины термопары уменьшаются плотности тепловых потоков и условия теплообмена облегчаются. При постоянных  $\alpha$  и  $\alpha_0$  увеличение длины термопары, работающей в холодильной установке, приводит к увеличению холодильного коэффициента.

При расчетах нужно учитывать, что в условиях естественной конвекции можно пренебречь влиянием тепловых потоков на коэффициенты теплоотдачи, а при кипении и конденсации эти зависимости легко определяются по известным формулам.

При малых плотностях тока и интенсивном теплообмене величинами  $\frac{ei}{2\alpha}$  и  $\frac{ei}{2\alpha_0}$  можно пренебречь. Тогда формула (1) упрощается. В этом случае оптимальная плотность тока, соответствующая  $\varepsilon_{max}$ , определяется уравнением:

$$i_{opt} = \frac{e(T' - T'_0)}{\left(\sqrt{1 + \frac{T' + T'_0}{2}z} - 1\right)\rho l}, \dots (3)$$

а максимальное значение холодильного коэффициента— уравнением:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon'_{max} - \frac{\lambda}{2la}}{1 + \frac{\lambda}{2l}\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_0}\right)}, \dots (4)$$

где:

$$\varepsilon'_{max} = \frac{T'_0}{T' - T'_0} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{T' + T'_0}{2}z} - \frac{T'}{T'_0}}{\sqrt{1 + \frac{T' + T'_0}{2}z} + 1} \dots (5)$$

В формулах (3), (4) и (5)  $z$  — известная характеристика полупроводниковых материалов.

Выведены также расчетные формулы для холодопроизводительности и теплопроизводительности термопары —  $q_0$  и  $q$ , формула для оптимальной плотности тока, соответствующей  $q_{0max}$ .

В частном случае расчета термоэлектрической выпарной установки, когда  $T' = T'_0$  экстремальное значение для  $\varepsilon$  вообще отсутствует.

Сравнение расчетных формул существующей теории с предлагаемыми в настоящей работе показывает следующее.

1. Максимальное значение холодильного коэффициента зависит не только от термоэлектрических параметров полупроводниковых материалов и температур, но и от геометрических размеров термопар и коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и  $\alpha_0$ .

2. Оптимальная плотность тока, соответствующая  $\varepsilon_{max}$ , для заданной термопары зависит не от температур спаев термопар, а от температур окружающих сред. Образование иная, обдув, оребрение—не влияют на величину оптимальной плотности тока. Расчеты показывают, что для полупроводниковых холодильных шкафов расхождение в определении  $i_{opt}$  может достигать до 20—25%, а для установок, работающих с малой разностью температур на спаях—даже в несколько раз.

3. Оптимальная плотность тока, соответствующая  $q_{0max}$ , для заданной термопары зависит не только от температуры холодного спая термопары, а является функцией следующих величин:  $i_{opt} = f[T'_0, (T' - T'_0), \alpha]$ .

4. Построение характеристик термопар существенно облегчается, т. к. разность температур между спаями и средами, необходимая для теплоотдачи, учитывается автоматически.

Основные положения предлагаемого метода расчета были проверены на опыте при исследовании термоэлектрических выпарных установок.

б) Влияние условий теплообмена на расход полупроводниковых материалов.

Показано, что при фиксированной холодопроизводительности и температурном режиме вес полупроводниковых материалов, необходимых для термобатареи, обратно пропорционален квадрату плотности теплового потока, проходящего через термоэлементы.

При одновременном увеличении коэффициентов теплоотдачи в «а» раз вес полупроводниковых материалов сокращается в «а<sup>2</sup>» раз.

Весьма перспективно с этой точки зрения является применение термоэлектрического подогрева в теплонасосных выпарных установках. В этом случае можно получить большие тепловые потоки и создать компактные установки с малой затратой полупроводниковых материалов.

В экспериментальных термоэлектрических выпарных установках, исследованных в настоящей работе, расход полупроводниковых материалов в оптимальных режимах составил 4—6  $\frac{\text{г}}{\text{ккал/час}}$  (без оребрения спаев термопар).

В опытных полупроводниковых шкафах расход материалов составлял 30—40  $\frac{2}{\text{ккал/час}}$  (при коэффициентах оребрения 400—600).

Применение оребренных термоэлементов, рассчитанных на большие плотности тока (100—200 а/см<sup>2</sup>), позволит в выпарных установках сократить расход полупроводниковых материалов до 0,1—0,01  $\frac{2}{\text{ккал/час}}$ .

в) *Влияние переходных и контактных электрических сопротивлений на характеристики термобатарей*

В этом разделе приводится вывод расчетных формул с учетом переходных и контактных электрических сопротивлений на холодных спае термопар —  $r_x$  и горячих —  $r_2$  ( $r$  — электросопротивление термопары). Можно считать, что вся теплота Джоуля, обусловленная наличием  $r_x$  и  $r_2$  выделяется в соответствующих спае. Тогда, формулы для максимального значения  $\varepsilon'$  и максимальной разности температур имеют следующий вид:

$$\varepsilon'_{max} = \frac{T'_0}{T' - T'_0} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{T' + T'_0}{2} z \xi} - \frac{T'}{T'_0}}{\sqrt{1 + \frac{T' + T'_0}{2} z \xi} + 1} - \frac{\bar{r}_x - \bar{r}_2}{1 + \bar{r}_x + \bar{r}_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{T' + T'_0}{2} z \xi} + 1} \quad (6)$$

$$(T - T_0)_{max} = \frac{1}{2} z T_0^2 \cdot \frac{1}{1 + 2\bar{r}_x} \dots \dots \dots (7)$$

где:

$$\bar{r}_x = \frac{r_x}{r}, \quad \bar{r}_2 = \frac{r_2}{r}$$

и

$$\xi = \left[ 1 + \frac{2}{T' + T'_0} (\bar{r}_x T'_0 + \bar{r}_2 T') \right] \cdot \frac{1}{(1 + \bar{r}_x + \bar{r}_2)^2} \dots \dots \dots (8)$$

Если  $r_x \rightarrow 0$  и  $r_2 \rightarrow 0$ , то формулы (6,7) совпадают с формулами существующей теории. Определены также формулы для оптимальных токов, соответствующих  $\varepsilon'_{max}$ ,  $q_{0max}$  ( $T - T_0)_{max}$ .

В часто встречающемся случае, подробно рассмотренном проф. Стилбансом Л. С., когда  $r_x = r_2 = r$  формулы (6) и (7) упрощаются и имеют такой же вид, как и в существующей теории. Только в этом случае необходимо вместо  $z$  подставлять величину  $z' = z \cdot \xi'$ , где

$$\xi' = \frac{1}{1 + 2r} \dots \dots \dots (9)$$

Анализ предлагаемых формул приводит к следующим выводам.

1. Наличие  $r_x$  и  $r_2$  существенно ухудшает энергетические характеристики термобатареи. Например, при  $z = 1,7 \cdot 10^{-3} 1/^\circ K$ ,  $T' = 308^\circ K$ ,  $T'_0 = 268^\circ K$  и  $r_x = r_2$  величина  $\bar{r}_x + \bar{r}_2 = 5\%$  приводит к уменьшению  $\varepsilon'_{max}$  на 15%, а при  $\bar{r}_x + \bar{r}_2 = 52,5\%$  величина  $\varepsilon'_{max} = 0$ .

2. Величина  $r_x$  оказывает более сильное влияние на холодильный коэффициент, чем  $r_2$ . Объясняется это тем, что теплота Джоуля, обусловленная  $r_x$ , приводит не только к увеличению мощности, потребляемой термобатареей, но и к уменьшению холодопроизводительности. Тогда как влияние  $r_2$  сказывается только на потребляемой мощности. Поэтому при изготовлении термобатареи необходимо особенно тщательно выполнять коммутацию холодных спаев.

3. Оптимальный ток в режиме  $\varepsilon'_{max}$  и в режиме  $q_{0max}$  уменьшается при увеличении  $r_x$  и  $r_2$ . В режиме  $(T - T_0)_{max}$  оптимальный ток не зависит от  $r_2$ .

4. Максимальная разность температур не зависит от переходного и контактного сопротивления на горячем спае.

ГЛАВА II.

К вопросу о практическом применении полупроводниковых термобатарей

а) *Сравнение полупроводниковых холодильных шкафов с компрессионными и абсорбционными*

Выше указывалось, что энергетические показатели крупных компрессионных холодильных установок еще намного превышают полупроводниковые. Однако, с уменьшением расчетной производительности энергетические характеристики компрессионных и абсорбционных установок ухудшаются. Это обстоятельство позволяет утверждать, что существует определенная величина производительности данных установок, ниже которой они будут уступать полупроводниковым в энергетическом отношении.

Для количественного определения зависимости холодильного коэффициента компрессионных и абсорбционных холодильных шкафов ( $\varepsilon$ ) от холодопроизводительности (т. е. от емкости шкафа —  $V$ ) нами были обработаны результаты испытаний нескольких десятков шкафов отечественного, американского и западно-германского производства и результаты обработки представлены в виде графиков. При испытании шкафов температура окружающей среды была +25°C и средняя температура внутри шкафов +6°C.

Рассмотрение графиков указывает на значительную зависимость  $\varepsilon$  от  $V$ . Например, для компрессионного шкафа

емкостью  $V = 300 \text{ л}$   $\epsilon = 1,5$ , для  $V = 150 \text{ л}$  —  $\epsilon = 1$  и для  $V = 70 \text{ л}$  холодильный коэффициент равняется всего лишь  $0,5 - 0,6$ .

Осуществлялись попытки постановки на малые холодильные шкафы компрессоров завышенной холодопроизводительности (шкаф «Саратов»,  $V = 80 \text{ л}$ ). Однако, несоответствие между холодопроизводительностями компрессора с одной стороны и испарителя и конденсатора с другой — привело к снижению холодильного коэффициента до значения  $0,3 - 0,5$ .

Холодильный коэффициент абсорбционных шкафов емкостью  $V = 40 \text{ л}$  составляет  $\epsilon = 0,2$ , а для  $V = 120 \text{ л}$  —  $\epsilon = 0,3$ .

Холодильный коэффициент полупроводниковых шкафов мало зависит от емкости шкафа и для данных температурных условий составляет  $\epsilon = 0,3 - 0,35$ .

Таким образом, сравнение показывает, что в настоящий момент полупроводниковые шкафы более экономичны, чем абсорбционные с электрообогревом, независимо от емкости шкафа. С компрессионными шкафами полупроводниковые могут конкурировать по энергетическим показателям только при емкости шкафов менее  $50 \text{ л}$ .

#### б) Термоэлектрические выпарные установки

Приводятся схемы и описание принципа действия термоэлектрических выпарных установок (см. главу III).

#### в) Абсорбционно-полупроводниковая холодильная машина

Замена электрообогрева генератора абсорбционной холодильной машины термоэлектрическим может дать значительный энергетический эффект.

Предлагается схема абсорбционно-компрессорной холодильной машины, в которой пары холодильного агента после генератора сжимаются в компрессоре и теплота конденсации используется для выпаривания раствора в генераторе. Показано, что в этом случае возможна замена компрессора полупроводниковой термобатареей. В такой абсорбционно-полупроводниковой машине разность между средней температурой в генераторе и температурой конденсации холодильного агента должна быть незначительной. Известные пары — холодильный агент — абсорбент, используемые в абсорбционных машинах непрерывного действия, не удовлетворяют этому требованию.

Однако, имеются твердые абсорбенты, которые с успехом могут быть использованы в сочетании с метиламином ( $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ). Особенно благоприятные условия у соединений:  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{CH}_3\text{NH}_2$ ,  $\text{SrCl}_2 \cdot 3\text{CH}_3\text{NH}_2$ ,  $\text{LiCl} \cdot \text{CH}_3\text{NH}_2$ . Например, разность между температурой распада  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{CH}_3\text{NH}_2$  и температурой конденсации  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  при  $P = 6 \text{ ата}$  составляет  $18^\circ\text{C}$ , а при  $P = 10 \text{ ата}$  —  $10^\circ\text{C}$ .

Холодильный коэффициент абсорбционно-полупроводниковой холодильной машины, использующей соединение  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{CH}_3\text{NH}_2$  с воздушным охлаждением абсорбера, по-

вышается против обычной, предлагаемой ранее схемы с электрообогревом генератора, от значения  $\epsilon = 0,3$  до  $\epsilon = 0,55$  ( $t_0 = -5^\circ\text{C}$ ,  $t_{cp} = +25^\circ\text{C}$ ). При этом давление в генераторе и конденсаторе снижается с  $6 \text{ ата}$  до  $2,5 \text{ ата}$ . При водяном охлаждении абсорбера холодильный коэффициент возрастает до значения  $\epsilon = 0,735$ . Давление в этом случае увеличивается до  $4 \text{ ата}$  ( $t_0 = -10^\circ\text{C}$ ,  $t_{cp} = +25^\circ\text{C}$ ).

Для соединения  $\text{SrCl}_2 \cdot 3\text{CH}_3\text{NH}_2$  при тех же температурах, что и в первом случае имеем: схема с электрообогревом —  $\epsilon = 0,3$ ,  $P = 8 \text{ ата}$ , абсорбционно-полупроводниковая с воздушным охлаждением —  $\epsilon = 0,5$ ,  $P = 3 \text{ ата}$ ; с водяным охлаждением —  $\epsilon = 0,705$ ,  $P = 5 \text{ ата}$ .

### ГЛАВА III.

#### Экспериментальное исследование термоэлектрических выпарных установок

В теплонасосных выпарных установках вторичные пары поджимают в компрессоре или эжекторе. При этом температура конденсации паров повышается и выделяющаяся теплота может быть использована в качестве греющей источника для выпаривания жидкости в испарителе. Полупроводниковую термобатарей можно также использовать для повышения температурного потенциала теплоты конденсации вторичных паров, давление которых в этом случае не меняется.

Принцип действия полупроводниковой выпарной установки прост. Выпариваемая жидкость подается на горячие спаи термобатарей и кипит, получая от них энергию. Образующийся пар конденсируется на холодных спаях, отдавая им теплоту конденсации. Теплота конденсата и продувки регенерируется с теплотой, поступающей жидкости.

Температуры горячих и холодных спаев термобатарей поддерживаются соответственно на несколько градусов выше и ниже температур кипения и конденсации, которые в общем случае (выпаривание раствора) могут быть неравны.

Разность температур на спаях термобатарей ( $T - T_0$ ) при дисциплации чистого вещества должна обеспечить только теплопередачу между конденсирующимся паром и кипящей жидкостью. Обычно, в теплонасосных выпарных установках величина ( $T - T_0$ ) находится в пределах  $5 - 25^\circ\text{C}$ .

Малая разность температур и высокий температурный уровень позволяют значительно повысить энергетическую эффективность полупроводниковой термобатарей.

Исследования термоэлектрических выпарных установок производились на двух аппаратах, предназначенных для дисциплации воды и метилового спирта. Выпарные аппараты работали под атмосферным давлением и температуры выпаривания равнялись соответственно  $100^\circ\text{C}$  и  $65^\circ\text{C}$ .

Полупроводниковые термобатареи, используемые в установках, состояли: для дисцилляции воды — из 54 термоэлементов, размером  $5 \times 10 \times 10$  мм, для перегонки метилового спирта — из 36 термоэлементов, размером  $5 \times 5 \times 5$  мм. Коммутация термоэлементов производилась медными пластинами, размером  $1 \times 10 \times 20$  мм и  $1 \times 5 \times 10$  мм. Собранные термобатареи заливались специальной смолой, которая после полимеризации обеспечивала электроизоляцию, герметичность и необходимую механическую прочность.

Электропитание термобатареи осуществлялось от сети переменного тока через секционный трансформатор, выпрямитель и электрофильтр.

Отвод паров из испарителя в конденсатор производился через медные трубки, заделанные непосредственно в термобатареи.

Для визуального наблюдения за режимом кипения в испарительном отсеке установки для дисцилляции воды было сделано смотровое окно.

Так как программа экспериментов предусматривала работу установок в различных режимах, то вместо постоянной тепловой изоляции выпарные аппараты помещались в термостат, температура в котором поддерживалась заданной с точностью  $\pm 0,25^\circ\text{C}$ .

Экспериментальное исследование термоэлектрических выпарных установок имело целью:

1. Определение тепловых, температурных и энергетических характеристик установок при различных температурах выпаривания и различных величинах накипи на горячих спаях термопар.

2. Сравнение опытных характеристик с теоретическими.

3. Определение влияния на энергетические показатели термобатарей таких факторов, как разность температур на спаях термопар, температура холодных спаев, отклонение силы тока от оптимального значения.

4. Сравнение полученных данных с показателями существующих теплонасосных выпарных установок.

5. Разработка на основе теоретических формул, предложенных в настоящей работе, и полученных опытных данных методики расчета термоэлектрических выпарных аппаратов.

Тепловые и температурные характеристики термоэлектрической выпарной установки, предназначенной для дисцилляции воды, представлены на рис. 1 и рис. 2, а энергетические характеристики — на рис. 3.

Рассмотрение графиков показывает, что температура горячих спаев термобатареи в большой мере зависит от нагрузки и величины накипи, характеризуемой термическим сопротивлением  $\frac{\delta}{\lambda}$ .

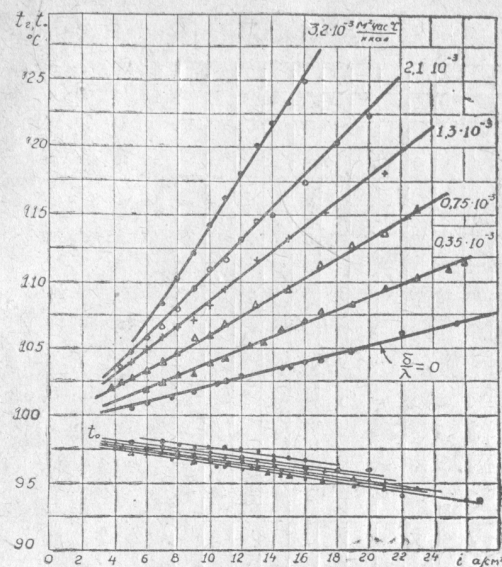


Рис. 1. Температурные характеристики установки опытной установки

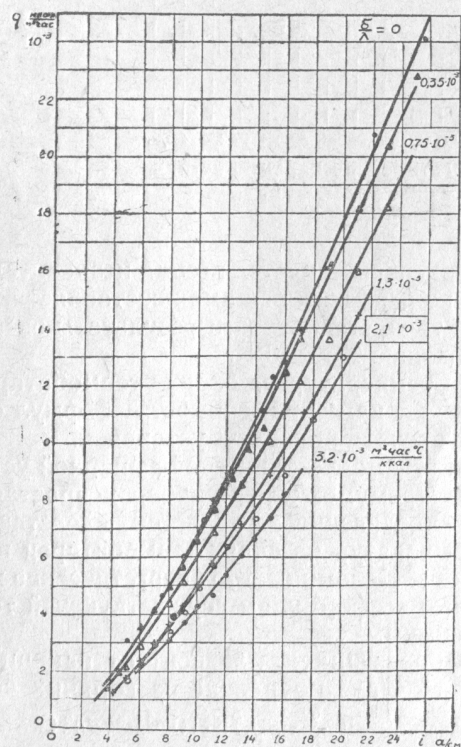


Рис. 2. Теплопроизводительность опытной установки в зависимости от нагрузки и накипи.

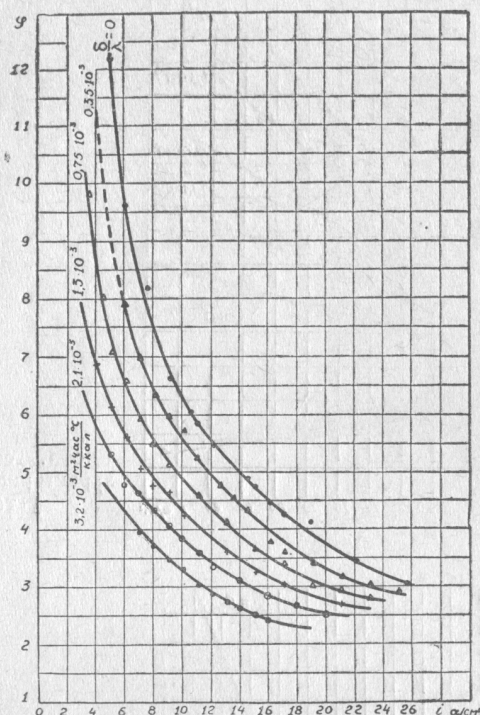


Рис. 3. Энергетические характеристики опытной установки.

Температура холодных спаев меняется весьма незначительно. Наибольшее изменение  $t_0$  во всех режимах составляет  $4^\circ\text{C}$ , что позволяет с хорошей точностью отнести результаты экспериментов к среднему значению  $T_0 = 370^\circ\text{K}$ .

Зависимость разности температур на спаях термопар от плотности тока указывает на неприменимость формул существующей теории для расчета подобных установок.

Тепловой коэффициент термоэлектрической выпарной установки изменяется без экстремумов и перегибов, возрастая с уменьшением нагрузки. Увеличение  $\varphi$  является следствием уменьшения разности температур на спаях термопар при уменьшении плотности тока. Напомним, что энергетические характеристики, построенные по формулам существующей теории, должны иметь максимум.

Величина теплового коэффициента зависит от накипи на горячих спаях. При  $i = 16 \text{ a/cm}^2$  появление на горячих спаях термического сопротивления  $\frac{\delta}{\lambda} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2\text{час}^\circ\text{C/ккал}$

приводит к уменьшению  $\varphi$  на 22% (по сравнению с чистой поверхностью).

Относительное влияние термического сопротивления возрастает с уменьшением нагрузки.

При  $i = 7 \text{ a/cm}^2$  увеличение  $\frac{\delta}{\lambda}$  от 0 до  $0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2\text{час}^\circ\text{C/ккал}$  снижает  $\varphi$  на 30%.

Исследование термоэлектрической выпарной установки, работающей на метиловом спирте, позволило определить зависимость энергетических показателей установок от температуры выпаривания. Понижение температуры выпаривания от значения  $t = 100^\circ\text{C}$  до  $t = 65^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению теплового коэффициента во всех режимах примерно на 15%.

Так как энергетические характеристики  $\varphi = f(i)$  не имеют экстремума, то оптимальный режим работы установки можно выбрать только на основании технико-экономического анализа.

Проведенные примерные расчеты показали, что при отсутствии накипи оптимальный тепловой коэффициент установки для дисцилляции воды составляет  $\varphi_{opt} = 6,8$ . При этом  $q = 6000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$ ,  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$  и  $i = 9 \text{ a/cm}^2$ .

Образование накипи с термическим сопротивлением  $\frac{\delta}{\lambda} = 0,75 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2\text{час}^\circ\text{C}}{\text{ккал}}$  ведет к уменьшению оптимального значения теплового коэффициента до  $\varphi_{opt} = 4,9$ . В этом случае  $q = 6200 \text{ ккал/м}^2\text{час}$ ,  $\Delta t = 11^\circ\text{C}$  и  $i = 10,2 \text{ a/cm}^2$ .

Необходимо подчеркнуть, что в опытных установках спай термоэлементов не оребрялись. Оребрение позволит при тех же энергетических показателях значительно увеличить плотности тепловых потоков.

Энергетические характеристики термоэлектрической выпарной установки, построенные по формулам, предложенным в настоящей работе, хорошо совпадают с характеристиками экспериментальных установок (см. рис. 4). Среднее отклонение расчетной характеристики от экспериментальной составляет 3—4%. Наибольшие расхождения наблюдаются при минимальной плотности тока и не превышают 8%. При построении расчетных характеристик зависимость коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и  $\alpha_0$  от теплового потока определялась опытным путем на этой же установке.

Полученное большое поле точек тепловых коэффициентов позволило построить ряд изотермических характеристик и проверить основные положения существующей теории термоэлектрического охлаждения и подогрева (см. рис. 5).

Изотермические энергетические характеристики имеют максимум.

С уменьшением разности температур на спаях термопар увеличиваются значения  $\varphi_{max}$ . При этом устойчивость изо-

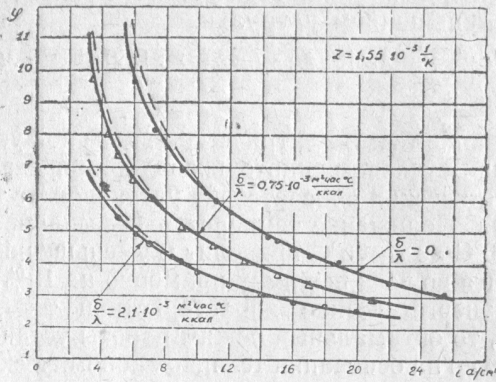


Рис. 4. Расчетные и опытные зависимости  $\varphi = f(i)$

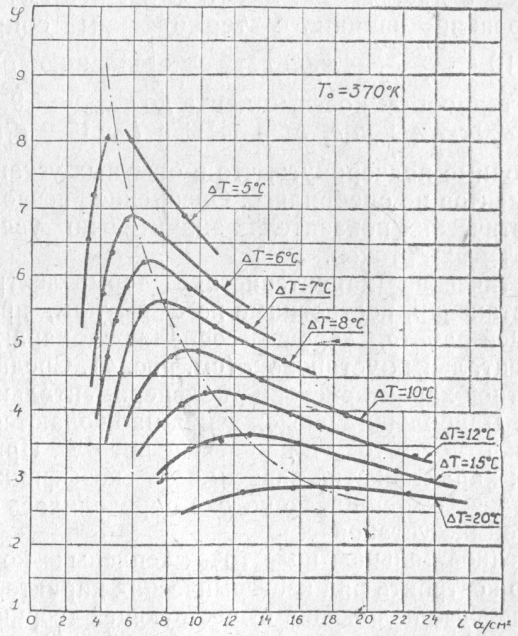


Рис. 5. Энергетические характеристики при постоянной разности температур на спаях термопары.

термической характеристики в окрестности экстремума уменьшается.

Особенно резкое падение теплового коэффициента наблюдается при отклонении от оптимальной плотности тока в сторону меньших значений. Например, при  $\Delta t = 6^\circ\text{C}$  отклонение от  $i_{opt} = 5,9 \text{ a/cm}^2$  до значения  $i = 3,5 \text{ a/cm}^2$ , т. е. на 40,6% приводит к уменьшению  $\varphi$  на 34% (от  $\varphi_{max} = 6,8$  до  $\varphi = 4,5$ ), тогда как отклонение в сторону большей плотности тока на те же 40,6% до ( $i = 8,3 \text{ a/cm}^2$ ) приводит к уменьшению  $\varphi$  только на 4,4% ( $\varphi = 6,5$ ).

С увеличением разности температур  $\varphi_{max}$  уменьшается и область максимального значения теплового коэффициента становится расплывчатой. При  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$  даже весьма большие отклонения плотности тока от  $i_{opt}$  практически не влияют на величину теплового коэффициента.

В работе исследовалась также зависимость холодопроизводительности термопары  $-q_0$  от плотности тока и накали на горячих спаях.

Изотермические характеристики  $\varphi = f(i)$  в совокупности с тепловыми характеристиками  $q_0 = f(i)$  позволяют определить среднее значение термоэлектрических параметров полупроводниковой термопары ( $e, \rho, \lambda$ ).

Суммарная характеристика термопары оказалась равной  $z = 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{K}}$  (с учетом контактных электрических и термических соприкосновений).

На рис. 6 приведены экспериментальные и расчетные зависимости  $\varphi_{max} = f(\Delta t)$  для установок, работающих на воде и метиловом спирте. Пунктиром показана кривая, построение которой производилось по формулам теории термоэлектрического охлаждения и подогрева.

Максимальные значения теплового коэффициента и оптимальной плотности тока хорошо совпадают с теоретическими. При  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$   $\varphi_{max} = 8$ , при  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$   $\varphi_{max} = 5$  и при  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$   $\varphi_{max} = 2,8$  (см. фиг. 6).

Наибольшее расхождение между расчетной и опытной характеристиками не превышает 10%.

Понижение температуры холодных спаев от  $T_0 = 370^\circ\text{K}$  до  $T_0 = 336^\circ\text{K}$  приводит к уменьшению  $\varphi_{max}$  в среднем на 15—20%.

Степень термодинамической эффективности термоэлектрической выпарной установки, под которой понималось отношение полученного теплового коэффициента к теплому коэффициенту цикла Карно при тех же температурах, менялась в пределах 10—15% в зависимости от разности температур на спаях термопары и температуры выпаривания.

В условиях проведения эксперимента, когда  $T_0$  оставалась почти постоянной, оптимальная плотность тока, соответ-

ствующая  $\varphi_{\max}$  на изотермических характеристиках для данной термопары, должна быть пропорциональна величине  $(T - T_0)$ .

Опытные данные, приведенные в таблице 1, подтверждают это. Расхождения наблюдаются только при больших разностях температур.

Таблица 1

$\Delta T^{\circ}\text{C}$	6	7	8	10	12	15	20
$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_{6^{\circ}\text{C}}}$	1	1,17	1,33	1,67	2	2,5	3,33
$\frac{i_{\text{онм}}^x}{i_{\text{онм}}^{6^{\circ}\text{C}}}$	1	1,17	1,31	1,61	1,91	2,2	2,9

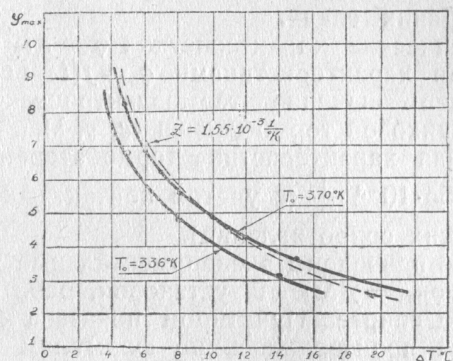


Рис. 6. Расчетные и опытные зависимости  $\varphi_{\max} = f(\Delta T)$ .

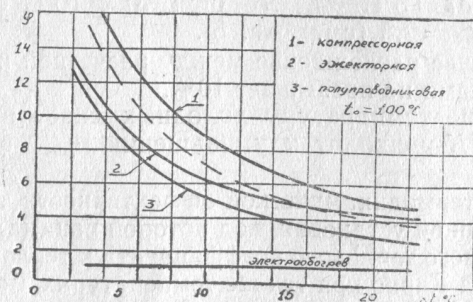


Рис. 7. Сравнение теплонасосных выпарных установок.

На основании теоретических формул, предложенных в настоящей работе, и опытных данных разработана методика расчета термоэлектрических выпарных установок.

Сравнение термоэлектрических выпарных установок с существующими компрессорными и эжекторными показало (рис. 7), что энергетические показатели термоэлектрических установок еще уступают компрессорным и эжекторным. Например, при температуре выпаривания  $t = 100^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$  тепловой коэффициент компрессорной выпарной установки составляет  $\varphi_k = 11$ , а для термоэлектрической  $-\varphi_{\text{онм}} = 7$ . Для  $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$  имеем соответственно:  $\varphi = 5$  и  $\varphi_{\text{онм}} = 3$ .

Тепловой коэффициент эжекторной установки  $-\varphi_{\text{эж}}$  не намного превышает  $\varphi_{\text{онм}}$ . При  $t = 100^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta t = 7^{\circ}\text{C}$  имеем:  $\varphi_{\text{эж}} = 8$  и  $\varphi_{\text{онм}} = 7$ .

С увеличением разности температур расхождение увеличивается. Если  $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$ , то  $\varphi_{\text{эж}} = 4,2$  и  $\varphi_{\text{онм}} = 3$ .

Увеличение температуры выпаривания приводит к более резкому возрастанию теплового коэффициента термоэлектрической выпарной установки, чем компрессорной и эжекторной.

По сравнению с существующими электродисцилляторами полупроводниковая установка дает экономию электроэнергии в 5—7 раз, сохраняя при этом все преимущества электрообогрева.

Можно надеяться, что полупроводниковые выпарные установки в ближайшем будущем найдут широкое применение в холодильной, химической, пищевой и др. отраслях промышленности.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ СТАТЬЯХ:

1. Наер В. А. «Термоэлектрические тепловые насосы», Труды 1-ой межвузовской конференции по современной технике диэлектриков и полупроводников (июнь 1956 г.), Изд. МВО СССР, 1957 г.

2. Наер В. А. «К определению геометрических размеров и веса полупроводниковых термобатарей в термоэлектрических холодильниках и тепловых насосах». Научно-техническая конференция молодых ученых Украины (тезисы докладов). Изд. АН УССР, 1957 г.

3. Г. Вихорев и В. Наер. «Влияние теплоотдачи на характеристики полупроводниковых термобатарей для холодильников и тепловых насосов». Физика твердого тела, т. I, вып. 6, 1959 г.

4. Наер В. А. «Экспериментальное исследование термоэлектрической выпарной установки». Физика твердого тела, т. I, вып. 8, 1959 г.

5. Мартыновский В. С. и Наер В. А. «The energetics characteristics of electro-thermal cooling». Доклад от СССР на 10-ом Международном Конгрессе по холодильной технике, 1959 г.

6. Наер В. А. «Термоэлектрические тепловые насосы для выпарных аппаратов и абсорбционных холодильных машин». Труды ОТИПХП, т. VIII, вып. 2, 1959 г.