М. Н. ИВАНОВСКИЙ
В. П. СОРОКИН
Б. А. ЧУЛКОВ
И. В. ЯГОДКИН

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ



МОСКВА АТОМИЗДАТ 1980

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных обозначений, индексов и сокращений 3

Предисловие 4

Глава 1 **Выбор теплоносителей и конструкционных материалов** . . 6
§ 1 1 Критерии выбора теплоносителя 6
§ 1 2 Теплофизические основы выбора теплоносителя 8
§ 1 3 Коррозионные ограничения при выборе теплоносителя и конструкционных материалов тепловой трубы 14

Глава 2 **Конструкция тепловых труб** 21
§ 2 1 Выбор типа капиллярной структуры 21
§ 2 2 Методы определения капиллярных характеристик 32
§ 2 3 Конструкционные формы и методы изготовления тепловых труб 37

Глава 3 **Заполнение тепловых труб теплоносителями** 44
§ 3 1 Очистка жидкометаллических теплоносителей 44
§ 3 2 Очистка конструкционных материалов 60
§ 3 3 Заполнение тепловых труб теплоносителями 62

Глава 4 **Методы экспериментальных исследований Характеристики тепловых труб** 72
§ 4 1 Методы подвода и отвода тепла 72
§ 4 2 Высокотемпературные тепловые трубы 76
§ 4 3 Тепловые трубы с корпусом из тугоплавких материалов 90
§ 4 4 Низкотемпературные и криогенные тепловые трубы 100
§ 4 5 Среднетемпературные тепловые трубы 117

Глава 5 **Особые типы тепловых труб** 119
§ 5 1 Тепловые трубы переменной проводимости 119
§ 5 2 Многокомпонентные тепловые трубы 134
§ 5 3 Гравитационные капиллярные тепловые трубы 142

Список литературы 146

6П2 2
Т38
УДК 669.536.422

Технологические основы тепловых труб/Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Чулков Б. А., Ягодкин И. В. — М.: Атомиздат, 1980. — 160 с.
Т38

На основе анализа и систематизации обширного литературного материала, а также результатов многолетних исследований авторов изложены технологические основы создания весьма эффективных тепловодов — тепловых труб. Рассмотрены вопросы выбора теплоносителей, капиллярных структур и конструкционных материалов для этих устройств. Описаны методы изготовления тепловых труб и проведения экспериментов с ними. Представлены примеры достигнутых характеристик для труб в различных диапазонах температур. Рассмотрены основные проблемы, возникающие при создании и работе тепловых труб. Является логическим продолжением вышедшей в 1978 г. в Атомиздате книги «Физические основы тепловых труб».

Для работников конструкторских и научно-исследовательских организаций, а также для преподавателей, аспиранов и студентов технических вузов.

Рис. 67. Табл. 24. Список литературы 253 наименования.

6П2.2

Heat Pipe Technological Fundamentals / Ivanovsky M. N., Sorokin V. P., Tchulkov B. A., Yagodkin I. V. — M.: Atomizdat, 1980. — 160 p.

On the basis of the authors investigations the analysis and the systematization of referencies, the technological problems to make the heat pipes are stated.

In the Chapter 1, the choice of the heat carries and materials for the heat pipes is considered. In the Chapter 2, these design structures and their fabrication methods are described, the choice of the wicks is considered. In the Chapter 3 the heat carry and structural material purification, the heat pipe filling by coolants are presented. In the Chapter 4 the experiment realization methods are given, the achieved performances are presented and the problems arised when creating and functioning of heat pipes at the different temperature ranges are considered. The Chapter 5 describes the special types of heat pipes. In the Chapter 6 the heat pipe employment fields are considered. In the appendix the heat pipe patent referencies are given.

This book is intended for the scientists and the engineers from the different engineering fields where can be used the heat pipes. It is logical continuation of the published in 1978 book by the same authors «Heat Pipe Physical Fundamentals».

Figures 67. Tables 24. Referencies 253.

Т $\frac{30315-035}{034(01)-80}$ 35—80·2304000000

© Атомиздат, 1980

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ И СОКРАЩЕНИЙ

ОБОЗНАЧЕНИЯ

ρ — плотность
P — давление
Q — переносимая мощность
T — температура
l — длина трубы или ее участка
d — диаметр трубы
h — высота подъема одного конца трубы над другим
k — проницаемость пористого материала
S — площадь поперечного сечения канала
g — ускорение свободного падения
ν — кинематическая вязкость
r — скрытая теплота парообразования
R — термическое сопротивление
G — масса, массовый расход пара
V — объем
X — мольная концентрация
x — координата вдоль оси трубы
L — массовый расход жидкости
F — площадь поверхности
C или c — растворимость примесного элемента

ИНДЕКСЫ

исп — испарение
конд — конденсация
внеш — внешний
внутр — внутренний
диф — диффузионный
п — паровой
ж — жидкостный
г — газовый
охл — охлаждающая среда
эф — эффективный
пр — предельный
обр — обратный
макс — максимальный
кап — капиллярный
об — объемный

СОКРАЩЕНИЯ

ТТ — тепловая труба
ВТТ — высокотемпературные трубы
ТВТТ — высокотемпературные тепловые трубы из тугоплавких материалов
СТТ — среднетемпературные тепловые трубы
НТТ — низкотемпературные тепловые трубы
КТТ — криогенные тепловые трубы
ППТТ — тепловые трубы переменной проводимости
ОСТТ — трубы переменной проводимости, использующие обратную связь
ГРТТ — газорегулируемые тепловые трубы
ПРТТ — тепловые трубы с регулированием по пару
ЖРТТ — тепловые трубы с регулированием по жидкости
ЭРТТ — тепловые трубы с электрическим регулированием
ПМТТ — тепловая труба с модулируемым тепловым потоком
НКК — низкокипящая компонента смеси
ВКК — высококипящая компонента смеси

ПРЕДИСЛОВИЕ

Использование тепловых труб в различных областях техники: энергетике, космической технике, радиоэлектронике, химической технологии и медицине — дает возможность создавать принципиально новые, высокоэффективные аппараты и установки либо значительно усовершенствовать уже существующие. Применение тепловых труб в технике в последние годы приобретает широкий размах как в нашей стране, так и в зарубежных технически развитых странах. В нашей стране широкий круг специалистов заинтересован в ознакомлении с технологическими основами создания тепловых труб. Хотя в настоящее время имеется довольно обширная литература по тепловым трубам, однако в значительной своей части она составляет статьи, отчеты, доклады зарубежных исследователей, малодоступные для широкого круга читателей. Большой объем информации содержится в трудах трех международных конференций по тепловым трубам, состоявшихся в 1973 г. в Штутгарте (ФРГ), в 1976 г. — в Болонье (Италия) и в 1978 г. — в Пало-Альто (США). Для удобства использования имеющегося литературного материала необходимы его систематизация и анализ. Немногочисленные книги по тепловым трубам [1—5] не решают в полной мере задачу по изложению технологических основ тепловых труб.

Данная книга является логическим продолжением изданной Атомиздатом в 1978 г. монографии «Физические основы тепловых труб» [6] и неразрывно с ней связана, так как классификация тепловых труб и многие основные понятия даны в названной выше книге. «Технологические основы тепловых труб» включают рассмотрение многих технологических и инженерных аспектов создания тепловых труб, однако в интересах стройности и необходимой целостности изложения в ней определенное место занимают и отдельные физические вопросы. Авторы сочли целесообразным привести также конкретные примеры разработанных конструкций и достигнутых характеристик тепловых труб различных температурных уровней, показать проблемы, которые возникают при создании этих устройств и их использовании. Проблемы эти разнообразны и, как правило, существенно различны для тепловых труб, предназначенных для работы в различных диапазонах температуры, например: для высокотемпературных тепловых труб

при температуре выше 1000° С достижение длительного ресурса работы при высоком теплопереносе требует решения проблемы тщательной очистки металла — теплоносителя и конструкционных материалов от коррозионно-активных примесей, предотвращения интенсивного переноса массы жидким металлом; для низкотемпературных водяных тепловых труб, изготовленных из нержавеющей стали типа 1Х18Н9Т, проблемой является выделение в паровую область трубы газообразного водорода, появляющегося в результате взаимодействия воды с нержавеющей сталью; для криогенных тепловых труб с простыми фитилями велико влияние сил гравитации на циркуляцию теплоносителя и соответственно на характеристики труб; для тепловых труб с составными фитилями, особенно для газонаполненных, необходимо обеспечить надежное заполнение фитилей жидкостью и принять меры для удаления или подавления паровых и парогазовых пузырей.

В последние годы все большее применение находят тепловые трубы переменной проводимости и, прежде всего, газорегулируемые тепловые трубы. Они привлекают специалистов своей конструкционной простотой и эффективностью при решении задач терморегулирования и термостатирования. В книге таким тепловым трубам уделено значительное внимание. Рассмотрены также тепловые трубы с многокомпонентными теплоносителями, использование которых в ряде случаев может быть весьма эффективным, так как дает возможность понизить температуры плавления теплоносителей. Дан анализ по тепловым трубам, имеющим капиллярную структуру и использующим кроме капиллярных сил и силы гравитации. Отметим, что высокотемпературным тепловым трубам в книге уделяется особенно большое внимание. Это объясняется тем, что по низкотемпературным тепловым трубам необходимую информацию, помимо нашей книги, читатель может получить из отечественных книг [2—4].

В книге приведена обширная библиография, в том числе зарубежная. При изложении материала наряду с литературой последних лет авторы используют результаты исследований тепловых труб, которые проводились ими в ордена Трудового Красного Знамени Физико-энергетическом институте Государственного Комитета по использованию атомной энергии СССР.

Параграф 1.3 написан В. А. Ивановым. Авторы благодарят Н. П. Колмогорову, Л. М. Кузнецову и Л. М. Пророк за помощь в оформлении рукописи.

Авторы будут признательны читателям за отзывы и замечания по книге.

Глава 1

ВЫБОР ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выбор теплоносителей, конструкционных материалов и в конечном счете всей конструкции тепловых труб — вопрос комплексный, где все должно быть подчинено решению задач, связанных с применением тепловых труб в том или ином устройстве. Прежде всего следует учитывать следующие моменты: 1) уровень рабочих температур; 2) максимальные подводимые тепловые потоки; 3) удельные тепловые потоки; 4) перепады температуры; 5) геометрические размеры; 6) положение в гравитационном поле и наличие центробежных, электромагнитных и других сил; 7) наличие ударов и вибраций; 8) условия пуска; 9) ресурс и надежность работы; 10) трудоемкость и воспроизводимость характеристик при изготовлении; 11) стоимость.

§ 1.1. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В качестве теплоносителей в тепловых трубах в принципе применимы любые химические вещества и соединения, имеющие при выбранных рабочих температурах жидкую и паровую фазы. Однако количество практически применяемых жидкостей сильно уменьшается из-за различных ограничений. Можно выделить следующие условия и требования, которым должны удовлетворять теплоносители.

1. Обеспечение передачи большого количества тепла в осевом направлении во многих случаях является главным требованием, которому должна удовлетворять труба. Для этого теплоноситель должен: хорошо смачивать капиллярную структуру фитиля, обладать высокой теплотой парообразования, иметь большой коэффициент поверхностного натяжения, достаточно высокую плотность пара при рабочих температурах и невысокую вязкость, особенно в жидком состоянии.

Критические параметры жидкости должны быть значительно выше рабочих, так как с увеличением температуры поверхностное натяжение и теплота парообразования уменьшаются и становятся равными нулю в критической точке.

2. Давление насыщенных паров теплоносителя при рабочей температуре должно быть достаточно высоким, чтобы обеспечить большой перенос тепла и малый перепад температуры по длине. Как правило, тепловые трубы начинают переносить значительные

количества тепла и становятся почти изотермичными при давлении паров выше 10^4 Па. Перепад температуры в паровой области при повышении давления уменьшается. Верхний предел давления пара определяется прочностью материала корпуса тепловой трубы.

3. Температура плавления должна быть по возможности низкой. Для КТТ появляется опасность замерзания теплоносителя, если температура плавления близка к рабочему диапазону температур. Для ВТТ и особенно ТВТТ важно, чтобы давление пара при температуре плавления не было высоким. Это упрощает пуск, помогая исключить трудности, связанные с сублимацией теплоносителя в зоне нагрева. (Высокое давление пара обусловливает высокую скорость переноса теплоносителя из зоны испарения в зону конденсации и сублимации его.)

4. Теплоноситель, как правило, должен иметь высокую чистоту, так как загрязнения могут снизить поверхностное натяжение, смачиваемость и увеличить коррозионные свойства теплоносителя. Накапливаясь в зоне испарения в концентрациях, превышающих предел растворимости, примеси способны выкристаллизовываться и закупоривать капилляры. Вред наличия примесей иллюстрируют неудачные попытки вывести на номинальный режим работы тепловую трубу со свинцовым теплоносителем [1]. Свинец при этих экспериментах был загружен в тепловую трубу с примесями кислорода. Это крайне отрицательно сказалось на работоспособности трубы. Следует, однако, заметить, что некоторые примеси, наоборот, благоприятно сказываются на работе тепловой трубы. Так, в опытах с тепловой трубой, изготовленной из тантала, со свинцом в качестве теплоносителя труба не работала в горизонтальном положении до тех пор, пока не было добавлено малое количество кремния, который улучшил смачиваемость тантала свинцом [2]. Иногда металлические примеси используются для геттерной (химической) очистки теплоносителя в процессе работы тепловой трубы. Например, в литий для улавливания из него кислорода в зоне нагрева добавляют небольшие количества кальция, иттрия и скандия [3].

5. Теплоноситель должен быть в коррозионном отношении совместим с материалами стенки тепловой трубы и фитиля во всем диапазоне температур.

6. Для теплоносителей, молекулы которых состоят из нескольких атомов, может возникать требование достаточной термической стойкости и стойкости в условиях ионизирующего излучения. Под воздействием нагрева или ионизирующего излучения такие теплоносители могут разлагаться на газообразные или твердые продукты. В первом случае вследствие появления газов возникает неизотермическая зона в тепловой трубе, во втором возможна закупорка фитиля продуктами разложения и, следовательно, выход тепловой трубы из строя. На одноатомные инертные газы и металлы ионизирующее излучение почти не оказывает влияния. Относительно небольшому воздействию подвержены двухатомные газы.

Особенно велико ионизирующее, а также термическое воздействие на сложные многоатомные соединения.

7. Наряду с другими свойствами при выборе теплоносителя приходится учитывать взрывоопасность и токсичность веществ. Хотя количество теплоносителя в тепловых трубах обычно мало, безопасность работы с ним имеет не последнее значение при изготовлении тепловых труб, их испытаниях и использовании.

8. Для применения тепловых труб в активной зоне реактора важно, чтобы теплоноситель имел малое сечение захвата нейтронов.

Рассмотрим далее более детально сначала теплофизические, а затем и материаловедческие основы выбора теплоносителей.

§ 1.2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Для оценки возможностей теплоносителя по теплопереносу в тепловых трубах в работе [4] предложено использовать комплексы, названные *коэффициентами переноса жидкости и пара* и равные соответственно

$$N_Q^{ж} = \sigma_{ж} r/\nu_{ж}; \quad N_Q^{п} = \sigma_{ж} r/\nu_{п}. \tag{1.1}$$

Коэффициент переноса жидкости имеет максимум при определенной температуре для каждой жидкости и падает до нуля в критической точке. Характер зависимости коэффициента переноса пара от температуры качественно аналогичен, однако максимум располагается при иной температуре. Выбирая теплоноситель для заданного интервала температур, нужно стремиться к тому, чтобы теплоноситель имел наибольшие значения $N_Q^{п}$ и $N_Q^{ж}$. Максимум теплопереноса для тепловых труб располагается в интервале температур между максимумами $N_Q^{п}$ и $N_Q^{ж}$. Положение его зависит от геометрических размеров трубы, характеристик капиллярного устройства, от ориентировки в поле массовых сил. $N_{п}$ и $N_{ж}$ при оценке положения максимума должны входить со своим статистическим весом, пропорциональным изменению давления в паре и в жидкости, которые будут компенсироваться капиллярным напором. На соотношение этих давлений влияет местоположение «мокрой» точки.

На рис. 1.1 представлены изменения коэффициентов переноса пара и жидкости для некоторых веществ в зависимости от температуры.

Как показано в работе [5], для коротких * тепловых труб, работающих при больших числах Рейнольдса ($\mathrm{Re} \gg 1$) и имеющих капиллярную структуру в виде составного фитиля с кольцевым зазором, учет теплофизических свойств теплоносителя сводится к величине, которая названа *фактором качества* и определяется как

$$\Phi = [\sigma^3 r^5 \rho_{п}^2/\nu_{ж}]^{0,2}. \tag{1.2}$$

---

* Коротких в гидродинамическом смысле

Отметим, что такой тип капиллярной структуры наиболее применим для металлических теплоносителей. На рис. 1.2 представлено значение Ф для некоторых металлов.

Задержку вскипания можно охарактеризовать комплексом

$$N_{\text{кип}} = \sigma\lambda_{\text{ж}}T_{\text{п}}/(r\rho_{\text{п}}). \qquad (1.3)$$

На рис. 1.3 приведено значение этого комплекса для некоторых теплоносителей.

Влияние гравитационных сил можно охарактеризовать отношением

$$N_{\text{гр}} = \sigma/\rho_{\text{ж}}. \qquad (1.4)$$

Значение этого отношения пропорционально высоте капиллярного поднятия жидкости при наличии сил гравитации. $N_{\text{гр}}$ для разных теплоносителей дан на рис. 1.4 в зависимости от температуры.

Рассмотрим вкратце характеристики различных теплоносителей. Каждый теплоноситель способен эффективно переносить тепло лишь в ограниченном интервале температур (табл. 1.1). Для различных температурных уровней имеющиеся теплоносители сильно различаются своими способностями осуществлять перенос тепла.

В целом следует отметить, что по мере понижения уровня температуры и соответственно использовании подходящих для этого уровня теплоносителей наблюдается ухудшение теплофизических свойств (уменьшение r, σ, λ, увеличение $\mu_{\text{ж}}$). Это влечет за собой

Таблица 1.1

Ориентировочный диапазон рабочих температур для теплоносителей тепловых труб

Теплоноситель	Температура, °С		Теплоноситель	Температура, °С	
	нижняя	верхняя		нижняя	верхняя
КТТ			**СТТ**		
Гелий	—	—	Даутерм-А	150	320
Кислород	—	—	Ртуть	200	500
Азот	—205	—170	Сера	200	600
Метан	—180	—120	**ВТТ**		
Этан	—150	—30			
Фреон-13	—120	—20	Цезий	350	700
Фреон-23	—120	—20	Калий	400	800
Фреон-22	—90	40	Натрий	600	1000
НТТ			**ТВТТ**		
Аммиак	—60	60	Литий	1000	1700
Фреон-21	—50	90	Кальций	1100	1800
Ацетон	—20	100	Барий	1200	1650
Этанол	20	120	Свинец	1350	1900
Гептан	30	160	Индий	1500	2100
Вода	40	180	Серебро	1600	2400

в первую очередь ухудшение такой важной характеристики, как максимальная переносимая мощность, обусловленная капиллярными ограничениями. Из-за понижения теплопроводности увеличиваются термические сопротивления фитилей, облегчается вскипание жидкостей, увеличивается относительное влияние сил гравитации.

Теплоносители низкотемпературных и криогенных тепловых труб. В области низких температур теплоносители обладают сравнительно плохими теплопередающими свойствами. Теплота парообразования и коэффициент поверхностного натяжения для них малы, а вязкость жидкости велика. Тем не менее и криогенные тепловые трубы весьма эффективны по сравнению, например, с медными тепловодами. Из табл. 1.2 видно ухудшение характеристик теплоносителей по мере понижения рабочих температур. Проводится сравнение теплоносителей с водой при давлении пара 10^5 Па. Если не удалять теплоноситель из корпуса при использовании криогенных жидкостей в тепловых трубах при комнатных

Таблица 1.2

Сравнение характеристик некоторых теплоносителей с характеристиками воды

Теплоноситель	Температура кипения, °С	$\frac{(N_Q^{ж})_{H_2O}}{(N_Q^{ж})_{тепл}}$	$\frac{(N_{вск})_{H_2O}}{(N_{вск})_{тепл}}$	$\frac{(N_{гр})_{H_2O}}{(N_{гр})_{тепл}}$	$\frac{(\lambda_{ж})_{H_2O}}{(\lambda_{ж})_{тепл}}$
Азот	—196,0	56,0	160,0	5,6	7,2
Фреон-22	—89,0	16,0	22,0	2,1	4,2
Этан	—41,0	27,0	26,0	4,3	5,9
Аммиак	—33,0	3,5	3,0	1,2	1,2
Вода	100,0	1,0	1,0	1,0	1,0

температурах, то давление пара в трубах будет большим. Во многих случаях приходится предусматривать удаление теплоносителя из труб или применение дополнительных емкостей для снижения давления газа.

Наибольший теплоперенос при температурах ниже 200° С обеспечивает вода. Однако и вода имеет некоторые недостатки. Точка замерзания воды значительно выше точки замерзания многих органических жидкостей. Смачивающие характеристики воды ухудшаются даже при наличии следов масляных загрязнений. Впрочем, проблема смачивания водой может быть решена введением в воду различных добавок. Однако смачивающие агенты сильно (более чем втрое) снижают преимущества воды, касающиеся теплопереноса.

Весьма высокий теплоперенос, сочетающийся с низкой температурой плавления, способен обеспечивать аммиак. Другие устойчивые жидкости, которые пригодны в области температур, харак-

терных для климата Земли, низкие алкоголи (спирты), галогенные гидрокарбонаты, гидрокарбонат (например, бифинил), эфиры, полиалкоголи (например, дифинильный), диэтилфталат и дибутилфталат, которые могут быть получены очень чистыми, — являются устойчивыми и не разлагаются до достаточно высоких температур.

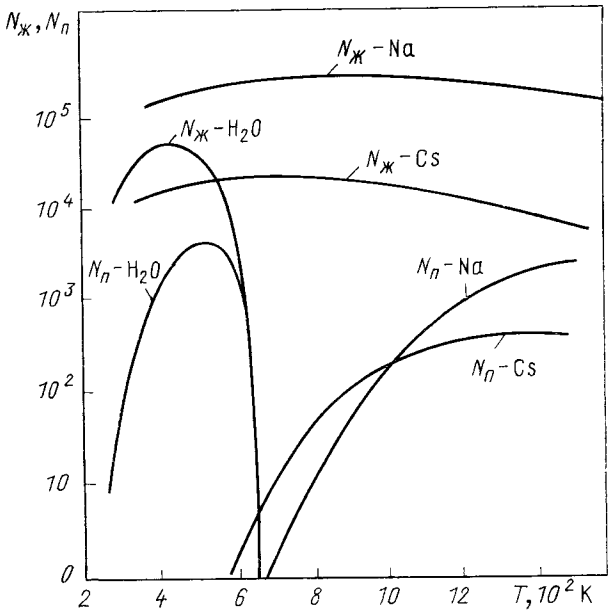


Рис 11 Зависимость коэффициентов переноса пара и жидкости для различных теплоносителей от температуры

Для температур ниже 0° С применимы низшие кетоны и другие более низкие гидрокарбонаты, а также жидкости типа фреонов.

Что касается ожиженных газов, то отметим следующее. Дейтерий в некоторых случаях можно предпочесть водороду, так как он остается жидким и при низком давлении пара. Жидкий кислород имеет преимущество перед жидким азотом.

Теплоносители высокотемпературных тепловых труб. Наилучшими теплопередающими свойствами обладают металлические теплоносители. Особенно хорошие свойства имеют литий и натрий. Литий обладает самыми благоприятными свойствами в отношении теплопереноса среди всех теплоносителей. В диапазоне высоких температур остальные теплоносители, в том числе и используемые с тугоплавкими материалами, существенно уступают ему в теплопередающих свойствах. Второе место по теплофизическим свойствам занимает натрий. Натрий широко используется в теп-

ловых трубах. Лишь в диапазоне температур, где давление его пара очень мало, целесообразно применять калий, а затем и цезий. Следует отметить, что для таких металлов, как кальций, магний, затруднен пуск тепловой трубы — для расплавления теплоносителя требуется нагрев до высоких температур. Большую опас-

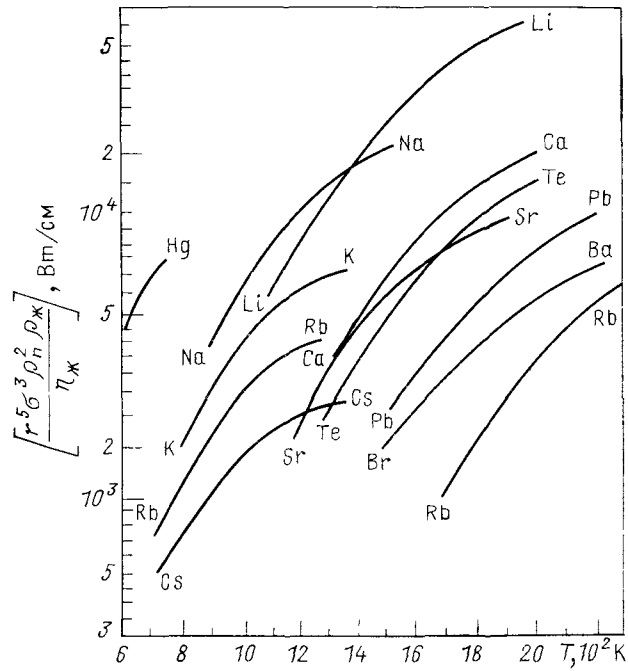


Рис. 1.2. Зависимость фактора качества теплоносителей от температуры

ность при пуске тепловой трубы представляет удаление теплоносителя из зоны нагрева вследствие сублимации его в зоне охлаждения.

Теплоносители среднетемпературных тепловых труб. При подборе теплоносителя для диапазона температур 200—400° С существуют некоторые трудности — для воды давление пара слишком велико, а для щелочных металлов мало. Органические же теплоносители применимы лишь для случаев с малой интенсивностью теплопереноса (например, для систем теплового регулирования). Для данного диапазона температур ртуть является наиболее перспективным теплоносителем.

Ценное свойство ртути — низкая температура плавления. При соответствующей конструкции тепловой трубы (большом гидравлическом диаметре каналов для протока жидкости) ртуть способна переносить очень большие количества тепла. Неблагоприятным свойством при использовании ртутных тепловых труб для от-

вода тепла из ядерных реакторов является большое сечение захвата нейтронов у ртути, а также грудности обеспечения смачивания. К тому же ртуть токсична.

В диапазоне температур от 50 до 400° С в качестве теплоносителя применим даутерм. Относительно низкая теплопроводность даутерма приводит к значительным термическим перепадам в зоне нагрева и конденсации. При использовании даутерма в верхнем диапазоне указанных температур происходит его разложение. Накопление

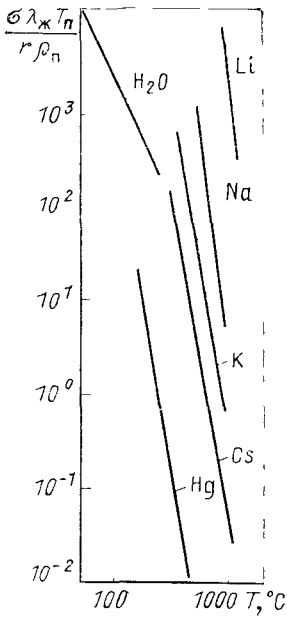


Рис. 1.3. Зависимость комплекса, характеризующего задержку вскипания различных теплоносителей, от температуры

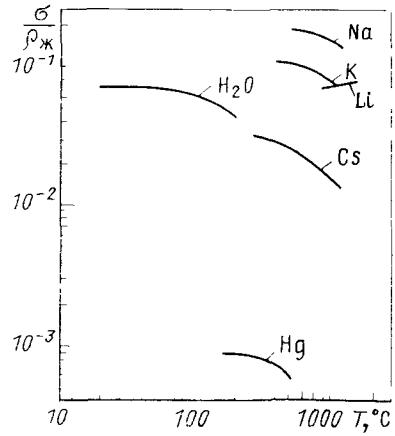


Рис. 1.4. Зависимость отношения, характеризующего влияние гравитационных сил, на теплоперенос

продуктов распада особенно неблагоприятно сказывается на тепловых трубах, имеющих капиллярную структуру, — происходит закупорка этой структуры твердыми продуктами разложения.

Мало исследованный в настоящее время, но перспективный теплоноситель в диапазоне температур 200—800° С (особенно для использования в бесфитильных трубах) — сера [6]. Сера не является химическим соединением и поэтому не подвержена термическому разложению и мало чувствительна к ионизирующему излучению. Стоимость ее невысока. Сера не коррозионно-активна по отношению к сталям. Нет противопоказаний и против использования серы в ядерных реакторах. Однако в жидком состоянии сера обладает высокой вязкостью. Выяснено, что добавка элементов со свободными электронами может снизить вязкость серы. Например, сравнительно небольшие (несколько процентов) количества иода в десятки раз понижают вязкость серы, обеспечивая эффективную ее работу в гравитационных тепловых трубах.

В отличие от даутерма и ртути сера может быть использована как теплоноситель и в трубах для пищевой промышленности. Хорошие диэлектрические свойства серы делают ее перспективной для применений в электротехнической промышленности.

§ 1.3. КОРРОЗИОННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Выбор перспективных пар твердый металл — жидкий металл. Все легкоплавкие или сравнительно легкоплавкие металлы в отношении коррозионной агрессивности в специфических условиях тепловых труб могут быть разделены на четыре группы (с учетом теплофизических и технологических характеристик).

Первую группу составляют щелочные металлы: литий, натрий, калий. Они достаточно удобны в эксплуатации, имеют хорошие физические, физико-химические и теплофизические характеристики. Их коррозионная агрессивность сравнительно невелика. В применении этой группы металлов в однофазных системах накоплен большой и разносторонний опыт. Этот опыт полезен и при установлении критериев применимости жидких металлов в качестве теплоносителя тепловых труб.

Ко *второй группе* можно отнести серебро и индий. Эти металлы в меньшей степени освоены технологически, но тем не менее они перспективны.

Третью группу составят вещества, возможно, перспективные для применения в качестве теплоносителя тепловых труб, но теоретически и экспериментально исследованные совершенно недостаточно. При удачном подборе системы с конструкционным материалом и хороших технологических разработках некоторые из веществ, отнесенные в настоящее время к третьей группе, по-видимому, удастся применить в тепловых трубах. К этой группе относятся кальций, висмут, свинец, таллий, барий.

Наконец, *четвертую группу* составят вещества с относительно невысокой температурой плавления, но для тепловых труб, по-видимому, бесперспективные. Некоторые вещества исключаются из рассмотрения, как обладающие неудачным комплексом теплофизических свойств. Это магний, сурьма, теллур, олово, кадмий. Алюминий и другие металлы исключаются из-за их склонности к образованию интерметаллических соединений с большинством конструкционных металлов; галлий и цинк исключаются, как чрезвычайно активные растворители для многих конструкционных металлов.

Коррозионные критерии пригодности теплоносителей тепловых труб. В системах твердый металл — жидкий металл часто наблюдается адсорбционное понижение прочности твердого металла под действием жидкого. Снижение поверхностной энергии твердого металла при одновременном воздействии растягивающих напряже-

ний может привести к преждевременному его разрушению при небольших нагрузках (эффект Ребиндера).

Тепловые трубы вводят в обращение много новых металлов, помимо теплоносителей, в какой-то мере уже освоенных техникой: натрий, калий, литий, ртуть. Но элемент новизны есть и в работе с перечисленными жидкими металлами, так как рабочие температуры тепловых труб значительно выше ранее освоенного интервала. Соответственно требуется применение новых, более жаропрочных конструкционных материалов, поведение которых в системах с жидкометаллическими теплоносителями еще не изучено.

Высокотемпературные тепловые трубы иногда работают при внутреннем давлении пара теплоносителя, достигающем нескольких тысяч паскалей. Такое давление с учетом высоких температур создает в корпусе тепловой трубы напряжения, зачастую близкие к пределу длительной прочности (в зависимости от выбираемого материала, температуры и ресурса). В процессе пуска и остановки тепловой трубы система проходит большой температурный интервал от $t_{\text{п.т}}$ теплоносителя до максимальной рабочей температуры. В этом интервале возможно существование области температур с максимальной интенсивностью процессов адсорбционного понижения прочности. Учитывая высокие скорости их протекания, при создании новых типов тепловых труб нельзя проходить мимо вероятности проявления эффекта Ребиндера. Считают, что наряду с классическим примером растрескивания латуни 70—30% под действием ртути заведомо должны существовать и многие другие системы, чувствительные к остаточным напряжениям [8]. Большинство экспериментов по проявлению эффекта Ребиндера поставлено с низкотемпературными материалами: цинком, медью, латунью. Но некоторые работы выполнены и со сталями. Ощущается нехватка экспериментальных данных и по характеристикам длительной прочности, и по проявлению эффекта Ребиндера для высокотемпературных условий. Тем не менее сформулированы некоторые общие закономерности проявления эффекта [9].

1. Наличие небольшой растворимости жидкого металла в твердом способствует проявлению адсорбционного понижения прочности.

2. Наиболее опасный вид диаграммы состояния — эвтектика с ограниченной растворимостью легкоплавкого металла в более тугоплавком.

3. Адсорбционное понижение прочности не характерно для диаграмм состояния с интерметаллидами с полной нерастворимостью и с очень широкой областью твердых растворов.

4. При высоких температурах возможно исчезновение эффекта, даже если он имеет место при средних температурах.

Что касается исчезновения адсорбционного эффекта понижения прочности с увеличением температуры выше некоторого уровня, то это факт благоприятный. Тем не менее он требует бдительности исследователя. Во-первых, для большинства пар неизвестно значение этого уровня температуры. Во-вторых, Ростокер [8]

в литературном обзоре приводит данные различных авторов по обнаружению адсорбционного эффекта при весьма высоких температурах, достигающих 900—1200° С. Хрупкость углеродистых, кремнистых и хромистых сталей при изгибе вызывали: олово, цинк, сурьма, медь, бронза с 5% олова и латунь с 10% цинка. Висмут, кадмий, свинец и серебро оказались практически нейтральными. При 425—500° С время до разрушения различных сталей в опытах на ползучесть уменьшалось в присутствии расплавленного цинка. Преждевременно разрушался титан, находившийся в контакте с жидким кадмием.

Вместе с тем замечено, что далеко не все жидкие металлы вызывают понижение прочности. Из-за недостатка данных трудно указать предельные значения растворимости адсорбента в твердом металле, при которых проявляется эффект Ребиндера. Известно только, что они соответствуют значениям растворимости в диаграммах состояния эвтектического типа с ограниченной растворимостью. Привести более точные данные в настоящее время нет возможности, и это затрудняет предварительную оценку качества выбираемого теплоносителя тепловой трубы.

Считают, что в диаграмме состояния для интерметаллидов адсорбционная хрупкость отсутствует [9]. Однако такой стороной рассмотрения вопроса нельзя ограничиваться при выборе работоспособных пар. Пáры, образующие интерметаллиды, могут оказаться нежелательными с точки зрения жидкометаллической коррозии. Образование и рост слоев интерметаллидов на конструкционных металлах приведет к изменению проходных сечений капилляров и пор тепловой трубы, размеры которых и без того невелики. Из опыта работы с жидкими металлами видно, что за время меньше 1000 ч вполне возможно сужение сечения на 10—30 мкм с каждой стороны, что означает уменьшение ширины канала на 20—60 мкм. Это явление может изменить характеристики тепловой трубы.

Таким образом, выбор пáры твердый металл — жидкий металл оказывается сильно ограниченным.

Заполнение капилляров в зоне испарения перенесенными массами — одна из причин выхода из строя тепловой трубы или нарушения режима ее работы. Кристаллизация перенесенных масс является звеном в цепи: растворение, транспортировка растворенного вещества потоком жидкого металла, пересыщение жидкометаллического раствора (повышение концентрации растворенного металла выше C), кристаллизация. Концентрация растворенного металла в теплоносителе определяет скорость накопления вещества, выкристаллизовавшегося в зоне испарения и заполнившего поры капиллярной структуры. При этом, если неметаллические примеси в жидком металле и не дают побочных коррозионных эффектов, то, как правило, повышают концентрацию насыщения растворяемого металла.

При очень высоких температурах, ранее почти не встречавшихся в практике, часто отсутствуют данные по растворимости,

а экстраполяция не дает надежных результатов. В настоящее время, пока не накоплен достаточный опыт по применению различных пар металлов, материаловедческую оценку их приходится вести по нескольким направлениям. В первую очередь можно отбраковать пáры, в которых растворимость при рабочей температуре превышает некое сравнительно большое значение. Для предварительной отбраковки явно непригодных пар критическое значение C можно принять равным 1%. Отметим, что это первичная оценка, отбраковка самых неподходящих материалов, не означающая, что пары с $C=1\%$ можно применять в конструкции тепловой трубы. Однако нужно иметь в виду следующее обстоятельство. При развитии технологии работ с перспективным, но малоизученным жидким металлом может оказаться, что данные по растворимости некоторых металлов в нем сильно завышены вследствие недостаточной очистки его от примесей. Такое положение естественно для ситуации, когда работы с интересующими нас металлами ведутся эпизодически и вопросы технологии редко затрагиваются.

Пáры твердый металл — жидкий металл, растворимость в которых менее 1%, оцениваются в отношении технологичности конструкционного металла, а также с точки зрения технологичности и пригодности жидкого металла в качестве теплоносителя. Прямыми опытами по эксплуатации тепловых труб, параллельными работами по технологии жидкого металла, изучению растворимости и особенностей коррозии в нем выбираются пáры, которые можно использовать на практике. Для щелочных жидких металлов положение облегчается, так как с ними проведено большое количество работ, на которые могут опереться исследователи, работающие с тепловыми трубами.

В табл. 1.3, 1.4 приведены примеры результата рассмотрения диаграмм состояния пар металлов с высокой и низкой растворимостью.

Таблица 1.3

Пáры металлов с повышенной растворимостью

Твердый металл	Жидкий металл	Температура проведения опыта, °С	Растворимость при температуре опыта, %	Литература
Марганец	Литий	1100	2,0	[10]
Кобальт	Магний	1000	38,0	[10]
»	Индий	700	12,0	[11]
Никель	»	700	5,0	[12]
Ниобий	Олово	1600	5,0	[10]
»	»	2000	50,0	[10]
Никель	Свинец	1425	20,0	[13]
Вольфрам	»	1425	30,0	[12]
Цирконий	Висмут	700	1,0	[11]
Титан	Индий	700	1,0	[13]
»	»	1000	5,0	[13]
Родий	Серебро	1800	2,5	[11]

Таблица 1.4

Пáры металлов с невысокой растворимостью

Твердый металл	Жидкий металл	Температура проведения опыта, °С	Растворимость при температуре опыта, %	Литература
Молибден	Натрий	1000	$1{,}4\cdot10^{-4}$	[14]
Ниобий	»	1000	До $2\cdot10^{-2}$	[14]
Ванадий	Магний	1200	1,0	[15]
Ниобий	»	1500	0,5	[15]
Титан	Индий	700	1,0	[13]
Никель	Таллий	1200	1,0	[12]
Ниобий	Литий	1500	$1{,}3\cdot10^{-1}$	[17]

Проведенная выше оценка пригодности пар с помощью диаграммы состояния слишком ориентировочна. Для более точной оценки воспользуемся методом, разработанным для стендовых систем [18]. Ввиду малой толщины оболочки тепловой трубы и небольшого сечения капилляров, где при испарении теплоносителя кристаллизуется растворенное вещество, допуск на разрешенное уменьшение толщины стенки снизим до 0,02 мм (что составит менее 10% толщины стенки). Для труб ПГ и трактов АЭС допустимая толщина растворяемого слоя принята равной 0,3 мм (около 10% толщины стенки). Правомочность метода оценки по аналогии заключается в несомненно существующей общности закономерностей коррозионных процессов в жидкометаллических устройствах различного типа [19]. Результаты расчета срока службы тепловых труб с натрием при изготовлении их из хромоникелевых нержавеющих сталей (1Х18Н10Т, 1Х18Н9, 1Х16Н15М3Б) приведены в табл. 1.5. Естественно, что предлагаемый метод оценки нельзя считать абсолютным, так как он не учитывает возможности локального растворения.

Таблица 1.5

Срок службы тепловых труб с натрием (ограничение — массоперенос, материал — хромон икелевая нержавеющая сталь)

Температура, °С	Срок службы при различном содержании кислорода, ч	
	$C=2\cdot10^{-3}$ %*	$C=1\cdot10^{-2}$ %
650	$1{,}3\cdot10^{5}$	$2{,}9\cdot10^{4}$
700	$1{,}0\cdot10^{5}$	$1{,}9\cdot10^{4}$
800	$6{,}0\cdot10^{4}$	$1{,}2\cdot10^{4}$
900	$3{,}4\cdot10^{4}$	
1100	$1{,}1\cdot10^{4}$	

* Натрий реакторной чистоты [18].

Оценка работоспособности тепловых труб может быть сделана также на основе имеющихся результатов их испытаний [20, 21]. Из комплекса показателей — рабочая температура, длительность испытания, безаварийность, данные по растворимости, — можно сделать следующие выводы. Для безаварийной работы тепловых труб в первую очередь требуется, чтобы растворимость кон-

струкционного металла в теплоносителе C при избранной рабочей температуре составляла:

Время, ч	Растворимость, %
5000	$(5{,}0\pm2{,}0)\ 10^{-4}$
10000	$(4{,}0\pm1{,}4)\ 10^{-4}$
15000	$(3{,}4\pm1{,}2)\ 10^{-4}$
20000	$(2{,}5\pm0{,}6)\ 10^{-4}$

Для срока службы меньше 5000 ч оценка не проведена из-за очень большого разброса данных, являющегося, вероятно, следствием преждевременного выхода из строя тепловых труб. Однако применить практически эти численные критерии при выборе и оценке перспективных пар не всегда представляется возможным, так как данные по растворимости в жидких металлах в настоящее время имеются для ограниченного круга элементов.

Выбор пары конструкционный материал — неметаллический теплоноситель. При рассмотрении совместимости неметаллических теплоносителей с конструкционными материалами нужно принимать во внимание следующие факторы: 1) коррозию, 2) образование неконденсирующихся газов. Для неметаллических жидкостей в отличие от жидких металлов процессы растворения и массопереноса конструкционных металлов имеют (ввиду низкой температуры) сравнительно малое значение. Главенствует химическое взаимодействие, а в некоторых случаях — электрохимическое взаимодействие теплоносителя с конструкционным материалом.

В работах [22, 23] приведены комбинации низкотемпературных теплоносителей и конструкционных материалов, совместимых и несовместимых друг с другом (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Совместимость теплоносителей с конструкционными материалами

Материал	Теплоноситель
Совместимые комбинации	
Нержавеющая сталь	Метанол, этанол, аммиак, фреоны
Никель	Вода, метанол, этанол, аммиак
Медь	Вода, метанол, ацетон, аммиак
Алюминий и его сплавы	Пропан, фреоны, ацетон
Ограниченно совместимые комбинации	
Нержавеющая сталь	Вода*
Алюминий	Вода, алкалоиды, фреоны*[2]

* При окислении нержавеющей стали водой накапливается водород.

*[2] Некоторые фреоны, содержащие хлор, фтор и другие агрессивные элемеиты, вызывают коррозию.

Отметим, что имеющиеся данные по коррозионной стойкости никеля и аммиака крайне противоречивы [24—26]. Это, по-видимому, объясняется различными (неконтролируемыми) количествами растворенной воды в аммиаке, с которым проводились опыты. Вода, растворенная в аммиаке, активно взаимодействует с никелем [26]. Поэтому при использовании аммиака в никелевых трубах необходимо тщательное предварительное обезвоживание аммиака.

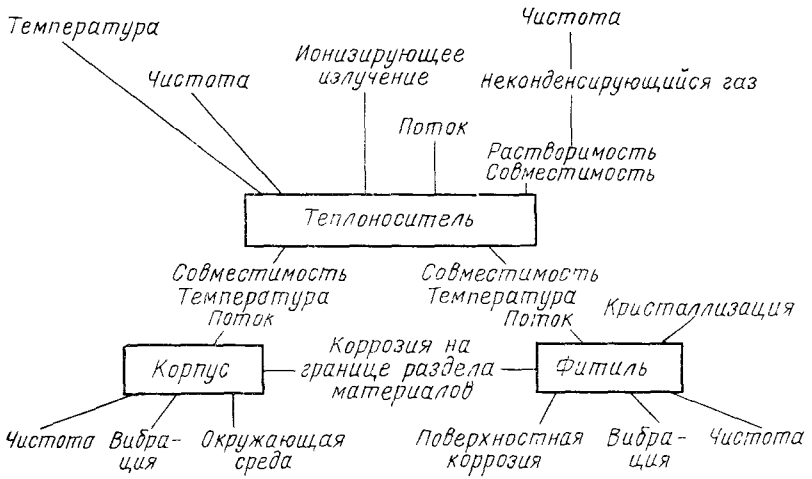


Рис. 1.5. Факторы, влияющие на ресурс работы тепловой трубы

Наиболее надежные данные по ресурсу работы тепловых труб могут быть получены при непосредственных ресурсных испытаниях последних. В процессе испытаний на ресурс оказывают влияние многие факторы (рис. 1.5). Факторы на рис. 1.5 указаны для тепловых труб любого температурного уровня и конструкционного исполнения, в том числе и для газонаполненных. Трактовка данных по ресурсным испытаниям не может быть проведена без рассмотрения условий изготовления тепловой трубы, заполнения ее теплоносителем, без знания конкретной конструкции, капиллярной структуры, режимных факторов при проведении испытаний и т. п. Вопросы конструирования тепловых труб, заполнения их теплоносителями, а также методики испытаний рассмотрены ниже, поэтому данные по ресурсным испытаниям будут приведены и проанализированы после изложения этих вопросов.

Глава 2

КОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

§ 2.1. ВЫБОР ТИПА КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ

При выборе капиллярной структуры для тепловой трубы следует исходить прежде всего из комплексной оценки ее качеств, таких, как: 1) транспортные свойства по отношению к тепло- и массопереносу; 2) надежность; 3) технологичность изготовления; 4) моделирование рабочих условий.

Остановимся на каждом из указанных качеств капиллярной структуры.

Высокий теплоперенос в тепловой трубе возможен лишь при благоприятных транспортных свойствах фитиля — малом эффективном радиусе пор, создающих высокое капиллярное давление, большом гидравлическом диаметре каналов и суммарной площади сечения для протока жидкости вдоль трубы, обеспечивающих в целом малое гидравлическое сопротивление при течении жидкости. Одновременное выполнение первых двух условий возможно лишь в составных фитилях. Однако составные фитили имеют крупные недостатки и их применение не всегда допустимо.

Для простых фитилей существует задача оптимизации, относящаяся к выбору размера каналов и их числа. При малом размере канала увеличивается движущий капиллярный напор, однако при этом возрастают гидравлические потери в жидкости, и наоборот. Большое число капиллярных каналов и соответственно большая толщина фитиля уменьшают гидравлические потери в жидкости, но при заданном размере внутреннего диаметра корпуса трубы увеличивают потери давления в паровой фазе.

К *транспортным свойствам* фитиля можно отнести эффективную теплопроводность и способность к передаче тепла в радиальном направлении без наступления критической ситуации (перегрев стенки, резкое повышение термического сопротивления трубы).

В наземных условиях к фитилю также часто предъявляют требование, чтобы при наклонном или вертикальном положении трубы, работающей с использованием силы тяжести, жидкость заполняла фитиль как минимум на высоту зоны нагрева.

Транспортными свойствами фитиля определяется и работа тепловой трубы в пусковых режимах. Эксперименты показывают, что трудно, а иногда и невозможно добиться пуска тепловых труб с крупной капиллярной структурой.

Надежность в данном случае следует понимать как характеристику вероятности выхода трубы из строя из-за протекания разнородных процессов, на которые влияют факторы, различные для каждого процесса. Как для простых, так и для составных фитилей (хотя, конечно, в различной степени) опасным является разрушение пористой структуры фитиля или закупорка пор вследствие массопереноса. В некоторых случаях излишки теплоносителя при неточной заправке могут выводить тепловую трубу из строя или делать ее характеристики неприемлемыми. Для труб с составными фитилями совершенно недопустима недозаправка. Тру-

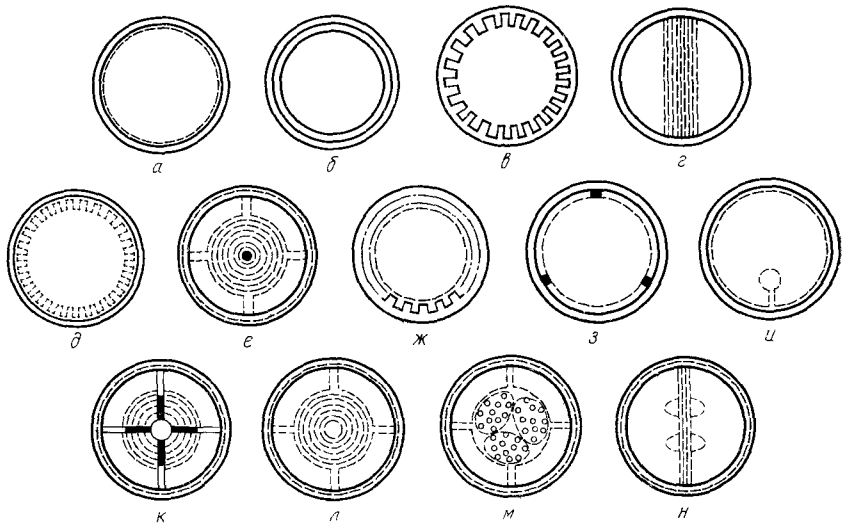


Рис. 2.1. Основные типы конструкции фитилей (табл. 2.2)

бы с составными фитилями, как уже указывалось, очень чувствительны к попаданию газа в канал для жидкости. Газовые пузырьки, находясь в области нагрева, инициируют вскипание, осушение составного фитиля и приводят к перегреву и даже разрушению трубы. Для вторичной подготовки к работе в этом случае, как правило, требуется проведение специальных операций. Воздействие ударов и вибраций особенно опасно для составных фитилей, так как «выбивание» части жидкости приводит к упомянутым выше эффектам.

Технологичность изготовления включает в себя несколько характеристик. Это трудозатраты на изготовление и очистку фитиля, оснащение им тепловой трубы, необходимость иметь оснастку большей или меньшей сложности, количество брака из-за невоспроизводимости необходимых характеристик. В конечном счете для массового применения важна и стоимость изготовления.

Моделирование рабочих условий заключается прежде всего в возможности распространения данных наземных испытаний на

Таблица 2.1

Оценка капиллярных структур высокотемпературных тепловых труб

Тип фитиля (см. рис. 2.1)	Транспортные свойства					Надежность, обусловленная				Технологичность изготовления, связанная с		
	эффективный радиус пор	проницаемость	осевой теплоперенос	радиальный теплоперенос	возможности вертикальной работы	вскипанием из-за попадания газа	недозаправкой теплоносителем	воздействием ударов и вибраций	закупориванием вследствие массопереноса	трудозатратами	оснасткой	воспроизводимостью
Простой:												
сеточный (*а*)	у	у	у	х	у	о	у	у	х	о	о	х
	у	у	у	х	у	о	у	у	у	о	о	х
спеченный (*б*)	у	у	у	х	у	о	у	у	у	у	у	х
канавочный (*в*)	у	х	х	о	п	о	у	у	о	х	у	о
	у	х	х	о	п	о	у	у	х	п	п	о
гофрированный (*д*)	у	х	х	х	п	о	о	у	у	х	у	х
	у	х	х	х	п	о	о	у	—	—	—	—
Составной:												
канавки, покрытые сеткой (*ж*)	о	х	х	о	х	п	п	п	у	у	п	х
	х	х	х	о	х	п	п	п	п	п	п	х
кольцевой канал (*з*)	о	о	о	о	х	п	п	п	у	х	у	х
	х	о	о	о	х	п	п	п	п	п	у	х
с резьбой на стенке и артерией (*е*)	х	о	о	о	у	п	п	п	у	п	п	у
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечания: Оценки даны для фитилей оптимальной геометрии. Верхняя оценка относится к ВТТ; нижняя — к ТВТ; прочерк — обычно не применяется. о — очень хороший; х — хороший; у — умеренный; п — плохой.

Таблица 2.2

Оценка капиллярных структур низкотемпературных тепловых труб для температурного контроля

Тип фитиля (см. рис. 2.1)	Температурный интервал*	Теплопереносо*2	Термическое сопротивление*2	Наземные испытания*2	Заправка теплоносителя*3	Легкость изготовления*2	Надежность*2	Применимость для температурного контроля*2		
								ГРТТ	Диод с жидкостной ловушкой	Диод с блокировкой
Простой:										
сеточный (*а*)	к, у	п	п—у	у—х	н	х	х—о	х	х	п
спеченный (*б*)	к, у	п	п—у	у—х	н	х	х—о	х	х	п
канавочный (*в*)	к, у, с	у	у	п	н—у	о*7	х—о	х	х*5	п
гофрированный фитиль (*д*)	к, у, с	у—х	у	п	у	о	х	х	х	п
пластинчатый фитиль (*е*)	к, у, с	у	х	х	у	х	х	о	у	п—у
заполняемая артерия (нетуннельная) (*ж*)	к, у, с	у—х	х	х	у	у	х	х—о	у	х
Составной:										
канавки, покрытые сеткой (*ж*)	Только для жидких металлов	о	х	х	у	х*8	х	у—х	х	п
кольцевой канал (*з*)		о	х	х	в	у*8	у—х	п*6	х	п
цокольная артерия (*и*)	к, у, с	о	х	х*4	в	у	п	п*6	х	п*9
спиральная артерия (нетуннельная) (*к*)	к, у, с	х	х	х*4	у—в	п—у	х	х	п—у	х
туннельный фитиль (*л*)	к, у, с	о	х	х*4	в	п—у	у—х	п*6	п—у	х
модулярная артерия (*м*)	к, у, с	х	х	х*4	в	у	х	х	п—у	х
артериальный пластинчатый фитиль (*н*)	к, у, с	х	х	х*4	в	у	у—х	п*6	п—у	п—у

*к — вблизи комнатных температур (350—200 К) у — умеренно криогенные температуры (200—80 К). с — существенно криогенные температуры (<80 К). *2о — очень хороший; х — хороший; у — умеренный, п — плохой *3 н — низкая, у — умеренная; в — высокая. *4 Если заполнена артерия *5 Если используются трубы из нержавеющей стали *6 Если щель артерии не заполнена *7 Если не используются трубы из нержавеющей стали. *8 Для ВТТ технология отличается. 9* Если не используется блокируемое отверстие.

работу в условиях невесомости для труб, предназначенных для работы в таких условиях. Это прежде всего относится к низкотемпературным тепловым трубам, а в ряде случаев и высокотемпературным.

Перейдем далее к рассмотрению свойств различных капиллярных структур (рис. 2.1). Отметим сразу, что при использовании металлических и неметаллических теплоносителей подход к оценке качеств одной и той же капиллярной структуры оказывается различным. Это обусловлено значительным различием физических свойств, приводящим к большим не только количественным, но и качественным различиям. Желание обеспечить высокие радиальные тепловые потоки, форсировать осевой теплоперенос, необходимость моделировать работу трубы в наземных условиях привели к разработке большого числа разновидностей капиллярных структур, специфичных для низкотемпературных и криогенных тепловых труб. Для высокотемпературных тепловых труб упомянутые вопросы часто решаются в ином плане, иными средствами.

Оценка качеств капиллярных структур дана в табл. 2.1 и 2.2. Нумерация фитилей в табл. 2.2 соответствует их нумерации на рис. 2.1. Табл. 2.2 заимствована из работы [1]. Упомянутая работа хотя и посвящена частному вопросу — температурному контролю тепловых труб для космических целей, однако оценка качеств капиллярных структур оказывается пригодной и в общем случае.

Простые фитили. Хорошей технологичностью при изготовлении и высокой надежностью при работе обладают фитили из нескольких слоев металлических или текстильных тканей, которые каким-либо образом прикреплены к стенке тепловой трубы на участке теплообмена. Транспортные свойства этих фитилей обычно таковы, что не могут обеспечивать очень высокого теплопереноса. Такие фитили применимы почти для любого температурного диапазона и теплоносителя [2—6]. Однако в низкотемпературных и криогенных тепловых трубах значительная толщина фитиля создает благоприятные условия для перегрева и кипения теплоносителя внутри капиллярной структуры, что обычно и ограничивает подводимые удельные тепловые потоки сравнительно небольшим значением.

Для труб с круглым поперечным сечением часто вполне достаточно упругих сил металлической сетки или ткани, чтобы фитиль плотно прилегал к стенке. Существует тем не менее опасность, что сетки в каких-то местах будут неплотно прилегать к стенке, особенно при высоких температурах, когда упругие силы исчезнут. Этого нужно избегать ввиду опасности образования в зоне нагрева «горячих пятен», т. е. локального осушения стенки, приводящего к ее перегреву.

Для обеспечения более плотного прилегания сеток или ткани к стенке используют распорные кольца, а при высоких температурах — пружины из тугоплавких материалов или опорные клетки [7—10]. В некоторых случаях используется протяжка сквозь тру-

бу шарика, уплотняющего слои сетки, например, сваренные вдоль. Можно приваривать сетки к стенке точечной или диффузионной сваркой, а также припаивать их или спекать со стенкой [4—12].

Рыхлые или спеченные пористые засыпки принципиально мало отличаются от тканевых или сеточных фитилей и также широко используются в тепловых трубах [13, 14]. Весьма стабильными и благоприятными капиллярными характеристиками обладают металловолокнистые фитили, разработанные специально для использования в тепловых трубах авторами работ [15, 16]. Такие фитили могут быть изготовлены высокой объемной, заранее заданной, пористости. Технология их создания обеспечивает и одновременное крепление, приваривание к корпусу трубы.

Механически стабильной капиллярной структурой, применяемой как для низко-, так и для высокотемпературных тепловых труб, являются продольные канавки в корпусе трубы [17—20]. Канавки выполняются, как правило, прямоугольными, но часто также трапецеидальными, треугольными или овальными. Некоторая завальцовка краев канавки позволяет уменьшить взаимодействие жидкости с паром, а также увеличить развиваемое капиллярное давление.

Изготовление канавок может осуществляться протяжкой, экструзией, фрезерованием, штамповкой, гофрированием, вытравливанием и другими способами на заготовке или на внутренней поверхности корпуса трубы. Канавки могут быть получены посредством набора продольных пластинок, скрепленных кольцами и помещенных внутри корпуса тепловой трубы или путем приваривания к корпусу гофрированной фольги. Когда корпус трубы выполняется методом осаждения металла (например, вольфрама) из газовой фазы, канавки удобно изготавливать непосредственно в корпусе. Весьма простой в изготовлении и близкой по своим свойствам к канавочной является структура из гофрированной сетки [21]. В низкотемпературных тепловых трубах упругих сил сетчатой гофры достаточно, чтобы она плотно удерживалась внутри корпуса. Такая структура легко может быть изготовлена многоканальной (т. е. имеющей каналы различных гидравлических диаметров), что уменьшает чувствительность ее в недозаправке теплоносителя, а также дает другие преимущества. (В частности, аксиальная неоднородность может приводить к увеличению теплопереноса при прочих равных условиях.)

Стремление уменьшить температурные перепады на стенке и более эффективно использовать центральную часть трубы привело к использованию для низкотемпературных тепловых труб фитилей, в которых капиллярная структура в виде артерии вынесена в паровой канал. Это, в частности, пластинчатый фитиль [рис. 2.1, *г*] или шнековый [22].

Составные фитили. Составные фитили следует подразделить на артериальные и неартериальные. Примеры конструкций составных фитилей второго типа представлены на рис. 2.2. Они применяются главным образом для высокотемпературных тепловых труб. Под

пористым экраном обеспечивается канал достаточно большого размера для протока жидкости. Экран может быть выполнен из одного или нескольких слоев сетки, из перфорированной трубки с отверстиями, изготовленными посредством сверления, электроискровым и фотохимическим способами, электронным лучом, лазером и другими способами. Экран также может быть изготовлен из каркаса (например, из трубки с весьма крупными перфорациями), обтянутого мелкой сеткой.

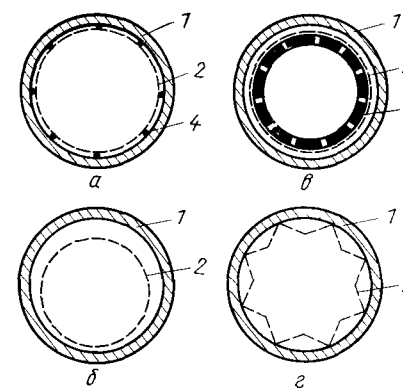


Рис. 22 Типы конструкций безартериальных составных фитилей с кольцевым каналом (*а*), с серповидным каналом (*б*), с поддерживающим перфорированным каркасом (*в*), с рифленым экраном (*г*):

1 — корпус; *2* — экран; *3* — каркас; *4* — центрирующие проволоки или прокладки

Тепловые трубы с составными фитилями позволяют переносить большие количества тепла, так как эти фитили обеспечивают высокий капиллярный напор и малое гидравлическое сопротивление при течении жидкости. Мелкопористые экраны на поверхности фитиля затрудняют взаимодействие потока пара с жидкостью, которое наблюдается при капиллярной структуре открытого типа, например канавках.

Составные фитили, как уже отмечалось, наряду с положительными имеют и отрицательные свойства. При изготовлении таких фитилей необходимо учитывать особенности их работы. Капиллярный напор для составного фитиля определяется самой крупной поверхностной порой, и дефекты пористой поверхности (большие поры) могут ухудшить капиллярные свойства составного фитиля или даже полностью ликвидировать его преимущества. Локальное разрушение мелкопористого экрана выводит из строя всю тепловую трубу. В том случае, когда канал между мелкопористым экраном и корпусом трубы имеет большой размер, возможны трудности с первоначальным заполнением его жидкостью или с заполнением после выдувания жидкости из канала после того, как капиллярный напор оказался недостаточным и возникло «сухое» пятно под мелкопористой структурой.

Недостатки составного фитиля можно несколько уменьшить, применяя продольное секционирование щелевого зазора [рис. 2.1(7)]. Образование крупных пор в этом случае будет приводить к уменьшению эффективности лишь отдельных секций, а не всего фитиля. Фитиль такого типа может быть выполнен в виде продольных канавок в стенке тепловой трубы, покрытых сверху плотно прилегающим мелкопористым экраном. Трудности в этом случае представляет необходимость обеспечить плотный контакт сетки с выступами между канавками.

Высокая теплопроводность жидкометаллических теплоносителей и большие перегревы, необходимые для вскипания, допускают получение чрезвычайно высоких удельных тепловых потоков в зоне нагрева, позволяют не считаться с термическим сопротивлением составных фитилей кольцевого типа. Для тепловых труб с неметаллическими теплоносителями низкая теплопроводность и малые перегревы, необходимые для вскипания, ведут к тому, что в составных фитилях кольцевого типа весьма вероятно вскипание. Следовательно, фитили могут осушаться, что приведет тепловые трубы к выходу из строя.

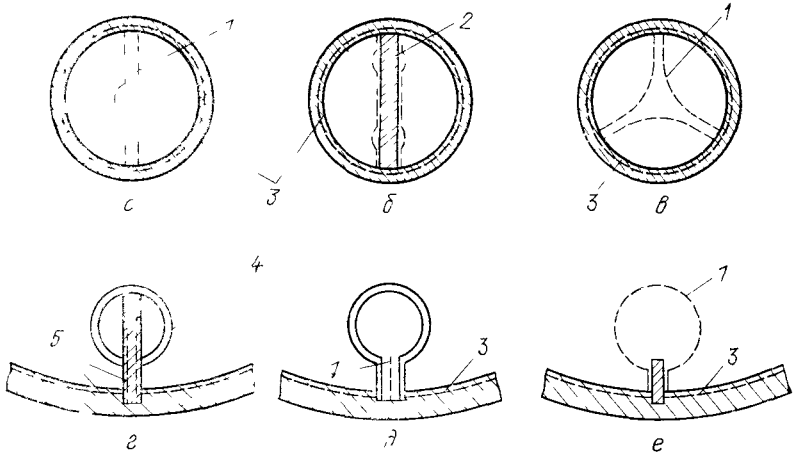


Рис 23 Примеры выполнения артериальных тепловых труб с резьбой [23]: *1* — сетка, *2* — опорная перегородка из листового материала; *3* — резьба, *4* — фольга без перфораций, *5* — канавки

Чтобы уменьшить толщину слоя жидкости у стенки, Кацов [12] предложил использовать «артерии», расположенные в паровом канале трубы и соприкасающиеся с относительно тонкой капиллярной структурой на стенке. При одинаковой площади сечения трубы, предназначенной для протока жидкости, тепловые трубы с артериями создают существенно меньшее падение давления в жидкости, так как гидравлический диаметр артерий много больше эквивалентного гидравлического диаметра кольцевого зазора, а от размера гидравлического диаметра перепад давления в жидкости при прочих равных условиях зависит обратно пропорционально четвертой степени.

Желание использовать преимущества составных фитилей привело к появлению фитилей артериального типа такой конструкции, чтобы пузырьки, возникшие на стенке, не проникали в артерию. Эксперименты показывают, что капиллярные структуры типа канавок допускают весьма высокие тепловые нагрузки на поверхности нагрева. Сочетать канавочную структуру (например, винтовую резьбу на внутренней стенке трубы) с артериями пред-

ложил Моритц [23]. На рис. 2.3 представлены некоторые конструкции фитилей с артериями.

Осевой перенос жидкости происходит в артериях относительно большого гидравлического диаметра, для сбора и растекания жидкости по окружности трубы предназначены желобки резьбы. Чтобы избежать образования пузырьков в артериях, необходимо выполнить дополнительный «мостик» (капиллярную перегородку между артерией и стенкой), связывающий резьбу с артерией. Мостики выполняют важную функцию: они препятствуют проникновению возникшего у стенки пузырька в артерию.

Фитили типов, изображенных на рис. 2.3, *а*, *б*, пригодны для тепловых труб малого диаметра. В фитиле типа *г* механическая жесткость обеспечивается с помощью специальной опоры. Артерии типа *г* и *д* изготовлены из фольги без перфораций. В таком случае существует опасность, что при быстром падении давления в трубе произойдет вскипание жидкости в артерии. При артерии типа *е* имеется возможность быстро охладить жидкость посредством испарения ее из пор на поверхности артерии. Поэтому для такого типа артерии опасности вскипания жидкости внутри артерии нет.

Преимущество фитиля в виде артерии, сочетающейся с резьбой, заключается в простоте изготовления и возможности иметь высокие удельные тепловые потоки при нагреве. Однако резьба не может быть столь же мелкой, что и сетки, а это сказывается на капиллярном напоре.

Широкое распространение получили и артериальные фитили с сеткой, уложенной у стенки [24, 25]. Артерию и пристенную капиллярную структуру при этом часто изготавливают из одной заготовки. Такие заготовки используются как для низкотемпературных, так и для высокотемпературных тепловых труб.

Проблемой номер один для артериальных тепловых труб является заполнение их теплоносителем. Особенно сложен вопрос для газонаполненных труб, когда попадание газа в артерии приводит либо к ухудшению характеристик трубы, либо к полной потере их работоспособности.

Для низкотемпературных и прежде всего криогенных тепловых труб, у которых теплоносители обладают очень плохими в отношении заполняемости и теплопереноса свойствами, разработано несколько оригинальных конструкций артериальных фитилей [1, 26—29].

На рис. 2.4, *а* представлена схема так называемой *спиральной артерии* [26—27]. На центральный стержень по спирали с зазором, центрируемым с помощью проволок, наматывается мелкая сетка. Спираль помещают в тщательно уплотненный цилиндрический кожух из мелкой сетки. С помощью капиллярных мостиков артерия соединяется с капиллярной системой на стенке, выполняемой чаще всего в виде резьбовых канавок на внутренней поверхности корпуса трубы. Хорошей заполняемости способствует наличие относительно небольших каналов между витками спира-

ли, большое суммарное сечение фитиля обеспечивает высокий теплоперенос, канавочная структура на стенке приводит к относительно малому термическому сопротивлению тепловой трубы.

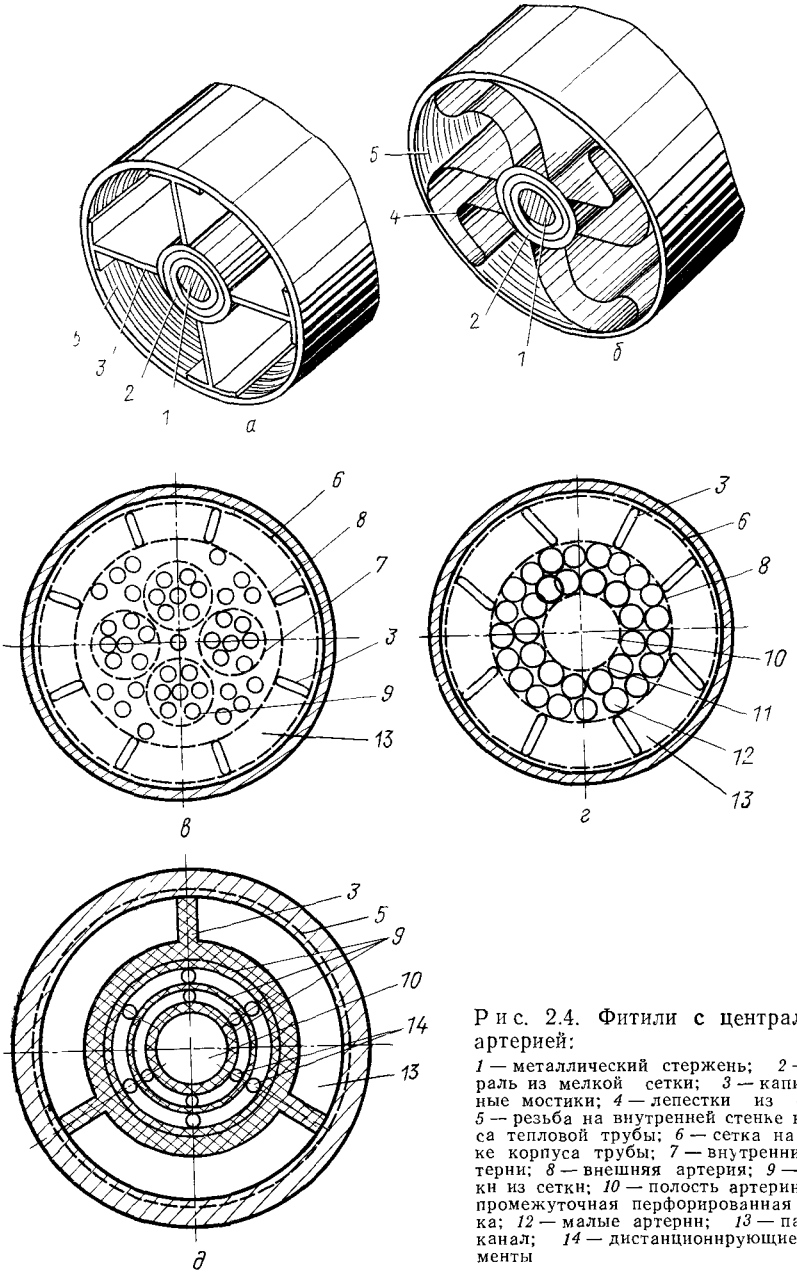


Рис. 2.4. Фитили с центральной артерией:

1 — металлический стержень; *2* — спираль из мелкой сетки; *3* — капиллярные мостики; *4* — лепестки из сетки; *5* — резьба на внутренней стенке корпуса тепловой трубы; *6* — сетка на стенке корпуса трубы; *7* — внутренние артерии; *8* — внешняя артерия; *9* — трубки из сетки; *10* — полость артерии; *11* — промежуточная перфорированная трубка; *12* — малые артерии; *13* — паровой канал; *14* — дистанционирующие элементы

В работе [29] рассматриваются характеристики так называемого *лепесткового фитиля* (рис. 2.4, *б*), который является усовершествованием фитиля спиральной артерии. Капиллярными мостиками в нем служат лепестки из мелкой сетки. Показано, что лепестковый фитиль способен функционировать при наличии на трубе гибов малых радиусов, он мало чувствителен к избытку, а также недостатку заправленного в трубу теплоносителя.

Модулированная артерия (рис. 2.4, *в*) при одинаковой заполняемости со спиральной артерией обладает лучшими гидродинамическими свойствами и соответственно лучшей способностью к теплопереносу вследствие того, что имеет круглые капиллярные каналы. Секционирование капиллярных каналов уменьшает влияние на теплоперенос паровых и парогазовых пузырей. Тепловые трубы с такой артерией используются в качестве газорегулируемых [28]. В *модифицированной модулированной артерии* (рис. 2.4, *г*) улучшены условия для диффузии газа.

Принципиально новая идея заложена в конструкцию *туннельного фитиля* (рис. 2.4, *д*) — заполнение большого канала артерии (туннеля) посредством использования разности давлений насыщения по длине парового канала и по сечению артерии [30]. Для этого жидкость (по крайней мере в центральной части фитиля) должна быть более холодной, чем пар. При стационарной работе тепловой трубы это условие всегда выполняется, так как жидкость из конденсаторной части поступает в артерию всегда охлажденной. Первоначально вследствие действия капиллярных сил заполняется жидкостью периферийная часть артерии, образуя «шубу», в которой имеется радиальный градиент температуры. Даже малого капиллярного напора может быть достаточно для того, чтобы при заполнении создавалась разность давлений, намного превышающая капиллярный напор фитиля. Разность давлений в зависимости от температурного напора «температура насыщения пара — температура жидкости» может быть вычислена по формуле Клапейрона — Клаузиуса:

$$\Delta P = rP_{\text{п}}\Delta T/(RT^2). \qquad (2.1)$$

Под действием разности давлений происходит заполнение туннеля, паровая фаза конденсируется в нем.

Такого типа артерии способны обеспечивать заполнение каналов очень большого гидравлического диаметра и соответственно создавать теплоперенос в тепловых трубах, недостижимый при других конструкциях капиллярных систем.

Отметим, что наряду с преимуществами у туннельного фитиля есть и недостатки. При отсутствии теплопереноса, т. е. тогда, когда нет разности температур по радиусу артерии, возможно осушение туннеля. Такой же эффект возможен при быстром охлаждении тепловой трубы. Очевидно, что преимущества туннельного фитиля могут быть использованы лишь для низкотеплопроводных, т. е. неметаллических жидкостей.

Из изложенного выше следует, что выбор фитиля в значительной степени зависит от рабочего диапазона температур. Желательно проводить его выбор одновременно с выбором теплоносителя.

Выбор должен быть направлен на обеспечение конкретных требований, предъявляемых к характеристикам тепловой трубы, учитывая их комплекс, а не отдельные, хотя и важные из них. Зачастую при выборе фитиля стремятся обеспечить наибольший теплоперенос, пренебрегая рассмотрением условий пуска, обеспечением длительности ресурса работы и др. Лишь комплексный подход при выборе типа, конструкции, размеров фитиля является правильным, оптимальным.

§ 2.2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Вопросам теоретического и экспериментального определения капиллярных характеристик фитилей различного типа для тепловых труб посвящено большое число исследований [11, 15, 16, 31—42].

Коротко остановимся на некоторых наиболее распространенных методах экспериментального нахождения основных характеристик фитилей, таких, как: а) эффективный радиус пор, определяющий максимальное капиллярное давление; б) объемная пористость, необходимая для нахождения объема загрузки теплоносителя; в) проницаемость, определяющая гидравлическое сопротивление при течении жидкости.

Определение максимального капиллярного давления и эффективного радиуса пор. Гравитационный метод. Максимальное капиллярное давление для образцов фитилей (сетки различного плетения, пористые пластины, трубки и т. п.) можно измерить на установках, представленных на рис. 2.5. Разрежение в жидкости, смачивающей фитиль, создается посредством снижения уровня жидкости в сообщающемся с фитилем сосуде. Максимальное капиллярное давление находят по разности уровней жидкости в момент отрыва мениска жидкости от фитиля:

$$(P_{\text{кап}})_{\text{макс}} \equiv 2\sigma \cos\theta / R_{\text{эф}} = \gamma h. \qquad (2.2)$$

Часто измерения удобно проводить не на реальных жидкостях, которые используются в тепловых трубах, а на модельных жидкостях (вода, ацетон, спирты и др.). При сложных конфигурациях пор необходимо следить за тем, чтобы величины краевого угла θ для рабочей и модельных жидкостей были близки, иначе эффективные радиусы пор могут быть различными. Необходимо тщательно промывать установку перед проведением измерений, так как загрязнения способны изменять коэффициент поверхностного натяжения и искажать результаты измерений.

Фитили могут давать заметный гистерезисный эффект. Это явление иногда связывается с гидравлическим сопротивлением фитиля, но чаще обусловлено неоднородностью каналов.

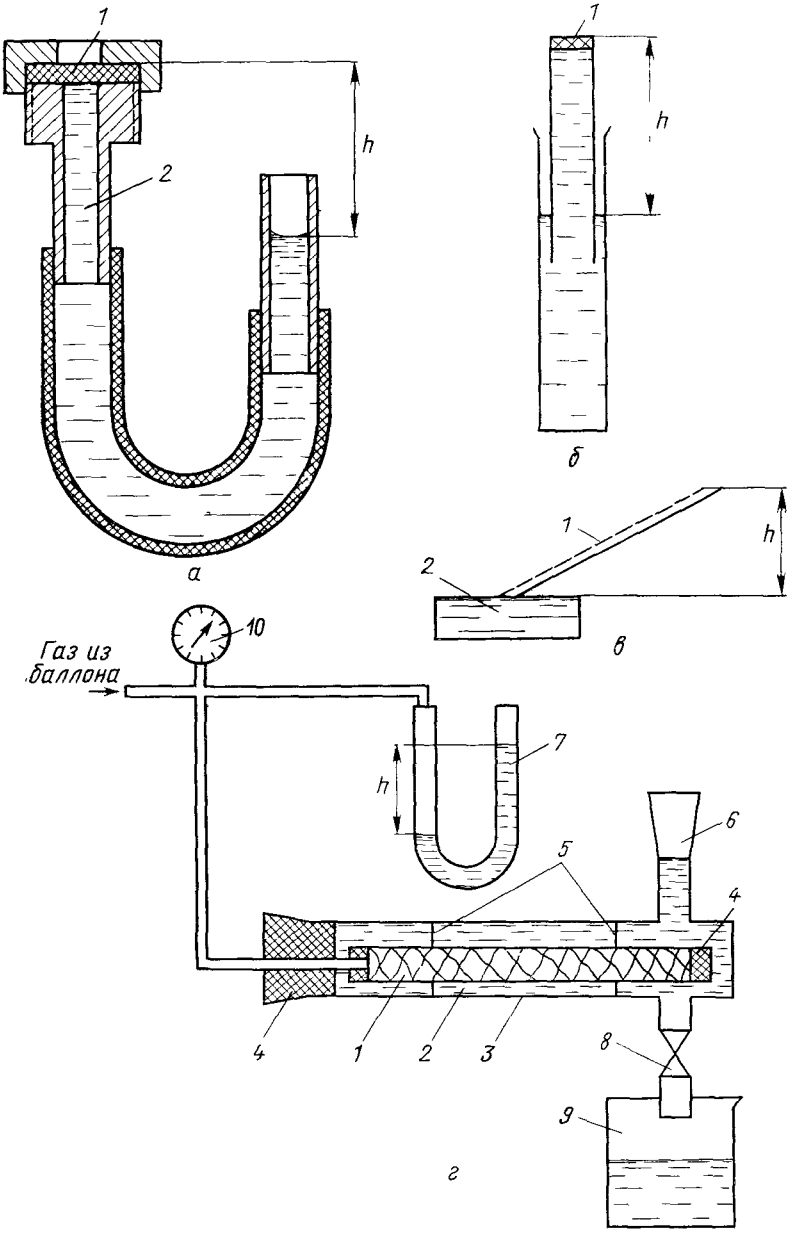


Рис. 2.5. Схемы приборов для измерения максимального капиллярного давления образцов фитилей [жидкостной манометр с U-образной трубкой (*а*); стеклянная трубка в сосуде (*б*); наклонная трубка (*в*); прибор для измерения максимального капиллярного давления в цилиндрическом экране (*г*)]:

1 — фитиль; *2* — ацетон, *3* — стеклянный цилиндр; *4* — пробка; *5* — кольцо, *6* — воронка; *7* — U-образный манометр; *8* — вентиль сливной; *9* — сливная емкость, *10* — образцовый манометр

Метод центрифугирования. Для определения максимального капиллярного давления в уже изготовленной тепловой трубе может быть применен метод центрифугирования. Тепловая труба обогревается на вращающейся установке. При постепенном увеличении измеряемого числа оборотов достигается момент, когда происходит осушение фитиля и возникает перегрев стенки.

Капиллярные силы в работающей тепловой трубе противостоят центробежным силам. Для момента, непосредственно предшествующего осушению, может быть записан баланс:

$$(P_{\text{кап}})_{\text{макс}} \equiv 2\sigma \cos\theta / R_{\text{эф}} = 2\pi^2 N_{\text{макс}}^2 L^2 \rho, \qquad (2.3)$$

где $N_{\text{макс}}$ — число оборотов; L — расстояние от нагреваемого конца трубы до центра вращения; ρ — плотность жидкости. Из уравнения (2.3) может быть найдено максимальное капиллярное давление и эффективный радиус пор фитиля, если определено $N_{\text{макс}}$. Этот принцип измерения максимального капиллярного давления на натриевой трубе использован, например, в работе Кемме [34].

Метод звукового режима. Для высокотемпературных тепловых труб, у которых организовано измерение температур в начале испарительной и в конце конденсаторной зон, а также имеется возможность плавно изменять теплоподвод и условия теплоотвода, можно измерить капиллярное давление таким образом.

Постепенно увеличивая теплоподвод и регулируя условия теплоотвода, измеряют температуру в начале зоны испарения в момент, непосредственно предшествующий осушению фитиля. При этом следует обеспечить условие: давление насыщения пара в начале зоны испарения должно быть намного выше давления в конце конденсаторной зоны, т. е. должен быть реализован звуковой режим течения пара, при котором в конденсаторной части давление пара снижается до нуля по ходу потока. Давление насыщенного пара, найденное по температуре в начале зоны испарения в момент, предшествующий осушению трубы, равно максимальному капиллярному давлению при этой температуре.

Преимущества этого метода в том, что он обеспечивает возможность проверки одной из основных характеристик фитиля для трубы, вмонтированной в установку в процессе проведения экспериментальных исследований (например, испытаний на ресурс работы и др.).

Определение объемной пористости капиллярно-пористого тела. Для нахождения пористости $\varepsilon_{\text{об}}$ достаточно измерить две из трех величин: общий объем, объем пор и собственный объем материала.

Метод, основанный на измерении объема и массы. При известной плотности материала фитиля $\rho_{\text{м}}$ объемную пористость $\varepsilon_{\text{об}}$ можно найти, измерив объем образца V_0 и его массу G:

$$\varepsilon_{\text{об}} = \frac{V_0 - G/\rho_{\text{м}}}{V_0}. \qquad (2.4)$$

Метод пропитки. Фитиль погружают в жидкость, смачивающую материал фитиля. Измеряют объем образца V_0 и объем жидкости $V_ж$, поглощенной пóрами образца. Пористость вычисляют по формуле

$$\varepsilon_{об} = V_ж/V_0. \qquad (2.5)$$

Если известен объем образца V_0 и плотность пропитывающей жидкости $\rho_ж$, то, определив массу образца до и после пропитки, также можно найти пористость:

$$\varepsilon_{об} = (G - G_0)/(V_0\rho_ж). \qquad (2.6)$$

Метод нагнетания ртути. Этот метод основан на том, что при атмосферном давлении ртуть не проникает в погруженный в нее образец, так как не смачивает его. Общий объем образца, следовательно, может быть определен по изменению уровня ртути в мерном сосуде. Если сосуд с ртутью и погруженным в ртуть образцом герметически закрыть и сильно увеличить давление, то ртуть войдет в поры, сжав запертый в них воздух до пренебрежимо малого объема, тогда вошедший внутрь образца объем ртути будет равен объему пор.

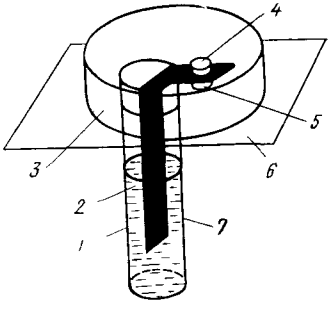


Рис. 2.6. Экспериментальная установка для определения доли насыщения фитиля методом поглощения β-излучения:
1 — стеклянный цилиндр; *2* — объем жидкости; *3* — стеклянная крышка; *4* — источник β-излучения (стронций-90); *5* — детектор β-излучения; *6* — стол; *7* — испытуемый матернал фитиля

Метод поглощения β-излучения. Наряду с объемной пористостью иногда необходимо определять и долю насыщения фитиля жидкостью в зависимости от капиллярного давления. Установка, позволяющая проводить такие измерения, представлена на рис. 2.6. Капиллярное давление в этих экспериментах определяется по подъему и опусканию уровня жидкости в стеклянном цилиндре. Доля насыщения определяется методом поглощения β-излучения в фитиле.

Измерение проницаемости капиллярно-пористых тел. Проницаемость однородного материала обычно определяют в стационарных условиях с использованием уравнения Дарси. В качестве примера приведем схему установки (рис. 2.7), использованную авторами для определения проницаемости пакета из саржевых сеток. Прямоугольные образцы из сеток в несколько слоев (7—10) укладывались в металлический пенал таким образом, чтобы жидкость протекала вдоль основы сеток. Между корпусом пенала и пакетом прокладывались паронит и вакуумная резина. Крышка пенала прижимала слои сетки при затяжке болтов. Движущий гидравлический напор обеспечивался вследствие разности уровней жидкости в напорном и сливном баках. Измерялись объемный

расход жидкости, а также разность уровней в напорном и сливном баках.

Проницаемость фитилей из прикрепленной сетки, системы параллельных пазов и некоторых других видов фитилей не может быть определена описанным выше способом, так как свободная верхняя поверхность является необходимой характеристикой этих фитилей. Более того, проницаемость может зависеть от местного перепада давления между жидкостью и паром. Примером служит

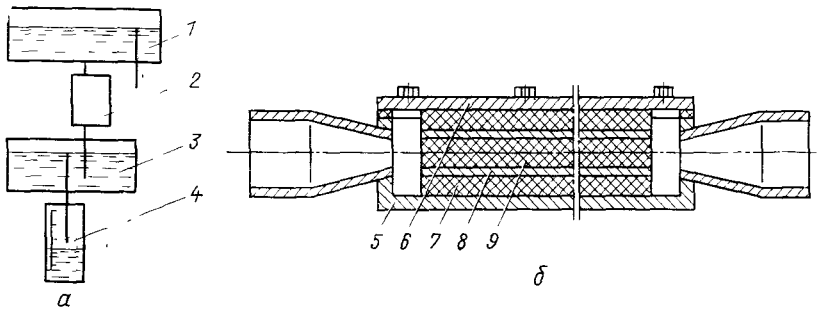


Рис. 2.7. Установка для определения проницаемости пористого материала [схема установки (*а*); пенал с образцами сеток (*б*)]:

1 — бак с постоянным уровнем жидкости; *2* — пенал с образцами сеток; *3* — сливная емкость; *4* — мерная колба; *5* — корпус; *6* — крышка; *7* — резиновые прокладки; *8* — металлические пластины; *9* —образцы сетки

фитиль из одного слоя сетки, укрепленного на стенке корпуса трубы. Если давление в жидкости заметно меньше давления в паре, мениск жидкости может достаточно сильно влиять на поток и увеличивать гидравлическое сопротивление, так как глубина мениска в любой части фитиля определяется главным образом отношением перепада давления к поверхностному натяжению. На градиент давления в фитиле может также влиять трение пара, текущего над поверхностью, а также наличие фазового перехода.

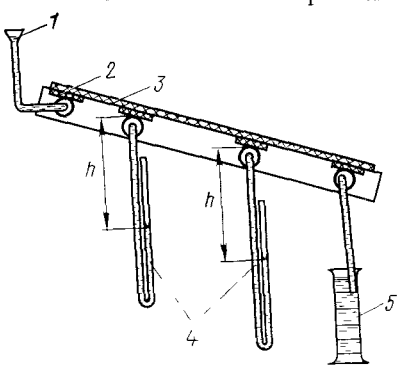


Рис. 2.8. Установка для определения проницаемости фитилей, имеющих свободную поверхность:

1 — подводящая труба; *2* — полоска из пористого материала; *3* — фитиль; *4* — дифференциальные манометры; *5*—мерная емкость

Схема установки для определения проницаемости фитилей, имеющих свободную поверхность, дана на рис. 2.8. Фитиль расположен на верхней поверхности наклонной пластины. Манометрические трубки связаны с основанием фитиля посредством тонких пористых пластинок. Жидкость подается к верхнему концу с регулируемой и измеряемой скоро-

стью и вытекает из нижнего конца фитиля при фиксированной скорости всасывания, которая определяется длиной всасывающей трубки. Скорость подачи жидкости согласована таким образом, чтобы давление было одинаково вдоль фитиля. При этом градиент давления, вызываемый гравитацией, в точности сбалансирован градиентом давления, вызываемым трением, т. е.

$$\rho g \sin \varphi = \mu W/k, \tag{2.7}$$

где φ — угол наклона фитиля по отношению к горизонтали; k — проницаемость фитиля; W — скорость жидкости. Использование жидкости, которая обладает высокой плотностью, подобно метиловому бромиду, или низкой вязкостью, подобно гексану, приведет к большим значениям W и соответственно увеличит точность измерения проницаемости фитиля.

Помимо стационарных методов измерения капиллярных характеристик фитилей используются и нестационарные. Один из таких способов описан в работе [32].

§ 2.3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ ФОРМЫ И МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Конструкционные формы. Конструкционные формы и материалы для изготовления тепловых труб различаются чрезвычайным разнообразием в зависимости от целей и условий использования. Основные факторы, определяющие конструкционные формы, следующие: 1) цель использования; 2) взаимное расположение источника и приемника тепла, условия теплообмена; 3) температурный диапазон и режим работы; 4) воздействие полей массовых сил; 5) технологические возможности изготовителя.

Примеры различных форм тепловых труб и разновидности их паровых камер приведены на рис. 2.9. Прямая цилиндрическая тепловая труба вследствие повышенной прочности и удобства изготовления корпуса получила наибольшее распространение. Цилиндрический корпус используется в различных изогнутых трубах, например кольцевых, змеевиковых, а также в трубах сложной формы, состоящих из набора сочлененных прямых или изогнутых участков. Трубы также могут иметь форму отдельных камер испарения и конденсации, соединенных конденсатопроводом и паропроводом [43] (рис. 2.9, *ж*). При необходимости корпус тепловых труб изготавливают из гибкого материала (рис. 2.9, *з*). Гибкость обеспечивается использованием металлического гофрированного тонкостенного корпуса, прорезиненной ткани, эластичных пластиков и т. п., а также применением отожженной меди (при малом числе гибов).

Часто решение той или иной технической задачи достигается лишь при одновременном использовании нескольких тепловых труб, соединенных последовательно, параллельно и в любых других комбинациях. При решении вопросов температурной проводимости и температурного регулирования в таких случаях полезно

использование аналогии с электрическими цепями — хорошо разработанный расчетный аппарат электротехники применим и для цепей из тепловых труб. Примеры способов стыковки тепловых труб приведены на рис. 2.10. Отметим, что при параллельной работе тепловых труб неодинаковость термических сопротивлений

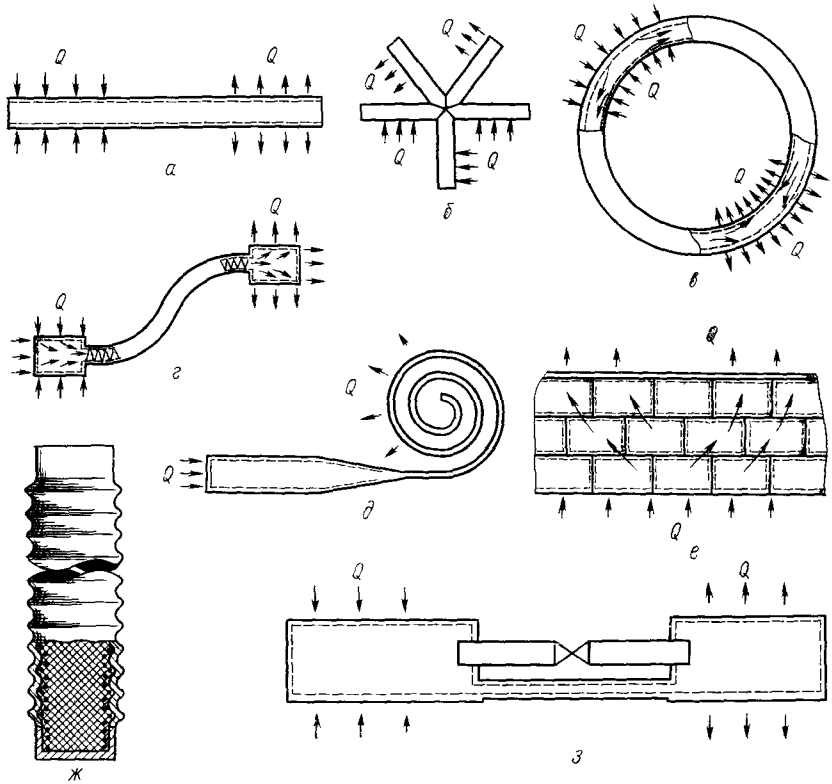


Рис. 2.9. Различные типы конструкционного выполнения тепловых труб: цилиндрическая (*а*), У-образная (*б*), кольцевая (*в*), гибкая (*г*), спиральная (*д*), паровая камера (*е*); сильфонообразная (*ж*); с разделенным конденсатопроводом и паропроводом (*з*)

цепей может привести к тепловой перегрузке труб с малым сопротивлением, возможно превышение максимальной мощности и осушение труб. В таких случаях необходимо подобрать трубы с приблизительно одинаковым сопротивлением либо, если это возможно, вводить дополнительные термические сопротивления, уравнивающие сопротивление параллельных цепей.

Изготовление тепловых труб. Изготовление тепловых труб включает в себя следующие операции: 1) изготовление корпуса и торцевых заглушек; 2) изготовление капиллярной структуры; 3) удаление загрязнений с поверхности деталей тепловой трубы;

4) сборка конструкции; 5) заполнение теплоносителем; 6) герметизация; 7) проверочные испытания.

Материал корпуса трубы подбирается так, чтобы удовлетворить требованиям прочности и коррозионной совместимости с теплоносителем. Вопросы прочности, в частности, особенно важны для криогенных тепловых труб при температурах хранения, если теплоноситель находится в надкритическом состоянии или имеет высокое давление насыщенного пара. Иногда приходится прибегать к размещению теплоносителя при этих условиях в дополнительной емкости. Чтобы удовлетворить противоречивым требованиям прочности и совместимости, можно использовать при изготовлении корпуса сочетание двух материалов, каждый из которых выполняет определенную функцию. Например, тепловые трубы, работающие с водяным теплоносителем, могуть быть изготовлены из нержавеющей стали с медным покрытием изнутри. Высокотемпературные трубы для работы при температуре выше 1000° С могут быть изготовлены из молибдена с вольфрамовым покрытием изнутри для уменьшения коррозионных эффектов.

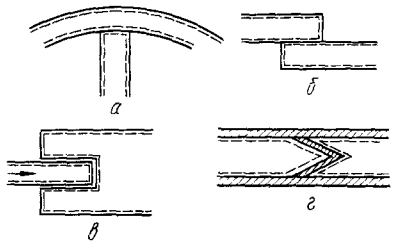


Рис. 2.10. Соединение тепловых труб встык (*а*), внакладку (*б*), внахлест (*в*), пример интегрального соединения (*г*)

Основные трудности при изготовлении тепловых труб связаны с созданием фитиля. Фитили могут быть изготовлены из того же материала, что и корпус трубы, или из другого материала, исходя из требований, предъявляемых к ним, относительно работы, технологичности и экономичности. Для мягких материалов (например, сплава алюминия) канавочные структуры часто изготавливаются непосредственно в корпусе трубы. При этом широко используется метод экструзии.

Для твердых материалов (типа вольфрама) способы механического изготовления канавок непригодны. В этих случаях используют метод осаждения паров металлов на охлаждаемую подложку, имеющую форму капиллярной структуры [44]. Можно изготовлять капиллярные структуры посредством плазменного напыления материала на подложку, которая затем вытравливается кислотами [45].

Канавочные капиллярные структуры изготавливают и посредством набора пластинок, собранных с помощью колец и помещенных внутри корпуса тепловой трубы. Капиллярные каналы при этом образуются посредством зазора между пластинами. Более прогрессивен метод создания канавочной структуры в виде цельного вкладыша, помещаемого в корпус тепловой трубы [17]. На вкладыше выфрезерованы продольные прорези. Технология изготовления его представлена на рис. 2.11. Изготовление вкладыша

осуществляется в следующей последовательности: 1) продавливание круговых канавок; 2) обтачивание вкладыша; 3) фрезерование продольных щелей; 4) химическое вытравливание оправки, находящейся внутри вкладыша.

Обработка проводится на внешней поверхности трубы, следовательно, возможно изготовление длинных вкладышей сравнительно малого диаметра.

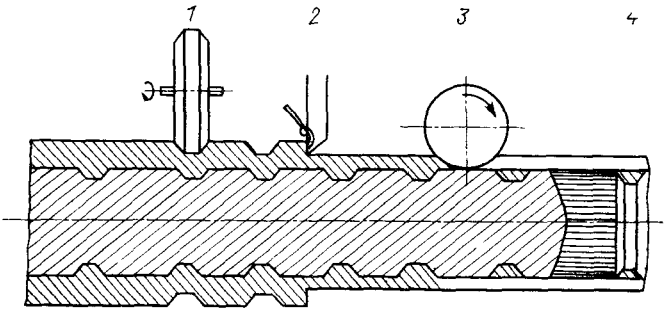


Рис. 2.11. Технологическая схема изготовления капиллярной втулки [17]:
1 — продавливание круговых канавок; *2* — обтачивание; *3* — фрезерование продольных щелей; *4* — химическое вытравливание оправки

Трубы с канавочной капиллярной структурой можно изготовить из листового материала. Например, в работе [19] на плоских листах никеля фрезеровались прямоугольные каналы, затем листы свертывались в цилиндры и проваривались продольно по шву.

При использовании капиллярной структуры с аксиальными канавками любой геометрии необходимо предусматривать соединение канавок между собой по периметру трубы, так как в противном случае при наземной горизонтальной работе трубы неравномерное распределение теплоносителя по канавкам приводит к появлению «горячих» пятен на поверхности корпуса в зоне нагрева.

Оптимальные размеры канавок зависят от многочисленных факторов: геометрии трубы, теплофизических параметров теплоносителя и переносимой мощности. Для ориентировки в табл. 2.3 приведены оптимальные значения отношения половины ширины

Таблица 2.3

Оптимальный размер аксиальных канавок

Теплоноситель	Cs	Rb	Na	Li	Bi	Pb	Ag
Температура, °С	450	470	820	1300	1600	1800	2000
(R/r)	9	13	15	17	18	16	25
Максимальная мощность трубы, кВт	3,3	5,6	33	95	22	29	63

канавки r к радиусу трубы R для нескольких металлических теплоносителей тепловых труб длиной 0,5 м с диаметром парового канала 20 мм при давлении пара теплоносителя в трубе 10^5 Па [46]. Глубина канавок принята вдвое большей ширины, то есть равной $\sim 4r$.

Примеры продольных каналов различного вида представлены на рис. 2.12 [47]. Сплошной экран с выштамповкой вследствие возможности запаривания применим только в адиабатической зоне тепловой трубы.

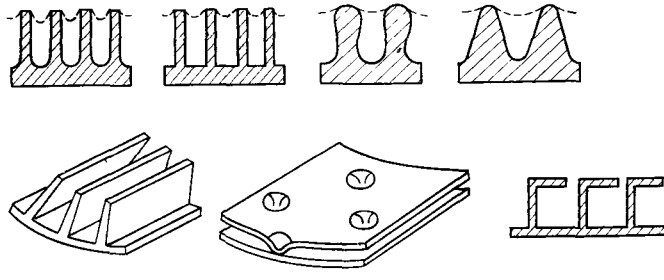


Рис. 2.12. Различные типы продольных каналов [47]

Следует отметить, что однородная по длине трубы капиллярная структура явно не оптимальна (в частности, для тепловых труб, работающих наклонно с использованием силы тяжести).

Канавки на внутренней поверхности корпуса тепловой трубы могут быть выполнены не на всей длине, а лишь в зоне нагрева. Так как изготовление каналов малых размеров часто весьма трудоемко, возможна комбинация из каналов больших размеров вне зоны испарения и малых размеров в зоне испарения.

Часто применяются фитили, использующие одну из разновидностей канавочной структуры — винтовую нарезку на внутренней поверхности стенки тепловой трубы [48—52]. Форма каналов винтовой нарезки при этом может быть различной. В работе [48], например, предложена винтовая нарезка треугольного профиля с большим шагом. Возможно изготовление винтовой нарезки с малым шагом, но с пересечением ее глубокими винтовыми прямоугольными пазами с шагом на порядок большим. Такая пересекающая винтовая нарезка обеспечивает сообщение отдельных каналов между собою, улучшает условия работы капиллярной структуры [49]. Преимуществом винтовой капиллярной структуры является то, что она несколько уменьшает унос жидкости из фитиля в паровой поток.

Сетки различного плетения (с квадратной ячейкой, саржевого плетения, односторонние и двусторонние) наиболее широко используются при изготовлении фитилей. Одно из первых предложений по использованию сетчатых фитилей было в патенте аб-

сорбционного холодильника [53]. Сетка, расположенная на внутренней поверхности абсорбера, должна была служить для поднятия жидкости в верхнюю часть холодильника. Позднее Гауглер [54] предложил использовать сетчатую ленту, уложенную, например, в форме спирали на внутренней стенке абсорбера. Кроме винтовой спиральной или сплошной сетки на внутренней поверхности холодильника, им также предложено использовать капиллярные каналы в виде трубок, которые позднее стали называть артериями. Капиллярные трубки предлагалось изготавливать из трех слоев сеток различной пористости и прижимать к стенке тонкой закрученной перфорированной лентой. Предусматривался слой тонкой сетки, который должен был «герметизировать» артерию и предотвращать проникновение газа внутрь ее. Артерии предлагались как параллельно расположенные, так и свитые в виде спирали. Предлагалось также помещать внутри артерии толстую проволоку, предназначенную для конденсации пара [55].

Сетки для пористых фитилей удобно приварить к корпусу тепловой трубы. Однако такой способ крепления сетки надежен лишь в том случае, если корпус и фитиль изготовлены из одного или близких по коэффициенту расширения материалов. Когда материалы фитиля и корпуса трубы плохо свариваются, можно покрыть корпус слоем материала, свариваемого с сеткой. Так, корпус трубы из алюминия гальваническим способом покрывают изнутри никелем, а затем точечной сваркой крепят сетку из нержавеющей стали к никелевому покрытию [56]. Сцепление никелевого покрытия с алюминиевым корпусом обеспечивает прочность всего соединения.

Изотропные по своей структуре фитили, как правило, не удовлетворяют оптимальным требованиям тепло- и массопереноса (в частности, при парообразовании в фитиле). Поэтому часто в качестве фитилей применяют комбинации металлических сеток с различной проницаемостью. Сетки с высокой проницаемостью укладывают у стенки, а мелкопористые — у поверхности раздела фаз [57]. Для тепловых труб с испарением теплоносителя с поверхности фитиля анизотропный (по своему характеру составной) фитиль может увеличивать теплоперенос на порядок по сравнению с изотропным. Для тепловых труб с кипением теплоносителя в зоне испарения анизотропный фитиль также лучше изотропного, только в этом случае порядок расположения сеток с мелкими и крупными ячейками должен быть противоположным (т. е. мелкоячеистая сетка должна укладываться у стенки, а крупноячеистая — у поверхности раздела фаз [58]). В таком случае образуется коническая форма радиальных капилляров, способствующих более успешному удалению паровых пузырей от поверхности нагрева. Мелкоячеистая сетка у поверхности нагрева обеспечивает необходимую доставку жидкости.

Металлические фитили могут быть изготовлены также в виде нескольких жгутов проволоки. Гибкие капиллярные пучки выполняются из отрезков проволоки. Для удержания проволоки в пучке

ее скручивают по спирали или обвивают проволокой. Пучкам можно придавать самую различную форму.

Капиллярная структура металловолокнистых фитилей (металлический войлок) изготавливается из предварительно измельченной проволоки, которая затем прессуется в ленту или трубку и подвергается горячему спеканию. При спекании может быть осуществлена приварка войлока к стенке корпуса тепловой трубы. Горячее прессование применимо при изготовлении капиллярных структур из сеток [59].

Для составных фитилей кольцевого типа мелкопористый экран изготавливают отдельно, проверяют его капиллярные характеристики, и лишь затем его устанавливают в корпус тепловой трубы с зазором между стенкой и экраном. Способы изготовления экранов разнообразны. По́ры не слишком малой величины могут выполняться механически в тонкостенной трубке. Мелкопористые фитили обычно изготавливаются из тонких тканых сеток. Для жесткости и исключения дефектов (больших пор) часто применяют многослойные экраны. Два или три слоя сетки саржевого плетения плотно наматывают на оправку и проваривают вдоль [60, 61].

Глава 3

ЗАПОЛНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

При заполнении тепловых труб теплоносителем необходимо решить следующие задачи:

1) обеспечить достаточно глубокую очистку конструкционных материалов трубы и теплоносителя от нежелательных примесей, в том числе в достаточной степени удалить из трубы и теплоносителя неконденсирующиеся газы;

2) обеспечить достаточную точность дозирования теплоносителя;

3) осуществить герметизацию тепловой трубы;

4) обеспечить смачивание теплоносителем фитиля и стенок тепловой трубы.

Очевидно, что очистка теплоносителя и элементов тепловой трубы, методы заполнения и герметизации могут сильно различаться в зависимости от применяемых материалов и теплоносителя, от уровня рабочих температур и требований, предъявляемых к работе трубы. Теплоноситель может очищаться механическим, химическим способами или посредством вакуумной дистилляции, а затем вводится в тепловую трубу в твердом, жидком или парообразном состоянии. Дегазация элементов трубы может осуществляться без нагрева и при нагреве в вакууме. Смачивание теплоносителем фитиля и стенок тепловой трубы может наступать сразу при введении теплоносителя, либо, как это имеет место со ртутью, после многочасового прогрева при наличии смачивающих добавок. Наибольшую сложность, пожалуй, представляют вопросы, связанные с качественным заполнением тепловых труб жидкими металлами.

§ 3.1. ОЧИСТКА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Состояние примесей. При использовании жидких металлов в высокотемпературных тепловых трубах существенное значение имеют газовые и металлические примеси. Легкодиссоцинрующие соединения типа гидридов щелочных металлов могут при нагреве теплоносителя разлагаться и выделять большое количество неконденсирующегося газа. При нагреве также выделяются в газовую фазу примеси газов, находившиеся в растворе. Неконденсирующиеся газы могут существенно влиять на работу тепловой тру-

бы: увеличивать ее неизотермичность, блокировать часть рабочей поверхности зоны конденсации. Выделяясь в зазоре между капиллярной сеткой и стенкой, газы могут приводить к осушению составных фитилей и т. д.

Соединения типа окислов могут скапливаться в порах в зоне испарения и закупоривать капиллярные отверстия фитиля. Примеси также существенно влияют на коррозионную стойкость конструкционных материалов в жидких металлах.

Количество и формы существования примесей в зависимости от конкретных условий изменяются в самых широких пределах. Они могут находиться в жидком металле как в виде молекулярного раствора, так и в виде твердой фазы, в свободном виде и в виде простых, сложных и комплексных соединений, в виде интерметаллидов и т. п.

Форма существования примеси существенно влияет на свойства жидкого металла, определяет применение того или другого метода очистки и контроля. Так, перераспределение неизменного количества кислорода между металлическими примесями в растворе, например между кальцием, барием, литием и т. п. в растворе лития, при изменении температуры приводит к изменению сигнала прибора, контролирующего содержание кислорода в литии по изменению электросопротивления. Эффективность дистилляционного метода очистки выше, если примесь находится в виде термически устойчивых соединений. Особое значение форма существования примеси в остатке после дистилляции имеет для дистилляционного метода контроля чистоты жидких металлов. В зависимости от формы примеси выбирают и метод количественного определения примеси в остатке после дистилляции.

Знание формы существования примесей в жидких металлах необходимо для понимания процессов очистки и контроля чистоты, для понимания поведения примесей при изменении температурных и концентрационных условий, для анализа процессов газовыделения из жидких металлов и процессов коррозии. Известные и применяемые в настоящее время методы физико-химического анализа жидких металлов, как правило, не позволяют определить, в форме какого соединения находится тот или другой элемент примеси. Необходимо дальнейшее развитие методик определения форм существования примесей посредством физических, химических, рентгеноструктурных и других анализов. Предварительное суждение о состоянии примесей можно составить, используя расчетный аппарат химической термодинамики. Химико-термодинамические расчеты могут быть выполнены, если известны величины, характеризующие термодинамическую стабильность соединений, которые вступают во взаимодействие друг с другом в растворе жидкого металла. Такими величинами являются изменения изобарно-изотермических потенциалов реакций взаимодействия или реакций образования примесей $\Delta Z_{т}^{0}$. Так как для точного расчета необходимы эмпирические константы (например, активность a), отсутствующие в большинстве случаев, то расчеты могут быть

выполнены лишь при некоторых упрощающих предпосылках. Однако, даже несмотря на упрощения, с помощью термодинамических расчетов можно получить представления о характере системы жидкий металл — примеси, о взаимосвязях между отдельными элементами и об основных закономерностях, которым эти взаимосвязи подчиняются.

При расчетах состояния примесей учитываются существование параллельных (одновременно протекающих) реакций взаимодействия одной примеси, например водорода, с другими (кислородом, натрием, литием, калием, магнием, железом и т. п.), учитываются реакции термической диссоциации продуктов взаимодействия и т. д. В жидком металле могут существовать одновременно многие формы одной и той же примеси. Количественное соотношение этих форм определяется равновесным состоянием одновременно протекающих реакций взаимодействия между ними и характеризуется термодинамической константой равновесия. Для обобщенной реакции взаимодействия теплоносителя (жидкого металла) $Me_т$ с металлическими примесями $Me_п$

$$(Me_т)_2O + \frac{A}{B} Me_п \rightleftarrows \frac{1}{B} (Me_п)_A O_B + 2Me_т$$

константа равновесия K_a равна

$$K_a = a^2_{Me_т} a^{1/B}_{(Me_п)_A O_B} / \left(a^{A/B}_{Me_п} a_{(Me_т)_2O}\right), \qquad (3.1)$$

где a — термодинамическая активность теплоносителя.

Реакции взаимодействия между различными формами примеси протекают при избытке теплоносителя (жидкого металла). В этом случае активность теплоносителя

$$a_{Me_т} = 1. \qquad (3.2)$$

Для решения уравнения (3.1) относительно концентраций компонентов, участвующих в реакции, необходимо установить связь между активностью компонента и его мольной концентрацией N_i:

$$a_i = \gamma N_i. \qquad (3.3)$$

Коэффициент активности γ обычно определяют экспериментально. Применительно к жидкометаллическим растворам активность может быть приблизительно подсчитана по формуле

$$a_i = N_i / N_i^н, \qquad (3.4)$$

где N_i и $N_i^н$ — соответственно мольная концентрация i-й примеси в жидком металле и концентрация насыщения при данной температуре. Это соотношение справедливо для растворов с ограниченной растворимостью i-го компонента.

Для определения количественного равновесного соотношения между различными формами существования данного примесного элемента в растворе жидкого металла проводится совместное ре-

шение системы уравнений типа (3.1) для всех параллельно протекающих реакций взаимодействия.

В результате термодинамических расчетов и экспериментальных исследований форм существования примесей установлены основные формы существования неметаллических примесей в щелочных металлах [1].

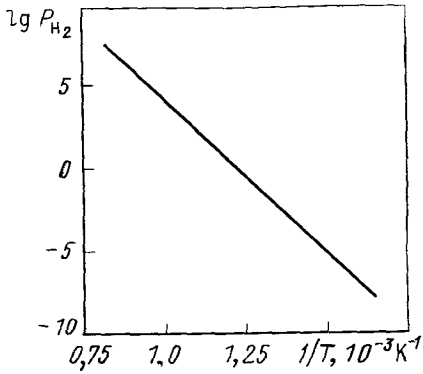


Рис. 3.1. Зависимость давления водорода от температуры при диссоциации гидрида лития

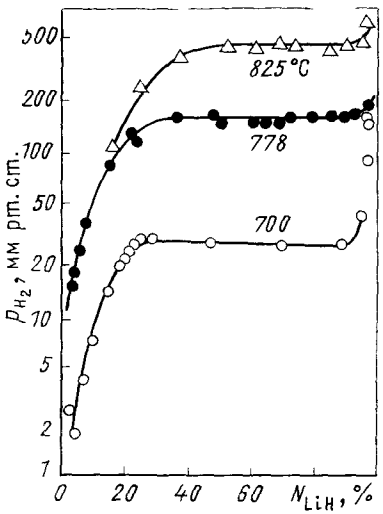


Рис 3.2. Давление диссоциации в зависимости от концентрации LiH в Li

Примеси в расплавленном литии. Кислород при избытке лития существует лишь в форме Li_2O и в виде окислов некоторых металлических примесей. При изменении температуры и общей концентрации кислорода происходит перераспределение кислорода между Li_2O и BeO, MgO и CaO. Однако от окисей бериллия, магния, кальция литий, натрий и другие щелочные металлы можно очистить вакуумной дистилляцией. Азот в литии находится в виде нитрида Li_3N, углерод в виде карбида Li_2C_2. Могут быть также нитриды бериллия, титана, кальция и циркония и карбиды титана и циркония. Наиболее вероятной формой существования водорода в литии является гидрид лития LiH. Гидрид лития легко диссоциирует. Давление диссоциации гидрида лития в зависимости от температуры дано на рис. 3.1. При данной температуре равновесно существуют раствор гидрида лития в литии и существенное количество свободного водорода над поверхностью расплавленного лития. Парциальное давление водорода зависит от температуры системы и концентрации гидрида лития в литии. На рис. 3.2 приведено давление свободного водорода над поверхностью лития в зависимости от температуры и концентрации гидрида лития в литии [2]. По мере увеличения концентрации гидрида в растворе, как видно из рисунка, растет давление свободного водорода при данной температуре. При достижении кон-

центрации насыщения дальнейшее увеличение количества гидрида приводит к увеличению нерастворенной твердой фазы гидрида. При этом концентрация растворенного гидрида постоянна и равна концентрации насыщения. Давление водорода тоже постоянно и равно давлению диссоциации гидрида лития при данной температуре. В области очень высоких концентраций гидрида (близких к 100%, т. е. в области растворов жидкого металла в гидриде) давление свободного водорода может существенно превышать давление диссоциации чистого гидрида.

Зависимость давления водорода над ненасыщенным щелочным металлом и, в частности, над ненасыщенным литием от концентрации водорода в литии близка к параболической. Аналогичное равновесие между газом и раствором в металле существует и в системе литий — азот, литий — углекислый газ и т. п. Однако равновесное давление азота и тем более кислорода при той же температуре значительно ниже давления водорода.

Следует отметить, что соединения водорода с металлическими примесями в литии маловероятны, так как количество металлических примесей существенно более активных к водороду, чем сам литий, пренебрежимо мало.

Примеси в расплавленном натрии и калии. Натрий, в отличие от лития, имеет менее прочную молекулу окиси. Поэтому картина распределения кислорода значительно сложнее, чем лития. Так, кислород в натрии может находиться в виде окиси натрия и окислов металлических примесей натрия. Кроме того, кислород может быть в виде гидроокиси NaOH и карбоната Na_2CO_3. Возможно присутствие в натрии ацетилидов $NaCH_2$ и метанидов CH_3Na натрия. Однако последние соединения термически непрочны: так, ацетилид разлагается при температуре 210° С. Азот в натрии существует в виде молекулярного раствора и в виде нитридов металлических примесей. Он также может образовывать сложные комплексы с углеродом и с кислородом, например соединения типа CN.

Водород в натрии существует в основном в виде гидрида NaH и при наличии кислорода, не связанного в прочные окислы, в виде NaOH.

В калии имеются те же примеси, что и в натрии. Однако в отличие от натрия в калии более вероятны соединения с кислородом не в виде окиси, а в виде карбоната и гидроокиси. Причем карбонат — наиболее прочное соединение.

Примеси в цезии. В цезии кислород присутствует не только в окисной форме, но и в гидроокисной CsOH. При температуре цезия ниже 500° С в основном будет существовать гидроокись, а избыточные над гидроокисью доли кислорода или водорода будут образовывать окись цезия или его гидрид. Давление водорода над диссоциирующими соединениями цезия при 300° С составляет над гидридом CsH $5 \cdot 10^4$ Па, а над CsOH $1 \cdot 10^{-16}$ Па.

Этот пример с давлением свободного водорода показывает, насколько важна для дегазации металлов и для определения коли-

чества неконденсирующихся газов в парáх металлов форма примеси в металле. Так, водород в цезии легко диссоциирует в виде гидрида и практически не выделяется в присутствии кислорода. Таким образом, кислород можно считать хорошим геттером при очистке цезия от водорода (например, в процессе дистилляции).

Очистка жидкометаллических теплоносителей. Химическая очистка. Химическая очистка жидких металлов основана на восстановлении примесей, растворенных в теплоносителе. В результате этого процесса образуется соединение очищаемой примеси с восстановителем (геттером). Соединение с геттером должно быть менее растворимым в теплоносителе, чем исходное соединение примеси с теплоносителем. Применяемые для химической очистки геттеры могут быть использованы, как правило, для очистки теплоносителя от определенных примесей.

Предварительный подбор геттеров может быть проведен на основе химико-термодинамических расчетов реакций геттера с примесью или группой примесей в теплоносителе по той же методике, что и расчет состояния примеси в теплоносителе.

Из всего многообразия принципиально пригодных геттеров наиболее приемлемыми на практике следует считать для очистки от кислорода лития — кальций, иттрий; для цезия, натрия, калия и их сплавов — цирконий и титан. Для очистки лития, цезия, натрия и калия от азота и углерода также весьма эффективными являются цирконий и титан. Таким образом, с помощью набора, по существу, из трех доступных и дешевых геттеров (титана, циркония, кальция) можно очистить литий, цезий, натрий и калий от основных примесей (кислорода, азота, углерода). Каждый из этих геттеров теоретически обладает способностью к достаточно глубокой очистке. Так, остаточная концентрация кислорода в условиях термодинамического равновесия при очистке натрия и калия по весу во много раз меньше 10^{-6}% для таких геттеров, как титан и цирконий. При экспериментальном изучении этих геттеров нами было установлено, что литий очищается от кислорода с помощью кальция до концентраций (по массе), меньших 10^{-4}%.

При очистке сплава натрия с калием при помощи циркониевого геттера установлена зависимость поглощенного цирконием кислорода от времени при различных температурах (мг/см^2):

$$g = a + b\sqrt{\tau}, \qquad (3.5)$$

где $a = 95 \exp(-9600/RT)$; $b = 21{,}7 \exp(-10000/RT)$; τ — время, ч; T — температура, К.

Зависимость получена для температур 550—650° С, времени более 4,4 ч и толщины циркониевой фольги 0,2—0,25 мм. Анализ собственных и литературных данных показал, что скорость процесса очистки определяется скоростью диффузии кислорода в циркониевой фольге. Скорость омывания геттера теплоносителем и концентрация кислорода в нем практически не сказываются на

скорости очистки. Исключения составляют режимы, когда при слишком малой скорости теплоносителя или очень малой концентрации кислорода скорость подвода кислорода к геттеру меньше его поглощающей способности.

Растворимость циркония в жидком металле пренебрежимо мала. Образующаяся на поверхности циркония пленка двуокиси прочно сцеплена с основой. Опасность ее отцепления и потери практически отсутствует при поглощении кислорода на единицу поверхности циркония меньше 2 мг/см^2. Это установлено путем металлографических исследований и измерений механических свойств циркониевой фольги толщиной 0,2 мм. Титан образует на поверхности хрупкую пленку. Это, с одной стороны, увеличивает скорость очистки, так как в реакцию постоянно вступают свежие, не покрытые пленкой, участки поверхности геттера. Но, с другой стороны, нужно принимать меры по улавливанию окиси титана в жидком металле. Свойствами, аналогичными свойствам самого титана, обладают и его 25-, 50- и 75%-ные сплавы с цирконием.

Более сложен подбор геттеров и очистка от водорода. Особенность водородных соединений с геттерами — их относительная непрочность. Так, очистка лития от водорода путем связывания водорода в химическое соединение с геттером практически невозможна. Однако можно существенно снизить концентрацию гидридов лития в литии, предварительно поместив в него торий, лантан или, наконец, кальций и затем провести дистилляцию, дистилляцию с дефлегмацией или ректификацию. Несколько более прочные гидриды геттеров будут концентрироваться после дистилляции лития.

Для химической очистки натрия, калия, цезия от водорода можно применять литий в качестве растворимого геттера. Преимущество растворимых геттеров перед нерастворимыми состоит в том, что очистка протекает с высокой скоростью при значительно меньшей температуре. В этом случае отсутствует самый медленный этап процесса очистки — диффузия примеси в материал твердого геттера.

Однако у растворимых геттеров есть недостаток, связанный с необходимостью сбора соединения примеси с геттером в специальном устройстве, например в холодной кристаллизационной ловушке или в кубовом остатке после дистилляции.

Растворимость лития в натрии и калии неизвестна. Однако прямые опыты показывают, что при 350° С в сплаве Na—K может быть растворено по массе не менее 0,1% лития.

Реакция взаимодействия лития с водородом в сплаве Na—K при 350° С завершается быстро, менее чем за 15 мин.

Еще более эффективно, чем литий, можно использовать растворимый геттер — кальций. Ввиду своего высокого химического сродства к примесям и литий, и кальций способны восстанавливать в остальных щелочных металлах все вредные примеси.

Дистилляционный метод очистки жидких металлов. Дистилляция, как метод очистки металлов от металли-

ческих и неметаллических примесей, получила широкое распространение. Она позволяет получать металлы рекордно высокой чистоты. Это метод со сравнительно высокой производительностью и высокой эффективностью отделения основного металла от примесей.

Дистилляционный метод очистки металлов в вакууме основан на различии упругости паров и скоростей испарения, конденсации основного металла и содержащихся в нем примесей. В результате этого содержание примесей в конденсате отличается от содержания их в исходном металле. Процесс дистилляции включает в себя несколько последовательно протекающих стадий: прогрев расплава до температуры испарения, испарение со скоростью, зависящей от параметров испарения, конденсация паров на поверхности конденсатора при заданной температуре. Процесс дистилляции неравновесен. Жидкость в испарителе должна иметь несколько бо́льшую температуру, чем температура конденсата, для того, чтобы избыточное давление пара уравновешивало потери давления при движении пара к поверхности конденсации. Учитывая, что дистилляция, как правило, происходит при низком давлении, следует учитывать термическое сопротивление фазового перехода и связанный с этим перепад температуры [3]. При низких давлениях дистилляции гидростатическое давление столба жидкого металла в испарительном сосуде может существенно превышать давление пара металла у поверхности испарения. В области низких давлений температура насыщения сильно зависит от давления. Поэтому температура насыщения у дна сосуда может на сотни градусов превышать температуру насыщения у поверхности жидкости вследствие гидростатического давления. Для возникновения кипения и образования пузырьков пара у обогреваемого дна сосуда нужен соответствующий перегрев. При низких давлениях необходимый для вскипания перегрев может составлять сотни градусов. Такой перегрев в жидком металле обычно невозможен ввиду высокой теплопроводности металлов. Поэтому дистилляция происходит за счет испарения металлов с поверхности без кипения. Как правило, при дистилляции над поверхностью испарения имеется достаточно высокое давление газов и имеет место вязкостное течение пара. В этом случае действительная скорость испарения уменьшается. Большое влияние на скорость дистилляции оказывают состояние и чистота поверхности испарения. Так, присутствие на поверхности пленки нелетучих примесей может существенно снизить коэффициент испарения, уменьшить скорость и даже вообще практически прекратить испарение. Летучие пленки окислов могут увеличить скорость испарения металлов в присутствии остаточного давления кислорода.

Остаточные неконденсирующиеся газы могут сильно понизить (при большом содержании газов практически до нуля) скорость дистилляции вследствие существенного диффузионного сопротивления в процессе конденсации.

Разделение примесей в процессе дистилляции возможно, если парциальные давления очищаемого металла и примесей, содержащихся в них, существенно различаются, т. е. если степень разделения компонентов $P_1/P_2 \neq 1$. В процессе дистилляции происходит постоянное изменение составов пара и остатка. Так, первые порции пара наиболее обогащены легколетучим компонентом. Последняя капля жидкости имеет наименьшее содержание легколетучей примеси. В связи с этим нельзя допускать полного испарения остатка. В испарителе должна оставаться значительная часть жидкости.

Вторым этапом процесса дистилляции, регулирующим степень разделения металлов, является процесс конденсации. Большое влияние на степень разделения компонентов пара при конденсации оказывает температура конденсации. С уменьшением температуры конденсации уменьшается парциальное давление легколетучего компонента над конденсатом. Например, повышение температуры конденсации может привести к лучшей очистке от легколетучей примеси. Чрезмерное повышение интенсивности конденсации, т. е. удельного потока при конденсации, может привести к ухудшению разделения, в частности, из-за того, что более летучие компоненты могут оказаться под слоем менее летучих, не успев испариться.

Описанный выше процесс дистилляции достаточно широко распространен и применяется для очистки различных металлов. Однако с помощью такого простого процесса невозможно получить дистиллят с бóльшим содержанием, например, легкокипящего компонента, чем в равновесном исходному раствору паре в начале процесса дистилляции.

Более полное разделение можно получить дистилляцией с дефлегмацией. Пар, выходящий из испарителя, имеет концентрацию легколетучего компонента, равновесную раствору в испарителе. В процессе дефлегмации осуществляется частичная конденсация этого пара в дефлегматоре до температуры дефлегматора, более высокой, чем температура конденсатора. При этом из пара конденсируются в первую очередь труднолетучие компоненты. Легколетучие составляющие конденсироваться не могут, так как температура в дефлегматоре достаточно высока. Оставшийся пар, обогащенный таким образом легколетучим компонентом, поступает в конденсатор и там полностью конденсируется.

Наибольшая эффективность разделения (очистки) достигается в ректификационных установках, в которых происходит ряд последовательных процессов дефлегмации и обогащения пара легколетучим компонентом. Однако, несмотря на высокую эффективность разделения, ректификационные установки для очистки жидких металлов не применялись.

Параллельно с испарением металлов в вакууме происходит их дегазация в первую очередь вследствие уменьшения растворимости газов при понижении давления. Кроме того, при нагреве происходит термическая диссоциация соединений примесь — металл. Эффективность дегазации в значительной степени зависит от

взаимодействия откачиваемых газов с конденсатом. Для предотвращения загрязнения конденсата выделяющимися газами их можно связать в выпарном устройстве в труднолетучие (недиссоциирующие) соединения. Применение в выпарном устройстве геттеров, образующих с газовыми примесями прочные нелетучие соединения, позволяет лучше очищать металлы от примесей.

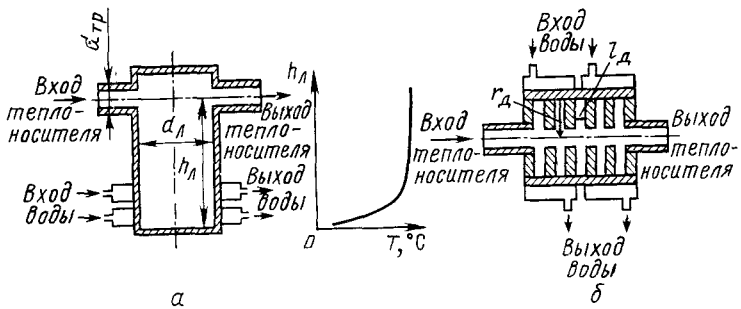


Рис. 3.3. Схема диффузионной (*а*) и дисковой (*б*) холодных ловушек

Близок к дистилляции процесс обезгаживания металлов. Вакуумной откачкой при невысокой температуре можно в основном удалить газы, растворенные в металле и выделяемые вследствие диссоциации непрочных примесей. Практически методом вакуумной откачки из щелочных металлов удаляют водород и иногда азот. Так, посредством вакуумной откачки при температуре 350° С авторам удалось уменьшить содержание водорода в натрии по массе от 10^{-1} до 10^{-4}%.

Наиболее изучена дистилляция лития. Экспериментальные данные показывают, что дистилляция позволяет лучше очищать литий от металлических примесей (кроме стронция) и хуже — от газовых. Основная причина плохой очистки от газовых примесей — загрязнение конденсата кислородом и азотом вследствие недостаточной герметичности установок, а также наличия в парах достаточного количества газов. Дистилляцию чаще проводят при вакууме 13,3—0,133 Па и температуре для лития 650—750° С, для натрия и калия около 450° С.

Отстаивание. Опыт показывает, что отстаивание — эффективное средство освобождения расплавленного металла от основной массы взвешенных примесей. Обычно металл отстаивается в баках, служащих для загрузки в дистилляционную установку или непосредственно в рабочую установку. Несмотря на все меры предосторожности, металлы, загружаемые в плавильные баки в виде кусков, сильно загрязняются. Содержание кислорода в щелочном металле при этом может достигать 0,2%. При температуре, близкой к температуре плавления, основная часть примесей находится в виде взвешенной в металле твердой примесной фазы и вследствие различия в удельном весе эффективно отстаивается. Время отстаивания в

баке высотой 500 мм составляет для щелочных металлов 4—8 ч (если приняты меры против конвективного перемешивания). После отстаивания металл сливается в другую емкость через трубу, срез которой помещается в отстойнике на достаточном расстоянии от дна, чтобы вместе с потоком металла не увлекались частицы отстоявшейся примеси.

Содержание кислорода в металле после отстаивания близко к концентрации насыщения при температуре отстаивания.

Фильтрование. Фильтрование может быть использовано наряду с отстаиванием для отделения основной части нерастворенных примесей. Для фильтрования расплавленных металлов обычно применяют фильтры, представляющие собой пористые перегородки из спеченных порошков никеля, нихрома и других металлов и сплавов с размерами пор 5—10 мкм и из мелкоячейных нержавеющих сеток с размерами отверстий 10—50 мкм, собранных в пакеты из 3—10 слоев. Содержание примесей в отфильтрованном металле несколько выше концентрации насыщения при температуре фильтрования. Перед фильтрованием жидкий металл обычно выдерживают некоторое время (4—24 ч) в плавильном баке при низкой температуре для установления равновесного состояния и выкристаллизации примесей из раствора. Гидродинамика жидких металлов не отличается от гидродинамики воды и других обычных жидкостей. Поэтому процесс фильтрования металлов может быть рассчитан так же, как и для прочих жидкостей, по общеизвестным формулам. Например, скорость движения натрия через сетчатый фильтр с размерами пор 10 мкм при перепаде давления 1 кгс/см^2 составляет около 5000 кг/(м^2·ч).

Очистка жидких металлов кристаллизацией в холодных ловушках. Установка для заполнения тепловых труб жидкометаллическим теплоносителем может быть с принудительной циркуляцией теплоносителя по контуру. Это удобно для очистки теплоносителя и для заполнения тепловых труб по методу заполнения «напроток» (см. разд. 3.2). Очистка жидких металлов в циркуляционных стендах с принудительной циркуляцией, как правило, проводится с помощью холодных ловушек, работающих непрерывно и установленных на основном контуре или байпасной линии. В холодной ловушке жидкий металл охлаждается, раствор примеси в жидком металле становится пересыщенным и кристаллизующаяся из раствора твердая фаза примеси удерживается в холодной ловушке. Жидкий металл выходит из ловушки очищенным от примесей.

Перспективным типом ловушек являются *диффузионные холодные ловушки* или их модификация — *дисковые ловушки* (рис. 3.3). Основные положения, с помощью которых можно выбрать размеры и режимы работы диффузионных ловушек, изложены в работе [1] и сводятся к следующему.

1. Объем ловушки выбирается исходя из предполагаемого поступления примесей в течение всего ресурса работы установки.

Следует считать, что примесь заполняет 10—20% объема ловушки. Если нельзя установить количество примесей, поступающих в ловушку, можно принять объем ловушки равным 5—10% объема контура с очищаемым теплоносителем.

2. Диаметр $d_л$ и высота $h_л$ ловушки должны быть связаны соотношением $h_л/d_л=6$. Отсюда могут быть определены диаметр и высота ловушки данного объема $V_л: d_л \simeq 0{,}6\sqrt[3]{V_л}$. Такое соотношение размеров ловушки справедливо при значениях отношения диаметра ловушки к подводящему трубопроводу $d_{тр}$ в диапазоне $d_л/d_{тр}=2\div0{,}2$.

3. Падение температуры в ловушке должно быть организовано на ее конце, у фронта выкристаллизации примесей (см. рис. 3.3, *а*). Концентрация примеси в очищенном теплоносителе соответствует концентрации насыщения при температуре зоны выкристаллизации. Чтобы поддерживать температуру зоны выкристаллизации на достаточно низком уровне по мере накопления примесей у дна ловушки, зона охлаждения должна перемещаться вверх. Сигналом к перемещению должно служить существенное уменьшение скорости очистки. Для передвижения зоны охлаждения служат обычно поочередно включаемые водяные рубашки.

4. В трубопроводе, к которому подсоединяется ловушка, режим течения должен быть турбулентным. При малых расходах теплоносителя целесообразно устанавливать в трубопроводе перед ловушкой турбулизующие шайбы.

Температура места врезки ловушки в контуре не имеет принципиального значения, однако при врезке в зонах минимальных температур уменьшаются потери на охлаждение теплоносителя. Диффузионную ловушку можно использовать не только в циркуляционных контурах, но также в баках и в установках без циркуляции. При врезке диффузионной ловушки в горячий бак в ней также будут скапливаться примеси. Место врезки должно определяться из условий максимальной интенсивности естественной конвекции в зоне ловушки. Однако скорость очистки при врезке ловушки в горячий бак существенно меньше, так как доставка примесей в зону кристаллизации осуществляется только посредством медленных процессов молекулярной диффузии и естественной конвекции.

Диффузионные холодные ловушки имеют чрезвычайно простую конструкцию. Они просты в обслуживании, мало чувствительны к колебаниям температуры и расхода теплоносителя в контуре, к повышению концентрации примеси в нем. Недостаток заключается в том, что для увеличения емкости ловушек необходимо перемещать зону охлаждения — кристаллизации вдоль ловушки. От этого недостатка свободны дисковые ловушки. Они представляют собой набор последовательно расположенных диффузионных ловушек, каждая из которых выполнена в виде круглого диска (см. рис. 3.3, *б*). Охлаждаемое дно диска, у которого кристаллизуются примеси, имеет большую поверхность Благодаря такой форме

заполнения диска примесями всего на 1/3 радиуса означает заполнение 60% объема ловушки. К тому же дисковые перегородки являются теплопередающими ребрами, которые отводят тепло и способствуют кристаллизации примесей при заполнении примесями периферийных охлаждаемых участков.

Экспериментальные данные по ловушкам дискового типа показывают, что оптимальное соотношение между радиусом диска и расстоянием между дисками должны быть $l_g/r_g = 0{,}1 \div 0{,}2$. Внутренний диаметр отверстий в дисках должен быть равен внутреннему диаметру подводящего трубопровода. Соотношение между диаметром отверстия диска и диаметром диска должно находиться в пределах 0,2—0,3. Толщина дискового ребра из теплопроводной малолегированной стали должна быть для ловушки емкостью ~ 10 л около 5 мм. Очищенный с помощью такой ловушки натрий содержал по массе $(2 \div 3)\,10^{-4}\%$ кислорода.

Выше рассмотрены наиболее эффективные и простые методы очистки жидких металлов. Выбор метода или их комбинации определяется условиями эксплуатации и требованиями к чистоте теплоносителя.

Контроль содержания примесей. В процессе подготовки и очистки жидкого металла и непосредственно перед заполнением тепловых труб необходим контроль содержания примесей. Это в первую очередь коррозионно-активные примеси, такие, как окислы и легкодиссоциирующие примеси, например примеси водорода, способные выделять неконденсирующиеся газы в процессе эксплуатации тепловой трубы. В щелочных металлах могут находиться в значительных количествах примеси других металлов. Так, в натрии может быть до 3% калия, в калии — 3% натрия. Такие примеси могут создавать зону неизотермичности в тепловой трубе.

По-видимому, непрерывные методы контроля чистоты жидкого металла нецелесообразны. И наиболее удобен анализ пробы металла в химической лаборатории на все вредные примеси химическим, химико-спектральным, дистилляционным и другими методами. Описание метода анализа проб имеется в работах [1, 2].

Отбор пробы и сохранение представительности пробы при ее транспортировке и анализе теплоносителя — сложная и ответственная задача.

Требование полной идентичности количественного и качественного состава примесей в отобранной пробе и в теплоносителе в свою очередь определяет ряд требований к устройствам и способам отбора проб.

1. Инертный газ, используемый в устройствах для отбора проб, должен быть чистым и не должен вносить дополнительных примесей в пробу.

2. В объеме отобранной пробы не должно происходить перераспределения примесей в процессе затвердевания (кристаллизации) жидкого металла, т. е. не должен происходить процесс

так называемой зонной очистки металла. Для того чтобы избежать перераспределения примесей при затвердевании, отобранную пробу быстро замораживают. Хорошие результаты получаются при охлаждении пробы расположенной внутри заполненной инертным газом полости, стенки которой омываются холодной водой.

3. Все детали системы пробоотбора должны быть изотермичными, так как охлаждение пробной порции металла может привести к выпадению части примесей в виде осадка в трактах и узлах, ведущих к ампуле для пробы. В таком случае проба будет непредставительной, результат контроля — искаженным.

4. Материал ампулы, в которую отбирают пробу, не должен взаимодействовать с теплоносителем и примесями.

Перечисленные требования не являются исчерпывающими. В каждом конкретном случае эти требования должны дополняться или облегчаться с учетом конкретной обстановки.

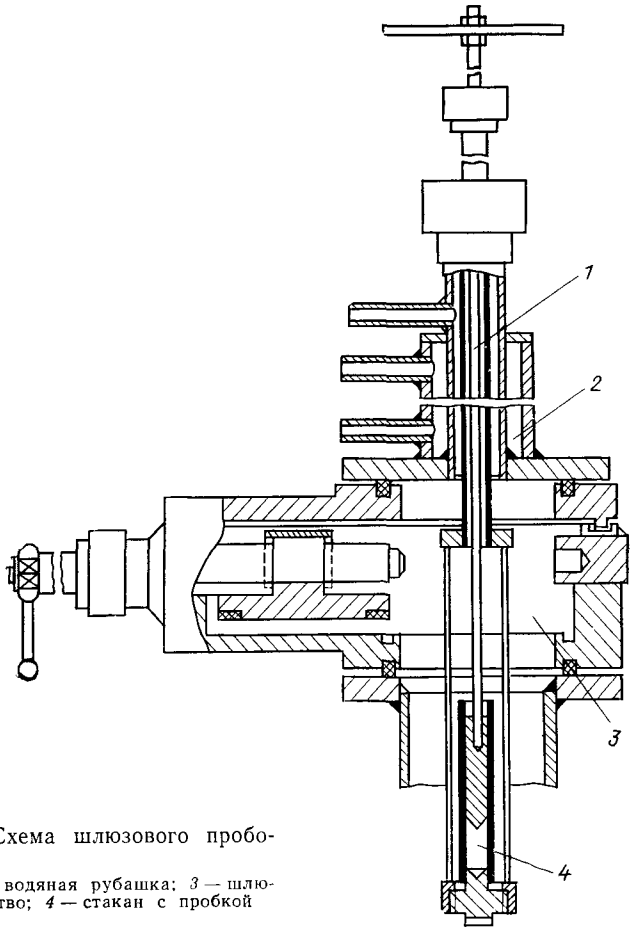
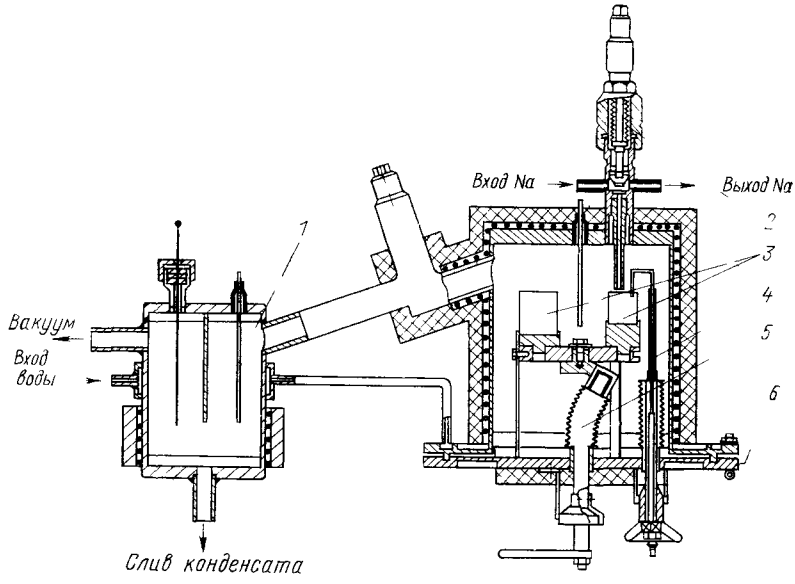


Рис. 34. Схема шлюзового пробоотборника:
1 — шток; *2* — водяная рубашка; *3* — шлюзовое устройство; *4* — стакан с пробкой

На рис. 3.4 и 3.5 приведены в качестве примера схемы двух пробоотборников, широко применявшихся авторами.



Р и с. 3.5. Конструкционная схема пробоотборника-дистиллятора:
1 — конденсатор; *2* — сливной вентиль; *3* — стаканчики; *4* — уровнемер; *5* — поворотный механизм, *6* — нижняя съемная крышка

Весьма удобен для контроля содержания основных вредных примесей *пробоотборник-дистиллятор* (рис. 3.6). Он позволяет получать результаты анализа непосредственно на месте отбора проб, обладает универсальностью и обеспечивает достаточно высокую чувствительность и точность (табл. 3.1). Пробоотборник-

Таблица 3.1

Характеристики дистилляции, точность и чувствительность определения содержания кислорода дистилляционным методом

Параметр	Na	K	Сплав Na—K	Li
Время дистилляции, ч	2÷4	2	2	3
Температура дистилляции, °С	350÷550	450	450	750
Давление остаточных газов, Па	0,133	1,33	2,66—4,0	0,01
Масса пробы, г	7	40	40	30
Чувствительность по массе, 10^{-4} %	1	1	1÷2	1
Погрешность не более..., %	10	15	15	10

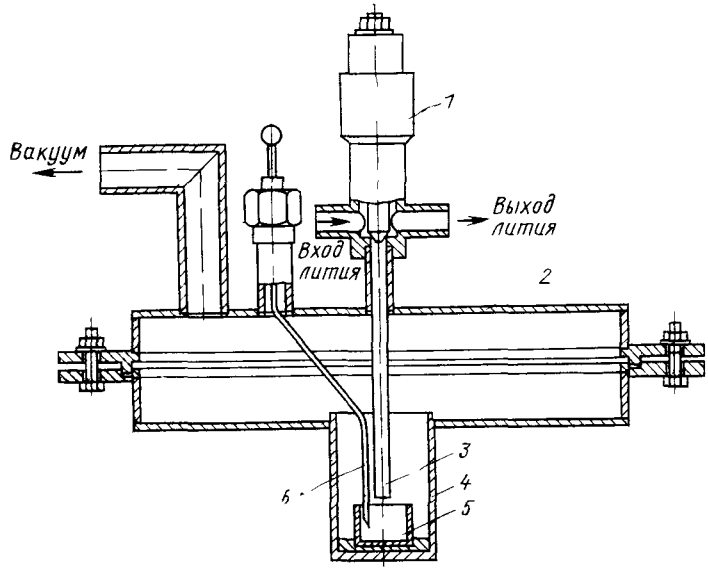


Рис. 3.6. Схема пробоотборника-дистиллятора для лития или натрия·
1 — вентиль; *2* — верхняя крышка; *3* — сливная трубка; *4* — нагреваемая часть; *5* — тигель; *6* — уровнемер

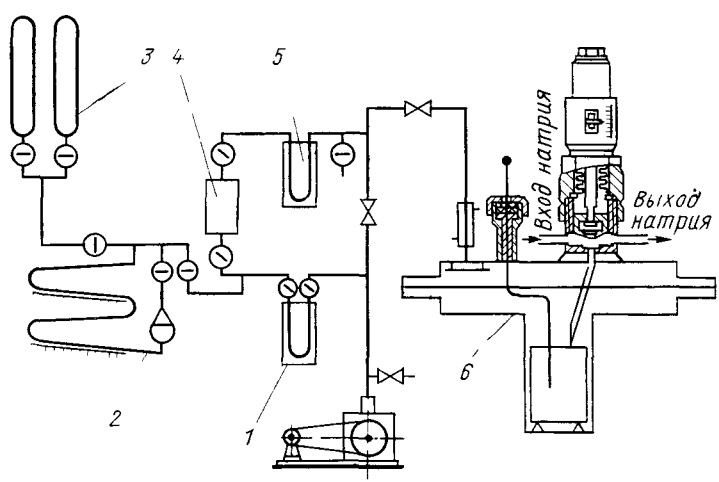


Рис. 3 7. Схема аналитической приставки с пробоотборником-дистиллятором для определения содержания водорода:
1, 5 — ловушки, охлаждаемые жидким азотом; *2* — манометр; *3* — дополнительные бачки; *4* — бачок с CuO; *6* — пробоотборник-дистиллятор

дистиллятор широко применялся авторами для контроля содержания примесей кислорода и водорода в щелочных металлах, применяемых для тепловых труб. Принцип его действия прост. Проба жидкого металла сливается в стаканчик пробоотборника, установленный внутри отвакуумированного корпуса пробоотборника. Затем при анализе на содержание кислорода проба из стаканчика полностью выпаривается при определенной температуре (450° С для натрия). После окончания дистилляции стаканчик извлекается и оставшиеся на его дне окислы анализируемого щелочного металла титруются на воздухе в водном растворе для определения количества кислорода в пробе.

Дистилляционным методом кроме содержания кислорода можно определить содержание водорода, выделяющегося из пробы вследствие диссоциации водородсодержащих примесей (рис. 3.7). Выделяющийся в процессе дистилляции пробы водород собирается в колбе со специальными поглотителями (например, нагретая до 450° С и диспергированная окись меди CuO). Измеряя количество образовавшихся при восстановлении окиси меди водяных паров удалось достигнуть чувствительности определения водорода 10^{-4}% по массе при массе отбираемой пробы 75 г и погрешности не более 20%. Возможно определение выделяющихся при дистилляции водорода и других газов с помощью масс-спектрометров или газовых хроматографов. Пробоотборник-дистиллятор позволяет совмещать определение содержания водорода в процессе дистилляции с определением содержания кислорода в остатке после дистилляции.

С помощью пробоотборника-дистиллятора можно отбирать пробы в ампулы с узким горлышком для передачи в химическую лабораторию для определения содержания металлических примесей. Для этой цели ампулы устанавливают вниз горлышком в стакан пробоотборника. Пробоотборник вакуумируется, стакан заполняется жидким металлом. Затем в полость пробоотборника подается инертный газ и жидкий металл из стакана передавливается в ранее отвакуумированные ампулы, а после замерзания металла пробоотборник вскрывают, ампулы извлекают. Горлышки ампул пережимают для обеспечения герметизации.

§ 3.2. ОЧИСТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Загрязнения, имеющиеся в конструкционных материалах, можно разделить на пять категорий [1].

1. Загрязнения из окружающей среды — пыль, нити, копоть из воздуха; с пола, мебели, одежды, со стен и т. п.

2. Растворимые в воде электролиты (например, минеральные соли) и неэлектролиты (различные органические вещества).

3. Нерастворимые в воде органические вещества — масла, смазочные материалы, эмульсии.

4. Нерастворимые химические вещества — окислы, силикаты,

сульфиды и другие подобные им соединения. Как правило, они прочно соединены с поверхностью.

5. Газовые загрязнения.

В трубах и металлических сетках, используемых для изготовления тепловых труб, имеются все виды загрязнений. Наличие загрязнений на поверхности фитиля и корпуса трубы приводит к образованию нежелательных примесей в жидких металлах, а для низкотемпературных тепловых труб загрязнения могут создавать несмачивание поверхностей, засорять капилляры механическими примесями и продуктами коррозии.

В основу технологических процессов очистки конструкционных материалов при изготовлении тепловых труб могут быть положены технологические решения, принятые в электронной технике [4].

Одним из наиболее ответственных процессов является очистка мелкопористых материалов (в частности, сеток), необходимых при изготовлении фитилей. Сетки в процессе машинного прядения сильно загрязняются машинным маслом. Наиболее эффективный метод очистки от механических примесей и смолистых веществ, прочно сцепленных с поверхностью металла, — ультразвуковая очистка. При большом количестве капиллярных каналов хорошая очистка возможна лишь при наличии нормально действующих сил в этих каналах. Такие силы и возникают в момент захлопывания кавитационных пузырьков под воздействием ультразвуковых колебаний на моющую жидкость. Механизм этого воздействия на очищаемые детали заключается в разрушении пленки загрязнений, в проникновении интенсивно колеблющихся пузырьков в поры и зазоры между твердой поверхностью металла и пленкой загрязнений [5]. На границе жидкость — твердое тело возникают большие ускорения, способствующие отрыву частиц загрязнений от очищаемой поверхности. Большие ускорения частиц среды являются результатом действия больших переменных давлений, диффузии моечного раствора в поры и микротрещины, возникающие на поверхности пленки загрязнений. Известно, что ультразвуковые колебания в жидкости вызывают несколько эффектов, влияние которых на качество очистки различно. Качество очистки главным образом определяется действием ультразвуковой кавитации. При прочих равных условиях жидкости с минимальным отношением G/μ дают наибольший эффект. В качестве моечных жидкостей во избежание коррозионных процессов удобно использовать органические растворители. Из таких моющих жидкостей, как этанол, ацетон, бензол, наименьшее время отмывки имеет место при использовании этанола.

Коротко остановимся на обезгаживании материалов. Если из трубы не удалить газы до ее заправки теплоносителем и герметизации, то в изготовленной высокотемпературной тепловой трубе газы, выделяясь, создадут неизотермическую зону. Оставшийся кислород способен интенсифицировать процессы коррозии в тепловых трубах, где теплоносителем является щелочной металл.

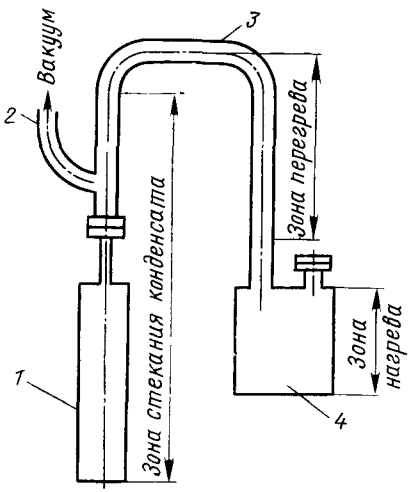
Для низкотемпературных тепловых труб проблема удаления газов не столь серьезна, однако для многих низкотемпературных теплоносителей содержание определенных газов нежелательно из соображений интенсификации коррозионных процессов и др. Дегазация металлов осуществляется посредством нагрева в вакууме до температур, близких к рабочим или выше их, но, как правило, не ниже 400° С. В литературе [6—9] рассматриваются различные источники газовых загрязнений конструкционных материалов и влияние газов на свойства материалов. Взаимодействие газов с металлами может носить разнообразный характер. Например, для водорода [13] характерны поверхностная физическая адсорбция, активированная абсорбция и хемосорбция, диффузия, растворение и химическое взаимодействие с образованием химических соединений. Водород — самый подвижный из всех газов, количество его в металле может меняться при каждой технологической операции, которой он подвергается. Основными видами газовых загрязнений таких материалов, как нержавеющая сталь и никель, являются водород, азот, кислород, окислы углерода. Анализ удаляемых газов проводится масс-спектрометром. Температурный режим обезгаживания подбирают исходя из допустимых для материала температур. Опыты показывают, например, что при температуре выше 600° С наблюдается диффузионное сваривание никеля, что не всегда желательно, так как при этом никелевая сетка теряет эластичность. Время и степень удаления газов сильно зависят от уровня температур и глубины вакуума. В каждом конкретном случае о степени дегазации конструкционных материалов можно судить по глубине вакуума, измеренного в тепловой трубе в стационарных условиях. Время удаления таких газов, как водород, окиси углерода и азота с поверхности нержавеющей стали и никеля в вакууме 0,133 Па при температуре 450—500° С, например, не превышает 40 мин. Следует отметить трудности обезгаживания алюминия, так как он обычно содержит большое количество газов, а также может содержать водяные пары.

§ 3.3. ЗАПОЛНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Высокотемпературные тепловые трубы. Для тепловых труб, работающих при повышенных температурах, важным вопросом является тщательная дегазация тепловой трубы и теплоносителя перед заполнением тепловой трубы.

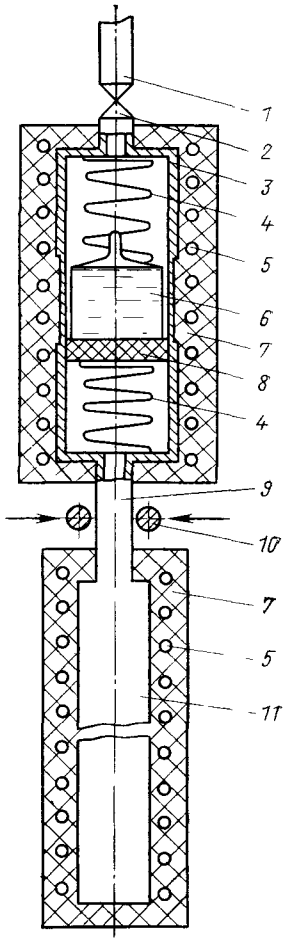
Метод вакуумной перегонки. На рис. 3.8 представлена схема заполнения тепловых труб натрием и калием, приведенная в работе [10]. Система заполнения предварительно обезгаживалась при вакуумировании в течение 4 ч при температуре 900° С. Необходимое количество теплоносителя загружалось в дистилляционный сосуд. Нагреватели и термопары позволяли поддерживать необходимый температурный режим в дистилляционном сосуде, опускной трубе, конденсационном ответвлении и тепловой трубе. При перегонке калия опускная и тепловая трубы перво-

начально нагревались сначала до 100° С, а конденсационное ответвление до 350° С. В дистилляционном сосуде в процессе перегонки поддерживалась температура около 400° С.



Р и с. 3.8. Схема заполнения натриевых и калиевых тепловых труб теплоносителем [10]·

1 — тепловая труба; *2* — линия вакуумирования; *3* — соединительная труба; *4* — загрузочный бачок



Р и с. 3.9. Схема ампульного заполнения тепловых труб:

1 — труба к вакуумному насосу; *2* — вентиль; *3* — корпус загрузочного бака; *4* — пружина; *5* — нагреватель; *6* — ампула с теплоносителем; *7* — тепловая изоляция; *8* — фильтр из металлической сетки; *9* — соединительная труба между загрузочным баком и тепловой трубой; *10* — пережимное устройство; *11* — тепловая труба

Перегонка натрия осуществлялась при температуре опускной и тепловой труб, равной 150° С, температуре конденсационного ответвления — 450° С, дистилляционного сосуда — 500° С. В процессе перегонки конденсационное ответвление нагревалось конденсирующимися парами.

Окончание процесса перегонки фиксировалось по повышению температуры в дистилляционном сосуде. Соединительный ниппель тепловой трубы затем тщательно расплющивали, отрезали и заваривали аргонно-дуговой сваркой на воздухе или электронно-лучевой сваркой в вакууме. Вакуумная термическая перегонка теплоносителя в тепловую трубу позволяет избавиться от значи-

тельной части малолетучих примесей в теплоносителе (таких, как окислы калия и натрия), частично уменьшает содержание диссоциирующих примесей (гидриды в калии и натрии) и хорошо сочетается с задачей дегазации тепловой трубы.

Ампульное заполнение. Схема такого заполнения представлена на рис. 3.9. Очищенный посредством дистилляции и обезгаживания при вакуумировании щелочной металл, герметизированный в стеклянной ампуле, помещается в тонкостенную емкость, расположенную над тепловой трубой. Заполнение проводится следующим образом. Отвакуумированная емкость с ампулой подогревается до температуры несколько выше температуры плавления щелочного металла. Затем ампулу раздавливают, сжимая стенки емкости, и жидкий щелочной металл сливается в тепловую трубу (при необходимости избыток оставляют на дне емкости). Далее щелочной металл замораживают в тепловой трубе и проводят «холодную отпайку» с последующей заваркой. Для этого всю сборку помещают в вакуумную камеру и, разрезав электронным лучом соединительный капилляр между емкостью с ампулой и тепловой трубой, герметизируют последнюю посредством оплавления соединительного капилляра. Естественно, что перед заполнением проводится дегазация трубы.

Такой способ заполнения прост, обеспечивает хорошую точность дозирования, позволяет тщательно обезгазить тепловую трубу. Недостаток способа — отсутствие возможности очистки щелочного металла после разгерметизации ампулы.

Полное удаление неконденсирующихся газов для тепловых труб с щелочно-металлическими теплоносителями зачастую трудно осуществить (а такое удаление необходимо, например, для тепловых труб с составными фитилями). Для более тщательного удаления газов из трубы может быть введена следующая дополнительная операция. После слива щелочного металла в тепловую трубу соединительный капилляр пережимают струбциной. Затем тепловую трубу разогревают, выводя на температурный режим работы 600—650° С. Визуально при этом удается наблюдать в верхней конденсаторной части трубы низкотемпературную «холодную» зону, занятую неконденсирующими газами. Далее газы периодически удаляют при ослаблении пережима соединительного капилляра до полного исчезновения холодной зоны. Проведение такой процедуры позволяет одновременно обеспечивать смачивание фитиля щелочным металлом, а также в целом проверять работоспособность тепловой трубы.

Метод заполнения сквозной прокачкой паров теплоносителя (напроток). Схема предложенного авторами метода заполнения тепловых труб [11] представлена на рис. 3.10. Установка состоит из парогенератора и сливного бака, к которым через коллекторы с вентилями подсоединена сборка из параллельно соединенных тепловых труб. Заполнение осуществляется следующим образом. Щелочной металл (натрий, калий) в парогенераторе в течение суток и более обезгаживается при вакуумирова-

нии через ловушку паров. Тепловые трубы также обезгаживаются в вакууме при температуре 750° С. Затем из парогенератора при температуре 480° С для калия и 550° С для натрия пар щелочного металла подается в тепловые трубы и там конденсируется. Трубы заполняются конденсатом. При этом происходит смачивание фитиля щелочным металлом. Затем трубы охлаждаются до темпера-

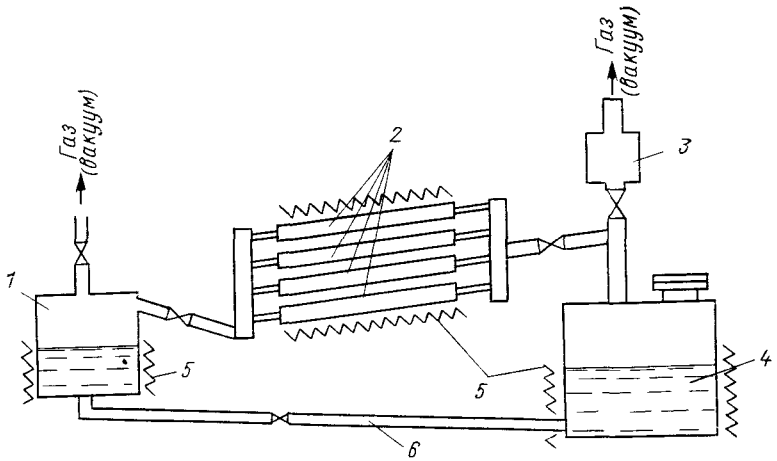


Рис. 3.10 Схема одновременного заполнения нескольких щелочно-металлических труб напроток:
1 — сливной бак; *2* — тепловые трубы; *3* — ловушка паров щелочного металла; *4* — парогенератор, *5* — нагреватель, *6* — линия для возврата металла в парогенератор

туры, на 50—70° С превышающей температуру плавления, и избыток металла удаляется продувкой через сборку чистого инертного газа (аргона или гелия). В тепловой трубе остается щелочной металл, заполнивший пространство в фитиле. Необходимый избыток металла обеспечивается за счет несливаемого объема металла (он подбирается изменением наклона труб и скорости продуваемого инертного газа). После заполнения вентили за коллекторами перекрывают, сборку тепловой трубы отделяют от стенда и помещают в вакуумную камеру, где каждая из тепловых труб электронным лучом отделяется от коллектора и герметизируется.

Такой метод позволяет осуществлять заполнение одновременно большого числа труб, в том числе труб, сочлененных между собой (например, уже вваренных в трубную доску). Проведения дополнительной операции по обеспечению смачивания фитиля не требуется — фитиль смачивается в процессе заполнения. Нет необходимости предварительной дозировки теплоносителя — в фитиле при таком методе заполнения оказывается необходимое количество щелочного металла. Правильность дозировки еще до окончательной отпайки каждой из труб может быть проверена при помощи рентгеновского просвечивания.

Этим способом авторами было опробовано заполнение самых различных по размерам тепловых труб как с простыми фитилями из нескольких слоев крупной сетки, так и с составными, имеющими экраны из тонкой сетки.

Метод полного залива. Экспериментально выяснено, что натриевые тепловые трубы, имеющие сетчатые мелкопористые фитили (в частности, составные фитили), не дают расчетных характеристик сразу после заполнения. Это установлено в процессе экспериментов, когда проверялась способность труб работать против силы тяжести, т. е. с зоной нагрева, расположенной в верхней части трубы.

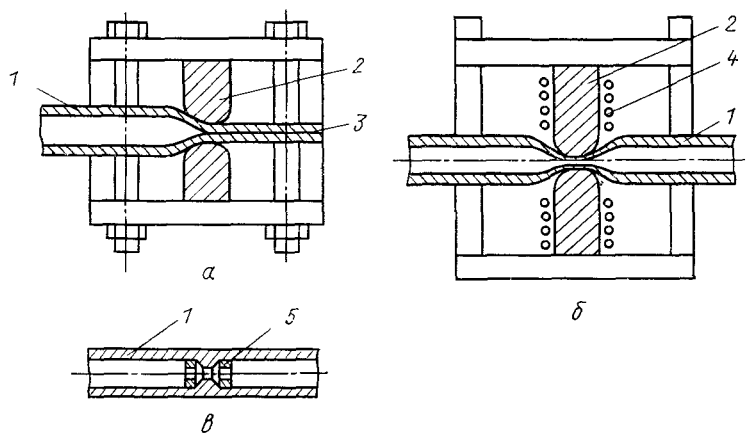


Рис. 3.11. Методы герметизации тепловых труб [пережатие капилляра и его заварка (*а*); диффузионная сварка (*б*); герметизация при пайке (*в*)]:
1 — капилляр; *2* — струбцина; *3* — место заварки, *4* — нагрев, *5* — припой

Требовалась длительная приработка трубы, прежде чем были получены расчетные характеристики. По-видимому, в процессе ампульного заполнения не удалось обеспечить полного смачивания плотных и мелких сеток, а также удалить из них пузырьки газов, которые препятствуют полному смачиванию и заполнению сетки щелочным металлом.

Улучшить условия смачивания и (а это главное) подавить центры парообразования, чтобы увеличить предельные тепловые нагрузки при вскипании, можно посредством полного залива тепловой трубы разогретым теплоносителем, создав в нем достаточно высокое [до $(20—50)\,10^5$ Па] давление.

Герметизация тепловых труб также представляет определенные трудности и заслуживает специального рассмотрения.

Отделение тепловой трубы от заправочной системы и герметизация трубы могут осуществляться различными методами (рис. 3.11). Эти методы являются общими как для высоко-, так и для низкотемпературных тепловых труб.

На воздухе герметизация может осуществляться посредством так называемой *холодной отпайки* — пережатия и «откусывания» капилляра с помощью специальных щипцов или струбцин, создающих большое давление с помощью губок из твердых материалов. Холодная отпайка применима для очень пластичных материалов, например для меди и никеля. При использовании хромоникелевой нержавеющей стали 1Х18Н9Т и алюминия результаты при таком методе не всегда удовлетворительны. Более надежен следующий способ. После пережатия капилляра струбциной без снятия ее производится отрезка капилляра и заварка отверстия аргонно-дуговой сваркой.

На воздухе тепловая труба может быть герметизирована посредством *диффузионной сварки.* В этом случае для сварки стали 12Х18Н10Т необходимо в месте зажатия капилляра прилагать усилие около 2 кгс/мм^2 и поддерживать температуру 1000° С в течение 6 мин [17]. Наконец, тепловая труба может быть запаяна высокотемпературным припоем: в капилляр заранее помещают высокотемпературный припой и после заполнения трубы разогревают припой до температуры плавления.

В ряде случаев (например, с высокотемпературными трубами) наиболее удобным способом герметизации является *пайка или заварка электронным лучом в вакууме.*

Отметим, что при любом способе герметизации необходимо предварительно тщательно удалить следы щелочного металла с места запайки или заварки посредством прогрева.

Высокотемпературные тепловые трубы из тугоплавких материалов. Обеспечение достаточно длительного ресурса работы тепловых труб при температурах выше 1300° С оказывается сложной технической задачей, требующей применения специальной технологии изготовления труб, их заправки теплоносителями.

С повышением температуры резко активизируются процессы коррозии, процессы растворения конструкционных материалов тепловой трубы в теплоносителе. Газовые примеси в щелочных металлах (такие, как азот в литии, кислород в натрии и калии, кислород в конструкционных материалах для труб с литием) резко ускоряют процессы коррозии. Необходима тщательная очистка теплоносителей и элементов тепловой трубы от таких загрязнений, а также специальные меры для уменьшения их вредного воздействия.

В работе [12] описана следующая технология заполнения и герметизации литиевой трубы. Литий перед заправкой в тепловую трубу подвергают горячей геттерной очистке от примесей. В качестве геттера используют циркониевую губку с очень низким содержанием кислорода. Губку берут в количестве, способном полностью впитать весь литий, предназначенный для заправки в тепловую трубу (масса циркониевой губки в 30 раз превосходила массу лития). В опытах [12] вся конструкция изготовлена из ниобий-циркониевого сплава. Операции по заполнению проводились в следующей последовательности.

Подготовка элементов конструкции тепловой трубы. Первоначально элементы тепловой трубы протравливались в царской водке. Затем они обрабатывались в растворе кислот HF и HNO_3 для удаления 0,05 мм стенки материала в целях очистки поверхности от загрязнения железом (загрязнение при механической обработке). Далее проводилось обезгаживание в течение нескольких минут при температуре 1650° С в вакууме ~0,001 Па при прогреве электронным лучом с незаваренным геттерным контейнером. Герметичность конструкции проверялась гелиевым течеискателем, затем проводилось обезгаживание в течение 5 мин при 1650° С и ~0,001 Па с последующей передачей сборки без контакта с воздухом в перчаточную камеру с чистым аргоном.

Приготовление геттера осуществлялось нагревом его при высоком вакууме в течение 1 ч при температуре 1500° С. Из вакуумной камеры без контакта с воздухом геттер передавался в перчаточную камеру с аргоном.

Приготовление теплоносителя начиналось с пропускания расплавленного лития через ниппельную воронку с отверстием 1 мм в вакууме 0,01—0,001 Па. Для передавливания лития использовался поршень, окислы оставались на стенках воронки. Повторение этой операции 2—3 раза обеспечивало предварительную очистку лития. Затем под вакуумом литий передавался в перчаточную камеру. В аргонной перчаточной камере циркониевая губка и литий закладывались в контейнер и закрывались пробкой. Далее проводилось вакуумирование камеры в течение 2 ч до 0,001 Па и пробка заваривалась электронным лучом.

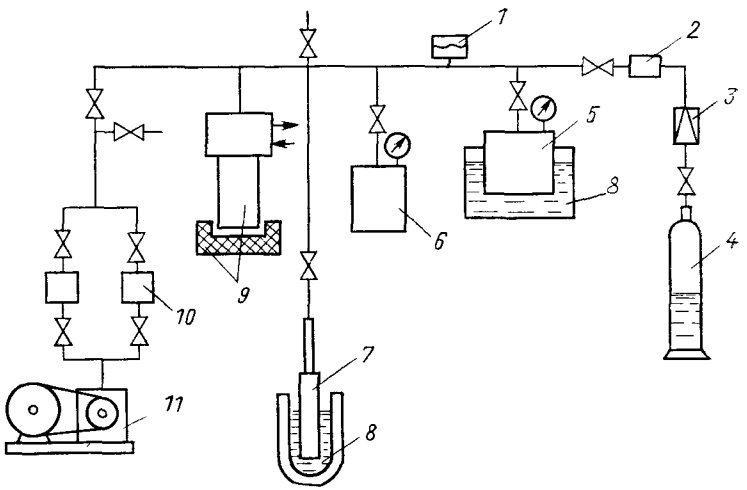
Очистка и перегонка лития, герметизация тепловой трубы. Система с геттерным контейнером располагалась ниже самой тепловой трубы и подвергалась нагреву до 800° С в вакууме 0,001 Па в течение 10 ч. Сама тепловая труба была нагрета до температуры на 100° С выше для обеспечения гарантии, чтобы литий находился в геттерном контейнере. Затем сборка переворачивалась и осуществлялась дистилляция лития в трубу при 800° С. Конец тепловой трубы поддерживался при температуре ниже температуры плавления лития с помощью медных зажимов, охлаждаемых водой. После перегонки лития капиллярную соединительную трубку пережимали, отрезали и заваривали электронным лучом и помещали в сосуд из кварцевого стекла.

Среднетемпературные тепловые трубы. При заполнении ртутных тепловых труб трудно обеспечить смачиваемость материала фитиля. Ртуть смачивает медь и никель, но это сочетание материалов не обеспечивает коррозионной стойкости конструкций. Наиболее распространенные материалы для работы с ртутью — хромоникелевые стали плохо смачиваются ртутью (вследствие наличия на них плотных окисных пленок).

Для обеспечения смачиваемости и уменьшения коррозии в тепловые трубы из хромоникелевой нержавеющей стали вводят магний и титан, а затем трубы в течение длительного времени

(десятки часов) выдерживают при повышенной температуре. В работе [13] заполнение ртутью трубки с фитилем из трех слоев стальной сетки (сталь 304) с размерами ячеек 394 меш осуществлялось следующим образом.

Сборка, подготовленная к заполнению, обезгаживалась в вакуумной печи при 1000° С. Затем в трубку подавалась ртуть (122 г) и в виде кусков проволоки вводились магний (0,01 г) и титан (0,005 г). Затем трубка в течение нескольких часов вакуумировалась для удаления неконденсирующихся газов. После этого капилляр, предназначенный для заполнения, сплющивался и отрезался электронно-лучевой сваркой. Нагрев в течение 2 сут



Р и с. 3.12. Схема заполнения теплоносителем криогенных тепловых труб:
1 — предохранительное устройство; *2*— фильтр; *3* — редуктор; *4* — баллон с теплоносителем; *5* — емкость с теплоносителем; *6* — дозировочный бак; *7* — тепловая труба; *8* — сосуд Дьюара; *9* — диффузионный насос; *10* — азотные ловушки; *11* — форвакуумный насос

при 400° С, как показала рентгенограмма, обеспечил лишь частичное смачивание, хотя в процессе прогрева трубку часто наклоняли и поворачивали, чтобы смочить все участки внутренних поверхностей. При последующей выдержке при 500° С в течение 2 сут была достигнута полная смачиваемость. Смачивание ртутью более мелкой капиллярной структуры (например, пористого экрана из многих слоев сетки, протянутой через фильеру, с размером ячейки сетки ~ 16 мкм) еще более затруднительно. Одно из возможных решений состоит в заполнении капиллярной структуры тепловой трубы под высоким давлением при 500° С. Излишки ртути затем можно слить, оставив лишь то количество, которое требуется для насыщения капиллярной структуры. В этом случае также используются смачивающие присадки.

Одним из методов, который не требует применения присадок, является заполнение труб, предварительно покрытых медью после восстановления окисных пленок. При контакте с ртутью медь

растворяется, и ртуть смачивает чистую поверхность, находящуюся под покрытием. Данный метод трудно применить к трубам с мелкопористыми фитилями — внутренние поверхности капиллярной структуры покрыть медью затруднительно.

Низкотемпературные тепловые трубы. Заполнение низкотемпературных тепловых труб можно осуществлять по самым разнообразным схемам. При простейшем способе заполнения необходимое количество теплоносителя вводится в отвакуумированное пространство тепловой трубы через резиновую пробку с помощью шприца. Заполнение нетоксичным теплоносителем также можно проводить на воздухе с последующим разогревом тепловой трубы и стравливанием в воздух паров теплоносителя. Вместе с парами удаляются и неконденсирующиеся газы.

Неконденсирующиеся газы часто удаляют при вакуумировании тепловой трубы без ее подогрева. При вакуумировании вода и некоторые другие теплоносители могут замораживаться. А в таком состоянии газы, растворенные в теплоносителе, почти не удаляются. Если необходимо избавиться от следов газов (например, в фитилях с артериями), водяные трубы нужно подогревать, и в уже работающей трубе стравливать газы из конденсаторной части трубы. Отметим, что для воды растворимость газов при разогреве понижается, для других теплоносителей — наоборот. Следует иметь в виду, что при заполнении со стравливанием газа вместе с парами теплоносителя дозировка его может оказаться неточной. При жестких требованиях по очистке теплоносителя и конструкционных материалов следует применять схему, описанную ниже.

Криогенные тепловые трубы. Получаемые в промышленности газы практически всегда загрязнены сопутствующими примесями, которые появляются вследствие протекания побочных реакций в процессе получения газа либо попадают в газ извне. Чистота газа и соответственно метод очистки определяются в зависимости от требований, предъявляемых к работе тепловой трубы. В любом случае процесс очистки газа включает удаление примесей воздуха и специфических примесей, образовавшихся при получении газа и его расфасовке.

Для высушивания газов используют концентрированную серную кислоту и твердые сорбенты: хлорид калия, едкий натр, перхлорат магния и фосфорный ангидрид, иногда применяют селикагель. Высушивание газа можно осуществлять охлаждением до низких температур.

Газовые смеси обычно разделяются с помощью процессов, в основе которых лежит различие физико-химических свойств веществ — различия по давлению паров, растворимости, сродству к твердому сорбенту, молекулярным и атомным массам.

Предварительную очистку газов от примесей других газов вплоть до концентрации 0,1% по объему осуществляют химическим методом, пропуская поток газа через сосуд, содержащий соответствующий жидкий или твердый поглотитель. Для более

тонкой очистки (до 0,01% по объему) используют методы фракционированной ректификации или хроматографические методы [14—16]. Для таких теплоносителей, как аммиак, фреон-11, фреон-22 и некоторых других, очистку газа от газовых примесей можно совместить с процессом заполнения тепловой трубы теплоносителем.

Одна из возможных схем заполнения представлена на рис. 3.12. Установка перед заполнением теплоносителем вакуумируется до 10^{-3}—10^{-4} Па. Газ из баллона перемораживается во вспомогательную емкость, охлаждаемую жидким азотом. Для удаления нелетучих примесей при этом служит фильтр, заполненный многими слоями мелкой фильтровой сетки. Использовать сорбенты нецелесообразно, так как они могут вносить нелетучие загрязнения. Для уменьшения содержания воды можно баллон поддерживать при низкой температуре, при этом содержание воды в паровой фазе резко уменьшается. После окончания перемораживания теплоносителя проводится его дегазация методом вакуумной откачки при пониженной температуре. Очищенный таким образом теплоноситель подается в дозировочный бак, где по давлению газа, его температуре и объему определяется масса газа. Далее осуществляется заправка тепловой трубы посредством замораживания теплоносителя в тепловую трубу. Теплоноситель подается с некоторым избытком. Затем с помощью пережима заправочный штуцер трубы плотно пережимается. Труба разогревается до комнатной температуры, пережим открывается и избыток теплоносителя стравливается при регистрации массы трубы на весах. После этого осуществляется окончательная герметизация тепловой трубы.

Глава 4

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

§ 4.1. МЕТОДЫ ПОДВОДА И ОТВОДА ТЕПЛА

Наряду с общими чертами тепловые трубы, предназначенные для работы на различных температурных уровнях, имеют и значительные различия. Это относится как к конструкциям тепловых труб, характеристикам этих устройств, так и к методам экспериментальных исследований, к конструкциям исследовательских стендов. При проведении экспериментов большое влияние на конструкцию экспериментальной установки обычно оказывает выбранный способ нагрева тепловой трубы и метод отвода тепла.

Применяются следующие основные методы нагрева тепловых труб: радиационный, контактный (кондуктивный), омический (пропусканием тока через стенку трубы), индукционный высокочастотный, электронной бомбардировкой, циркулирующим в контуре теплоносителем, посредством конденсации пара. Наибольшие сложности вызывает нагрев высокотемпературных тепловых труб (особенно при температуре выше 700° С и необходимости обеспечивать высокие удельные тепловые потоки). Коротко охарактеризуем каждый из названных методов применительно к экспериментам с высокотемпературными тепловыми трубами.

При радиационном нагреве использование электропечей на воздухе, как правило, не позволяет получить высокие удельные тепловые потоки в зоне нагрева тепловых труб. В широко распространенных печах с нихромовыми электронагревателями мощности ограничиваются наибольшей допустимой температурой для работы нихрома на воздухе, равной 1100° С. Длительность работы печей при высоких температурах невелика из-за окисления нихрома.

Длительные испытания тепловых труб при температуре до 800—850° С возможны при использовании радиационных электропечей с керамическими нагревательными элементами, например силитовыми стержнями. Высокая рабочая температура этих нагревателей (около 1400° С) и длительная стойкость при работе на воздухе позволяют эффективно использовать их для проведения ресурсных и других испытаний в условиях, когда плотности теплового потока в зоне нагрева умеренные — до 100 Вт/см^2. Для создания высокой удельной плотности теплового потока могут быть использованы также кварцевые криптоновые лампы большой мощности — до 10—15 кВт.

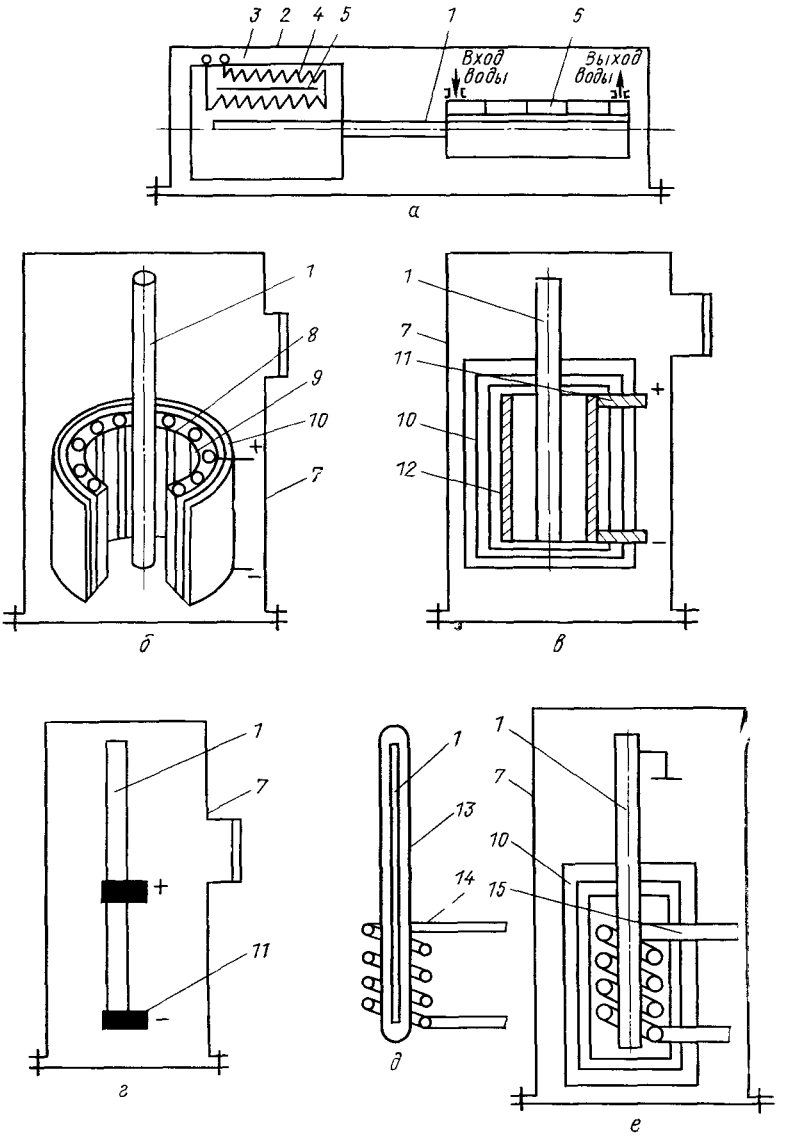


Рис. 4.1. Методы нагрева высокотемпературных тепловых труб [радиационная печь со спиральными высокотемпературными нагревателями (*а*); радиационный нагреватель в виде беличьей клетки (*б*); раднационный цилиндрический электронагреватель (*в*); омический нагрев (*г*); индукционный нагрев (*д*); электронный нагрев (*е*)]:

1 — тепловая труба; *2* — барокамера; *3* — инертный газ; *4* — спиральный нагреватель; *5* — керамика; *6* — рубашка водяного калориметра; *7* — вакуумная камера; *8* — электроизоляторы; *9* — стержневые нагреватели, *10* — тепловые экраны; *11* — токоподводы; *12* — фольга из тугоплавкого материала; *13* — кварцевая ампула; *14* — спираль индуктора; *15* — спираль электронного нагревателя

Для нагрева в инертной среде и в вакууме могут быть применены нагреватели из тугоплавких материалов: тантала, молибдена, вольфрама. В зависимости от имеющихся в распоряжении источников питания могут быть применены различные конструкции нагревателей. Укладка спиралей из проволоки в керамическую изоляцию (рис. 4.1, *а*) позволяет использовать высокое напряжение и иметь малые токи. При изготовлении спиралей из молибденовой и вольфрамовой проволоки необходим предварительный прогрев последней до 200—300° С для обеспечения пластичности (например, посредством протяжки через отверстие в разогретой медной болванке). Нагреватели в виде беличьего колеса (рис. 4.1, *б*) или нагреватели цилиндрического вида (рис. 4.1, *в*) требуют невысокого напряжения и больших токов. При проведении экспериментов с ТВТТ необходимо обеспечивать в камерах глубокий вакуум (10^{-3} Па и ниже).

Радиационные методы нагрева удобны для экспериментов: печь и тепловая труба являются автономными элементами, кроме того, можно вести наблюдения за тепловой трубой. Однако при этом методе обогрева теплоподвод весьма ограничен, а температуры нагревателей должны существенно превышать температуру тепловой трубы.

При контактном методе электрообогрева температуру нагревателя можно понизить за счет хорошего термического контакта между нагревателем и стенкой трубы. Одним из способов обеспечения термического контакта является создание электроизоляции, а иногда и самого нагревателя методом вакуумного напыления. В качестве электроизоляции для ТВТТ может служить алунд или окись бериллия, нагревательный элемент можно изготовить из вольфрама или молибдена. При работе с такими нагревателями следует избегать термокачек — вследствие различия в коэффициентах термического расширения и температуропроводности при резком изменении температур возможно растрескивание электроизолятора и нагревателя.

Омический нагрев посредством пропускания тока по стенке трубы (рис. 4.1, *г*) удобен для труб с длинной нагреваемой зоной и малыми толщинами стенки трубы и фитиля. При таком нагреве требуются большие токи при невысоком электрическом напряжении. Этот метод успешно используется в экспериментах как с ВТТ, так и с ТВТТ. Однако он требует громоздкого, хотя и несложного, электрооборудования; кроме того, тепловыделение в жидком металле, заполняющем фитиль, не всегда допустимо по условиям опытов.

Индукционный нагрев (рис. 4.1, *д*) основан на использовании токов, которые индуцируются в стенке тепловой трубы магнитным полем, изменяющимся с высокой частотой (диапазон используемых частот составляет 50—500 кГц). Чем выше частота, тем нагрев является более поверхностным — токи проникают в стенку трубы на меньшие толщины. Чем выше частоты, тем выше требования к экранированию индукционной установки для защиты ра-

дио- и телевизионной сети от помех, а также от воздействия высоких частот на организм человека. Высокочастотный нагрев удобен для испытаний тепловых труб в вакууме. Для этого трубы помещают в ампулы из кварцевого стекла, пространство в них вакуумируют и ампулы запаивают. Конец ампулы с тепловой трубой помещают в индуктор печи.

Электронный нагрев (рис. 4.1, *е*) основан на подводе энергии за счет бомбардировки трубы электронами, которые эмиттируются нагретым телом (например, вольфрамовой спиралью) и ускоряются в сильном электрическом поле (напряжением несколько киловольт). Для такого способа нагрева необходимо обеспечивать вакуум 10^{-1}—10^{-2} Па. Отметим, что при наличии хотя бы слабой диффузии щелочного металла через стенку трубы (например, литиевой тепловой трубы) возможно возникновение дугового разряда в паре щелочного металла и пережог трубы.

Нагрев циркулирующим в контуре теплоносителем или *конденсирующимся паром* предотвращает пережог тепловой трубы при осушении фитиля в зоне нагрева. Эти способы нагрева позволяют осуществлять интенсивный теплоподвод, но уровень рабочих температур при этом оказывается сильно ограничен, а экспериментальные установки громоздки и сложны. Интенсивный

Таблица 4.1

Применимость различных методов нагрева при экспериментах с высокотемпературными тепловыми трубами

Метод нагрева	Среда	Применение		Простота (+) Сложность (—)	Удобство термометрирования
		Для ВТТ	Для ТВТТ		
Радиационный	Воздух	ОР, ИР	—	+	—
	Инертная	ОР, ИР	ОР, ИР	—	—
Кондуктивный	Воздух	ОР	—	+	+
	Инертная	ИР	—	—	—
Омический	Воздух	ОР, ОТ	—	+	+
	Инертная	ОР, ИР, ОТ	ОР, ИР, ОТ, КП		+
Индукционный	Воздух		—	—	—
	Инертная	ОР, ИР, ОТ, КП	ОР, ИР, ОТ, КП	—	—
		ОР, ИР, ОТ, КП			
Электронная бомбардировка	Вакуум	ОТ, КП	—	—	—
Конденсация пара	—	ОТ, КП	—	—	—

Примечание. Метод удобен при определении максимального осевого теплопереноса (ОТ); при нахождении критических тепловых потоков в зоне нагрева (КП); при определении работоспособности (ОР); при испытаниях на ресурс работы (ИР).
Наиболее предпочтительный метод при каждом виде эксперимента подчеркнут.

обогрев, т. е. обеспечение теплоподвода большой мощности или высоких удельных тепловых потоков, возможен вследствие использования вспомогательной тепловой трубы или паровой камеры. Свойство трансформации тепловых потоков при этом позволяет разместить нагреватели на больших поверхностях.

Ориентировочные сведения о применимости различных методов нагрева при проведении экспериментов с высокотемпературными тепловыми трубами сведены в табл. 4.1.

Для низкотемпературных тепловых труб, как правило, проблем с организацией нагрева не возникает. Часто используются медные блоки для того, чтобы сделать более равномерным подвод тепла к стенкам трубы.

Обратимся далее к методам отвода тепла от тепловых труб в экспериментальных установках. Наиболее часто используют следующие методы отвода тепла или их сочетание: 1) радиационный; 2) кондуктивный — через прослойку низкотеплопроводного материала; 3) через газовый зазор; 4) циркулирующим теплоносителем ;5) посредством испарения.

Трудности может создавать необходимость произвольного регулирования теплоотвода, а также строгого калориметрирования отводимого тепла. При высоких температурах наиболее часто применяется теплоотвод через газовый зазор к водяному калориметру. Ухудшение вакуума в газовом зазоре (в той области давлений, где теплопроводность газа изменяется с изменением его давления), замена газов с различной теплопроводностью (аргона, гелия, водорода), а также смешение газов в различных концентрациях дает возможность изменять теплоотвод в широких пределах.

При исследовании тепловых труб часто необходимо изучить следующее: 1) максимальный теплоперенос и удельные тепловые потоки в стационарных условиях работы; 2) распределение температур вдоль тепловой трубы в стационарных условиях, термические сопротивления; 3) динамические характеристики: возможность пуска, время выхода на заданный тепловой режим и другие; 4) влияние гравитационных и других (например, электромагнитных) сил на характеристики тепловой трубы; 5) ресурс работы.

Решение каждой из перечисленных задач, как правило, требует своеобразного экспериментального подхода. Ниже при рассмотрении характеристик, полученных при исследованиях тепловых труб на различные температурные уровни, будут приведены типичные схемы экспериментальных установок, отмечены их преимущества и недостатки.

§ 4.2. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

Для тепловых труб со щелочно-металлическими теплоносителями (натрием, калием, рубидием, цезием) в целом характерен высокий теплоперенос. Эти теплоносители совместимы с такими

широко распространенными конструкционными материалами, как нержавеющие стали и сплавы на основе никеля. Данные тепловые трубы могут обеспечить длительный ресурс работы при условии хорошей очистки корпуса трубы, фитиля и теплоносителя от нежелательных примесей, прежде всего кислорода. Натрий имеет очень благоприятные теплофизические свойства и в диапазоне температур 650—1000° С наиболее приемлем. Калий обычно при-

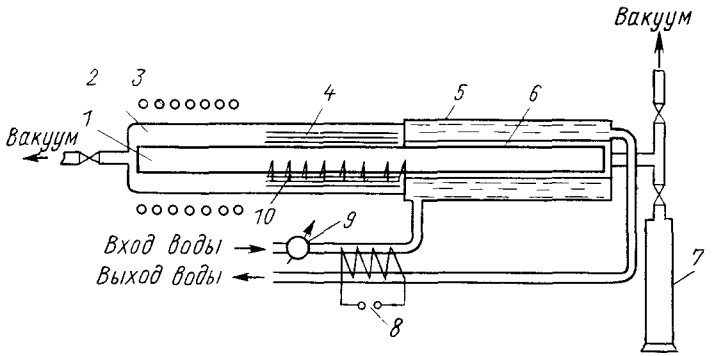


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки с натриевой тепловой трубой [1]: *1* — тепловая труба; *2* — кварцевая ампула; *3* — спираль индуктора; *4* — тепловые экраны; *5* — водяной калориметр; *6* — газорегулируемый зазор; *7* — баллон с гелием; *8* — измеритель перепада температуры, *9* — расходомер; *10* — термопары

меняют лишь в тех случаях, когда необходимо обеспечить изотермичность трубы и высокий теплоперенос при температурах 550—650° С, т. е. в том диапазоне температур, где для натрия давление паров слишком мало. Рубидий и цезий имеют сравнительно малое поверхностное натяжение и ухудшенные по сравнению с натрием и калием другие физические свойства. Их следует использовать лишь при 400—550° С там, где требования по теплопереносу относительно невелики, и, главным образом, необходимо обеспечить изотермичность.

Рассмотрим наибольший осевой и радиальный теплоперенос для характерных конструкций тепловых труб, а также достигнутый ресурс работы для тепловых труб различных конструкций.

Теплоперенос. Для тепловых труб с составными фитилями могут быть получены наилучшие результаты по теплопереносу. Наибольший удельный теплоперенос (на единицу поперечного сечения парового канала) был достигнут в опытах Винца и Буссе с натриевой тепловой трубой [1] (рис. 4.2). Опыты проводились на цилиндрической горизонтальной трубе длиной 500 мм с корпусом из нержавеющей стали диаметром 12 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Труба имела 27 продольных прямоугольных канавок шириной 0,5 и глубиной 0,6 мм, покрытых сеточным экраном с максимальным эффективным диаметром пор 11 мкм. Технология изготовления фитиля описана в § 2.3. Поверхностная пористость

фитиля оценивается 20%. Труба заполнялась натрием с использованием горячей геттерной очистки с последующей дистилляцией натрия. Нагрев осуществлялся индукторами длиной 35 и 110 мм. Нагреваемая и адиабатическая части трубы находились в кварцевой ампуле. Адиабатическая зона имела длину 245 и 160 мм. В охлаждаемой зоне на длине 200 мм тепло отводилось водой через наполняемый гелием газорегулируемый зазор.

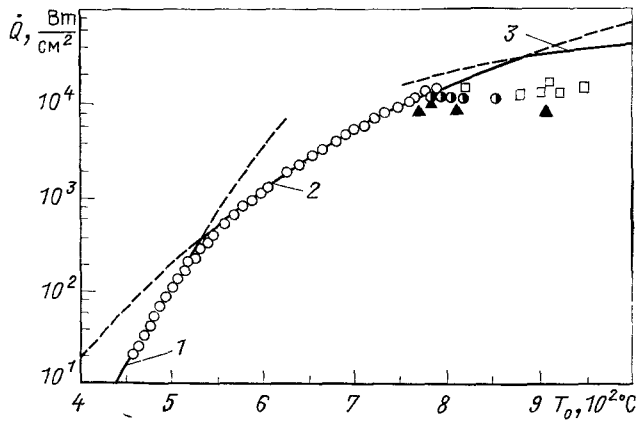


Рис. 4.3. Зависимость максимального удельного теплопереноса в натриевой тепловой трубе от температуры в начале зоны нагрева [1] (сплошные и пунктирные линии — расчет, ○, □, △ — эксперимент):

1 — вязкостный предел; *2* — звуковой предел; *3* — капиллярные ограничения

Результаты измерений максимального теплопереноса представлены на рис. 4.3. Зависимость теплопереноса от температуры можно разделить на три области. При 460—530° С имеют место вязкостные ограничения теплопереноса, при которых плотность теплового потока изменялась пропорционально изменению $\rho_0'' P_0''$ (где 0 означает, что плотность и давление пара взяты при температуре T_0 в начале зоны испарения). Измерения проводились с короткой индукционной катушкой (длиной 35 мм).

В интервале температур 530—790° С наблюдались звуковые ограничения теплопереноса — плотность теплового потока увеличивалась уже пропорционально $(\rho_0'' P_0'')^{1/2}$. Эксперименты по измерению теплопереноса проводились с коротким и длинным индукторами. Наибольшее значение радиального теплового потока достигало 1,25 кВт/см² (отнесено к площади внутренней поверхности тепловой трубы) при $T_0 = 750°$ С и плотности осевого теплового потока, равной 11,2 кВт/см².

В интервале температур 720—945° С при использовании индуктора длиной 110 мм зафиксировано более 40 осушений трубы. Отмечено следующее: 1) мощности, при которых происходили осушения фитиля в этом диапазоне температур, не описываются определенной кривой (см. рис. 4.3), наблюдается разброс значе-

ний от 7 до 15,5 кВт/см^2; 2) зависимости от температуры при 790—945° С не наблюдается; 3) даже наивысшие значения теплопереноса при осушении располагаются приблизительно вдвое ниже теоретической кривой капиллярных ограничений (точки и кривая *3* на рис. 4.3).

После первой серии измерений (частично зачерненные точки на рис. 4.3) появились трудности с пуском трубы — возникало большое горячее пятно в нагреваемой зоне даже при малых удельных тепловых потоках. Запускать тепловую трубу оказалось возможным только при очень медленном нагреве (5—10° С/мин) и отвакуумированном зазоре между трубой и водяным калориметром. Лишь при достижении 820° С горячее пятно исчезало и можно было увеличивать теплоперенос. После первой серии измерений вакуум в объеме, окружающем зону нагрева, ухудшился от $6 \cdot 10^{-2}$ Па до 1 Па. В течение этого периода измеренные значения ограничений теплопереноса (треугольники на рис. 4.3) непрерывно уменьшались (~на 20%). Когда тепловые потоки увеличивали до высоких значений, горячее пятно появлялось уже и при температуре 820° С. Осушение начиналось всегда с места, где размещалось горячее пятно.

При улучшении вакуума в объеме, окружающем зону нагрева, до $2 \cdot 10^{-3}$ Па значения критических нагрузок снова увеличивались до прежних значений, в большинстве случаев горячее пятно больше не появлялось вплоть до осушения. Однако если такое пятно имелось, то значения критических нагрузок были всегда ниже, чем без горячего пятна. Существенное улучшение вакуума в зазоре калориметра при медленном пуске трубы привело к дальнейшему увеличению критических нагрузок (вплоть до 15,5 кВт/см^2).

Обсуждая полученные результаты, авторы экспериментальной работы [1] приходят к выводу, что наиболее вероятным объяснением расхождения теории с экспериментом является влияние поверхностных химических эффектов, приводящее к понижению капиллярных сил. Капиллярное давление может оказаться весьма чувствительным к тонкой пленке загрязнений (таких, как окислы) на жидкости и на смачиваемой поверхности.

Ранее расхождение между измеренным критическим теплопереносом и теоретическими значениями капиллярных ограничений в экспериментах с тепловыми трубами большой удельной мощности было уже обнаружено в опытах Кемми с натриевыми тепловыми трубами [2] и опытах Фрааза и Семюэлза с калиевыми трубами [3].

Кемми, основываясь на том, что при работе трубы были слышны удары капель о стенку, причину расхождения объяснил действием уноса жидкости из фитиля. Однако это объяснение представляется неубедительным. В опытах Хуфшмидта и др. [4] показано, что фитиль, выполненный из сетки с ячейками размером 250 мкм, предотвращает унос даже при очень больших числах Рейнольдса текущего газа. Унос капель в опытах Кемми должен

был иметь место в конденсаторной части трубы, где осуществляется рециркуляция натрия, однако это никак не могло сказаться на балансе давлений в испарительной зоне и соответственно на капиллярных ограничениях мощности.

Фрааз и Семюэлз [3] рассматривали три возможных объяснения полученного расхождения: присутствие пузырей неконденсирующихся газов, несоответствие расчетной и реальной геометрии фитиля, уменьшение смачивающегося действия за счет примесей кислорода. Более вероятным объяснением они считают последнее.

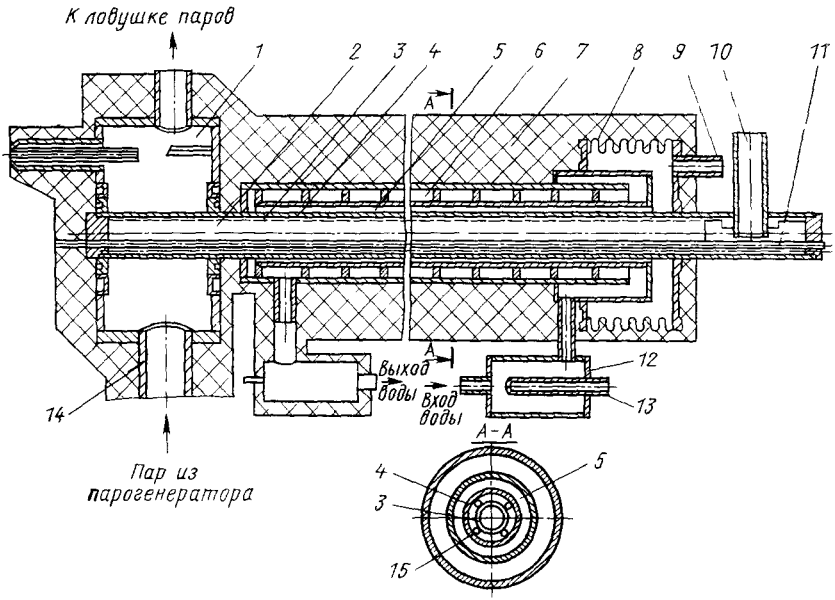


Рис. 4.4. Конструкционная схема установки ФЭИ с натриевой тепловой трубой, имеющей составной фитиль с перфорированным экраном:

1 — паровая камера; *2* — паровой канал тепловой трубы; *3* — фитиль; *4* — корпус тепловой трубы; *5* — газорегулируемый зазор; *6* — водяной калориметр; *7* — тепловая изоляция; *8* — сильфон; *9* — трубка для подачи газа в газорегулируемый зазор; *10* — трубка для заполнения тепловой трубы теплоносителем; *11* — капилляр подвижной микротермопары; *12* — смеситель воды; *13* — термопариая гильза; *14* — паропровод; *15* — дистанционирующие проволоки

Авторы этой книги провели опыты на горизонтально расположенной цилиндрической тепловой трубе с составным фитилем экранного типа и кольцевым зазором для протока жидкости (рис. 4.4). Конструкция тепловой трубы была выбрана таким образом, чтобы наиболее важные параметры (диаметр парового канала, радиус пор на поверхности фитиля, зазор для протока жидкости) отвечали требованиям проверки расчетной модели и сохранялись неизменными в процессе работы. С этой целью экран составного фитиля выполнялся в виде перфорированной трубки. Диаметр отверстий в зоне нагрева длиной 100 мм составлял 450 мкм, отверстия были расположены в шахматном порядке, поверхностная пористость равнялась 33%. Диаметр отверстий

перфорированной трубки на остальной части длины (600 мм) был равен 1,2 мм. Эта часть перфорированной трубки плотно обертывалась сеткой с размером квадратных ячеек, равных 40 мкм. Зазор для протока жидкости в фитиле выбран достаточно большим, чтобы потери давления по жидкостному тракту были малыми. Этому требованию и требованию заполнения при горизонтальном положении удовлетворял зазор 0,5 мм. Перфорированная трубка со стороны зоны нагрева плотно насаживалась на посадочный выступ торцевой заглушки с последующим закреплением точечной сваркой. В зоне конденсации для обеспечения компенсации температурных расширений предусматривалась скользящая посадка перфорированной трубки на втулку. Зазор для протока жидкости также дистанционировался проволоками диаметром 0,4 мм, проложенными вдоль трубы в зоне конденсации.

Температура в паровом пространстве по длине трубы измерялась подвижной микротермопарой, которая свободно перемещалась в капилляре $\varnothing 1{,}5 \times 0{,}25$ мм. Капилляр проходил в нижней части парового канала трубы, соприкасаясь с экраном составного фитиля. Поскольку термопара предназначалась для измерения распределения температур пара в различных режимах работы трубы, в том числе и звуковых, то для предотвращения аэродинамического нагрева, возникающего при высоких скоростях пара, капилляр в конце зоны испарения и в адиабатической зоне был покрыт капиллярным устройством, образованным из скрученной тонкой проволоки. Таким образом, измерение температуры пара осуществлялось «мокрым термометром», а стенка капилляра подвижной термопары имела температуру, практически соответствующую температуре насыщения пара в данном сечении трубы.

Теплоподвод к трубе осуществлялся конденсирующимся натриевым паром на длине 100 мм. Тепло отводилось к водяному калориметру, а теплосъем регулировался посредством изменения давления гелия в зазоре шириной 0,5 мм между корпусом трубы и калориметром.

Установка была многоцелевой и предназначалась: для исследования распределения температуры насыщения пара вдоль трубы в звуковых и дозвуковых температурных режимах; для измерения звукового предела и капиллярных ограничений теплопереноса без газа и с неконденсирующимся газом в паровом пространстве трубы; для изучения пусковых характеристик трубы как без газа, так и при наличии различных газов при разных массовых содержаниях их в паровом пространстве. Измерение максимального теплопереноса проводилось в следующем порядке. При малом теплоотводе от трубы (или при полном отсутствии его) температуру трубы повышали до определенного уровня. Затем, поддерживая температуру тепловой трубы почти постоянной, медленно увеличивали теплоотвод от трубы вплоть до наступления осушения фитиля в зоне испарения. Момент осушения фиксировался по резкому падению температуры пара в трубе при одно-

временном понижении отводимой мощности. После осушения теплоотвод от трубы уменьшали или совсем прекращали. Эти условия поддерживали вплоть до восстановления температуры пара внутри тепловой трубы до уровня температуры греющего пара снаружи ее. Затем изменяли температурный уровень тепловой трубы и измеряли максимальную мощность на новом уровне температуры. Как при отсутствии неконденсирующихся газов, так и при наличии их в паровом пространстве трубы были получены результаты, удовлетворительно согласующиеся с расчетом.

В целях изучения влияния примесей (таких, как кислород и водяные пары) в заключение программы исследований был измерен максимальный теплоперенос после подачи в тепловую трубу дозированных количеств воздуха. Результаты измерений представлены на рис. 4.5. Объем первой порции введенного в трубу воздуха, приведенный к нормальным условиям, составил 2,42 см³. Влажность воздуха при этом была равна 60—70% при температуре 25° С. Осушение составного фитиля в опытах происходило при мощностях, весьма близких к расчетным. По истечении одних суток работы теплоноситель в тепловой трубе был заморожен, остаточные газы отвакуумированы. Пониженное по сравнению с начальным давление в тепловой трубе указывало на то, что кислород и влага из воздуха поглощены натрием. Была подана новая порция возуха объемом 3,75 см³. Онако измерить максимальный теплоперенос при таком количестве газа оказалось невозможным — поверхность с эффективным теплоотводом сильно уменьшилась. Поэтому по истечении ~1,5 ч после разогрева трубы некоторое количество оставшихся газов было удалено. Измерения максимального теплопереноса показали довольно близкое соответствие ее расчетным значениям. Со второй порцией газов тепловая труба работала также в течение одних суток. Третья порция воздуха объемом 2,45 см³ не привела к сильному снижению максимального теплопереноса. Снижение наблюдалось в пределах до 25%.

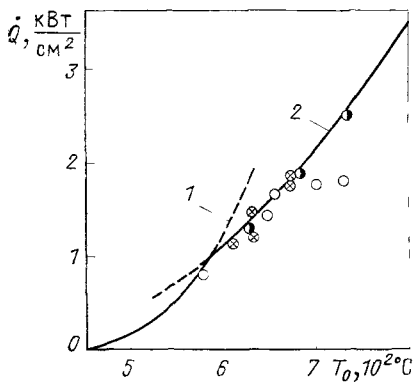


Рис 4.5 Зависимость максимального теплопереноса натриевой тепловой трубы от температуры, измеренной в начале зоны нагрева, при введении различных порций воздуха в паровой канал (опыты ФЭП)

⊗—введено 2,42 см³ воздуха, приведенного к нормальным условиям; ◑ — добавлено 3,75 см³ воздуха; ○ — еще добавлено 2,45 см³ воздуха, *1*, *2* — расчетные значения звукового и капиллярного пределов мощности тепловой трубы

Итак, в наших опытах введение даже большого количества загрязняющих примесей с воздухом (введено в общей сложности 8,62 см³ воздуха, взятого при нормальных условиях и имеющего влажность около 60—70%) мало сказалось на капиллярных ог-

раничениях теплопереноса. Загрязняющими примесями были кислород и водород (последний входил в состав воды). Эти опыты были проведены с тепловой трубой, имеющей относительно крупную капиллярную структуру. По нашему мнению, это не должно препятствовать распространению выводов об относительно малом влиянии загрязнений на капиллярное давление и для труб с мелкой капиллярной структурой, с которыми проводились опыты в работах [1—3].

Более вероятной причиной расхождения опытных значений максимального теплопереноса с расчетными значениями капиллярных ограничений для тепловых труб высокой мощности является вскипание жидкого натрия в фитиле. Большие мощности приводят к возникновению больших радиальных и циркуляционных перегревов, достаточных для возникновения паровой фазы на наиболее «активных» центрах парообразования. Поступление газа вследствие диффузии через стенку тепловой трубы в работе [1], по-видимому, улучшало условия для вскипания, приводило к осушению трубы при уменьшенном теплоподводе.

Авторы книги провели эксперименты на тепловых трубах с составными фитилями, имеющими сеточный экран. Экран выполнялся в виде цилиндрической пористой трубки, изготовленной из односторонней фильтровой сетки (материал — нержавеющая сталь 1Х18Н8Т) саржевого плетения № 450 либо № 685. При изготовлении пористых трубок сетка на медной цилиндрической оправке плотно свертывалась в несколько слоев, а продольный шов проваривался точечной электросваркой.

Эксперименты по определению звукового предела мощности вплоть до 9 кВт/см^2 были проведены на натриевой тепловой трубе (рис. 4.6) длиной 960 мм, имеющей длину зоны нагрева 350 мм, адиабатической зоны 150 мм и зоны конденсации 460 мм. Корпус трубы имел диаметр 17 мм и толщину стенки 1,5 мм. Составной фитиль был выполнен из двух концентрически расположенных пористых экранов, изготовленных каждый из трех слоев сетки № 685 с зазором между слоями 0,07 мм. Средний зазор между корпусом тепловой трубы и ближайшим к нему экраном составлял 0,23 мм. Диаметр парового канала был равен 12 мм при толщине экранов 0,35 мм. Поскольку экраны центрировались только на концах трубы при приварке их к заглушкам, то естественно, что зазоры по длине могли изменяться от кольцевого до серповидного. Измеренный эффективный диаметр пор экранов составлял 26 мкм.

Способ уплотнения экранов на концах трубы посредством приварки их совместно с заглушками к концам трубы применим тогда, когда тепловая труба предназначается для работы без термических качек. При проведении экспериментов с осушением трубы выявился недостаток такого способа уплотнения — не обеспечивалась компенсация температурных расширений экрана и стенки трубы. В условиях осушения фитиля при быстрых разогревах и охлаждениях, когда различия температур стенки трубы и

экранов фитиля могут достигать сотни и более градусов, за счет разности температурных расширений происходит растяжение и сжатие экранов, что в конечном счете может привести к образованию гофр на экранах и появлению больших, не заполняемых жидкостью зазоров под ними. Наличие гофр было обнаружено после препарирования некоторых образцов таких тепловых труб, проходивших предварительные испытания при нагреве в радиационных печах. Трубы испытывались при быстром нагреве и охлаждении и различном действии гравитационных сил на работу труб.

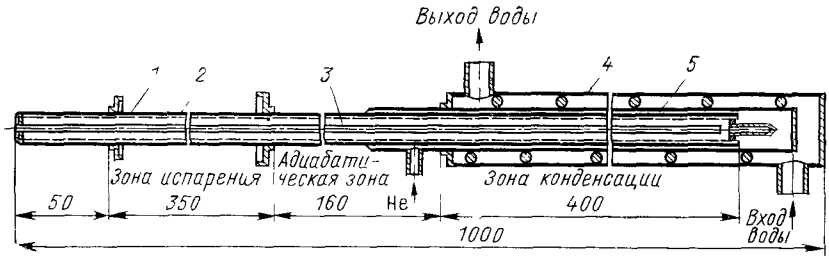


Рис. 4.6. Конструкция натриевой тепловой трубы с большим теплопереносом, использованной в опытах ФЭИ:
1 — корпус; *2* — фитиль; *3* — капилляр для размещения подвижной термопары; *4* — водяной калориметр; *5* — зазор для подачи газа

Некоторые из таких труб после их изготовления сначала обеспечивали ожидаемые характеристики по теплопереносу, но в процессе проведения предварительных испытаний ухудшали эти характеристики. В дальнейшем конструкция тепловых труб была изменена так, что использовались экраны с «плавающими» заглушками. Для сохранения заполняемости зазоров натрием за заглушками неплотно укладывалось несколько слоев сетки.

В тепловых трубах с канавочной капиллярной структурой максимальный теплоперенос экспериментально исследовался в работе Кемме [5]. В качестве теплоносителей использовались натрий и калий. Для всех исследованных тепловых труб внутренний радиус труб был равен 7,5 мм, длина — 300 мм, длина зон испарения и конденсации — 80 и 220 мм соответственно. Результаты некоторых опытов представлены на рис. 4.7, 4.8. Число прямоугольных канавок в трубах как открытых, так и закрытых сеточным экраном было равно 88.

Натриевые тепловые трубы при равных условиях обеспечивали существенно больший теплоперенос, чем калиевые, начиная с температуры несколько выше 500° С (см. кривую *2* на рис. 4.7). Большое расхождение экспериментально полученных значений максимальной мощности с расчетными при низких давлениях пара (см. кривые *1* на рис. 4.7, *а*) Кемме — автор работы [5] — объясняет взаимодействием пара с потоком жидкости в открытых каналах. При высоких скоростях пара взаимодействие приводит

к появлению паразитной рециркуляции теплоносителя из-за уноса жидкости паровым потоком. Покрытие канавок сеткой, как и следовало ожидать, увеличивало максимальные мощности за счет уменьшения взаимодействия пара с жидкостью (сравни кривые *1* и *2* на рис. 4.7, *а*). Для трубы с неплотно прижатой сеткой максимальная мощность была больше, чем для трубы с плотно

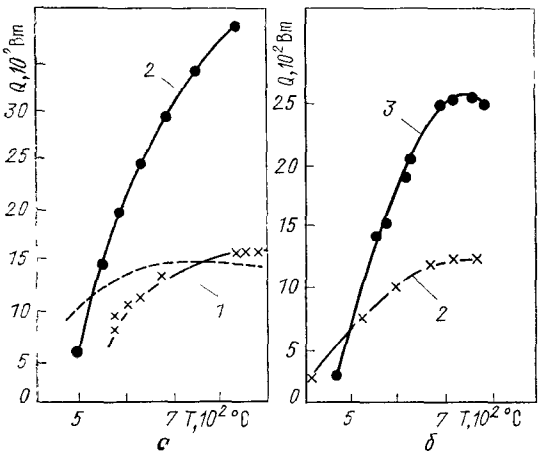


Рис. 4.7. Влияние экранной сетки на максимальный теплоперенос в зависимости от температуры натриевых (*а*) и калиевых (*б*) тепловых труб [5] [размер канавок (ширина и глубина) 0,16×0,4 мм, точки — эксперимент, пунктирная линия — расчет]:

1 — канавки, не покрытые экраном; *2* — канавки, покрытые плотно прижатым экраном; *3* — канавки, покрытые свободно прилегающим экраном

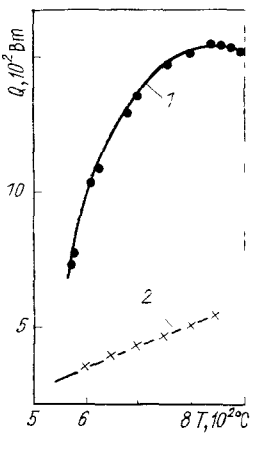


Рис. 4.8. Экспериментальная зависимость максимальной мощности от температуры при различных размерах открытых канавок для натриевых труб [5]:

1 — канавки размером 0,16×0,4 мм; *2* — канавки размером 0,12×0,3 мм

прижатой сеткой (см. кривые *2* и *3* на рис. 4.7, *б*). Это может быть объяснено тем, что в первом случае использовалось большее сечение для протока жидкости в капиллярной структуре. Изменение размеров канавок при сохранении их числа существенно сказывалось на максимальной переносимой мощности (см. рис. 4.8). Экспериментально установлено, что при фиксированном числе канавок определенного размера существует свой оптимум переносимой мощности.

При пусковых режимах перепад давления в паровом потоке по длине трубы, как правило, намного больше перепада давления в жидкости. Поэтому для обеспечения возможности пуска без обогрева конденсаторной части трубы желательно иметь высокий располагаемый перепад капиллярного давления, что обеспечивается канавками меньшей ширины. Тепловые трубы с широкой канавкой в опытах Кемме не запускались из-за капиллярных ограничений в пусковых режимах.

Таблица 4.2

Фитили тепловых труб [6]

Номер тепловой трубы	1	2	3	4	5
Номер сетки	50	80	120	150	300
Размер ячейки, мм×мм	0,36×0,36	0,21×0,21	0,141×0,141	0,125×0,125	0,055×0,055
Диаметр проволоки, мм	0,2	0,14	0,09	0,06	0,04
Число слоев сетки	2	3	4	2	4

Тепловые трубы с сеточной капиллярной структурой исследовались в работе Шмидта и Семерия [6]. Изучалось влияние размеров сеток и угла наклона трубы на максимальную мощность натриевых тепловых труб с простым фитилем из нескольких слоев металлической сетки с квадратной ячейкой. Фитиль прижимался к стенке трубы спиральной пружиной. Размер ячеек сетки изменялся для каждой трубы. В табл. 4.2 представлены геометрические характеристики фитилей экспериментальных тепловых труб.

Диаметр корпуса трубы 25 мм, толщина 2 мм и длина 200 мм. Трубы нагревались индукционным методом, теплосъем регулировался составом смеси газов в кольцевом зазоре между тепловой трубой и водяным калориметром. Опыты проводились при различном наклоне тепловой трубы. На рис. 4.9, *а* представлены ре-

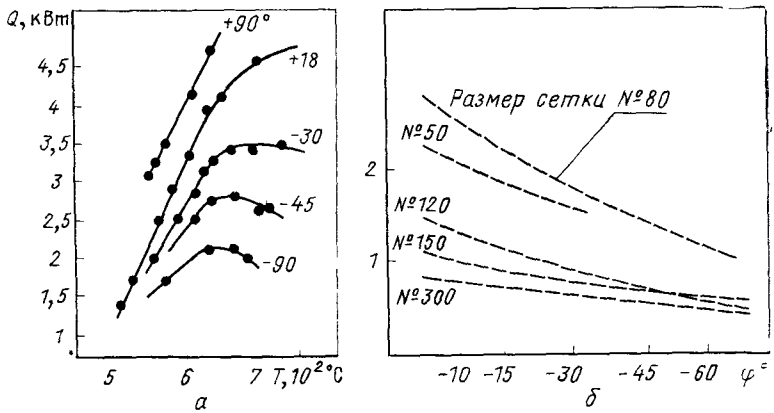


Рис. 49. Зависимость максимального теплопереноса для натриевых тепловых труб с сеточной капиллярной структурой от температуры при различных углах наклона (*а*) и от угла наклона для различных сеток (*б*) [6] (точки — эксперимент; пунктирная линия — пересчет данных эксперимента)

зультаты экспериментов с тепловой трубой № 2 при различных температурах и углах наклона. Кривые ограничения мощности имеют свой максимум при определенной температуре для каждого угла наклона. На рис. 4.9, *б* представлены пересчитанные, исходя из экспериментальных данных, характеристики тепловых труб с разными сетками, но одинаковым числом слоев этих сеток, равным трем. Из представленных характеристик следует, что тепловая труба с сеткой № 80 должна передавать самые большие количества тепла. Сетка № 300 имеет малую проницаемость, хотя и способна создавать высокое капиллярное давление.

Для изучения характеристик теплопереноса и полей температуры насыщения вдоль парового канала в Физико-энергетическом институте были проведены эксперименты с натриевой тепловой трубой, в которой в качестве «простого» фитиля использовалась сетка саржевого плетения [7]. Экспериментальная установка состояла из тепловой трубы с излучательной нагревательной печью и воздушным холодильником, а также из системы дистилляционной очистки и дозировки подаваемого в тепловую трубу натрия. Труба горизонтально располагалась внутри барокамеры, наполняемой аргоном. Длина трубы составляла 500 мм, диаметр 28,5 мм, толщина стенки 1,5 мм. Внутри трубы в три слоя по спирали уложена сетка саржевого плетения С80 ГОСТ 3185-65 из нержавеющей стали (диаметр проволоки основы — 0,35 мм, диаметр утка — 0,25 мм). Диаметр парового канала трубы 20,5 мм, основа сетки с осью трубы составляла угол 7°. Через каждые 100 мм для крепления сетки установлены тонкостенные кольца. Нагрев трубы осуществлялся на длине 180 мм, теплоотвод — на длине 245 мм. Для измерения температуры пара в семи сечениях по длине парового пространства трубы в гильзах размещались хромель-алюмелевые термопары. Передаваемое по трубе тепло определялось по расходу и подогреву воздуха. Температура, измеренная по длине трубы при различном теплопереносе, дана на рис. 4.10.

Рассмотрение перепадов давления в паровой и жидкой фазах в режиме с наибольшим теплопереносом (3,7 кВт) приводит к кажущемуся несоответствию. Максимальное капиллярное давление, рассчитанное по размеру пор сетки и равное $2 \cdot 10^3$ Па, намного меньше действительного перепада давления в паровой фазе, которое выше $7 \cdot 10^3$ Па. Это кажущееся противоречие можно

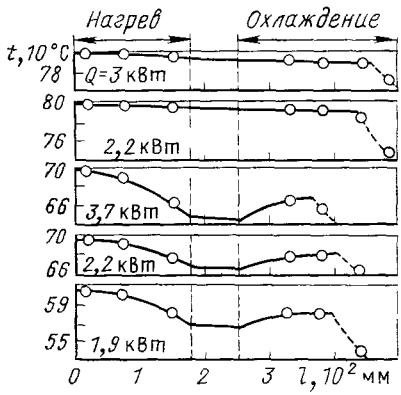


Рис. 4.10. Экспериментальное по одиночным термопарам (кружки) и подвижной термопаре (сплошная линия) распределение температуры пара по длине натриевой тепловой трубы в опытах ФЭИ [7]

объяснить следующим образом. Внутри саржевой сетки имеются непрерывные каналы, в которых радиусы кривизны менисков могут быть много меньше, чем в порах на поверхности сетки. Эти каналы клиновидной формы образованы проволокой основы и вплотную уложенной на ней проволокой утка. По мере увеличения перепада давления между фазами в таком канале уменьшается доля сечения, заполненная жидкостью, уменьшается радиус кривизны мениска, соответственно увеличивается капиллярное давление. При этом фитиль частично осушается, начиная с сечения, в котором разность давлений пара и жидкости равна капиллярному напору поверхностных пор сетки. Таким образом, мы встречаемся со случаем работы тепловой трубы в условиях, когда движение жидкости по фнтилю происходит при изменяющемся вдоль трубы коэффициенте проницаемости. При таком частичном осушении фитиля испарение жидкости происходит в глубине фитиля, и по не заполненным жидкостью порам пар перемещается к поверхности капиллярной структуры и попадает в паровой канал.

Свойство фитилей с каналами клиновидной формы сечения — создавать высокое капиллярное давление — может быть использовано на практике. Например, это свойство помогает упростить пуск трубы, когда в пусковом режиме имеет место наибольший перепад давлений между фазами.

Различные вопросы теплопереноса в высокотемпературных тепловых трубах исследовались также в экспериментальных работах [8—10].

Ресурс работы. Основной причиной, приводящей к перегоранию высокотемпературных тепловых труб или потере их работоспособности, является массоперенос как металлических, так и неметаллических элементов конструкционного материала из зоны конденсации в зону испарения. Забивание фитиля при кристаллизации перенесенных масс приводит к его осушению. Повышение концентрации неметаллических примесей в зоне испарения способствует усилению как межкристаллитной коррозии материала стенки и фитиля, так и их растворения с одновременным ослаблением прочности.

Удельный тепловой поток характеризует кратность циркуляции теплоносителя и в какой-то мере степень концентрации загрязнений в зоне нагрева. Длина трубы является характеристикой масштабного фактора: для длинных тепловых труб может иметь место большее количество загрязнений, что способствует усилению коррозионных процессов. Диаметр трубы и толщина стенки характеризуют ее прочность. От вида капиллярной структуры зависит ее чувствительность к явлениям, сопровождающим процессы переноса массы. К сожалению, во многих случаях при описании ресурсных испытаний часть из названных выше параметров не приводится, и поэтому анализ результатов затруднен.

Из результатов испытаний высокотемпературных щелочно-металлических тепловых труб на ресурс работы (см. табл. 4.3) видно, что для температур ниже 1000° С ситуация довольно благо-

Таблица 4.3

Данные ресурсных испытаний высокотемпературных тепловых труб (до 1000° С)

Теплоноситель	Материал корпуса и фитиля	Фитиль	Размеры, м		Среда	Тепловой поток, Вт/см²	Температура, °С	Длительность испытаний, ч	Литература
			длина	диаметр					
Cs	Х18Н10Т	1 слой сетки № 120	200	20/19,5	ВК	16,5	525	10500	ФЭИ
Cs	Ti	—	—	—	—	—	400	>2000	[11]
Cs	Nb+1% Zr	Канавки	400	10/8	ВК	60	830	20000	[14]
K	Ni	—	—	—	—	—	600	>6000	[13]
K	Ni	—	—	—	—	—	600	16000	[12]
K	Ni	—	—	—	—	—	600	>24000	[13]
K	Нержавеющая сталь	—	150	12,5	—	—	650	5800	[15]
K	Нержавеющая сталь 347	—	—	—	—	—	510	6500	[16]
Na	Х18Н10Т	Составной	405	12/10	ВД	9,5	690	9950*	ФЭИ
Na	Х18Н10Т	То же	405	12/10	ВД	11,2	720	11600*[2]	ФЭИ
Na	Х18Н10Т	Три слоя сетки № 120	550	12/21	ВД	6,6	670	16600*[3]	ФЭИ
Na	Нержавеющая сталь 316	—	—	—	—	—	771	>4000	—
Na	Нержавеющая сталь 304	—	150	12,5	ВД	—	650	3900	[15]
Na	То же	—	300	12,5	ВД	—	650	1300	[15]
Na	»	—	—	—	—	—	—	11500	[16]
Na	Хастеллой X	—	—	—	—	—	715	>8000	[13]
Na	»	—	—	—	—	—	715	>20000	[13]
Na	Nb+1% Zr	Канавки	400	10/8	ВК	60	830	16000	[14]
Hg	Нержавеющая сталь 347	Сетка из нержавеющей стали 304	—	—	—	—	—	10000	[17]

Примечания: ВК — испытания в вакууме; ВД — испытания на воздухе, Р — разрушение корпуса, * — работа тепловой трубы против силы тяжести, *[2] — работа ТТ с использованием силы тяжести; *[3] — работа ТТ в горизонтальном положении.

приятная — для труб имеются материалы, которые могут длительно работать при температурах 500—750° С с цезием, калием и натрием. Для получения длительного ресурса работы необходима соответствующая техника заполнения трубы теплоносителем, гарантирующая хорошую очистку от примесей как конструкционных материалов, так и щелочного металла.

Опыты авторов показали, что возможна длительная эксплуатация на воздухе тепловых труб с относительно тонкой стенкой (толщиной 1 мм) в течение десятков тысяч часов. Неудивительно, что тепловые трубы с грубой капиллярной структурой, например канавочной, способны весьма длительно работать при температурах 600—700° С. Но оказывается, что и тогда, когда используются весьма тонкие капиллярные структуры, ресурс работы может быть длительным. Это выявили опыты авторов, проведенные на тепловых трубах с составными фитилями, имеющими экран из тонкой сетки саржевого плетения и испытанными при работе в различных положениях по отношению к горизонту, в том числе и против силы тяжести (табл. 4.3). Заполнение этих тепловых труб натрием проводилось методом напроток, что гарантировало хорошую очистку конструкционных материалов и теплоносителя.

В работе [14] описаны ресурсные испытания цезиевой и натриевой тепловых труб с корпусом из ниобиевого сплава (Nb — 1% Zr) при 830° С. Капиллярную структуру составляли 64 канавки шириной 0,25 и глубиной 0,4 мм. Осмотр труб после перегорания показал, что имела место эрозия капиллярной структуры, интенсивный рост зерен особенно в испарительной зоне, в этой же зоне наблюдалась концентрация циркония, сильно обогащенного его окислами. Указывается, что две натриевые тепловые трубы при температуре 630° С и тепловых потоках в зоне нагрева около 40 Вт/см^2 проработали без перегорания 32 500 и 27 500 ч. Осмотр показал лишь одинаковый рост зерен в испарительной и конденсаторной зонах.

В [14] даны рекомендации по использованию в сочетании с калием и натрием нержавеющей стали и инконели. Титан с этими теплоносителями несовместим.

В работе [17] проведены опыты с ртутной тепловой трубой. После 10 000 ч работы в ней наблюдалась некоторая коррозия и перенос массы с выпаданием осадка в фитиле и на стенке, а также стрессовая коррозия под напряжением в проволоках сеточного фитиля. Однако эти эффекты на характеристиках ртутной тепловой трубы не сказались.

§ 4.3. ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ С КОРПУСОМ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ

В диапазоне весьма высоких рабочих температур (выше 1000° С) основные направления проводимых исследований обусловлены задачами обеспечения достаточно длительного ресурса

работы, поиском путей замедления переноса массы и устранения коррозии. При выборе капиллярной структуры для тепловых труб из тугоплавких материалов приходится учитывать эффекты закупорки и разрушения фитиля вследствие указанных выше явлений. Экспериментально было опробовано большое число тепловых труб с различными теплоносителями, наибольшее число опытов было проведено с литиевым теплоносителем, имеющим самые благоприятные для применения в тепловых трубах теплофизические свойства.

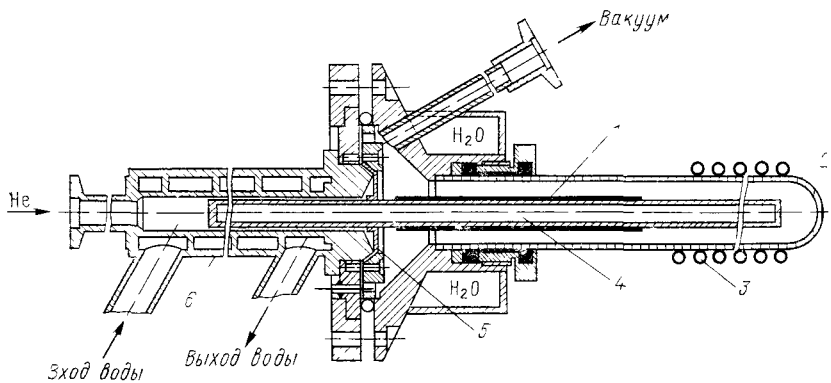


Рис 4 11 Схема экспериментальной установки с литиевой тепловой трубой [18].

1 — тепловой экран, *2* — кварцевое стекло, *3* — индукционный нагреватель, *4* — тепловая труба, *5* — танталовая диафрагма, *6* — холодильник

Теплоперенос. Наибольший удельный теплоперенос в горизонтальной литиевой тепловой трубе был достигнут в работе [18]. Корпус трубы с диаметром парового канала, равным 7,7 мм, был изготовлен из тантала, фитиль выполнен в виде 39 канавок глубиной 0,96 и шириной 0,42 мм, покрытых сеткой из сплава Nb — 1% Zr с ячейкой 0,11 мм и диаметром проволоки 0,06 мм. Труба длиной 448 мм нагревалась индуктором на участке протяженностью 150 мм. Длина зоны охлаждения составляла 204 мм. Сетка к стенке трубы приваривалась контактной сваркой. Схема экспериментальной установки дана на рис. 4.11. Сборка состояла из двух частей: нагреваемая и адиабатическая части находились в вакууме, охлаждаемая — в атмосфере гелия. Мембрана толщиной 0,2 мм, приваренная электронным лучом к тепловой трубе, разделяла эти части установки. Температуры контролировались двумя вольфрам-рениевыми термопарами, находящимися под экраном в адиабатической зоне, а также оптическим пирометром. Максимальный теплоперенос определялся по появлению горячего пятна в зоне нагрева.

Результаты измерений теплопереноса показаны на рис. 4.12. Максимальный измеренный удельный теплоперенос при 1500° С

составил 15 кВт/см². Расчетные кривые соответствуют капиллярным ограничениям в расчете на заполненную (работа трубы в режиме составного фитиля) и недозаполненную канавку (работа в режиме простого фитиля). Значения теплопереноса при пониженных температурах получены в начале опытов и существенно выше рассчитанных, что указывает на работу трубы с составным фитилем (сетка служит экраном). При высоких температурах расчетные значения оказались выше экспериментальных, по-видимому, произошло коробление сетки и разрушение ее в зоне нагрева. Теплоперенос при этом уже определялся капиллярной структурой канавок, а не сетки, мог сказаться также унос жидкости.

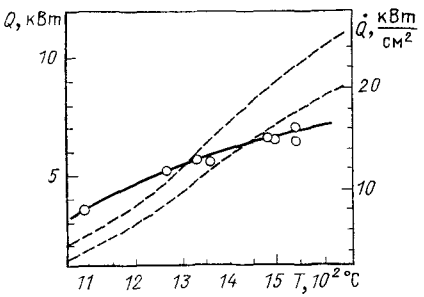


Рис. 4.12. Зависимость теплопереноса в литиевой тепловой трубе от температуры [18]:
О — эксперимент; — — — — расчет (нижняя кривая рассчитана для недозаполненной жидкостью канавки; верхняя — для полностью заполненной)

Авторы книги совместно с С. И. Обуховым провели эксперименты по измерению теплопереноса в литиевой тепловой трубе, имеющей иную капиллярную структуру, — использовался составной фитиль с кольцевым зазором для протока жидкости и экраном из перфорированной трубки. Тепловая труба (рис. 4.13) диаметром 9×1 мм и длиной 270 мм имела экран составного фитиля — из трубки диаметром 6,25 мм с толщиной стенки 0,2 мм. Материал корпуса и экрана—молибденовый сплав. Перфорации выполнялись сверлением, диаметр отверстий в зоне испарения был равен 0,6 мм, в зоне конденсации — 1 мм. Поверхностная пористость составляла 15 и 55% соответственно. Загрузка лития осуществлялась методом вакуумной перегонки с использованием циркониевого геттера для предварительной очистки. Помимо 0,85 г лития было загружено также 0,05 г кальция. Тепловая труба нагревалась при непосредственном пропускании по ней электрического тока на длине 110 мм, тепло отводилось к водяному калориметру с газовым зазором 0,5 мм на длине 115 мм. Температура трубы определялась пирометром. Опытные данные, полученные в диапазоне температур 920—1600° С, представлены на рис. 4.14. Наибольший удельный теплоперенос, равный 12 кВт/см², получен при подаче водорода в зазор калориметра.

Осушение тепловой трубы в зоне нагрева удалось получить лишь при пониженных температурах —940—990° С. Экспериментально полученные значения максимальной мощности согласуются с расчетными. Опыты показали, что в тепловых трубах с фитилями, имеющими относительно крупную капиллярную структуру (размер пор 0,6 мм) и малую поверхностную пори-

стость (15%) при использовании лития в качестве теплоносителя, достижим высокий теплоперенос.

Ресурс работы. Превые результаты испытаний тепловых труб из тугоплавких материалов на ресурс работы были доложены в 1965 г. на конференции по термоэмиссионному преобразованию тепловой энергии в электрическую в Лондоне, затем такие результаты регулярно докладывались на последующих международных и внутренних конференциях, а также публиковались в виде отчетов и статей [19—30]. Основное внимание исследователи уделяли тепловым трубам для диапазона температур 1400—1700° С,

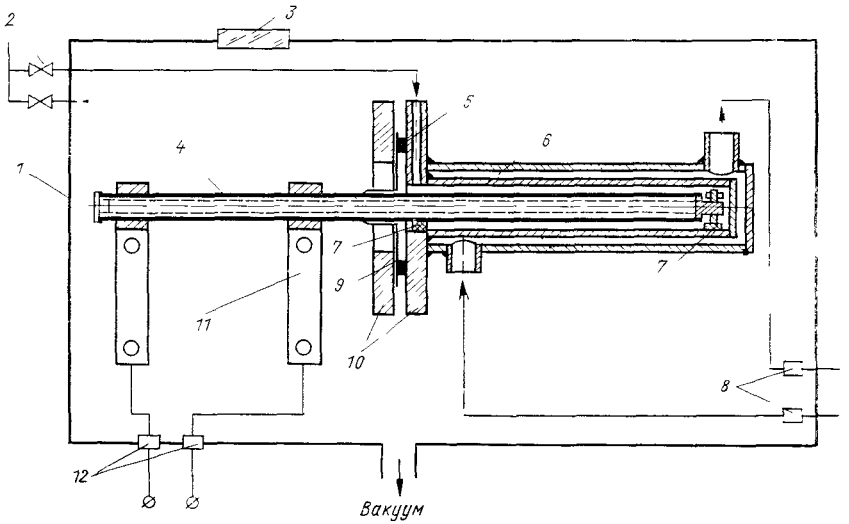


Рис. 4 13. Схема экспериментальной установки ФЭИ с литиевой тепловой трубой:

1 — вакуумная камера; *2* — линии для подвода и отвода газа; *3* — окно с кварцевым стеклом; *4* — тепловая труба; *5* — медное уплотняющее кольцо; *6* — водяной калориметр; *7* — дистанционирующая соломка из окиси бериллия; *8* — подвод и отвод воды; *9* — ниобиевая мембрана; *10* — фланцы; *11* — молибденовые токоподводы; *12* — гермовводы

которые могли служить катодами в термоэмиссионных преобразователях. Исследования велись в Лос-Аламосской лаборатории (США), в исследовательском центре Евратома в Испре (Италия), атомном центре в Гренобле (Франция) и в других научных центрах.

В Лос-Аламосской лаборатории в первых опытах [19] были испытаны тепловые трубы с литием, серебром и некоторыми другими металлами в качестве теплоносителей. Трубы имели длину от 100 до 430 мм и диаметр от 10 до 20 мм. В качестве фитиля использовалось несколько слоев сетки. После заполнения теплоносителем трубы нагревались по всей длине, чтобы обеспечить хорошее смачивание сетки. Литиевые тепловые трубы из сплава ниобия с 1% циркония испытывались в диапазоне температур

от 900 до 1350° С. При 1100° такая тепловая труба проработала без заметных изменений структуры материала свыше 4000 ч, причем за это время в трубе процирку лировало более 720 кг лития. Трубы из вольфрам-иттриевого сплава, заполненные литием, испытывались в течение нескольких часов при 1875° С. Из-за высокого давления паров лития при этой температуре имело место раздувание тепловых труб, работающих при температурах выше 1500° С. Танталовые трубы с индием, серебром и свинцом в качестве теплоносителей показали большой массоперенос тантала из зоны конденсации в зону испарения, вследствие чего и происходит пережог этих труб. Танталовая труба с серебром в качестве теплоносителя проработала 100 ч при 1900° С, причем общее количество процирку лированного серебра составляло 200 кг. Скорость массопереноса из зоны конденсации в зону испарения, определенная на основании опытов с тремя такими трубами, составляла 10^{-9} г/Дж перенесенного тепла. В одной из этих тепловых труб использовалась в качестве фитиля вольфрамовая сетка. Сетка осталась неизменной после циркуляции 200 кг серебра при температуре 1900° С. В той же работе [19] приведены результаты исследований по совместимости материалов, полученные в опытах с изотермичными капсулами. Опыты проводились с индием, серебром и свинцом в танталовых капсулах. После выдержки в течение 1000 ч при 1800° С вскрытые капсулы не показали взаимодействия материалов. Это доказывает, что статические изотермические условия исследования совместимости не соответствуют более тяжелым условиям работы материалов в тепловых трубах.

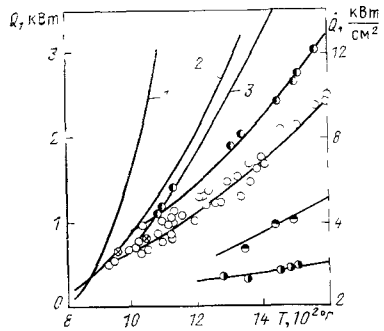


Рис. 4.14. Расчетная (линии) и экспериментальная (кружки) зависимости теплопереноса в литиевой тепловой трубе от температуры (опыты ФЭИ):

1 — звуковые ограничения мощности, *2* — капиллярные ограничения при работе составного фитиля; *3* — капиллярные ограничения при работе простого фитиля; ○ — в зазоре калориметра гелий, ◐ — водород, ◓ — аргон; ◑ — вакуум, ⊗ — осушение фитиля в испарительной части

Первые изготовленные и опробованные в исследовательской лаборатории Евратома (при температурах около 1500—1600° С) тепловые трубы имели малый ресурс работы вследствие коррозии и закупорки фитиля продуктами переноса массы [20]. Системы с литиевым теплоносителем при температуре 1600° С давали течь уже после нескольких десятков часов работы. Например, тепловая труба из сплава Nb — 1% Zr вышла из строя после 132 ч, труба из тантала — после 17 ч. При этом в зоне нагрева появлялась течь из-за кислородной коррозии. Несколько тепловых труб со свинцом в качестве теплоносителя также быстро вышли из строя (трубы из сплава Nb — 1% Zr отказали в работе при

1570° С после 50 ч, при 1600° С — после 20 ч). Пережог этих тепловых труб был вызван образованием в канавочной капиллярной системе твердого интерметаллического слоя толщиной 1 мм. В тепловой трубе, выполненной из тантала, со свинцом в качестве теплоносителя, проработавшей 250 ч при 1600° С, была обнаружена сильная рекристаллизация тантала. Эта труба выдержала 40 пусков и остановок.

В докладе [21] на конференции в Хьюстоне (США) в 1966 г. были представлены результаты дальнейших исследований Евратома по ресурсным испытаниям тепловых труб в диапазоне температур 1000—1600° С. Корпус и фитиль тепловых труб изготавливались из Nb — 1% Zr, Ta и W. В качестве теплоносителей использовались литий, свинец, висмут, таллий, барий, а также натрий и цезий. Результаты испытаний приведены в табл. 4.4, где τ — продолжительность работы; q — удельные тепловые потоки в зоне нагрева; φ — угол наклона трубы, отсчитываемый от горизонтали. Все тепловые трубы имели канавочную капиллярную структуру. Трубы из сплава Nb — 1% Zr и Ta при диаметре 11 мм и толщине стенки 2 мм имели 62 канавки шириной 0,25 мм и глубиной 0,4 мм. Вольфрамовые трубы изготавливались диаметром 10 мм и толщиной 1 мм посредством осаждения из паровой фазы. Капиллярную систему этих трубок составляли 30 прямоугольных канавок шириной и глубиной 0,4 мм. Длина труб была не более 120 мм. Тепловые трубы герметизировались заглушками с концов без обеспечения сообщения между канавками.

При изготовлении труб проводились следующие операции:

1) материал стенки предварительно дегазировался при глубоком вакууме (Nb — 1% Zr и Ta — в течение 20 мин при ~1700° С; W—Tl и W—Ba в течение 30 ч при 2000° С; вольфрам—литий, вольфрам—свинец, вольфрам—висмут в течение 1 ч при 1900° С);

2) после операций с трубами на воздухе снова проводилась дегазация их при глубоком вакууме в течение 10 мин при температуре около 1000° С;

3) в тепловые трубы вводился предварительно очищенный теплоноситель и геттер — барий.

Причины выхода из строя тепловых труб: 1 — горячее пятно в зоне нагрева; 2 — течь в зоне нагрева; 3 — течь в зоне охлаждения; 4 — появление механических деформаций;

4) осуществлялась дегазация в течение нескольких минут при 1000° С и глубоком вакууме, вольфрам-бариевая труба дегазировалась при температуре 1600° С в среде аргона в течение 40 мин без заметных потерь бария из тепловой трубы;

5) электронным лучом приваривались заглушки.

Тепловые трубы, изготовленные из сплава Nb — 1% Zr, в экспериментах разрушались после относительно малого времени работы при 1600° С. Наибольшее время — 287 ч — проработала труба с барием. В тепловых трубах с бариевым и свинцовым теплоносителями имел место сильный массоперенос из зоны конденсации в зону испарения. В опытах наблюдалась так-

Ресурсные испытания тепловых труб, изготовленных из различных материалов [21]

Теплоноситель	T, °С	Содержание основного элемента, %	Nb—1% Zr			
			τ, ч	d, Вт/см²	Φ, град	q^{*2}, Па
Bi	1600	99,9999	1	35	90	3
Pb		99,99	19	35	90	1,2
Tl		99,999	40	45	90	1,2
Li		99,9	132	20	90	1,2
Ba		99,5	287	35	90	3

* Тантал (точнее, тантал с небольшой добавкой иттрия); *2 — динамический вакуум ния в кварцевом контейнере).

же межкристаллитная коррозия, особенно сильно проявившаяся для системы с висмутовым теплоносителем. В зоне конденсации коррозия была неравномерной по длине: в начале зоны конденсации — слабая, в конце — сильная. В тепловых трубах, где теплоносителем были Tl, Li, Ba, в зоне конденсации наблюдалась незначительная эрозия материала стенки, а в зоне испарения стенка сильно разрушалась из-за коррозии. Тепловая труба с Ba разрушилась из-за разрыва стенки вдоль границ зерен в зоне конденсации. Этот эффект характерен для крупнозернистой структуры. Коррозия была обнаружена после опытов во всех трубах с корпусом из Nb — 1% Zr.

Тепловые трубы, изготовленные из тантала или тантала с прибавками иттрия (SGS—Ta) во время коррозионных испытаний при 1600° С имели такие же хорошие характеристики, как и тепловые трубы, изготовленные из сплава Nb — 1% Zr. Количественно массоперенос Ta в Bi и Pb был на два порядка ниже, чем ниобия. В трубе с Tl в качестве теплоносителя почти никакой коррозии обнаружено не было. Эти опыты были преждевременно закончены (после 248 ч) из-за нарушения вакуума. Другая тепловая труба, изготовленная из тантала с добавками иттрия, где в качестве теплоносителя был использован Tl, работая в горизонтальном положении со средним тепловым потоком в зоне нагрева 60 Вт/см², выдержала испытания более чем 2000 ч.

Тепловые трубы, изготовленные из вольфрама с Li и Pb в качестве теплоносителя успешно проработали в горизонтальном положении более 1000 ч при 1600° С. Литиевая труба имела особенно слабую коррозию. Трубы с корпусом из вольфрама с Bi, Tl, Ba в качестве теплоносителей раз-

Таблица 4.4

Ta				W			
τ, ч	q, Вт/см²	φ, град	g, Па	τ, ч	q, Вт/см²	φ, град	C*³
39	50	90	1	118	70	90	2, 3, 4
1000*	50	90	—	1000	80	0	—
248*	50	90	—	75	70	0	1
17	50	90	1,2	1000	70	0	—
340*	50	90	1,2	358	50	25	1

(10⁻⁴ Па), создаваемый масляным диффузионным насосом, *³ C — статический вакуум (испыта-

рушились после нескольких десятков или сотен часов из-за коррозии в зоне испарения, такой же, как в трубах из Nb — 1% Zr и Ta. Тепловая труба, выполненная из вольфрама с барием в качестве теплоносителя, разрушилась вследствие межкристаллитной коррозии. Опыты с Tl и Ba в качестве теплоносителя были прекращены после того, как горячее пятно охватило всю зону нагрева. Обе трубы имели коррозионный осадок и почти полное разрушение канавок в зоне нагрева, слой дендритов из вольфрама имел толщину около 1 мм. Не было найдено каких-либо интерметаллических соединений вольфрама с таллием.

В 1973 г. были представлены результаты экспериментов Евратома с тепловыми трубами, корпуса которых изготовлены из вольфрам-рениевого сплава (26% Re) с литием и серебром в качестве теплоносителей [29]. Использовались трубки внешним диаметром 11 мм с толщиной стенки 1,5 мм и длиной 116 мм. Капиллярную систему образовывали 24 открытых аксиальных прямоугольных канавки размером 0,5×0,5 мм, соединенные у концевых заглушек. Трубки были помещены в охлаждаемые водой ампулы из кварца с двойными стенками (вода прокачивалась между стенками ампул). Вакуум $5 \cdot 10^{-7}$ Па в ампулах поддерживался ионным геттерным насосом. Тепловые трубы обогревались с помощью индукционного нагревателя токами высокой частоты. Периодически химическим способом удалялся налет, появляющийся на внутренней поверхности ампул. Параметры испытаний даны в табл. 4.5.

После проведения опытов выполнялась электронография, ионные анализы и микроанализы электронным зондом. Тепловые трубы с литием и серебром в качестве теплоносителей имели перенос массы, типичный для высокотемпературных труб, коррозию в зоне охлаждения и кристаллизацию материала стенки в зоне

Таблица 4.5

Ресурсные испытания тепловых труб из вольфрам-рениевого сплава [29]

Номер тепловой трубы	1	2	3	4	5
Теплоноситель	Li	Li	Li	Ag	Ag
Масса теплоносителя, г	0,30	0,28	0,26	5,9	6,2
Температура, °С	1600	1700	1800	2000	2000
Тепловой поток на внутренней поверхности испарителя, Вт/см^2	120	120	120	155	155
Длина зоны нагрева, мм	20	24	29	33	33
Длина зон конденсации по обе стороны от зоны нагрева, мм	15/81	15/77	15/72 721	13/70	13,70
Продолжительность опыта, ч	10000	10000		1000	1000
Число отключений	230	193	Перегорание 30	50	55

нагрева (за одним исключением — в тепловой трубе № 4 имелась кристаллизация также и в конце зоны охлаждения). Установлено, что происходит преимущественно растворение Re в зоне охлаждения и перенос его в зону нагрева. Наблюдалось два типа коррозионных явлений: 1) общая и точечная (трубы 1, 4); 2) продольное растрескивание (трубы 2, 3 и 5). Коррозионное явление каждого типа соответствовало определенной партии поставки материала корпуса и определялось текстурой вольфрам-рениевого сплава. Авторы работы [29] на основе анализа этих экспериментов приходят к выводу, что тепловые трубы с корпусом из W — 26% Re с Li в качестве теплоносителя при 1600° С могут работать в течение многих лет, при 1700° С уже после одного года может наблюдаться значительная коррозия, а при 1800° С их ресурс будет порядка одного месяца. Тепловые трубы с корпусом из W — 26% Re с Ag в качестве теплоносителя оказываются пригодными для работы при 2000° С в течение 1000 ч, хотя наблюдается значительное испарение с поверхности материала корпуса, выполненного из рения.

В 1976 г. в работе [30] приведены данные по изучению коррозии тепловых труб с различными теплоносителями при весьма высоких температурах — выше 2000° С. В качестве материала корпуса тепловой трубы использовался вольфрам, осажденный из паровой фазы. Внешний диаметр труб составлял 12 мм, толщина стенки — 2 мм, длина — 130 мм. Капиллярную структуру составляли аксиальные канавки размером 0,4×0,4 мм, соединенные между собой у концевых заглушек. Все трубы были газорегулируемыми, располагались вертикально в охлаждаемой водой кварцевой ампуле и нагревались снизу индукционным способом.

Все выбранные теплоносители: Ag, Au, Cu, Ga, Ge, In — не образовывали интерметаллидов с вольфрамом. На первом этапе опытов проводились измерения давления насыщенных паров указанных элементов. Все тепловые трубы, за исключением тех, где теплоносителями были серебро и индий, при температурах 2300—2650° С вышли из строя. После этого оставшиеся целыми трубы были выведены на стационарный режим испытаний. Испытания тепловой трубы с серебром в качестве теплоносителя были прекращены после 6,25 ч при 2420° С и теплопереносе 2,86 кВт из-за перекоса ее в кварцевой ампуле, хотя течи теплоносителя в ней не было. Тепловая труба, где теплоносителем был индий, расплавилась после 2,4 ч работы при 2290° С и теплопереносе 2,08 кВт (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Опыты с тепловыми трубами, корпус которых изготовлен из вольфрама [30]

Номер тепловой трубы	1	2	3	4	5	6	7
Теплоноситель	Ag	Cu	In	Ga	Sn	Ge	Au
Чистота теплоносителя, %	99,999	99,95	99,9999	99,9999	99,999	99,9999	99,999
Масса теплоносителя, г	7	6	6	5	6	5	12
Первый этап опытов: температура, °С	2420	2510	2290	2320	2575	2500	2650
продолжительность, ч	1	0,67	1,5	0,4	0,4	0,1	0,13
Второй этап опытов: температура, °С	2420	—	2290	—	—	—	—
продолжительность, ч	6,25	—	2,4	—	—	—	—
Газ между ТТ и калориметром	Ar	Ar	Ar	He	He	He	He
Средний тепловой поток в зоне испарения при максимальной температуре*, Вт/см²	200	220	145	160	240	225	270
Общий теплоперенос при максимальной температуре, кВт	2,86	3,15	2,08	2,28	3,44	3,22	3,87

* Отнесен к внутренней поверхности.

Примечательно то, что в тепловой трубе, где теплоносителем было серебро, отсутствовал какой-либо массоперенос. Однако эта труба должна была разрушиться вследствие межкристаллитной коррозии. Линейная экстраполяция глубины проникновения во времени дает возможность ожидать [30], что время ее работы при 2420° С составит около 25 ч. В тепловых трубах с другими теплоносителями наблюдался интенсивный массоперенос. Таким образом, показано, что наиболее перспективной парой для использования при температурах выше 2000° С является комбинация из вольфрама (корпус) и серебра (теплоноситель).

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что лишь тщательная очистка тугоплавкого конструкционного материала и теплоносителя позволяет достичь ресурсов работы, указанных в работе [30].

§ 4.4. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ И КРИОГЕННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

Экспериментальному и расчетному исследованиям характеристик низкотемпературных и криогенных тепловых труб посвящено большое число работ [31—69].

При разработке низкотемпературных тепловых труб различных типов возникают специфические задачи. Отметим наиболее важные из них:

1. Изучение механизма теплопереноса при наличии силы тяжести и экстраполяция данных, полученных в наземных условиях на случай, когда сила тяжести отсутствует.

2. Достижение оптимальных характеристик тепловых труб, в частности высокого теплопереноса.

3. Выбор теплоносителей и материалов, совместимых друг с другом.

4. Ресурсные испытания

Механизм теплопереноса при наличии массовых сил и при их отсутствии. Для тепловых труб, работающих в широком интервале температур, в частности для криогенных труб, зачастую велики изменения объема теплоносителя. Труба, заполненная теплоносителем с небольшим избытком жидкости, рассчитанным на наименьшую рабочую температуру, как правило, имеет «лужу» — объем избыточной жидкости в нижней своей части (рис. 4.15). Из-за плохих теплофизических свойств низкотемпературных теплоносителей при больших углах наклона трубы к горизонту φ зачастую трудно обеспечивать заполнение фитиля в верхней части трубы, поэтому приходится вести эксперименты при малых наклонах. При повышенных температурах объем лужи оказывается велик, значительной оказывается ее протяженность. Поскольку можно практически не считаться с гидравлическим сопротивлением при переносе жидкости в луже, в эффективную длину трубы не входит занятый лужей участок $l_п$ (см. рис. 4.15). Этот фактор приводит к увеличению максимальной переносимой

мощности. Воздействие гидростатического столба жидкости ведет к неоднородности гидродинамической картины по радиусу трубы. В совокупности с воздействием гидростатического столба, обусловленного наклоном трубы, этот эффект уменьшает максимальную переносимую мощность по сравнению с переносом в усло-

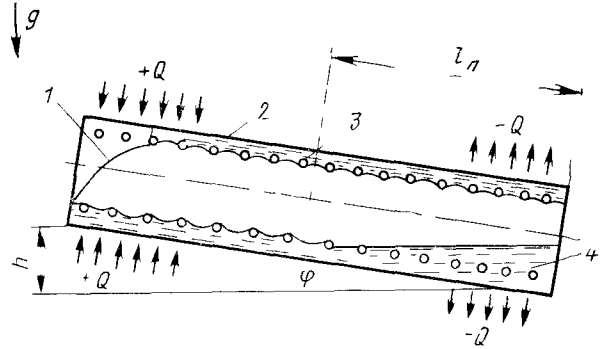


Рис 4 15. Схема испытаний тепловой трубы в поле гравитационных сил
1 — фронт осушения фитиля, *2* — корпус, *3* — фитиль, *4* — «лужа»

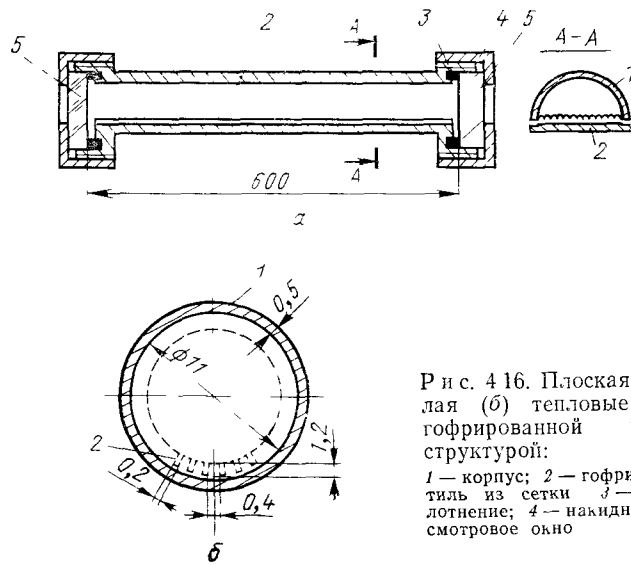


Рис. 4 16. Плоская (*а*) и круглая (*б*) тепловые трубы с гофрированной капиллярной структурой:
1 — корпус; *2* — гофрированный фитиль из сетки *3* — резиновое уплотнение; *4* — накидная гайка; *5* — смотровое окно

виях невесомости. Следует отметить, что при малом капиллярном напоре фитиля возможно осушение фитиля в верхней части, а соответственно и увеличение объема и протяженности лужи. При этом фронт осушения фитиля имеет вид, качественно представленный на рис. 4.15. Задача гидродинамического расчета тепловой трубы становится двухмерной.

Значительное влияние на работу тепловых труб с канавочной гофрированной капиллярной структурой оказывают силы гравитации [67]. Для того чтобы исключить многомерность задачи, часть опытов проводили на тепловой трубе с плоским фитилем из гофрированной сетки (рис. 4.16, *а*). Фитиль изготовлен из никелевой односторонней сетки саржевого плетения 80/720 ТУ16-538.082—70 (основа из проволоки диаметром 0,052 мм, уток — из проволоки диаметром 0,035 мм). Гофрирование было проведено таким образом, что структура получилась неоднородной; узкие каналы чередовались с широкими. Движение жидкости в капиллярной структуре осуществлялось по широким закрытым каналам, узким открытым каналам и по самой сетке саржевого плетения. Длина трубы составляла 600 мм, ширина фитиля — 15 мм. Торцевые заглушки были выполнены из стекла, что позволило визуально на-

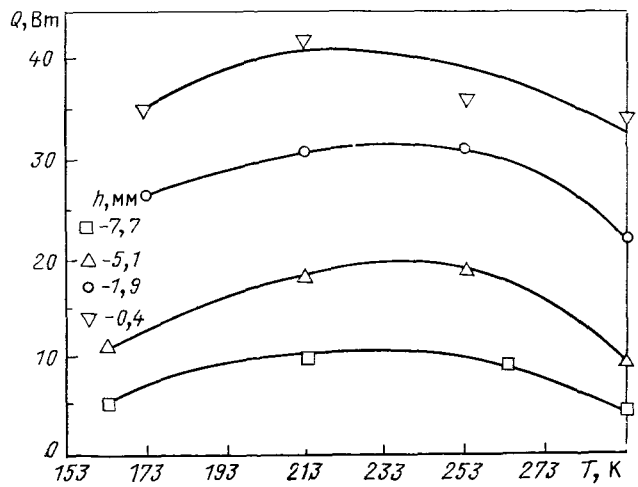


Рис. 4.17. Экспериментальная зависимость максимального теплопереноса от температуры при разном наклоне плоской тепловой трубы с гофрированной капиллярной структурой [67]

блюдать за поведением жидкости в тепловой трубе. Подвод тепла осуществлялся от электрического нагревателя на длине 140 мм, отвод (с помощью медной охлаждаемой азотом шины) на длине 140 мм. Тепловая труба была установлена в вакуумной камере и теплоизолирована посредством экранновакуумной изоляции. Труба заполнена 16 г фреона-22; при таком количестве его наблюдалось заполнение капиллярной структуры без избытка при 173 К. Максимальная мощность трубы, измеренная при различных наклонах, соответствующих опусканию охлаждаемого конца на высоту h, представлена на рис. 4.17. Видно, что изменение наклона от $h=-0{,}4$ мм до $h=-7{,}6$ мм изменяет максимальный теплоперенос в четыре и более раза.

Чтобы определить характеристики капиллярной структуры, необходимо оценить влияние лужи. Зависимость длины лужи от температуры и наклона тепловой трубы, полученная в опытах при отсутствии теплопереноса, представлена на рис. 4.18. С ростом теплопереноса длина лужи несколько увеличивается, достигая 1,05—1,15 от измеренной при отсутствии теплопереноса. Это связано с особенностью работы неоднородной капиллярной структуры.

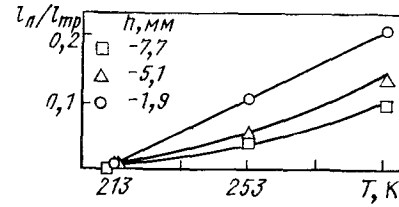


Рис. 4.18. Экспериментальная зависимость относительной длины лужи от температуры при разном наклоне плоской тепловой трубы и отсутствии теплопереноса [67]

По мере увеличения теплопереноса перепад давления жидкость — пар растет и при определенной мощности становится равным по величине перепаду капиллярного давления широких каналов. Дальнейший рост теплопереноса ведет к тому, что сначала начинается отступление фронта жидкости в широких каналах в направлении адиабатической зоны, а затем, начиная с определенной мощности, происходит отступление фронта жидкости также и в узких каналах.

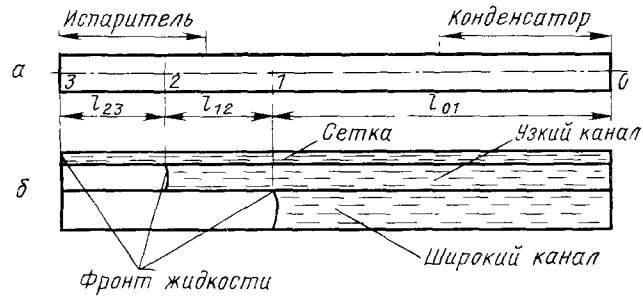


Рис. 4.19 Схема положения жидкости в гофрированной капиллярной структуре при максимальном теплопереносе для тепловой трубы (*а*) и элемента трехканальной капиллярной структуры (*б*)

В режиме максимального теплопереноса капиллярная система частично осушена, а распределение жидкости в ней имеет ступенчатый характер (рис. 4.19). На участке *0—1* жидкость движется по всей капиллярной структуре, падение давления в жидкости на этом участке ΔP_{0-1} определяется перепадом капиллярного давления широких каналов. На участке *1—2* жидкость движется по сетке и узким каналам; падение давления ΔP_{1-2} соответствует разности перепада капиллярных давлений узких и широких каналов. На участке *2—3* жидкость переносится только по сетке; перепад давления ΔP_{2-3} соответствует разности перепада капиллярных давлений сетки и узких каналов. Исходя из такой многоканальной (в данном случае трехканальной) схемы, максималь-

ный теплоперенос можно определить при решении следующей системы уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
\Delta P_{0-1} + \rho_{ж} g h_{0-1} &= \frac{\nu}{r}\frac{l_{0-1}}{k_{1-2}S_{1-2}}Q;\\
\Delta P_{1-2} + \rho_{ж} g h_{1-2} &= \frac{\nu}{r}\frac{l_{1-2}}{k_2 S_2}Q;\\
\Delta P_{2-3} + \rho_{ж} g h_{2-3} &= \frac{\nu}{r}\frac{l_{2-3}}{k_3 S_3}Q;\\
l_{0-1} + l_{1-2} + l_{2-3} &= l,
\end{aligned}\right\} \qquad (4.1)$$

где h_{0-1}, h_{1-2}, h_{2-3} — высота подъема испарительной части трубы относительно конденсаторной на участках *0—1*, *1—2*, *2—3* (высота отрицательная); l_{0-1}, l_{1-2}, l_{2-3} — эффективные длины участков *0—1*, *1—2*, *2—3* соответственно, а l — эффективная длина тепловой трубы; k_1, k_2, k_3 — коэффициенты продольной проницаемости широких каналов, узких и сетки; k_{12} — суммарный коэффициент проницаемости структуры, который определяется в основном проницаемостью широких и узких каналов; S_1, S_2, S_3 — площади поперечного сечения широких каналов, узких и сетки. Искомые параметры при решении системы (4.1) — Q, l_{0-1}, l_{1-2}, l_{2-3}.

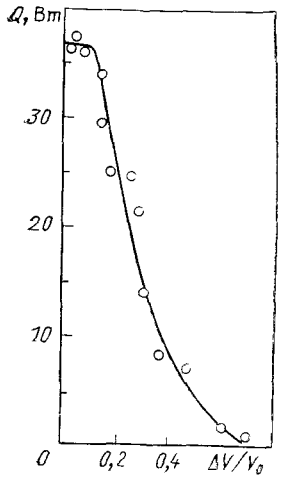


Рис. 4.20. Экспериментальная зависимость максимального теплопереноса от относительной недозаправки для плоской тепловой трубы с гофрированной капиллярной структурой [67] (T=253 К; h=—0,4 мм; $\Delta V/V_0$ — отношение недостающего объема теплоносителя к объему при полностью заполненной структуре)

Заметим, что при отсутствии наклона трубы положение жидкости в капиллярной структуре при $Q_{макс}$ не зависит от температуры трубы или вида теплоносителя, а определяется только геометрическими параметрами структуры. Поэтому кривая максимального теплопереноса будет только параметром комплекса $\sigma r/\nu$.

Неоднородные капиллярные структуры обладают интересной особенностью — они допускают в некоторых пределах недозаправку трубы теплоносителем без заметного уменьшения максимального теплопереноса. Это следует из расчетов и подтверждается экспериментально (рис. 4.20). Минимальная заправка трубы желательна, чтобы уменьшить размер и влияние лужи. Устойчивость работы в определенных пределах недозаправки дает гарантию, что трубы с гофрированной капиллярной структурой не потеряют работоспособность из-за технологических отклонений при укладке капиллярной сетки внутри трубы.

Возможности по теплопереносу для ци-

Таблица 4.7

Параметры этановых тепловых труб

Характеристика	Тепловая труба		Характеристика	Тепловая труба	
	ТТ-1	ТТ-2		ТТ-1	ТТ-2
Длина трубы, мм	970	970	Толщина стенки, мм	0,5	0,4
Длина зоны нагрева, мм	180	140*; 70*[2]	Диаметр парового канала, мм	7,6	7,8
Длина зоны охлаждения, мм	790	830*; 900*[2]	Эффективный радиус пор экрана, мкм	15	16
Внутренний диаметр корпуса, мм	8,9	8,8	Масса заправки этана, г	6,5	5,0

* — первый пуск тепловой трубы, *2 — второй пуск.

линдрических круглых тепловых труб с гофрированным сетчатым фитилем при различных теплоносителях (фреон-22, аммиак, этиловый спирт), различной загрузке теплоносителя и наклоне трубки к горизонту показаны на рис. 4.21. Опыты проведены на шести однотипных тепловых трубах (см. рис. 4.16, *б*) с внутренним диаметром 11 мм, длиной 1 м и протяженностью зон нагрева и конденсации 0,1 м. Температурное сопротивление труб колеблется в диапазоне 0,23—0,66° С/Вт.

На работоспособность низкотемпературных тепловых труб с составными фитилями существенное влияние могут оказывать паровые пузыри, образующиеся при заполнении капиллярной системы жидкостью. Это влияние и вместе с тем сложности постановки экспериментов с составными фитилями продемонстрируем на примере экспериментов, проведенных авторами с этановыми тепловыми трубами, сконструированными и изготовленными Е. М. Сидоренко, И. М. Блинчевским и др. Конструкция тепловых труб дана на рис. 4.22, основные характеристики их представлены в табл. 4.7.

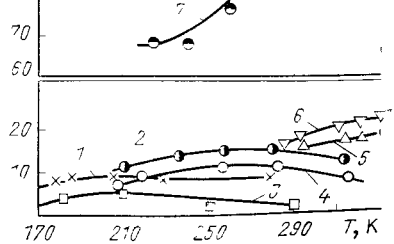


Рис. 4.21. Зависимость максимального теплопереноса от температуры при различных наклоне тепловой трубы и загрузке теплоносителя для цилиндрических тепловых труб:
1 — фреон-22, h= —10 мм, G=34 г; *2* — аммиак, h= —5 мм, G=10 г; *3* — фреон-22, h= —10 мм, G=46 г, *4* — аммиак, h= = —10 мм, G=10 г, *5* — этанол, h= —10 мм G=31 г; *6* — этанол, h= —5 мм, G=31 г. *7* — аммиак, h= —10 мм, G=22 г

Цилиндрический корпус трубы имел четыре продольных выступа для центрирования экрана, изготовленного из одного слоя тонкой никелевой сетки саржевого плетения. Изнутри экран распирался пружиной. Эксцентричное расположение экрана с широкой щелью внизу позволяло заполнять жидкостью зазор под экраном при горизонтальном положении трубы.

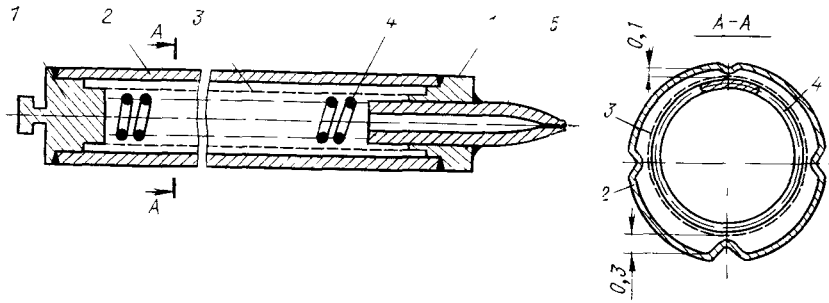


Рис 4 22. Конструкция этановых тепловых труб
1 — заглушки; *2* — корпус, *3* — экран, *4* — пружина, *5* — штуцер заполнения теплоносителем

Эксперименты проводились на криостате, имеющем кольцевую полость, заполненную жидким азотом, и центральную полость, в которой по центру располагалась тепловая труба. Теплоотвод от трубы осуществлялся через газовую среду к охлаждаемой азотом стенке. Интенсивность теплоотвода менялась в зависимости от степени разряжения в полости криостата, а также от состава газа. Переносимая трубой мощность определялась по подводимому к электронагревателю теплу с учетом потерь тепла. Во всех опытах осуществлялось измерение максимального теплопереноса при наклонном положении трубы (испарительный конец на 20 мм выше конденсаторного).

Опыты выявили, что на работоспособность тепловой трубы в каждом опыте большое влияние оказывает «предыстория», т. е. условия, при которых происходит заполнение составного фитиля жидкостью, а также режимы, предшествовавшие установке трубы в «рабочее» (наклонное) положение.

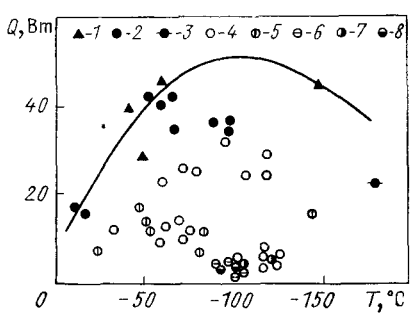


Рис 4 23 Теплоперенос, при котором наблюдалось осушение этановой тепловой трубы
1 — опыты с подачей «обратного» теплового потока; *2* — опыты с захолаживанием трубы, *3, 4, 5* — опыты с подачей небольшой мощности (2—4 Вт) в момент захолаживания; *5, 7* — недостаточное захолаживание ($t > -135°$ С), *6* и *8* — вымораживание теплоносителя ($t < -183°$ С); сплошная линия — расчетное значение капиллярного предела мощности

Результаты измерений представлены на рис. 4.23. Преждевременное осушение при очень малом теплопереносе происходило вследствие увеличения в объеме паровых пузырей, возникших в начальный момент заполнения составного фитиля жидкостью. Доказательством существования пузырей служил перегрев стенки в верхней части нагревательной зоны. Устойчиво высокие значения теплопереноса были зафиксированы в опытах после предварительной ликвидации паровых пузырей. Для ликвидации паровых пузырей использовались два способа: 1) перемена направления теплового потока; 2) захолаживание тепловой трубы до температур ниже —135° С с минимальным теплоподводом и заполнение фитиля жидкостью при этой температуре в горизонтальном положении.

При первом способе при горизонтальном расположении тепловой трубы зона конденсации ее на короткое время (1—2 мин) обогревалась дополнительным нагревателем мощностью 10—15 Вт. В таком режиме в месте расположения отключенного основного нагревателя вследствие переохлаждения жидкости паровые пузыри в фитиле конденсировались. Затем дополнительный нагреватель отключался, тепловая труба приводилась в рабочее (наклонное) положение и при постепенном увеличении теплопереноса на основном нагревателе при одновременном увеличении интенсивности охлаждения производилось измерение максимального теплопереноса.

При втором способе с отключенным электрообогревом тепловая труба в горизонтальном положении захолаживалась до температур ниже —135° С. При этом радиальные перегревы становились столь малыми, что также создавались условия для конденсации паровых пузырей. Расчетные оценки показали, что при теплопереносе меньше 2 Вт перегрев становится меньше критического при абсолютной температуре и составляет —135° С.

Помимо недостаточного захолаживания к преждевременному осушению трубы приводили также и другие факторы. Так, в экспериментах с захолаживанием было установлено, что теплоподвод к тепловой трубе 2—3 Вт при положении трубы, близком к горизонтальному, приводит в дальнейшем к преждевременному осушению. По-видимому, даже такой теплоподвод при наличии лужи достаточен для вскипания жидкости и образования паровых пузырей в фитиле либо для значительного увеличения объема уже имевшихся пузырей.

При захолаживании до температур ниже температуры замерзания этана (—183° С) также наблюдается преждевременное осушение трубы. Действительно, если тепловая труба устанавливалась в рабочее положение с замерзшим теплоносителем, заполнение фитиля происходит в условиях, обеспечивающих живучесть паровых пузырей.

В области повышенных температур максимальный теплоперенос в опытах с этановыми тепловыми трубами ограничивается вскипанием жидкости на стенке трубы в зоне теплоподвода.

На это указывают результаты, полученные при различных длинах нагреваемой части труб (рис. 4.24). Уменьшение длины зоны нагрева приводит к уменьшению максимального теплопереноса. Поскольку процесс вскипания носит статистический характер, вполне закономерен существенный разброс данных, полученных при одинаковых условиях опыта.

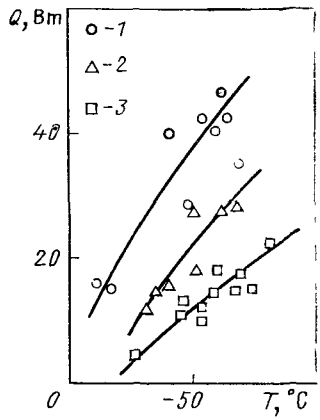


Рис. 4.24. Сравнение теплопереноса этановых тепловых труб при осушении для различных длин зоны нагрева:

1 — опыты с тепловой трубой № 1, длина зоны нагрева 180 мм, *2, 3* — опыты с тепловой трубой № 2, длина зоны нагрева 170 и 140 мм соответственно

Опыты авторов с этановыми тепловыми трубами показывают, что паровые пузыри способны нарушать работоспособность труб даже тогда, когда экран составного фитиля обладает довольно малой проницаемостью. Однако после ликвидации паровых пузырей такие трубы способны обеспечивать высокий теплоперенос — до 40 Вт в диапазоне температур от —50 до —150° С.

К настоящему времени имеется весьма большое число экспериментов, в которых исследуется теплоперенос в низкотемпературных и криогенных тепловых трубах, существенно различающихся по конструкционным параметрам, диапазону рабочих температур и назначению.

Ресурсные испытания низкотемпературных тепловых труб. При длительных испытаниях можно ожидать значительных изменений характеристик тепловых труб. Эти изменения вызваны различными причинами. Во-первых, продукты реакции, растворимые в теплоносителе, могут уменьшать поверхностное натяжение и соответственно снизить теплоперенос; твердые продукты реакции способны закупоривать капилляры; образование налета на стенке трубы также может уменьшить коэффициент теплопередачи и увеличить термическое сопротивление труб; выделение неконденсирующихся газов приводит к созданию газовой пробки в конденсаторном конце трубы, тем самым уменьшая эффективную поверхность ее; и наконец, сильная коррозия может разрушить стенку трубы и капиллярную систему. Наиболее обстоятельные данные по ресурсным испытаниям тепловых труб представлены в работах [15, 71]. В работе [71] в предварительной исследовательской программе были проведены испытания 40 тепловых труб. Трубы испытывались с многослойным сетчатым фитилем при мощности теплопереноса ~10 Вт. Теплосъем осуществлялся естественной конвекцией на воздухе. В табл. 4.8 представлены основные параметры и результаты этих опытов. Проводились следующие анализы: металлографический — стенки в зоне испарения и конденсации, масс-спектроскопиче-

Таблица 4.8

Предварительные испытания тепловых труб [71]

Материал		Теплоноситель	Геометрия		Размер ячейки сетки, мкм	Рабочая температура, С	Тепловой поток, Вт/см²	Продолжительность испытаний, ч	Примечания
Стенка	Фитиль		Внешний диаметр, мм	Длина, мм					
М	М	Вода	11,5	300	22	130	14	1400	Нет коррозии
М	Броф	»	15	300	22	130	13	20000	—
С	Нс 304	»	14	300	22	130	15	4800*	Немедленное появление газа
Нс 321	Нс 316	»	14	300	16	130	12	10400*	Появление газа
С	Нс 304	»	14	300	16	130	14	1500*	Появление газа (H_2 и CH_3)
С	Нс 304	»	14	300	25	130	14	5000*	Появление газа, несмотря на добавку NaOH
М	Броф	»	14	500	16	110	75	5000*	Растворимость Cu^{++} — 2 млн$^{-1}$
Н	Н	»	14	300	28	90	12	4500*	—
Нс 321	Нс 304	»	14	300	16	130	10	750*	Появление газа, несмотря на добавку NaOH
Нс 321	Нс 304	»	14	300	16	130	15	1400*	Газ, 7 млн$^{-1}$ Ni^{++}
Нс 321	Нс 304	Ацетон	14	300	25	70	12	10600	—
Б	Броф	»	12	500	22	50	15	2400	Коррозия стенки (Sn и Zn), растворимость в ацетоне
Б	»	»	12	500	22	50	15	2400	Коррозия стенки, ацетон изменил цвет
Нс 321	Нс 304	»	14	600	16	50	14	15000	Ацетон изменил цвет
М	Броф	»	14	600	16	50	15	1300	Межкристаллитная коррозия
М	»	»	14	600	16	50	75	13000*	Испытания продолжаются
Н	Н	»	14	300	28	70	10	8400	»
М	Броф	Метанол	14,5	300	22	50	8	700	Течь в сварном шве
Нс 321	Нс 304	»	14	300	25	50	12	5500	Незначительная коррозия

Продолжение табл. 4.8

Материал		Теплоноситель	Геометрия		Размер ячейки сетки, мкм	Рабочая температура, °С	Тепловой поток, Вт/см²	Продолжительность испытаний, ч	Примечания
Стенка	Фитиль		Внешний диаметр, мм	Длина, мм					
Б	Броф	Метанол	12	500	22	50	15	2400*	Медный налет, жидкость пожелтела
Б	»	»	12	500	22	50	15	1500*	Медный налет, Sn и Zn растворены
Нс 321	Нс 304	»	14	600	16	50	14	1500*	200 ppm Fe++, коррозия
М	Броф	»	14	600	16	50	15	1300*	200 ppm Cu++, межкристаллитная коррозия
Н	Н	»	14	300	28	70	10	6000*	29 ppm Ni++
Нс 321	Нс 304	Аммиак	12	500	10	50	80	12800	Испытания продолжаются
Нс 321	А	»	14	500	10	50	80	12000	То же
Нс 321	Нс 304	Этанол	14	300	25	70	12	18600	»
Б	Броф	»	12	500	22	70	14	1500	Легкая коррозия, медный налет в испарителе
Нс 321	Нс 304	»	14	600	16	50	14	1500	5 ppm Fe++, легкая коррозия
М	Броф	»	14	600	16	50	15	1300	Легкая межкристаллитная коррозия
Нс 321	Нс 304	Гексан	14	300	25	50	12	11900*	Нет коррозии
Б	Броф	»	12	600	22	70	15	1500*	То же
М	»	Бутанол	14	300	16	50	10	5200	Малая газовая пробка
М	»	Пропанол	14	300	16	50	10	4500	То же
М	»	Дихлорметан	14	300	16	50	10	11800	Нет коррозии
М	»	Фреон-113	14	300	16	70	10	9500	Испытания продолжаются
С	Нс 304	Дифинил	12	500	16	130	15	6200*	Легкая коррозия

Примечания: А — алюминий; Б — бронза; М — медь; Н — никель; Нс — нержавеющая сталь, С — низкоуглеродистая сталь, Броф — оловянистофосфористая бронза; * — увеличение температурного перепада вдоль трубы.

ский — обнаруженных газов, спектрометрический — теплоносителя. Анализы показали, что медь как материал стенки в сочетании с фитилем из фосфористой бронзы (6% Sn и 0,4% P, остальное — Cu) наиболее перспективна. Латунь не пригодна, так как олово растворялось во всех исследованных теплоносителях. Ацетон, метанол, этанол проявили себя как теплоносители, которые способны обеспечивать длительный ресурс работы.

После таких оценочных опытов были выбраны девять комбинаций конструкционный материал — теплоноситель, способных работать при относительно высокой мощности. Для каждой комбинации испытывались две трубы. Фитили всех тепловых труб были выполнены с шестью артериями из сетки, размер ячейки которой составлял ~ 10 мкм, примыкающими к стенке, устланной этой же сеткой. Внешний диаметр труб составлял 13,5 мм при общей длине 500 мм и длинах зон испарения и конденсации 150 мм. Эти тепловые трубы имели водяные калориметры. Все трубы испытывались в течение 5000 ч при удельной плотности теплового потока в зоне нагрева ~ 100 Вт/см^2. Результаты испытаний представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Результаты испытаний тепловых труб большой мощности теплопереноса [71]

Материал		Теплоноситель	Мощность, Вт	Рабочая температура, °С	Примечания
Стенка	Фитиль				
Нс 321	Нс 304	Ацетон	112	50	Нет заметной коррозии
»	Нс 304	»	93	50	То же
М	Броф	Ацетон*	112	50	Нет коррозии
»	»	»	120	50	»
Нс 321	Нс 316	»	118	50	Нет заметной коррозии
»	»	»*	152*[2]	50	»
М	Броф	Метанол*	185*[2]	70	Легкое газовыделение, легкая коррозия
»	»	»	370	50	Нет коррозии
Нс 321	Нс 304	»*	320*[2]	50	То же
»	»	»	296	50	Легкое газовыделение, легкая коррозия
Нс 321	Нс 316	»	327	50	То же
»	»	»*	283	50	»
»	Нс 304	Вода*	416	70*[3]	Газовая пробка после 25 дней
»	»	»	470*[2]	70*[3]	То же
М	Броф	»	420	70	Нет коррозии
»	»	»*	665	70	То же
Нс 321	Нс 316	»	235	70*[3]	Газовая пробка
Нс 316	»	»	385	70*[3]	То же

* Тепловая труба с клапаном.
*[2] Мощность снизилась к концу испытаний.
*[3] Увеличение перепада температуры вдоль трубы.

Таблица 4.10

Параметры тепловых труб, испытанных на ресурс работы [15]

Корпус	Фитиль	Теплоноситель	Размеры, см		Примерная рабочая температура, °С	Время работы, ч
			Длина	Диаметр		
Нержавеющая сталь	Спеченная медь	Даутерм-Е	10	5,75	145	68932
Медь	Сетка из нержавеющей стали	То же	15	2,5	100	67188
»	Спеченная медь	Даутерм-209	15	2,5	90	66142
»	Рефразил	СР-9	15	2,5	135	59188
»	»	Даутерм-А	15	2,5	130	52372
Нержавеющая сталь	»	»	30	2,5	90	46080
Медь	»	C_6F_6	15	2,5	85	50708
»	»	Метиловый спирт	15	2,5	75	47664
»	Углеродный войлок	То же	15	2,5	85	47664
»	Рефразил	ДС-200	15	2,5	80	43748
»	»	C_2Cl_4	15	2,5	80	42398
»	»	Метиловый спирт	15	2,5	70	49886
»	»	Ацетон	15	2,5	70	49886
Нержавеющая сталь	Сетка из нержавеющей стали	Аммиак	15	2,5	40	44628
Алюминий	Войлок из никеля		15	2,5	50	43848
»	Войлок из алюминия	Аммиак	15	2,5	50	43848
»	Рефразил	Диметил-сульфид	15	2,5	80	41367
»	Войлок из меди	СР-32	15	2,5	80	36538
Нержавеющая сталь	То же, из нержавеющей стали	Метиловый спирт	12,5	0,64	110	21792
То же	Спеченная медь, рефразил	Даутерм-А	9	2,5	130	21164
»	Сетка из монеля	Вода	20	1,6×0,3	70	22655
»	То же, из нержавеющей стали	»	60	1,25	90	22776
»	Спеченная медь, рефразил	ДС-200	9	2,5	90	17664
»	Войлок из меди	Вода	15	2,5	75	17520
Холоднокатаная сталь	Рефразил	Даутерм-А	15	2,5	80	17496
Нержавеющая сталь	Сетка из меди	»	60	1,25	200	17016
То же	То же, из нержавеющей стали	»	60	1,25	200	17016
Монель	То же, из монеля	Вода	45	1,65	105	13320
Медь	То же, из меди	»	30	0,95	115	13032
Нержавеющая сталь 347	»	»	75	2,5	165	9376
Медь	Пена из меди	»	25	1,25	60	8736
»	Спеченная медь	»	30	1,25	60	8736
Моиель	Сетка из моиеля	»	30	2,5	100	6576
Холоднокатаная сталь (3 эксперимента)	Нет капиллярной структуры	Аммиак	1220	5	45	5503*

Продолжение табл. 4.10

Корпус	Фитиль	Теплоноситель	Размеры, см		Примерная рабочая температура, °С	Время работы, ч
			Длина	Диаметр		
Медь	Войлок из меди	Вода	30	1,25	60	5668
Алюминий	Пазы в стенке	Аммиак	45	1,65	50	5668
Нержавеющая сталь	Войлок из нержавеющей стали	»	15	0,48	50	5668
То же	Сетка из нержавеющей стали	»	10	0,48	60	5668
»	Войлок из нержавеющей стали	Калий	15	1,25	650	5528*
»	»	Натрий	15	1,25	650	2380*

* При перерыве в работе.

Результаты восьмилетних исследований представлены в работе [15]. Параметры испытанных тепловых труб представлены в табл. 4.10. Основные результаты получены при работе с аммиаком, метанолом, ацетоном, даутермом А (эвтектическая смесь дифенила и дифенилоксида), а также с калием и натрием.

Рассмотрим основные результаты ресурсных испытаний для различных теплоносителей.

Вода. Вода обладает хорошими теплофизическими свойствами, но коррозионно активна по отношению к большинству материалов, которые могли бы быть использованы в тепловых трубах.

Многие исследователи в качестве конструкционного материала применяли в опытах нержавеющие стали в сочетании с водой в качестве теплоносителя [71—75]. Обнаружено, что при такой комбинации в тепловой трубе происходит выделение неконденсирующегося газа — водорода. Известно, что нержавеющие стали пассивируются за счет образования тонкой оксидной пленки на поверхности. Если оксидный слой удалить посредством перепадов электрохимического потенциала, то начинает протекать электрохимическая реакция, т. е. происходит коррозия стенки. При работе тепловых труб все газы удаляются в конденсаторную зону, что приводит к ликвидации оксидного слоя и выделению водорода:

$$\left.\begin{aligned} &Fe \rightleftarrows Fe^{++} + 2e^{-}; \\ &2H^{+} + 2e^{-} \rightleftarrows H_2\uparrow. \end{aligned}\right\} \qquad (4.2)$$

Все обычно используемые нержавеющие стали (сталь 304, 316, 321) согласно данным работы [15] генерировали большое количество водорода.

Лишь тепловая труба, изготовленная из стали 347 с добавкой тантала (известного как геттер для водорода), в сочетании

с фитилем из медной сетки при испытании показала удовлетворительные результаты. В ней за длительный период работы не замечено образование газа. Однако в опытах с бесфитильной тепловой трубой из стали 347 и в опытах с трубой, имеющей корпус и фитиль из той же стали, была обнаружена генерация газа.

В теплообменнике с тепловыми трубами из углеродистой стали С1015 при испытаниях обнаружено выделение газа в трубе и рост температурного перепада.

В водяных никелевых трубах генерировалось большое количество газа [76], поэтому комбинация вода—никель не может быть использована для тепловых труб.

Хороший материал для изготовления корпусов тепловых труб — медь. В работе [71] указывается, что при первых испытаниях в тепловой трубе с корпусом из меди и сеточным фитилем из оловянистофосфористой бронзы (см. табл. 4.8) наблюдалась незначительная коррозия, по-видимому, связанная с наличием примесей на границах зерен в медной стенке. Для дальнейших испытаний (см. табл. 4.9) использовалась медь высокой чистоты, и уже никакой коррозии не наблюдалось. В другой работе [15] указывается, что хорошие результаты при ресурсных испытаниях показали тепловые трубы, для корпусов которых использовались обычные медные трубы, применяемые в холодильной технике, а также сетки, изготовленные из обычной медной проволоки. Монель, согласно этой работе, также совместим с водой, генерации газа не происходит.

Метанол. Алюминий корродирует при контакте с метанолом. У нержавеющих сталей в сочетании с метанолом обнаруживается незначительная коррозия [71] и отмечено небольшое выделение газов водорода, угарного газа и др. Предполагается, что имеют место реакции, в которых нержавеющая сталь участвует как катализатор:

$$\left.\begin{aligned} &(CH_3CH)_{\text{газ}} \xrightarrow{\text{нержавеющая сталь}} H_2CO^+ + e^- + H_2\uparrow; \\ &H_2CO^+ \rightarrow 2H^+ + CO\uparrow; \\ &2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow; \\ &H_2CO^+ + e^- \rightarrow H_2CO_3. \end{aligned}\right\} \qquad (4.3)$$

Впрочем, процессы эти развиваются медленно. Так, при температуре 115° С труба из нержавеющей стали с метанолом проработала 20 тыс. ч и имелось лишь небольшое увеличение температурного перепада [15]. Хорошо совместима с метанолом медь.

Ацетон. При проведении опытов с тепловыми трубами из нержавеющих сталей 304 и 316 обнаружена лишь незначительная коррозия [71]. В работе [15] при проведении ресурсных испытаний при 110° С обнаружено сильное увеличение перепада температуры на трубах, причем некоторые из них полностью перестали работать даже с испарительным концом, расположенным ниже конденсаторного. Таким образом, данные работ [15] и [71] противо-

речивы. Можно предположить, что различие результатов связано с различием в технике заполнения и введенных при этом загрязнений.

Удовлетворительные результаты дает сочетание ацетона с медью. В работе [71] отмечается, что в зоне нагрева медных тепловых труб обнаружен тонкий налет вещества неизвестного состава и наблюдалось некоторое ухудшение характеристик труб.

Аммиак давно успешно используется в низкотемпературных тепловых трубах. Опыты показывают совместимость тщательно обезвоженного аммиака с нержавеющими сталями, алюминием, углеродистой сталью. Аммиак несовместим с медью.

Даутерм-А (эвтектическая смесь дифинила с дифинилом оксида) привлекает внимание исследователей тем, что он обладает диэлектрическими свойствами. Опыты показывают, что даутерм, используемый в тепловых трубах, медленно разлагается, причем продуктами крекинга являются бензин, вода и другие соединения. Теплоноситель становился многокомпонентным, в тепловых трубах появлялась неизотермичность. Коррозии с нержавеющей сталью не было замечено.

Итак, даутерм А может быть использован в тепловых трубах там, где допустим значительный и медленно возрастающий температурный перепад вдоль трубы.

Фреоны. Предельные фторгалогенопроизводные, так называемые фреоны, широко используются в холодильной технике [76]. Фреон-11, фреон-22, фреон-113 и др. применяются в качестве теплоносителей тепловых труб. Фреон-22, например, термически стоек в широком интервале температур [68]. Разложение его идет лишь при температурах выше 450° С. Скорость термического разложения сильно возрастает в присутствии окислов железа или окислов меди [77]. При разложении фреона-22 получаются следующие продукты: HC, CO_2, H_2O, SiF_4, CF_4. В присутствии Fe_2O_3 наблюдается большой выход CO и CO_2. Фреоны совместимы с нержавеющей сталью и медью.

Основываясь на собственных опытах, а также обобщении результатов ресурсных испытаний, авторы работы [15] приводят следующие рекомендации по использованию конструкционных материалов с теплоносителями (см. табл. 4.11).

В заключение раздела о ресурсных испытаниях остановимся еще на двух аспектах этого вопроса.

В работах [78—80] указывается, что при длительных ресурсных испытаниях тепловых труб было обнаружено выделение газа вследствие электролиза теплоносителей при использовании разнородных материалов для корпуса и фитиля.

В аммиачных тепловых трубах с корпусом из алюминиевого сплава и артериальным фитилем из нержавеющей стали 304 наблюдалось постоянное выделение большого количества водорода, которое не могло быть объяснено действием ничтожно малых примесей воды в аммиаке. Выделение газа сопровождалось протеканием коррозионных процессов. Тепловые трубы с тем же

Таблица 4.11

Использование конструкционных материалов в среде различных теплоносителей

Теплоноситель	Рекомендуемые материалы	Нерекомендуемые материалы
Аммиак	Алюминий Углеродистая сталь Никель Нержавеющая сталь	Медь
Ацетон	Медь Кварц Алюминий* Нержавеющая сталь	—
Метиловый спирт	Медь Нержавеющая сталь Кварц	Алюминий
Вода	Медь Монель Нержавеющая сталь 347*[2]	Другие нержавеющие стали Алюминий Кварц Инконель Никель Углеродистая сталь
Даутерм-А (эвтектическая смесь дифинила с дифенилоксидом)	Медь Кварц Нержавеющая сталь*[3]	—
Калий и натрий	Нержавеющая сталь Инконель	Титан

* Данные по использованию алюминия в среде ацетона противоречивы, *[2] рекомендуется; *[3] использование возможно лишь в том случае, если в тепловой трубе допустимо некоторое количество некоиденсирующегося газа особенно при высокой температуре

теплоносителем, но изготовленные из однородных материалов (нержавеющая сталь или алюминиевый сплав), таких эффектов не имели.

Таким образом, при применении разнородных материалов следует обращать внимание на возможность электролиза теплоносителя.

В ряде случаев (при использовании тепловых труб в ядерных реакторах или в космосе, где велико ионизирующее воздействие) необходимо учитывать возможность радиолиза теплоносителей. Прежде всего это относится к теплоносителям, имеющим сложный химический состав, таким, как аммиак, фреоны. Изучена

радиационная стабильность лишь небольшого числа теплоносителей.

Поскольку в рамках книги не удается изложить данные по радиолизу, приведем лишь один пример.

В работе [81] электронным пучком при температуре —70° С облучался фреон-11 в количестве 42 г в присутствии меди и нержавеющей стали. При дозе облучения 10^9 рад (10^7 Гр) образовалось 28,3 мг хлора в виде Cl^- и 4,2 мг фтора в виде F^-. Выход радиолиза довольно высок, поэтому наблюдалось и последующее коррозионное воздействие продуктов радиолиза на конструкционные материалы. Отмечается [82], что с увеличением температуры, при которой происходит радиационное облучение, выход продуктов радиолиза существенно увеличивается. Это характерно для всех теплоносителей.

§ 4.5. СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

Для среднетемпературных тепловых труб, диапазон работы которых лежит в интервале температур 300—500° С, в качестве теплоносителей могут использоваться: дифенил, даутерм-А, трифинил М, сантовакс, ртуть, сера. Все перечисленные выше органические соединения подвержены термическому разложению и практически могут использоваться лишь в нижней части этого температурного диапазона — не более чем до 350° С [15, 84]. Вопрос о ресурсе работы таких труб уже затрагивался в предыдущем разделе.

Ртуть, хотя и имеет довольно неплохие теплофизические свойства и способна работать в весьма широком температурном интервале (от 200 до 600° С), однако коррозионно активна и, что самое главное, высокотоксична. Кроме того, она плохо смачивает нержавеющие стали и имеет неблагоприятные ядерные свойства. С ртутными трубами проведено незначительное количество экспериментов [17, 85], однако технического применения они пока не нашли.

Перспективным теплоносителем для использования при 200—600° С в гравитационных тепловых трубах с умеренным теплопереносом является сера [84]. Она имеет сравнительно низкую температуру плавления (112° С), высокие температуру кипения (444° С) и критическую точку (1040° С). Сера термически стабильна, не вызывает коррозионных повреждений нержавеющей стали, не противопоказана (в противоположность ртути) с точки зрения гигиены и безопасности. Такие теплофизические свойства серы, как σ, $\rho_ж$, r, сравнимы с соответствующими свойствами органических теплоносителей типа даутерма. Однако некоторые теплофизические свойства серы (особенно динамическая вязкость жидкости) сильно меняются в интервале температур 200—600° С, что связано с переходами к различным модификациям серы, а также образованием молекул серы различных размеров [86]. Динамическую вязкость ее можно очень сильно уменьшить добав-

лением соответствующих веществ со свободными электронными парами, которые вызывают деление длинных полимерных цепочек серы Галогены (хлор, иод), амины и гидрогенные сульфиты могут быть использованы как такие добавки. В частности добавление 3—5% иода к сере меняет динамическую вязкость в интервале температур 200—300° С на несколько порядков. Для работы капиллярных тепловых труб и при таком снижении вязкости сера остается сравнительно малоэффективным теплоносителем Для гравитационных тепловых труб она приемлема. Это показывает, в частности, результаты экспериментов, представленные в работе [84]. Опыты проводились на вертикальных тепловых трубах, внешний диаметр корпуса которых составлял 3,2 см, толщина стенки 0,25 см и длина 200 см. Трубы с помощью индуктора нагревались в нижней части на длине 0,5 см, тепло отводилось к водяному холодильнику через газорегулируемый зазор. Для сравнения использовались одинаковые тепловые трубы с различными теплоносителями — даутермом-А и серой (чистой и с добавкой к сере 3% и 5% иода). Опыты показали, что трубы, где теплоносителем является сера с добавкой 5% иода, при 200° С имеют характеристики, вполне сопоставимые с характеристиками труб, заполненных даутермом, а при 500° С имеют преимущества перед последними — термическое сопротивление их меньше и не происходит выделения газа вследствие термической диссоциации, как у даутерма. Наблюдения на тепловых трубах, изготовленных из стекла, где теплоносителем является сера с добавкой иода, показали, что при повышенной мощности на поверхности конденсатной пленки наблюдается волнообразование, а конденсация носит не чисто пленочный характер — на части конденсаторной зоны происходит капельная конденсация. Наряду с влиянием добавки иода на физические параметры теплоносителя эти эффекты, по-видимому, и могут объяснить расхождение опытов с расчетами.

Глава 5

ОСОБЫЕ ТИПЫ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

§ 5.1. ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Одним из основных достоинств тепловых труб является их высокая тепловая проводимость. Однако очень часто возникает необходимость регулировать эту проводимость для того, чтобы либо изменять количество передаваемого трубой тепла, либо поддерживать необходимый уровень температуры греющей или нагреваемой среды при изменении теплоподвода. Представляют интерес два случая регулирования проводимости тепловых труб — ступенчатое и плавное. При ступенчатом регулировании тепловая труба работает либо в режиме максимального теплопереноса (положение «включено»), либо минимального (положение «выключено») В общем случае ступенчатое регулирование подразумевает и обеспечение некоторых промежуточных значений проводимости. При плавном регулировании теплоперенос тепловой трубы меняется плавно в широком диапазоне изменения параметров. Особый случай регулирования осуществляется с помощью *тепловых диодов*, в которых тепло эффективно переносится лишь в одном направлении, а при передаче тепла в противоположном направлении диод является тепловым изолятором. Конечно, чаще всего идеальной теплоизоляции при этом не достигается.

В общем случае термическое сопротивление тепловой трубы складывается из следующих составляющих:

$$R = R^{\text{исп}}_{\text{внеш}} + R^{\text{исп}}_{\text{внут}} + R^{\text{п}}_{\text{внут}} + R^{\text{ж}}_{\text{внут}} + R^{\text{конд}}_{\text{внут}} + R^{\text{конд}}_{\text{внеш}} + R_{\text{диф}}, \quad (5.1)$$

где $R^{\text{исп}}_{\text{внеш}}$ и $R^{\text{конд}}_{\text{внеш}}$ — термическое сопротивление при теплоподводе и теплоотводе без учета термических сопротивлений стенки тепловой трубы и фитиля; $R^{\text{исп}}_{\text{внут}}$ и $R^{\text{конд}}_{\text{внут}}$ — термическое сопротивление стенки тепловой трубы, фитиля и на границе раздела фаз в зоне испарения и в зоне конденсации соответственно; $R^{\text{п}}_{\text{внут}}$ и $R^{\text{ж}}_{\text{внут}}$ — термическое сопротивление, связанное с гидродинамическим сопротивлением при движении пара и жидкости внутри тепловой трубы; $R_{\text{диф}}$ — диффузионное термическое сопротивление, вызванное присутствием в тепловой трубе неконденсирующихся газов или паров низкокипящего элемента.

Для регулирования теплопереноса тепловой трубы можно использовать любое из этих семи термических сопротивлений. Однако обычно изменяют термические сопротивления: $R^{\text{исп}}_{\text{внеш}}$ и

Классификация тепловых труб для терморегулирования [1]

А. Тепловые трубы переменной проводимости (ПТТТ) и трубы, использующие обратную связь (ОСТТ)

1. Газовое регулирование ГРТТ	2. Паровое регулирование ПРТТ	3. Жидкостное регулирование ЖРТТ	4 Электрическое регулирование ЭРТТ
1.1. Холодный резервуар, снабженный фитилем 1.2. Резервуар с постоянной температурой (резервуар с вспомогательным нагревателем), снабженный фитилем 1.3. Бесфитильный горячий резервуар 1.4. Каскадная система 1.5. С механической обратной связью (бесфитильный резервуар переменного объема) 1.6. С электрической обратной связью	2.1. Регулирование паровым потоком 2.2. Осушение канавочного фитиля: система с одной, двумя или тремя тепловыми трубами	3.1. Запирание конденсатора жидкостью: сильфонная система с механической обратной связью; система с нагреваемым резервуаром, имеющая электрическую обратную связь	4.1. Электрогидродинамическое перекачивание 4.2. Электроосмотическое перекачивание

$R^{конд}_{внеш}$ (внешнее регулирование), $R^{п}_{внут}$ (паровое регулирование), $R^{ж}_{внут}$ (жидкостное регулирование), $R_{диф}$ (газовое регулирование). С помощью этих сопротивлений можно осуществлять как плавное, так и ступенчатое регулирование теплопереноса тепловой трубы.

Если обратиться только к тем способам регулирования, которые непосредственно связаны с работой самой тепловой трубы, то можно дать классификацию тепловых труб в отношении терморегулирования в виде, представленном в табл. 5.1 [1].

В этой классификации приведены трубы переменной проводимости при передаче тепла в одном направлении, диодные трубы и комбинированные системы, обеспечивающие как переменный теплоперенос, так и диодные свойства трубы. При этом для регулирования могут использоваться или не использоваться дополнительные системы обратной связи, т. е. механические или электрические приспособления, воздействующие на тепловую трубу при изменении ее параметров. Тепловые трубы без специальных систем обратной связи способны осуществлять лишь стабилизацию температуры пара, при наличии обратной связи чаще всего выпол-

Таблица 5.1

Б. Диоды		В. Комбинированные (ППТТ/диоды)		
5. Газовое регулирование	6. Жидкостное регулирование	7. Газовое регулирование	8. Жидкостное регулирование	9. Комбинация газового и жидкостного регулирования
5.1. Запирание испарителя газом	6.1. Жидкостная ловушка (удаление жидкости из капиллярной структуры) 6.2. Запирание испарителя жидкостью	7.1. Газорегулируемая тепловая труба или труба с обратной связью и одновременно диод	8.1. Запирание жидкостью (с использованием обратной связи) и одновременно диод 8.2. Запирание жидкостью (с использованием обратной связи) и диод с жидкостной ловушкой	9.1. Газорегулируемая тепловая труба и труба с обратной связью и диод с жидкостной ловушкой

няют задачи по стабилизации температуры источника тепла. Примеры устройства тепловых труб с различным регулированием схематически даны на рис. 5.1. Краткая оценка качеств некоторых типов тепловых труб представлена в табл. 5.2 [1].

Газорегулируемые тепловые трубы. Этот способ регулирования наиболее широко распространен в практике применения тепловых труб переменного теплопереноса. Уже в первых опытах с тепловыми трубами [2] было замечено, что не полностью удаленный из трубы неконденсирующийся газ при ее работе накапливается в конце зоны конденсации, образуя газовую «пробку».

Газ препятствует проникновению пара в занятую им область трубы, создает дополнительное диффузионное сопротивление тепло- и массопереносу. Эксперименты показывают [3], что диффузионное термическое сопротивление в десятки и сотни раз может превышать термическое сопротивление при конденсации чистого пара. Часть поверхности тепловой трубы, занятая газом, практически не участвует в теплообмене.

При большой аксиальной скорости пара между паром и газом образуется достаточно резкая граница раздела. Изменяя положения этой границы, можно регулировать количество тепла, пере-

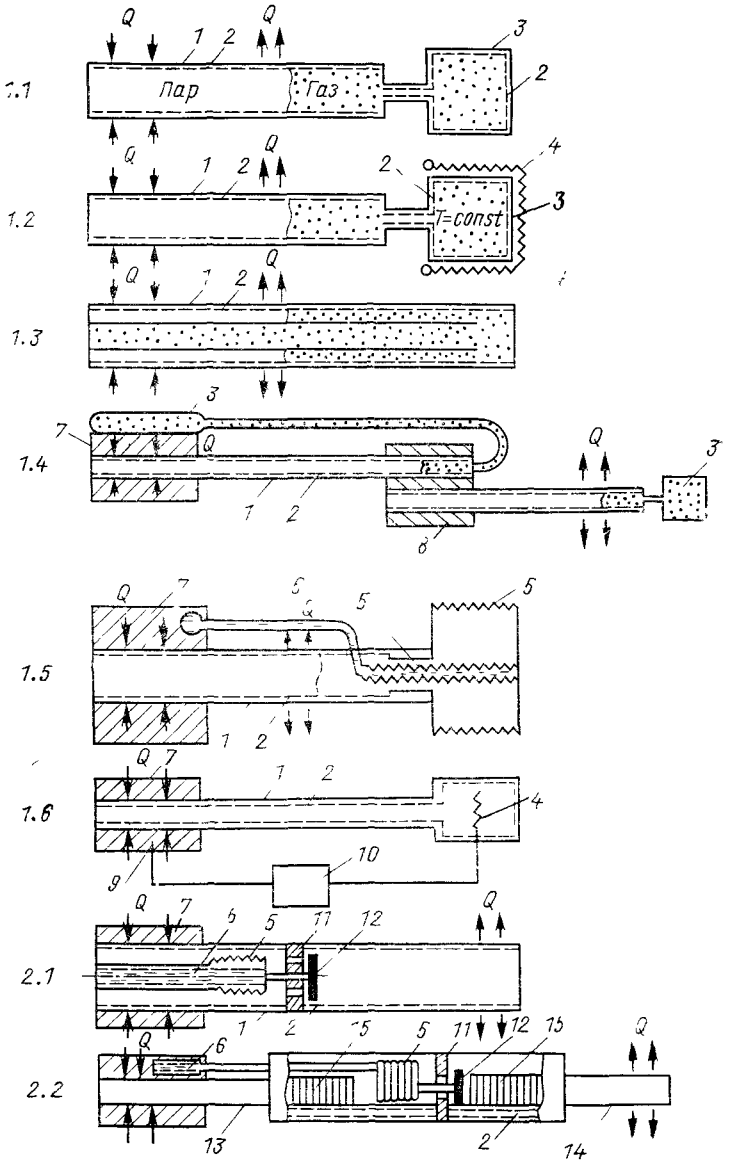
Таблица 5.2

Сравнение и оценка качеств тепловых труб с различным регулированием [5.1]

Метод регулирования	Критерий для сравнения: Теплоперенос	Требуемые объем/масса	Легкость изготовления	Надежность	Характеристика регулирования
		Трубы переменной проводимости			
Без обратной связи					**Температура пара может лишь стабилизироваться**
Холодный резервуар, снабженный фитилем	о	у*	х*	х	Пр*4 — простая без движущихся частей конструкция, потенциальный диод; Н*5 — очень чувствительна к температурным изменениям охлаждающей среды, особенно когда она близка к рабочей температуре среды (исключается при использовании резервуара с постоянной температурой), проблематично использование составных фитилей
Бесфитильный горячий резервуар	о	у	х	у—х	Пр — простая конструкция, без движущихся частей, менее чувствительная к изменениям температуры охлаждающей среды, Н — чувствительность к присутствию пара или жидкости в резервуаре (сводится к минимуму при очень малых или очень больших l/d, подводящих газ трубок)
Каскадная система (с бесфитильным газовым резервуаром)	о	у*6	у*2—х	у—х	Пр — нет движущихся частей, еще менее чувствительна к температурным изменениям охлаждающей среды (если конечно, контролирующая труба имеет бесфитильный резервуар); Н — необходимы две тепловые трубы, больший температурный перепад, проблематично использование составных фитилей
С обратной связью					**Может стабилизироваться температура источника тепла**
Электрически обогреваемый газовый резервуар, снабженный фитилем	о	у—х	у—х	х	Пр — очень хорошее регулирование с очень малым резервуаром, хорошая чувствительность к переходам, возможность иметь различные режимы, потенциальный диод; Н — требуется электрическая мощность и датчик, проблематично использование составных фитилей
Сильфонная система, приводимая в движение расширением жидкости, бесфитильный газовый резервуар	о	п	п—у	у	Пр — хорошее регулирование, не требуется источников энергопитания; Н — механическая система, большие габаритные размеры и масса, проблематично использование составных фитилей

ПМТТ*3: Регулирование паровым потоком	п—у	х	у	у	Пр — хорошее регулирование, не требуется источников энергопитания, нечувствительность к изменению температуры охлаждающей среды, Н — ограниченность низким давлением жидкости и тонкой капиллярной структурой (ограничения из за уноса), точка замерзания жидкости должна быть ниже температуры охлаждающей среды
ПМТТ: Осушение канавочного фитиля	о	х	у	у—х	Пр — те же, что и перечисленные выше, но нет никаких ограничений на жидкость или фитиль вследствие ограничений из-за уноса, Н — сложность (но компактность), большие температурные перепады для конфигураций с двумя или тремя тепловыми трубами
					Диоды
Запирание испарителя жидкостью	х	х	х	х	Пр — нет движущихся частей, жидкостной резервуар (если испаритель и паровое пространство малы) хорошо соответствует переменным режимам, Н — трудности при наземных испытаниях, перепад в паровой области может быть велик (если не используется блокировочное отверстие)
Запирание испарителя газом	о	у—х	х	х	Пр — простая, без движущихся частей конструкция может быть выполнена с аксиальными канавками, может быть использована ППТТ, Н — больших размеров резервуар и меньшая чувствительность, чем при жидкостной блокаде, проблематично использование составных фитилей
Ловушка для жидкости	о	х	х	х	Пр — нет движущихся частей, малых размеров ловушка и хорошее поведение в переходных режимах (зависит от фитиля), может быть использована совместно с газовым регулированием в гибридной системе, может являться термическим выключателем, Н — большой объем ловушки требуется при артериальных фитилях, энергия должна отводиться от ловушек в период отключения трубы
					Комбинированная система
Газорегулируемая тепловая труба и диод с газовым запиранием	о	у	х	х	Пр — нет движущихся частей, с использованием одной тепловой трубы решаются две задачи, простота, если используются аксиальные канавки, применимы различные конструкции ППТТ; Н — проблематично использование составных фитилей

Примечания: п — плохой, у — умеренный, х — хороший, о — очень хороший, * для тепловых труб с простыми фитилями, *2 для тепловых труб с артериальными составными фитилями, *3 ПМТТ — тепловая труба с модулируемым паровым потоком *4 Пр — преимущества, *5 Н — недостаток, *6 однако необходимо использовать две или более ППТТ



Р и с. 5.1. Схемы тепловых труб с переменным теплопереносом (номера соответствуют указанным в табл. 5.1):

1 — корпус трубы; *2* — фитиль; *3* — резервуар; *4* — электронагреватель; *5* — сильфон; *6* — жидкость с большим коэффициентом расширения; *7* — источник нагрева (он же термостатируемый объект); *8* — связка тепловых труб; *9* — термопара; *10* — регулируемый от термопары источник электроэнергии; *11* — седло клапана; *12* — клапан; *13* — тепловая труба, подводящая тепло; *14* — тепловая труба, отводящая тепло; *15* — канавочная капиллярная структура.

даваемое тепловой трубой. Положение границы раздела между паром и газом можно найти, учитывая, что

$$P_{\text{п}} \simeq P_{\text{г}}. \tag{5.2}$$

Давление пара $P_{\text{п}}$ определяется посредством кривой насыщения по известной температуре и почти экспоненциально зависит от нее. Давление газа $p_{\text{г}}$ можно найти, используя уравнение состояния идеального газа

$$P_{\text{г}} = G_{\text{г}} \tilde{R} T_{\text{г}} / V_{\text{г}}. \tag{5.3}$$

Из соотношений (5.2), (5.3) следует, что граница раздела между паром и газом в работающей тепловой трубе зависит от рода газа, его массы и температуры. Любой из этих параметров можно использовать для регулирования положения границы раздела и, следовательно, термического сопротивления тепловой трубы.

Чаще всего тепловые трубы с неконденсирующимися газами используют для стабилизации температуры источника или потребителя тепла [4, 16]. Зачастую возникает необходимость поддерживать постоянной температуру тепловой трубы, когда мощность ее меняется в широких пределах.

В общем случае температура газонаполненной тепловой трубы зависит от следующих параметров:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}(Q,\ T_{\text{охл}},\ T_{\text{г}},\ G_{\text{г}},\ V_{\text{г}}), \tag{5.4}$$

где $T_{\text{охл}}$ — температура охлаждающей среды.

Это соотношение можно упростить, если учесть, что теплообмен в зоне конденсации зависит от положения границы раздела пар—газ, которое, в свою очередь, определяется параметрами газа, т. е. вместо (5.4) можно записать

$$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}(Q,\ T_{\text{охл}},\ x_{\text{г}}). \tag{5.5}$$

Решение уравнения (5.5), выполненное в работе [4], дает зависимость температуры пара в тепловой трубе от параметров газа, теплового потока, передаваемого трубой, и температуры холодного источника:

$$dT_{\text{п}} = \frac{1}{1+S}\left\{\left(\frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial Q}\right) dQ + \left(\frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial T_{\text{охл}}}\right) dT_{\text{охл}} + \right.$$

$$\left. + \frac{S}{\dfrac{\partial}{\partial T_{\text{п}}}(\ln P_{\text{п}})}\left[\frac{dT_{\text{г}}}{T_{\text{г}}} + \frac{dG_{\text{г}}}{G_{\text{г}}} - \frac{dV_{\text{г}}}{V_{\text{г}}}\right]\right\}, \tag{5.6}$$

где $S = \dfrac{\partial Q}{\partial x}\dfrac{\partial T_{\text{п}}}{\partial Q}\dfrac{\dfrac{\partial}{\partial T_{\text{п}}}(\ln P_{\text{п}})}{-\dfrac{d}{dx}(\ln V_{\text{г}})}$ — *кратность регулирования*. (5.7)

При выводе уравнений (5.6), (5.7) сделаны следующие допущения: 1) пар и газ в зоне конденсации имеют четкую границу раздела; 2) гидравлическое сопротивление парового потока пренебрежимо мало; 3) неконденсирующийся газ подчиняется уравнению идеального газа; 4) тепло вдоль тепловой трубы переносится только паром; 5) рассматривается стационарное состояние. Из уравнений (5 6) и (5.7) можно видеть, что наличие неконденсирующегося газа всегда уменьшает изменение температуры тепловой трубы при изменении теплопереноса, так как множитель $(1+S)^{-1}$ всегда меньше единицы, поскольку S — положительная величина. Для улучшения термической стабилизации необходимо увеличить параметр S. Это можно сделать несколькими способами: во-первых, иметь как можно больший газовый объем при наименьшей площади границы раздела между паром и газом, тогда изменение величины $d\,(\ln V_г)/dx$ будет минимально, во-вторых, увеличить интенсивность теплосъема в зоне теплоотвода, т. е. увеличить dQ/dx, изменить температуру газа.

Для оценки качества термостабилизации в различных конструкциях газорегулируемых тепловых труб введено понятие коэффициента температурной чувствительности:

$$\Psi = \frac{\partial Q}{\partial T_п} = \frac{\partial Q}{\partial x}\,\frac{\dfrac{\partial}{\partial T_п}(\ln P_п)}{\dfrac{\partial}{\partial x}(\ln V_г)}\,. \qquad (5.8)$$

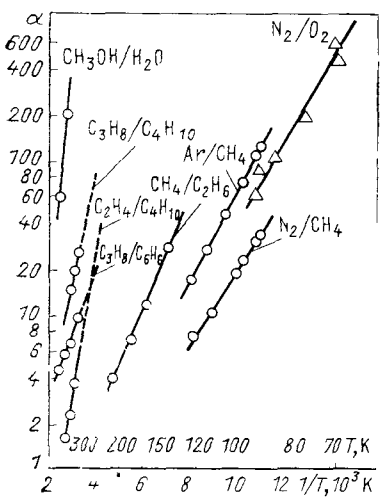


Рис 5.2 Экспериментальная зависимость коэффициента Оствальда от обратной температуры для ряда пар неконденсирующийся газ — теплоноситель

Существует очень большое количество модификаций газорегулируемых тепловых труб. На рис. 5.1 схематически представлены лишь некоторые из принципиальных схем их выполнения.

Как правило, для увеличения объема газа используется дополнительный резервуар постоянного или переменного объема (см. рис. 5.1). В том случае, когда резервуар не обогревается до температуры выше температуры тепловой трубы, должны быть приняты меры для сведения к минимуму потерь теплоносителя вследствие диффузии его через газ в полость резервуара (например, из-за малого сечения капилляра, соединяющего трубу с резервуаром) либо организован возврат конденсата в трубу (по фитилю или стеканием под дей-

ствием силы тяжести). Для улучшения качества термической стабилизации предложено использовать каскадирование тепловых труб (т. е. последовательное их соединение). В такой конструкции, реагируя на изменение теплоподвода, каждая из тепловых труб работает в меньшем интервале температур, и качество регулирования улучшается.

В работе [17] предложено в тепловых трубах использовать такие неконденсирующиеся газы, которые хорошо растворяются в теплоносителе при повышении температуры. Применение их может резко уменьшить объемы газовых резервуаров. На рис. 5.2 для нескольких пар неконденсирующийся газ — теплоноситель дан коэффициент Оствальда, который представляет собой отношение числа молекул газа, растворенных в жидкости, к числу молекул в паровой фазе Чем выше коэффициент Оствальда, тем меньшие объемы газового резервуара необходимы для регулирования. При значении его, равном 10, например, необходимый объем газа может уменьшиться в 10 раз Отметим, что не всегда необходимо усложнение конструкции тепловой трубы или схемы ее работы, чтобы использовать преимущества термостабилизации при помощи газонаполненных тепловых труб.

Для стабилизации температуры узла высокотемпературного устройства авторы применили газонаполненную тепловую тру-

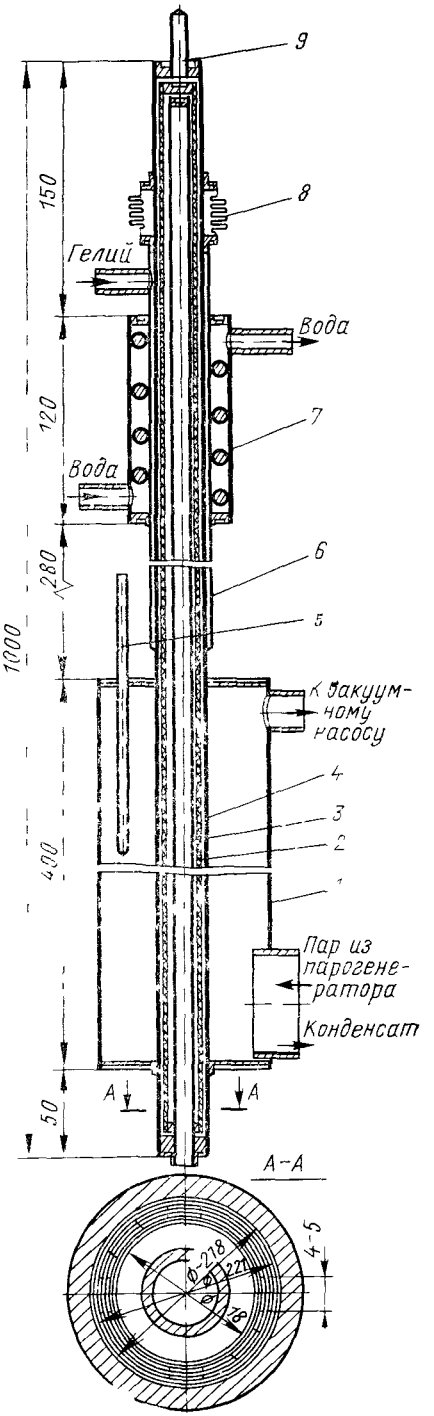


Рис 5.3 Конструкция газонаполненной тепловой трубы

1 — паровая камера, *2* — фитиль, *3* — гильза для внутреннего нагревателя, *4* — корпус, *5* — гильза для термопары, *6* — газовый зазор, *7* — холодильник, *8* — температурный компенсатор *9* — штуцер для заправки тепловой трубы теплоносителем

бу, конструкция и основные размеры которой даны на рис. 5.3. Тепловая труба предназначалась для поддержания температуры в зоне нагрева в пределах 750—800° С при изменении мощности от 1 до 5 кВт. Труба работала в вертикальном положении с зоной испарения, расположенной внизу. В связи с большой длиной зоны испарения, равной 400 мм, и значительной удельной мощностью, которую должна была переносить тепловая труба (4 кВт/см^2), к конструкции фитиля трубы предъявлялись особые требования. Фитиль должен был создавать большой капиллярный напор и в то же время иметь малое гидравлическое сопротивление при движении в нем жидкости. Жидкость уже в начальный момент должна была заполнять фитиль по всей высоте зоны испарения. Этим требованиям отвечал использованный авторами комбинированный фитиль, который был выполнен из нескольких слоев тонкой сетки № 450 саржевого плетения и имел внутри себя каналы с разными размерами проходного сечения. Каналы с малым проходным сечением и непосредственно сама многослойная сетка обеспечивали подъем жидкости на всю высоту зоны испарения, а возможность беспрепятственно стекать жидкости из зоны конденсации в зону испарения давали каналы с большим проходным сечением, а также зазор между корпусом тепловой трубы и фитилем. Большое количество каналов позволяло равномерно распределить жидкость по периметру фитиля.

Теплоносителем служил натрий, в качестве неконденсирующегося газа был выбран гелий. Внутри тепловой трубы на всей ее длине имелась гильза — вытеснитель, в которую во время испытаний помещалась термопара, предназначенная для измерения температуры пара в трубе, а также мог помещаться нагреватель для пускового разогрева. Опыты проводились при нагреве трубы за счет конденсации натриевого пара, поступающего из парогенератора. Тепло отводилось дистиллированной водой, протекающей в холодильнике. Холодильник был отделен от тепловой трубы газовым зазором шириной 0,3 мм, создающим дополнительное термическое сопротивление. Величину термического сопротивления во время работы можно было менять посредством замены одного газа другим. Количество неконденсирующегося газа, находящегося в тепловой трубе во время опытов, было неизменно, его температура поддерживалась постоянной внешним электронагревателем.

Результаты опытов приведены на рис. 5.4 в виде зависимости мощности трубы от температуры пара для трех значений интенсивности охлаждения. Экспериментальные точки и усредняющие их линии *1*, *2*, *3* получены при работе газонаполненной тепловой трубы, когда в зазоре между холодильником и корпусом трубы был соответственно вакуум, аргон и гелий. На этом же рисунке для сравнения нанесены расчетные кривые при работе тепловой трубы, не содержащей неконденсирующийся газ. Из сравнения можно видеть, что наличие неконденсирующегося газа значительно стабилизирует температуру тепловой трубы при различ-

ных переносимых мощностях. Так, при изменении мощности тепловой трубы в четыре раза (см. кривую *3*, рис. 5.4) температура трубы изменилась только на 20° С, в то время как для тепловой трубы, работающей без газа, изменение мощности всего на 6% ведет к такому же изменению температуры. На стабилизацию температуры газонаполненной тепловой трубы, как и следует ожидать, влияет интенсивность охлаждения. Чем больше интенсивность охлаждения (см. кривые *1* и *3*, рис. 5.4), тем лучше осуществляется термическая стабилизация.

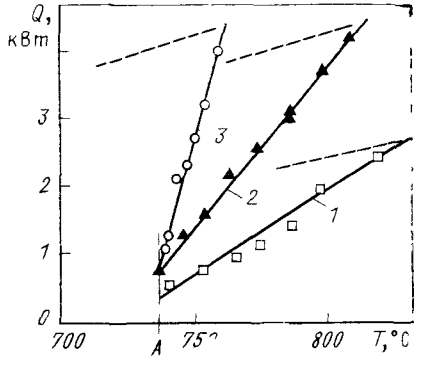


Рис 5.4 Экспериментальная зависимость теплопереноса натриевой тепловой трубой от температуры

1, 2, 3 — экспериментальные данные при работе газонаполненной тепловой трубы когда в зазоре между холодильником и корпусом тепловой трубы соответственно вакуум, аргон и гелий — — — — расчетные данные при работе тепловой трубы не содержащей неконденсирующийся газ 1 — нижняя температурная граница регулирования для газонаполненной тепловой трубы

При разработке низкотемпературных и криогенных газорегулируемых тепловых труб с применением составных фитилей артериального типа перед исследователями возникла проблема влияния парогазовых пузырей на характеристики теплопереноса. Образование таких пузырей, их поведение в процессе работы трубы и влияние на теплоперенос рассматривалось, в частности, в работах [17—20]. Газ первоначально попадает в артерию при заполнении ее жидкостью перед пуском, при частичном осушении артерии и под воздействием вибраций. При стационарной работе возможно устойчивое существование парогазовых пузырей и даже их возникновение. При работе тепловой трубы с неконденсирующимся газом можно выделить две зоны: в первой паровое пространство практически лишено газа, а температура равна рабочей температуре трубы, вторая зона располагается в конце конденсаторной части трубы, содержит неконденсирующийся газ и имеет пониженную температуру. В равновесных условиях концентрация газа в жидкости, находящейся в артерии, может быть вычислена из закона Генри с использованием коэффициентов Оствальда. В работающей тепловой трубе постепенно устанавливается динамическое равновесие. Во второй зоне газ непрерывно растворяется в артериальной жидкости и с нею переносится в зону испарения, где либо диффундирует в паровое пространство, либо выделяется в виде пузырей, подобно тому, как это имеет место при откупоривании бутылки с газированной водой. Выделение пузырьков возможно тогда, когда степень пересыщения жидкости газом велика по сравнению с равновесной его концентрацией

в жидкости. Пузыри могут образоваться и при вскипании перегретой жидкости. Наиболее вероятно вскипание на стенке артерии в зоне испарения тепловой трубы, поскольку сетчатая стенка артерии может способствовать возникновению центров парообразования больших размеров. Из анализа, выполненного в работе [19], следует, что в отличие от чисто парового пузыря парогазовый имеет два равновесных радиуса, причем для меньшего радиуса состояние пузыря метастабильно. Эксперименты, проведенные на тепловых трубах с модульной артерией, использующих в качестве теплоносителей аммиак и ацетон, а в качестве инертного газа — аргон, показали, что максимальный теплоперенос благодаря выделению газовых пузырей уменьшается более чем вдвое.

Тепловые трубы с регулированием термического сопротивления. Эффективного регулирования можно достигать за счет изменения перепадов давлений в паре или жидкости, текущей в тепловой трубе [21—27]. Следует указать на различие, которое лежит в основе регулирования посредством изменения давления в паре или жидкости. Падение давления вследствие дросселирования пара при регулировании теплопереноса тепловой трубы ведет к падению температуры насыщения по длине тепловой трубы, т. е. к увеличению ее термического сопротивления $R^{\text{п}}_{\text{внутр}}$. Увеличение же гидравлического сопротивления жидкости в фитиле при одном и том же располагаемом капиллярном напоре приводит к уменьшению максимального теплопереноса тепловой трубы, однако не ведет к увеличению ее термического сопротивления до тех пор, пока не произойдет осушение капиллярной структуры.

Регулирование посредством изменения перепада давления пара и жидкости может осуществляться на любом температурном уровне как для криогенных, так и для высокотемпературных тепловых труб. Схема тепловой трубы, в которой используется принцип регулирования термического сопротивления посредством дросселирования пара, изображена на рис. 5.1 (схема 2.1). Пар из зоны испарения в зону конденсации может пройти только через отверстие, закрываемое клапаном. Открытие и закрытие клапана осуществляется при перемещении штока вследствие изменения объема жидкости, имеющей большой температурный коэффициент объемного расширения. На рис. 5.1 (схема 2.2) представлена другая конструкция, в которой для регулирования термического сопротивления используется осушение канавочной капиллярной структуры. При уменьшении температуры греющего тела ниже определенного значения клапан закрывает отверстие для прохода пара, перепад давления между испарительной и конденсаторной частями увеличивается, что приводит к осушению канавочной капиллярной структуры в испарительной части, уменьшению теплоподвода к ней, открытию клапана и т. п.

Регулирование теплового потока, основанное на изменении гидравлического сопротивления жидкости, текущей в капилляр-

ной системе, чаще всего используется в устройствах, которые работают по принципу «включено — выключено» и называются *тепловыми выключателями* [27, 28].

Тепловые диоды. Тепловые диоды предназначены для переноса тепла лишь в одном направлении. Простейшим и широко распространенным диодом является бесфитильный термосифон.

В настоящее время предложено большое количество схем тепловых труб, работающих по принципу диодов [27—36]. Некоторые схемы тепловых диодов даны на рис. 5.5.

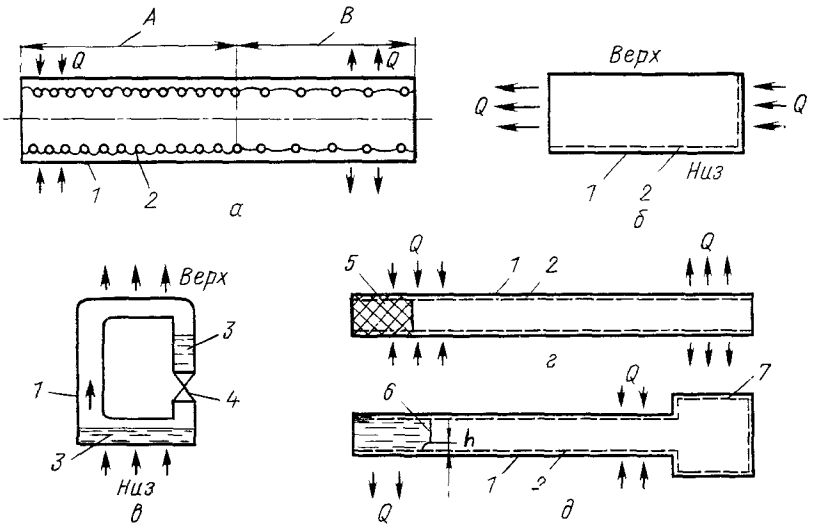


Рис. 5.5. Схемы тепловых диодов [с неоднородной капиллярной структурой (*а*); без фитиля в зоне теплоотвода (*б*); с жидкостной ловушкой (*в*); со сборником конденсата в виде капиллярной набивки (*г*); с блокированием поверхности нагрева жидкостью (*д*); для всех видов изображено прямое направленне теплопереноса, за исключением случая *д*]:

1 — корпус; *2* — фитиль (*4* — с мелкой капиллярной структурой, *B* — с крупной структурой); *3* — жидкий теплоноситель; *4* — запорный вентиль; *5* — сборник конденсата в виде мелкой капиллярной набивки; *6* — перегородка с отверстием; *7* — резервуар для жидкости

Тепловые диоды с неоднородным фитилем. Принцип работы теплового диода с неоднородным фитилем рассмотрим на примере тепловой трубы, предложенной в работе [34]. На рис. 5.5, *а* изображена цилиндрическая тепловая труба с неоднородной капиллярной структурой. Предположим, что эта тепловая труба переносит слева направо количество тепла Q. Тогда на поверхности раздела фаз пар—жидкость по длине фитиля должно установиться некоторое распределение менисков, причем кривизна их K будет убывать в сторону зоны конденсации. Следовательно, без ущерба для теплопереноса фитиль по длине тепловой трубы можно сделать неоднородным, т. е. увеличить раз-

мер пор в сторону зоны конденсации так, чтобы соблюдалось условие

$$K_{\text{пр}\,(x)} \leqslant 1/R_{\text{эф}\,(x)}, \qquad (5.9)$$

где $K_{\text{пр}(x)}$ — предельная кривизна мениска при максимальной мощности на расстоянии x от начала зоны испарения; $R_{\text{эф}(x)}$ — эффективный радиус пор фитиля на расстоянии x от начала зоны испарения. Теперь поменяем местами зоны испарения и конденсации. Тепловой поток можно увеличивать до тех пор, пока кривизна мениска в фитиле не превысит величину $1/R_{\text{эф}(x)}$. Дальнейшее повышение мощности тепловой трубы приведет к разрыву мениска жидкости, поток жидкости прервется и наступит осушение фитиля. После осушения обратный тепловой поток будет определяться теплопроводностью корпуса тепловой трубы и фитиля. Известно, что поток тепла за счет теплопроводности чаще всего мал по сравнению с теплопереносом работающей трубы. Обратный тепловой поток $Q_{\text{обр}}$ зависит от размера пор в фитиле и места их расположения. Чем крупнее поры и чем ближе они расположены к зоне конденсации, тем меньше обратный тепловой поток и, следовательно, больше термическое сопротивление тепловой трубы в обратном направлении. Качество теплового диода характеризуется двумя величинами: отношением максимальных тепловых потоков, переносимых тепловой трубой в прямом и обратном направлениях $Q_{\text{обр макс}}/Q_{\text{пр макс}}$, и отношением термических сопротивлений. Задача расчета теплового диода с неоднородным фитилем сводится к нахождению такого распределения пор в фитиле, чтобы эти отношения были минимальными.

В рассмотренной выше тепловой трубе с неоднородной капиллярной структурой эффект работы трубы в качестве диода достигается за счет различия капиллярных напоров, развиваемых капиллярной системой в зоне испарения и в зоне конденсации при изменении направления теплового потока. Другой способ изменения капиллярного напора — изменение смачиваемости. В тепловом диоде с неодинаковой смачиваемостью уменьшение капиллярного напора достигается посредством изменения величины угла смачивания фитиля θ в зонах испарения и конденсации. Конструкция теплового диода с неодинаковой смачиваемостью фитиля предложена в работе [30]. Диод с такой конструкцией выполнен следующим образом. Корпус тепловой трубы состоит из трех частей, причем на участке испарения и конденсации он выполнен из теплопроводного материала, на адиабатическом участке для уменьщения перетечек тепла — из теплового изолятора. Фитиль в зоне испарения обладает хорошей смачиваемостью, в зоне конденсации смачиваемость фитиля теплоносителем мала. Благодаря этому при изменении направления теплового потока достигается бо́льшая разница в капиллярных напорах, развиваемых участками фитиля с неодинаковой смачиваемостью, а следовательно, и в мощности, переносимой тепловой трубой.

Тепловые диоды без капиллярной системы в зоне конденсации. Тепловой диод с неоднородной капиллярной системой, как было указано, допускает обратный тепловой поток до момента пересыхания фитиля. Когда требуются очень малые обратные тепловые потоки, диод этого типа часто оказывается непригоден. Для уменьшения обратного теплового потока предложены тепловые диоды, лишенные капиллярной системы в зоне конденсации [32, 36]. Схема одного из таких диодов [36] представлена на рис. 5.5, *б*. Работа его состоит в следующем. При прямом направлении теплового потока пар конденсируется на вертикальной, лишенной фитиля стенке. Конденсат под действием силы тяжести в виде пленки или капель стекает вниз, затем по фитилю поступает в зону испарения. При обратном направлении потока жидкости пленка, имеющаяся на стенке без фитиля, пересыхает и перенос тепла в тепловой трубе прекращается. Недостаток такого диода, как и подобного ему, предложенного в работе [32], состоит в том, что он может работать только при наличии силы тяжести.

Диоды со сборником конденсата. Диоды со сборником конденсата, выполненные в виде испарительного термосифона, предложены в работах [33, 35]. На рис. 5.5, *в* дан один из примеров таких диодов, который представляет собой разновидность термосифона в виде парожидкостного замкнутого контура [33]. На участке стока жидкости имеется запорный вентиль. При открытии вентиля конденсат стекает в зону испарения и термосифон работает с максимальным теплопереносом. При закрытом вентиле конденсат накапливается в сборнике, теплоперенос прекращается и термосифон превращается в тепловой изолятор.

Схема теплового диода, который предложен в работе [35], аналогична описанной, за исключением клапана вентиля, который приводится в движение биметаллической пластиной. Для работы выполненного по такой схеме термосифона в качестве теплового диода необходимо, чтобы объем сборника конденсата равнялся объему заправленного в термосифон теплоносителя. Имеются другие схемы диодов со сборником конденсата, работа которых основана на принципе работы тепловой трубы. К их числу относится диод, схема которого изображена на рис. 5.5, *г* [31]. Диод имеет капиллярную систему, расположенную на всей внутренней поверхности тепловой трубы. Кроме того, в зоне испарения имеется капиллярная набивка, предназначенная для сбора жидкости, которой в тепловой трубе должно быть столько, чтобы она заполняла только капиллярную систему, расположенную на внутренней поверхности тепловой трубы. При прямом направлении теплового потока диод работает как обычная тепловая труба. При изменении направления теплового потока на обратный весь теплоноситель оказывается в сборнике с капиллярной набивкой, и теплоперенос в тепловой трубе прекращается. Преимущество диода

с капиллярной набивкой заключается в том, что он может работать также в условиях перегрузок и вибраций.

Диоды с блокированием поверхности теплообмена жидкостью или газом. Схема диода с блокированием поверхности теплообмена жидкостью изображена на рис. 5.5, *д* [29]. Такого рода диоды используются для работы в условиях отсутствия силы тяжести применительно к криогенным и низкотемпературным тепловым трубам. На рис. 5.5, *д* изображена конструкционная схема для наземных испытаний. От космического варианта она отличается тем, что имеет капиллярную перемычку, предназначенную для удержания жидкости в левой части тепловой трубы при обратном направлении теплового потока. Работа диода сводится к следующему. При прямом направлении теплового потока пар из зоны испарения через отверстие в капиллярной перегородке направляется в зону конденсации. Возвращение конденсата в зону испарения происходит как по артерии (основная часть теплоносителя), так и по капиллярной системе, расположенной на стенках тепловой трубы. Избыток конденсата сосредоточивается в сборнике.

Когда направление теплового потока меняется на обратное (см. рис. 5.5, *д*), весь теплоноситель из сборника конденсата собирается за капиллярной перемычкой, блокируя таким образом поверхность теплообмена. Теплоперенос в такой трубе практически прекращается, так как теплопроводность криогенных жидкостей очень мала. Отверстие для прохода пара h рассчитано таким образом, чтобы при наземных испытаниях капиллярные силы смогли удержать жидкость в левой части тепловой трубы. При работе диода в космических условиях капиллярная перемычка не требуется. Работа теплового диода с неконденсирующимся газом мало чем отличается от работы только что рассмотренного диода. Разница состоит лишь в том, что блокирование поверхности теплообмена в нем производится неконденсирующимся газом, а не жидкостью.

§ 5.2. МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

Интерес к многокомпонентным (обычно двухкомпонентным) тепловым трубам вызван следующими причинами.

1. Они имеют более широкий диапазон рабочих температур по сравнению с тепловыми трубами, использующими одну из выбранных жидкостей.

2. При определенном количественном составе компонент смеси они обладают бо́льшим максимальным теплопереносом, чем однокомпонентные.

3. При концентрациях компонент теплоносителя, близких к эвтектическим, они имеют низкую температуру плавления и могут существенно упростить сложную проблему пуска тепловой трубы из состояния с замороженным теплоносителем. Азеотроп-

ные растворы не разделяются на компоненты в тепловой трубе, и также имеют пониженную температуру плавления.

4. Могут быть применены при терморегулировании.

Особенности многокомпонентных тепловых труб связаны прежде всего с возможным разделением смеси на составляющие ее чистые компоненты или смеси с различной концентрацией в процессе стационарной работы тепловой трубы. Разделение, с одной стороны, ведет к повышению термического сопротивления тепловой трубы, с другой — в отдельных случаях может увеличить ее мощность. Вопрос о разделении смеси на чистые компоненты является одним из основных вопросов теории и эксперимента многокомпонентных тепловых труб. Как правило, рассматриваются двухкомпонентные тепловые трубы.

Известно, что для стационарной работы любой тепловой трубы, в том числе и двухкомпонентной, необходимо соблюдение двух условий. Во-первых, необходим баланс масс — в каждом сечении тепловой трубы массовый расход пара G должен быть равен массовому расходу жидкости L, т. е.

$$G + L = 0. \tag{5.10}$$

Во-вторых, приближенно должно соблюдаться термодинамическое равновесие на границах раздела фаз пар—жидкость. Температура жидкости в любом сечении однокомпонентной тепловой трубы (без учета обычно малого перепада температуры при фазовом перепаде) должна равняться температуре пара. Применительно к двухкомпонентным тепловым трубам соблюдение первого условия означает, что средние составы пара и жидкости в каждом поперечном сечении тепловой трубы должны быть равны между собой:

$$G\overline{Y} + L\overline{X} = 0, \tag{5.11}$$

где $\overline{Y}$ — средняя массовая мольная доля низкокипящей компоненты (НКК) в паре; $\overline{X}$ — средняя массовая мольная доля НКК в жидкости.

Из соотношений (5.10) и (5.11) следует:

$$\overline{X} = \overline{Y}. \tag{5.12}$$

На рис. 5.6 представлена типичная диаграмма температура кипения—состав для двухкомпонентной смеси веществ. Исходя из условия баланса масс, работа тепловой трубы на диаграмме изобразится линией AB, т. е. средние массовые доли пара $\overline{Y}$ и жидкости $\overline{X}$ в каждом сечении трубы равны между собой. Однако из второго условия вытекает, что пар, находящийся в термодинамическом равновесии с жидкостью, должен быть обогащен более низкокипящей компонентой (НКК). Это означает, что жидкость в точке B, имеющая состав X_1, будет хотя бы приближенно находиться в термодинамическом равновесии с паром в точке C, имеющим состав Y_2.

На первый взгляд, требования баланса масс и термодинамического равновесия в двухкомпонентной тепловой трубе противоречат друг другу. Это противоречие привело авторов первых исследований [37, 38] к предположению, что в стационарном режиме в двухкомпонентной тепловой трубе происходит полное разделение компонент смеси и образуются два контура из чистых теплоносителей, соединенных между собой коротким участком с переменным составом (рис. 5.7). Зона высокотемпературного теплоносителя занимает часть тепловой трубы со стороны испарителя, зона низкотемпературного теплоносителя — остальной объем трубы со стороны конденсатора. Если давление в тепловой трубе предположить примерно постоянным, то теплоносители в обеих зонах находятся при своих температурах насыщения. Тепло из одной зоны к другой передается посредством теплопереноса от одной компоненты к другой и теплопроводности по стенке трубы. Однако такая модель работы двухкомпонентной тепловой трубы не нашла подтверждения в дальнейших экспериментальных исследованиях [39—42]. На основе более детального анализа тер-

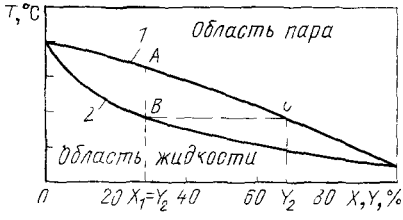


Рис 5 6 Типичная фазовая диаграмма температура — состав для двух компонент, смешивающихся во всем диапазоне концентраций при данном давлении
1 — пар; *2* — жидкость

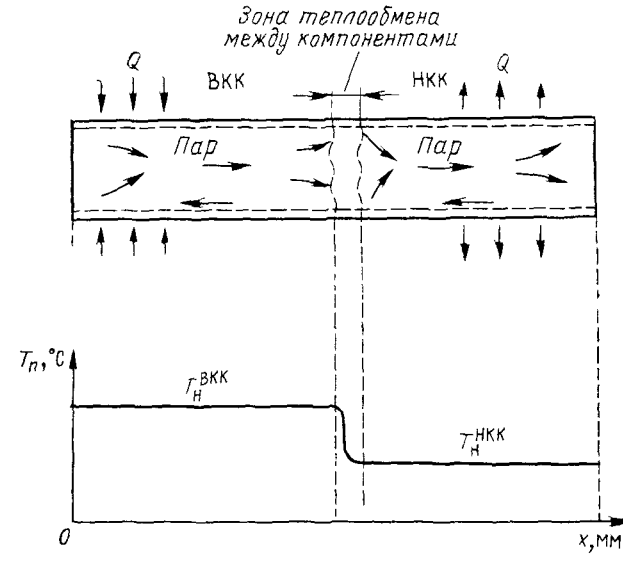


Рис 5 7 Схема работы двухкомпонентной тепловой трубы с полным разделением компонент по длине ее и распределение температуры пара в центре потока по длине трубы

модинамического равновесия бинарных смесей в работе [40] показано, что степень разделения компонент в работающей тепловой трубе зависит от ряда факторов, прежде всего от типа бинарной смеси, ее первоначального состава, тепловых условий в зоне испарения и конденсации, геометрии тепловой трубы.

Степень разделения смеси на чистые компоненты зависит от давления паров, входящих в смесь чистых компонент. Разделение смеси на чистые компоненты более вероятно, если тепловая труба заправлена смесью с сильно различающимися для чистых компонент давлениями паров. Помимо типа раствора разделение его на чистые компоненты зависит также и от его температуры. Эта зависимость выражается законом Вревского [43]: при повышении температуры раствора в равновесных парах повышается относительное содержание той компоненты, парциальная мольная теплота испарения которой больше. Из закона Вревского следует, например, что разделение в тепловой трубе натрий-калиевой смеси на чистые компоненты более вероятно при низкой температуре, чем при высокой.

Зависимость степени разделения смеси на чистые компоненты от состава определяется двумя законами Коновалова. Первый из них характеризует соотношение между составами равновесных жидкости и пара и влияние добавления той или другой компоненты на общее давление пара. Он говорит о том, что: а) повышение относительного содержания данной компоненты в жидкой фазе всегда вызывает увеличение относительного содержания ее в парах; б) в двойной системе пар по сравнению с находящейся с ним в равновесии жидкостью богаче той из компонент, прибавление которой к системе повышает общее давление пара, т. е. понижает температуру кипения смеси при данном давлении. Применительно к двухкомпонентным тепловым трубам это означает, что если начальная смесь богата НКК, то при работе тепловой трубы в стационарном режиме какое-то количество НКК будет оставаться в зоне испарения. При этом максимальная температура в зоне испарения будет ниже температуры насыщения ВКК для данного давления. В этом случае в тепловой трубе могут существовать следующие зоны: а) зона переменного состава, которую занимает испаритель и часть конденсатора; б) зона приблизительно чистого низкокипящего компонента в конце конденсатора.

Если же начальная смесь богата ВКК, то низкокипящая составляющая раствора может полностью выпариться и в зоне испарения останется лишь его высококипящая часть. Зона конденсатора будет состоять из смеси переменного состава или же начальная часть конденсатора будет содержать чистую ВКК.

Второй закон Коновалова касается *азеотропных растворов*. (Азеотропными называют такие бинарные растворы, состав которых одинаков с составом равновесного с ним пара.) Азеотропные растворы обладают тем интересным свойством, что, несмотря на большое различие давлений составляющих их чистых компонент,

они кипят при одной температуре (для данного давления), т. е. верхняя кривая насыщенного пара и нижняя кривая кипящей жидкости сходятся в одну точку A (рис. 5.8). Азеотропные растворы существуют при строго определенном составе компонент бинарной смеси.

В табл. 5.3 [44] приведены некоторые азеотропные растворы. Азеотропные растворы невозможно разделить на чистые компоненты методом дистилляции. Тепловая труба с азеотропной смесью будет вести себя как однокомпонентная.

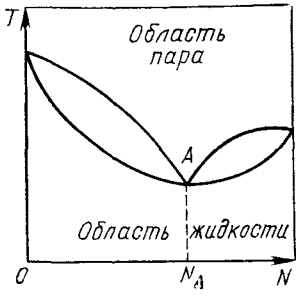


Рис. 5.8. Фазовая диаграмма температура — состав для двухкомпонентной смеси, образующей азеотропный раствор с концентрацией N_A

Разделение двухкомпонентных смесей на чистые компоненты определяется тепловыми условиями в зоне испарения и конденсации, а также длиной тепловой трубы. В работающей трубе температура в направлении конденсатора уменьшается, и в соответствии с диаграммой температура — состав (см. рис. 5.6) при постоянном давлении содержание НКК в жидкой и паровой фазах увеличивается вдоль трубы от испарителя к конденсатору. Если температура стенки конденсатора ниже температуры насыщения НКК для данного давления, то в зоне конденсации всегда будет существовать зона

Таблица 5.3

Некоторые азеотропные растворы

Компонента		Температура кипения, °С			Содержание компоненты А в азеотропном растворе
А	В	А	В	Азеотропного раствора	
Вода	Этиловый спирт	100	78,30	78,13	4,43
»	Изопропиловый спирт	100	82,44	80,37	12,10
Метиловый спирт	Бензол	64,70	80,20	58,34	39,55
Этиловый спирт	»	78,30	80,20	68,24	32,37
То же	Хлороформ	78,30	61,16	59,40	7,0
Толуол	Хлорное олово	110,70	113,85	109,15	48,0
Сероуглерод	Ацетон	46,25	56,25	39,25	66,0
Калий	Цезий	759	670	—	—

чистой НКК. Если же эта температура выше температуры насыщения, то при прочих равных условиях зоны чистого НКК может и не быть и всю длину зоны конденсации займет смесь переменного состава.

Двухкомпонентную тепловую трубу можно сравнить с противоточной ректификационной колонной с полным стоком. При

конечной длине колонны в ней также не происходит полного разделения компонент. Однако работа тепловой трубы отличается от работы ректификационной колонны тем, что в трубе поверхности раздела фаз мало развиты, нет такого хорошего контакта между паром и жидкостью, как это имеет место в ректификационных колоннах. В связи с этим разделение смеси на чистые компоненты в тепловой трубе менее вероятно. Другое отличие состоит в том, что давление в ректификационной колонне является внешним регулируемым параметром, в то время как в тепловой трубе оно весьма сложно зависит от многих параметров.

Теоретические исследования двухкомпонентных тепловых труб проводятся с 1967 г. [38]. Поскольку модель о полном разделении смеси на чистые компоненты не была подтверждена экспериментально, в работе [38] было высказано предположение о радиальном изменении состава пара в каждом сечении тепловой трубы. Необходимое условие термодинамического равновесия при этом должно удовлетворяться на поверхности раздела фаз, однако средние концентрации пара и жидкости по-прежнему должны быть далеки от термодинамического равновесия. Существование неравновесного состояния — причина радиального адиабатического массообмена между двумя фазами. НКК, концентрация которой по условиям термодинамического равновесия должна быть больше в паре, испаряется из жидкой фазы, а ВКК, наоборот, конденсируется на поверхности раздела. Радиальный профиль концентраций компонент в паре и жидкости в тепловой трубе схематически показан на рис. 5.9. Этот профиль концентраций выполнен для условия баланса масс, т. е. для $\bar{Y}=\bar{X}$, а также удовлетворяет термодинамическому равновесию пара и жидкости на поверхности раздела фаз. В настоящее время установлено [42], что разделение смеси в двухкомпонентной тепловой трубе — результат адиабатического радиального массообмена, который имеет место по всей ее длине, в том числе и на адиабатическом участке.

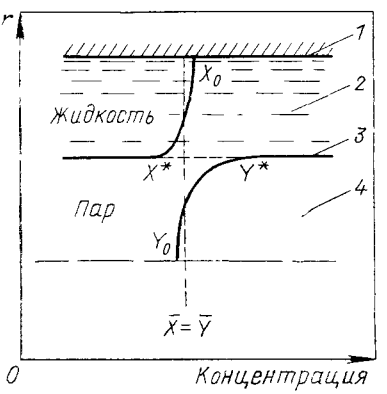


Рис. 5.9. Распределение концентраций по радиусу в двухкомпонентной тепловой трубе:
1 — стенка трубы; *2* — жидкость; *3* — поверхность раздела жидкость — пар; *4* — пар; $\bar{Y}$, $\bar{X}$ — средние по сечению концентрации НКК в паре и жидкости, Y^*, X^* — концентрации НКК на поверхности раздела пар — жидкость, Y_0, X_0 — концентрации НКК в основных объемах пара и жидкости

В зоне испарения и конденсации имеется, кроме того, радиальный массовый поток, возникающий в результате подвода и отвода тепла. Исследования, проведенные на ректификационных колоннах, например [45], показали, что влияние поперечных потоков при подводе и отводе тепла на адиабатический радиальный массо-

обмен и степень сепарации компонент невелико. Степень сепарации несколько увеличивается при подводе тепла и уменьшается при его отводе.

Наряду с неравновесностью средних концентраций в двухкомпонентной тепловой трубе имеет место неравновесность средних температур. Учитывая малое термическое сопротивление фазового перехода, следует ожидать, что температура жидкости на границе раздела фаз равна температуре пара и, следовательно, в пределах диффузионного пограничного слоя имеется радиальный перепад температур. Радиальный перепад температуры в каждом сечении тепловой трубы, в том числе и в адиабатической зоне, вызывает радиальный теплообмен между двумя фазами, похожий на противоточный теплообмен в теплообменниках. Пар охлаждается при движении в направлении к конденсатору, жидкость, двигаясь в противоположном направлении, нагревается. Радиальное падение температуры пара — совершенно необходимое условие работы двухкомпонентной трубы. Иначе невозможно объяснить значительное падение температуры между испарителем и конденсатором, наблюдаемое во всех экспериментах с двухкомпонентными тепловыми трубами при концентрациях, отличающихся от азеотропных [39—42].

Следует заметить, что испарение в равновесных условиях не может происходить при температуре жидкости ниже, чем температура пара. В работе [42] поперечные профили температуры в различных сечениях тепловой трубы предположительно представлены следующим образом (рис. 5.10).

В самом начале зоны испарения (сечение *а*) имеется радиальное падение температуры в жидкости, связанное с передачей тепла, необходимого для испарения жидкости. Температуру пара в этом сечении можно принять постоянной, так как теплообмен между паром и жидкостью здесь отсутствует. В сечении *б* проис-

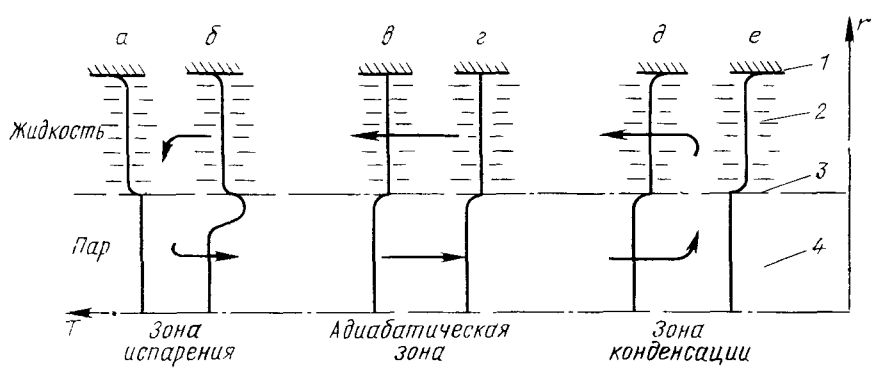


Рис. 5.10 Изменение профиля температуры по длине и радиусу двухкомпонентной тепловой трубы:

1 — стенка, *2* — жидкость, *3* — поверхность раздела жидкость—пар, *4* — пар, *а—е* — сечения по длине трубы

ходит испарение жидкости, которая холоднее, чем жидкость в сечении *а*, из-за радиального теплообмена между обеими фазами. Пар, образующийся в сечении *б*, имеет более низкую температуру, чем аксиально-движущийся пар, полученный в сечении *а*. В адиабатической зоне (сечения *в* и *г*) радиального падения температуры в жидкой фазе почти нет, так как термическое сопротивление для теплообмена внутри жидкой фазы очень мало по сравнению с паровой фазой. В конденсаторе (сечения *д* и *е*) имеется радиальное падение температуры в жидкости вследствие отвода тепла фазового перехода. В паровой фазе можно ожидать, что распределение температуры близко к постоянному (по крайней мере, в конце тепловой трубы — сечение *е*). Теоретические зависимости для радиального профиля концентраций и поперечного потока низкокипящей компоненты, а также распределения концентраций по длине двухкомпонентной тепловой трубы получены в работе [46].

Экспериментальные исследования по двухкомпонентным тепловым трубам пока сравнительно малочисленны [39—42, 47]. В основном опыты проводились на тепловых трубах, заполненных смесью воды с этиловым или метиловым спиртом. В работе [47] использовалась тепловая труба со смесью натрия и лития. Однако цель этой работы состояла в изучении строения интерметаллических молекул и специальных измерений, характеризующих процессы, массо- и теплопереноса в ней не было. Интересные данные получены в работе Броммера [42], проведенной на тепловой трубе, заполненной смесью воды и метилового спирта. Длина тепловой трубы составляла 50 см при внешнем диаметре 13,5 мм. Корпус трубы — медный, капиллярная система состояла из шести артерий. На рис. 5.11 представлены данные по максимальному теплопереносу в зависимости от температуры при различном перво-

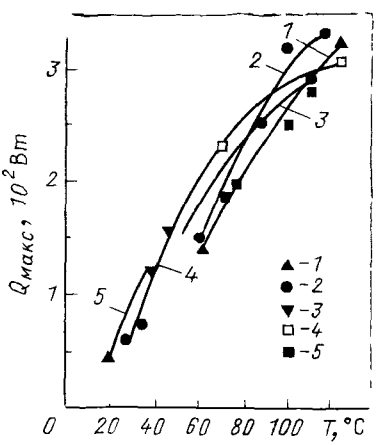
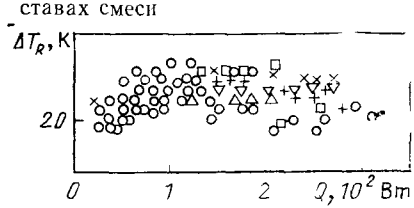


Рис. 5.11. Экспериментальная зависимость максимального теплопереноса (в тепловой трубе с метиловым спиртом и водой) от температуры при различных первоначальных составах смеси [42].

1 — мольная доля H_2O—0% (чистый метанол), *2* — 40% H_2O, *3* — 62% H_2O, *4* — 85% H_2O, *5* — 100% H_2O

Рис. 5.12. Осевой перепад температуры в тепловой трубе с метиловым спиртом и водой при различных составах смеси



начальном составе смеси. По сравнению с чистым метиловым спиртом небольшая добавка воды значительно увеличивает максимальную переносимую тепловой трубой мощность. Это можно объяснить влиянием разделения компонентов на капиллярное давление. При работе тепловой трубы вода с ее высоким поверхностным натяжением концентрируется преимущественно в испарителе, обеспечивая тем самым высокий теплоперенос. На рис. 5.12 показана зависимость осевого перепада температуры от теплопереноса при различных первоначальных составах смеси. Отметим, что перепад температуры почти постоянен в широком диапазоне изменения мощности.

Степень разделения компонент зависит от состава смеси. Для смесей с близкой концентрацией обеих компонент она выше, чем тогда, когда одной из компонент в смеси мало. Изменение длины испарителя и конденсатора практически не оказывает влияния на осевые перепады температуры. Однако увеличение общей длины трубы увеличивает степень разделения смеси на чистые компоненты. Измеренный радиальный перепад температуры в двухкомпонентных трубах значительно выше, чем в однокомпонентных вследствие диффузионного сопротивления. Большой перепад температуры по длине двухкомпонентной тепловой трубы вызван прежде всего адиабатическим радиальным тепло- и массообменом между жидкой и паровой фазами. Для того чтобы уменьшить радиальный тепло- и массообмен, в адиабатической зоне тепловой трубы в экспериментах [42] был установлен экран, отгораживающий пар от жидкости. В результате установки экрана аксиальный перепад температуры был понижен примерно в два раза.

§ 5.3. ГРАВИТАЦИОННЫЕ КАПИЛЛЯРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

При создании различных типов тепловых труб, использующих силы гравитации, возникают свои специфические проблемы [48—55]. В бесфитильных трубах — термосифонах — силы гравитации являются основными движущими силами. В тепловых трубах с капиллярной структурой, добавляясь к капиллярным, они способны существенно увеличивать теплоперенос.

Остановимся на особенностях гидродинамики в вертикальных капиллярных тепловых трубах. На рис. 5.13 показано изменение давления пара и жидкости вдоль трубы. На рис. 5.13, *а* при отсутствии теплопереноса избыток теплоносителя находится в нижней части трубы (мокрая точка M внизу), давление в жидкости меняется линейно, капиллярная структура заполняется лишь частично — верхняя граница находится на высоте, при которой перепад давления между паром и жидкостью равен максимальному капиллярному давлению. На рис. 5.13, *б*, соответствующем пусковому режиму, жидкость вследствие возникновения перепада давления в паре поднимается уже на бóльшую высоту (на этом рисунке представлен случай, когда сечение фитиля велико и падением давления в жидкости вследствие трения можно пренебречь

из-за малости по сравнению с изменением давления в паре). В той части трубы, где фитиль еще не заполнен, осуществляется свободное стеканне жидкости. Наконец, на рис. 5.13, *в*, соответствующем большому теплопереносу при повышенном давлении пара в тепловой трубе, капиллярная структура заполнена полностью, избыток жидкости удален из нижней части трубы, мокрая точка перемещается к верхней части зоны нагрева. Капиллярное давление уравновешивает перепад давления пар—жидкость, уменьшенный вследствие гравитационного напора на высоте зоны нагрева.

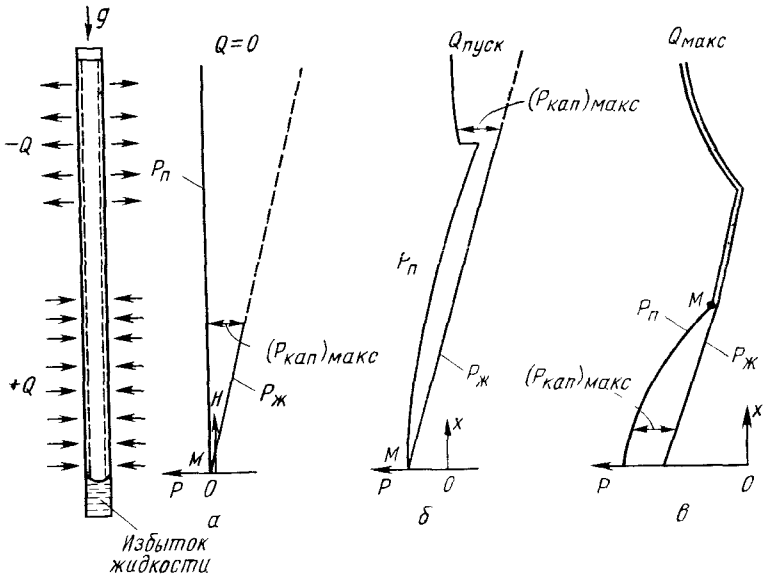


Рис. 5.13. Профили давлений в паре и жидкости для капиллярной тепловой трубы, работающей вертикально в поле силы тяжести с нагревом в нижней части:

а — при отсутствии теплопереноса; *б* — при работе в процессе пуска; *в* — при работе с теплопереносом, близким к максимальному при капиллярных ограничениях; *M* — местоположение мокрой точки

Для некоторых областей применения (например, ампульные испытания твэла в реакторе) необходимо создать высокотемпературные вертикально работающие тепловые трубы с большим теплопереносом. При выборе капиллярной структуры для таких труб возникают противоречивые требования: 1) нужно иметь мелкую капиллярную структуру, способную обеспечивать поднятие жидкости часто на значительную высоту зоны нагрева; 2) следует использовать фитили с большими гидравлическими диаметрами и капиллярным давлением, чтобы иметь большой теплопере-

нос. Решение задачи следует искать в использовании неоднородных капиллярных структур, прежде всего по сечению фитиля. Стенка трубы должна быть устлана простым фитилем мелкой структуры, предназначенным для теплоотвода в пусковых режимах и для распределения жидкости по периметру трубы. Высокий теплоперенос может быть обеспечен лишь при использовании каналов большого гидравлического диаметра для протока жидкости. Капиллярная структура, использованная авторами в газонаполненной натриевой тепловой трубе (см. рис. 5.3), лишь частично решает задачу — максимальный теплоперенос, характерный для составного фитиля, в опытах не был получен, что, по-видимому, обусловлено влиянием парогазовых пузырей.

Для обеспечения работоспособности составного фитиля при отсутствии неконденсирующихся газов может быть использована выдвинутая авторами идея «самозаполнения» больших каналов в таком фитиле, т. е. постепенное поднятие жидкости в них из-за уменьшения перепада пар—жидкость в пусковых режимах работы. Конструирование фитиля в таком случае должно сопровождаться расчетными оценками, показывающими осуществимость идеи «самозаполнения». Избыток жидкости должен быть выведен из зоны нагрева во избежание вскипания и осушения вследствие этого составного фитиля.

В работе [54] для обеспечения относительно высокого теплопереноса в тепловой трубе при 600—650° С разработана спиральная капиллярная структура. Опыты в целях выбора оптимальной геометрии фитиля были проведены с тепловыми трубами, отличающимися числом, шагом и размером спиральных артерий. Трубы имели длину 54 см и внутренний диаметр корпуса 20,4 мм. На стенке каждой трубы в несколько слоев (5—6) монтировалась мелкая сетка, затем к ней приваривались расположенные по спирали артерии из мелкой сетки круглого или прямоугольного сечения. В качестве теплоносителя использовался как натрий, так и калий. На рис. 5.14 для примера представлены экспериментальные результаты, полученные на тепловой трубе, имеющей два слоя сетки с 102 яч/см у стенки, затем три слоя сетки с 63 яч/см, распределяющие жидкость по периметру трубы, и четыре спирально расположенных желоба из сетки 63 яч/см (по 6 витков на всю

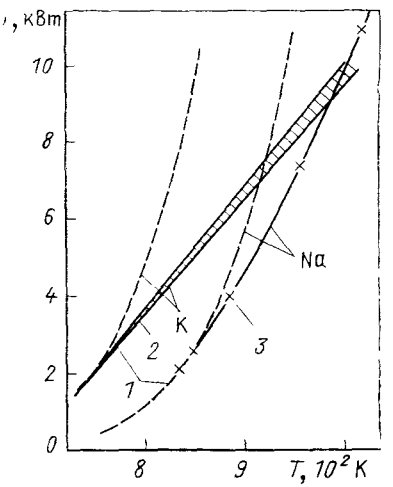


Рис 5 14. Ограничения теплопереноса для калиевой и натриевой тепловых труб со спиральными капиллярными структурами [55]: *1* — звуковые ограничения; *2* — максимальный теплоперенос с калием; *3* — максимальный теплоперенос с натрием

длину трубы). Каждый желоб имел высоту 3,2 мм, ширину 1,6 мм и был открыт сверху. Из рис. 5.14 видно, что калий при низких давлениях при такой капиллярной структуре способен давать более высокий теплоперенос, чем натрий. Однако в целом следует отметить, что такая капиллярная структура не способна обеспечить высокий теплоперенос, особенно при повышенных давлениях. Осушение тепловых труб наступало вследствие ограничения по градиенту давления. Это специфичное для гравитационных труб ограничение связано с тем, что стекание пленки жидкости вниз происходит лишь тогда, когда градиент давления в жидкости превышает градиент давления в паре. В противном случае происходит остановка и даже возвратное (снизу вверх) течение жидкости.

Для расчета ограничения мощности по градиенту давления в работе [55] предложена формула

$$Q_{\text{макс}} = F_{\text{эф}} r \left[\frac{\rho_{\text{п}}}{A} \left(\frac{\rho g h_{\text{и}}}{2} + \frac{G}{R_{\text{ж}}} \right) \right]^{1/2}, \qquad (5.13)$$

где $F_{\text{эф}}$ — эффективная поверхность парового прохода со спиральными каналами; $\rho_{\text{п}}$ — плотность пара на выходе из испарителя; $h_{\text{и}}$ — длина испарительной зоны; $R_{\text{ж}}$ — половина ширины желоба; A — коэффициент, зависящий от соотношения давлений на входе в испаритель и выходе из него ($A \approx 1{,}1$ при ламинарном течении и $A \approx 2{,}2$ при полностью турбулентном).

В работе [56] отмечается, что наибольший теплоперенос водяные капиллярные тепловые трубы с канавочной капиллярной структурой обеспечивают не в вертикальном, а в наклонном положении. К существенному увеличению переносимой мощности приводит введение в паровой канал специальной трубы, способствующей перетеканию жидкости из зоны конденсации в зону испарения без взаимодействия с потоком пара, текущим в противоположном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К предисловию

1 **Тепловые трубы.** Пер с англ и нем Под ред Э Э Шпильрайна М, Мир, 1972
2 **Васильев Л. Л., Конев С. В.** Теплопередающие трубки Минск, Энергия, 1972
3 **Низкотемпературные** тепловые трубы / Л Л Васильев, С Л Вааз, В Г Киселев, С В Конев, Л П Гракович Минск, Наука и техника, 1976
4 **Низкотемпературные** тепловые трубы для летательных аппаратов/ В Г Воронин, А В Ревякин, В Я Сасин, В С Тарасов М, Машиностроение, 1976
5 **Dunn P. D., Reay D. A.** Heat pipes Oxford, Pergamon Press, 1976
6 **Ивановский М. Н, Сорокин В. П., Ягодкин И. В.** Физические основы тепловых труб М, Атомиздат, 1978

К главе 1

1 **Bainton K. F.** Experimental heat pipes — AERE-M1610, Harrwell, June 1965.
2 **Bohdansky I., Schins E. J.** Heat transfer of a heat pipe operating at emitter temperatures — In Proc Intern Conf on Thermionic Electrical Power Generation L, 1965
3 **Busse C. A.** Heat pipe thermionic converter research in Europe. — In Proc. Fourth Intersociety Energy Conversion Engng Conf, Sept 22—26, Washington, 1969
4 **Frank S.** Optimization of a grooved heat pipe — In Proc Third Intersociety Energy Conversion Engng Conf, August 13—17, Florida, 1967
5 **Van Andel E** Heat pipe design theory — In Proc Second Inter Conf on Thermionic Electrical Power Generation Stresa, Italy, 1968
6 **Polasek F** Heat pipes with sulphur fillings and their application Fifth Intern. Congress CHISA-75, Prague, August 25—29, 1975
7. **Busse C. A., Caron J. P, Geiger T. P.** Performances studies on heat pipe. — In Proc Intern Conf on Thermionic Electrical Power Generation L, 1965
8 **Ростокер У., Мак-Коги Дж., Маркус Г.** Хрупкость под действием жидких металлов Пер с англ М, Изд во иностр лит, 1962
9 **Горюнов Ю. В., Перцов Н. В., Сумм Б. Д.** Эффект Ребиндера М, Наука, 1966
10 **Шанк Ф. А.** Структуры двойных сплавов Пер с англ Под ред И И Новикова, И Л Рогельберга Т 3 М, Металлургия, 1973
11 **Эллиот Р. П.** Там же, т 1 1970
12 **Хансен А. А., Андерко К.** Там же, т 2, 1962
13 **Эллиот Р. П.** Там же, т 2, 1962
14 **Растворимость** индивидуальных веществ в натрии/ Ф А Козлов, Ю И Загорулько, Н Г Богданович и др Препринт ФЭИ 510 Обнинск, 1974
15 **Гранкова Л. П., Минц Р. С., Петрова Л. А.** Диаграммы состояния металлических систем Под ред Н В Агеева Вып 9 М, ВИНИТИ, 1966
16 **Алисова С. П., Будберг П. Б** Там же, вып 17, 1973
17 **Di Stefano J. R., Litman A P** Effects of impurities in some refractory metal-alkali metal systems — Corrosion, 1964, v. 20, N 12, p. 24—31.

18 **Опыт** эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития атомной энергетики/ Ю Ф Баландин, С С Шураков О В Стариков и др — В кн 20 лет атомной энергетики Сб докладов. Т. 2 Обнинск, 1974, с. 16—27.
19 **Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Субботин В. И.** Испарение и конденсация металлов М, Атомиздат, 1970
20 **Ушаков Б А., Никитин В. Д., Емельянов И. Я.** Основы термоэмиссионного преобразования энергии М, Атомиздат, 1974
21 **Dunn P D., Reay D A.** Heat pipes N Y, Pergamon Press 1976
22 **Бадылькес Н. С** Рабочие вещества холодильных машин М, Пищепромиздат, 1952
23 **Кобулашвили Ш. Н.** Холодильная техника Энциклопедический справочник М, Госторгиздат, 1960
24 **Коррозионная** стойкость металлов и сплавов Справочник М, Машиностроение, 1964
25 **Клинов И. Я., Удыма Г. Г. и др.** Химическое оборудование в коррозионном исполнении Справочник М, Химия, 1970
26 **Тодт Ф.** Коррозия и защита от коррозии Справочник М, Химия, 1966

К главе 2

1 **Groll M., Kirkpatrick J. P.** Heat pipes for spacecraft temperature control — an assessment of the state-of-the art — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p 167
2 **Grover G. M, Cotter T P., Erickson G. E.** Structures of very high thermal conductance — J Appl Phys, 1964, N 35, p 1990
3 **Deverall J. E, Kemme J. E.** High thermal conductance devices utilizing the boiling of lithium or silver LA-3211, 1964
4 **Vapor-chamber** fin studies/H R Kunz, L S Langston, B H. Hilton, S S Wycle NASA CR 812, 1967
5 **Pruschek R., Schindler M, Moritz K.** Das Warmerohr — Chem. Ing. Techn, 1967, N 39, S 21
6 **Eastman G. K.** The heat pipe — Scientific American, 1968, N 218, p 38
7 **Moritz K, Pruschek P.** Grenzen des Energietransports in Warmerohren — Chem Ing Techn, 1969, N 41, S 30
8 **Deverall J. E., Kemme J. E.** Satellite heat pipe LA-3278-MS, 1965.
9 **Dorner S., Reiss F., Schretzmann K.** Experimentelle Untersuchungen an Na — gefullten Heat Pipes Kernforschungszentrum Karlsruhe, Bericht KFKS12, 1967
10 **Schmidt E., Scmeria R** Determination theorique et experimental de la puissance thermique limite transferee par des caloduces a sodium — In Proc. Second Intern Conf on Thermionic Electrical Power Generation Stresa, Italy 1968
11. **Исследование** тепло и массопереноса в тепловой трубе с натриевым теплоносителем/ М Н Ивановский, В П Сорокин, В И Субботин, М В Шустов — Теплофизика высоких температур, 1970, т 8, № 2, с 319
12 **Katzoff S.** Notes on heat pipes and vapor chambers and their application to thermal control of spacecraft Sandia Laboratories Heat Pipe Conference, Okt 1966
13 **Basilulis A., Prages R. C., Lamp T. R.** Compatibility and reliability of heat pipe materials — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p 357
14 **Finlay I. C., Loy B, Gree D. G.** Manufacture and performance of water filled heat pipe with a sintered copper wick — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p. 93.
15 **Результаты** исследования структуры волокнистых фитилей, проницаемости и высоты капиллярного равновесия/ М Г Семена, А Г Косторнов, А Н Гершуни, А Л Мороз, В К Зорипов — Инж физ журн, 1974, т 27, № 6, с 1009
16 **Исследование** структурных и гидродинамических характеристик фитилей тепловых труб/М Г Семена, А. Г Косторнов, А. Н Гершуни, А Л Мо-

роз, М. С. Шевчук. — Теплофизика высоких температур, 1975, т. 13, № 1, с. 162.
17. **Performance** studies on heat pipes/ C. A. Busse, R. Caron, F. Geiger, M. Pötzschke. — In: Proc. Intern. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation. L., 1965.
18. **Heat** pipe lifetests at 1600° C and 1000° C/C. A. Busse, F. Geiger, M. Pötzschke, D. Quatert. — In: Proc. Thermionic Conversion Specialist Conf., Houston, USA, 1966.
19. **Kemme J. E.** Heat pipe capability experiments. — LA-3585-MS, 1966.
20. **Koch H., Kreeb H., Perdu M.** Modular axial grooved heat pipes. — In: Proc. Second Intern. Heat Pipe Conf. Bologna, Italy, 1976, v. 1, p. 77.
21. **Operation** peculiarities of low—temperature heat pipes with crimped capillary structure / M. N. Ivanovsky, Ju. A. Ilyin, F. F. Kolgotin, V. I. Korneev, V. V. Privesentsev, B. I. Rybkin, V. I. Serbin, Ju. Ju. Sergeev, E. M. Sidorenko, V. P. Sorokin. — Ibid., v. 2, p. 699.
22. **Васильев Л. Л., Конев С. В.** Теплопередающие трубки. Минск, Наука и техника, 1972.
23. **Моритц К.** Влияние геометрии капилляров на максимальную тепловую нагрузку в тепловых трубах. — В сб.: Тепловые трубы. Пер. с англ. и нем. Под ред. Э. Э. Шпильрайна. М., Мир, 1972, с. 33.
24. **Development** of a bendable Al/SS/NH_3 heat pipe for satellite application/ W. D. Münzel, M. Groll, M. Knupfer, P. Zimmermann, H. Hassan. — In: Proc. Intern. Heat Pipe Conf., Stuttgart, FRG, 1973, Paper 9—3.
25. **Goodacre J. B., Griffiths G. D.** Heat pipe and space radiator development. — In: Proc. Second Intern. Heat Pipe Conf. Bologna, Italy, 1976, v. 2, p. 865.
26. **Edelstlain F., Hembach R.** Design, fabrication and testing of a variable conductance heat pipe for equipment thermal control. — AIAA Paper, 1971, N 71, p. 421.
27. **Nelson B. E., Petrie W.** Experimental evaluation of a cryogenic heat pipe/radiator in a vacuum chamber. — In: Proc. Intern. Heat Pipe Conf. Stuttgart, FRG, 1973, Paper 10—2a.
28. **Münzel W. D., Groll M., Hage M.** Development of a passive hot gas reservoir variable conductance heat pipe. — In: Proc. Second. Intern. Heat Pipe Conf., Bologna, Italy, 1976, v. 1, p. 197.
29. **Cenkner A. A., Nelson B. E., Petrie W.** Extended cryogenic performance of lobar wick heat pipe/radiator. — Ibid., v. 2, p. 683.
30. **A tunnel** wick 100000 watt — inch heat pipe/R. Kosson, R. Hambach, F. Edelstein, M. Tawil. — AIAA Paper N72-273, 1972.
31. **Исследование** краевых углов смачивания фитилей низкотемпературных тепловых труб/М. Г. Семена, А. Г. Косторнов, А. Н. Гершуни, В. К. Зарипов. — Инж.-физ. журн., 1975, т. 28, № 2, с. 217.
32. **Васильев Л. Л., Костко З. Н., Конев С. В.** Исследование характеристик капиллярнопористых фитилей для низкотемпературных тепловых трубок. — Там же, 1972, т. 23, № 4, с. 606.
33 **Фреггеис Р. А.** Экспериментальное определение свойств фитилей для тепловых трубок. — Прямое преобразование тепловой энергии в электрическую и топливные элементы, 1970, вып. 10 (99), с. 88.
34. **Kemme J. E.** Ultimate heat pipe performance. — IEEE Trans. Electron Devices, USA ED-16, N 8, 1969.
35. **Thien C. L., Sun K. H.** Minimum meniscus radius of heat pipe wicking materials. — Intern. J. Heat. Mass Transfer, 1971, v. 14, N 11, p. 1853.
36. **Hoogendoorn C. J., Nio S. G., Hardy H. J.** Permeability studies on wire screens and grooves. — In: Proc. Intern. Heat Pipe Conf. Stuttgart, FRG, 1973, Paper 5—3.
37. **Birnbreier H., Gammel G.** Measurement of effective capillary radius and permeability of different capillary structures. — Ibid., Paper 5—4.
38. **Keser D.** Experimental determination of properties of saturated sintered wicks. — Ibid., Paper 6—1.
39. **Uhlemann H., Marks C. J., Spigt C. L.** Capillary pressure in screen wick structures. — Ibid., Paper 6—2.

40. **Uhlemann H., Marks C. J., Spigt C. L.** Flow resistance in screen wick structures. — Ibid., Paper 6—3.
41. **Eninger J. E.** Capillary flow through heat pipe wicks. — AIAA Paper, 1975, N 661, p. 1.
42. **Новое** в теории и практике тепловых труб (обзор). — Астронавтика и ракетодинамика, 1975, № 46, с. 1.
43. **Федоров В. Н., Юдашкин А. Г.** Тепловая труба. — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1969, № 12, с. 155.
44. **Neu H.** Heat Pipes und ihre Anwendung in nuklearen Energieversorgungseinheiten für die Raumfahrt. — Atompraxis, 1966, N 4, S. 96.
45. **Способ** изготовления тепловой трубы/ В. А. Климашин, А. И. Строжков, С. И. Обухов, И. В. Ягодкин. — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1965, № 10, с. 112.
46. **Bohdausky J.** Heat pipe. Patent USA N 3402767, 1965.
47. **Lewedahl W. E.** Heat pipe for thermal conductivity working fluids. Patent USA N 3537514, 1969.
48. **Brien O.** Heat transfer device with liquid. Patent USA N 2426044, 1942.
49. **Gaugler R. S.** Refrigerating apparatus. Patent USA N 2350347, 1941 and N 2350348, 1942.
50. **Phillips B. A.** Heat and material transfer apparatus. Patent USA N 2691281, 1951.
51. **Conway B. H.** Absorber assembly. Patent USA N 3045452, 1962.
52. **Phillips B. A.** Absorption refrigerating apparatus. Patent USA N 3078690, 1963.
53. **Payne C. A.** Absorption refrigerating machine. Patent USA N 2307947, 1942.
54. **Gaugher R. G.** Refrigerating apparatus. Patents USA N 2565221, 1946; N 2565220, 1946; N 2517654, 1946.
55. **Gaugher R. G.** Absorber for refrigerating apparatus. Patent USA N 2583769, 1946.
56. **Calimbas A. T., Hult R. H.** An avionios heat pipe. — ASME Paper N HT-16, 1969.
57. **Arcella F. G., Dzakowic G. S.** Heat pipe function isothermally and adoptably.— Space Aeronautics, 1969, N 8, p. 3.
58. **Сасин В. Я., Федоров В. Н., Сорокин А. Я.** Экспериментальное исследование тепловой трубки на легкокипящих теплоносителях. Сб. докл. научно-технич. конф. МЭИ. М., Изд-во МЭИ, 1969, с. 79—84.
59. **Schmidt E.** Element d'am mechanismu motor a turbine a gaz expore a une charge thermique et rebroidi par un gas. Patent Franz. N 1576334, 1970.
60. **Vinz P., Cappelletti C., Geiger F.** Development of capillary structures for high performance sodium heat pipes. — In: Proc. Intern. Heat Pipe Conf. Stuttgart, FRG, 1973, Paper 3—4.
61. **Uhlemann H., Marks C. Y., Spigt C. L.** Design and construction of wick structures. — Ibid., Paper 5—5.

К главе 3

1. **Субботин В. И., Ивановский М. Н., Арнольдов М. Н.** Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М., Атомиздат, 1970.
2. **Messer C. E.** Survey report on lithium hidride. — NYO-970, 1960.
3. **Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Субботин В. И.** Испарение и конденсация металлов. М., Атомиздат, 1976.
4. **Розбери Ф.** Справочник по вакуумной технике и технологии. М., Энергия, 1974.
5. **Северденко В. П., Клубович В. В.** Применение ультразвука в промышленности. Минск, Наука и техника, 1967.
6. **Гельд П. В., Рябов Р. А.** Водород в металлах и сплавах. М., Металлургия, 1974.
7. **Черепнин Н. В.** Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М, Сов. радио, 1966.

8. **Черепнин Н. В.** Сорбционные явления в вакуумной технике М., Сов. радио,. 1973.
9. **Данилин Б. С.** Вакуумная техника в производстве интегральных схем. М., Энергия, 1972.
10. **Kemme J.** Heat pipe capability experiments. Los-Alamos Laboratory, LA-3585-MS, 1966.
11. **Сорокин В. П., Строжков А. И., Чулков Б. А.** — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1974, № 29, с. 112.
12. **High** temperature lithium heat pipes/ A. C. Busse, F. Geiger, H. Strub, M. Pötzschke, G. Graft. — In: Proc. Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa, Italy, 1968, p. 495.
13. **Доверолл И. Е.** Ртуть как теплоноситель для тепловой трубы. — В кн.: Тепловые трубы. Пер. с англ. и нем. Под ред. Э. Э. Шпильрайна. М., Мир, 1972.
14. **Раппорт Ф. М., Ильинская А. А.** Лабораторные методы получения чистых газов. Л., Химия, 1963.
15. **Перри Д. Г.** Справочник инженера-химика. Л., Химия, 1969.
16. **Кричевский Н. Р.** Фазовые равновесия в растворах при высоких давлениях. М., Госхимиздат, 1952.
17. **Казаков Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов. М., Машиностроение,. 1976.

К главе 4

1. **Vinz P., Busse C. A.** Axial heat transfer limits of cylindrical sodium heat pipes between 25 w/cm^2 and 15·5 kw/cm^2. — In: Proc. Intern. Heat Pipe Conf. Stuttgart, FRG, 1973, Paper 2—1.
2. **Kemme J. E.** High performance heat pipes. — In: 1967 IEEE Conf. Record of the Thermionic Conversion Specialist Conference. Palo Alto, Inst. Electrical and Electronics Engrs., N. Y., 1967, p. 355—357.
3. **Fraas A. P., Samuels G.** Isotope kilowatt program quarterly progress report. Rep. ORNL-TM-3491, August 1971 and ORNL-TM-3592, November 1971. Oak-Ridge National Laboratory.
4. **Der Einfluss** der Scherwirkung des Dampfstromes auf den laminaren Flüssigkeitsstrom in Kapillaren von Wärmerohren—Wärme und Stoffübertragung/ W. E. Hufschmidt, G. Burck, Di Cola, H. Höffman. 1969, Bd 2, N 4, S. 222—239.
5. **Kemme I. E.** Heat pipe capability experiments. Los-Alamos Lab., LA-3585-MS, 1966.
6. **Schmidt E., Semeria R.** Determination theorie at experimentale. — In: Proc. Second Intern. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation. Stresa, Italy, 1968, Paper D-4.
7. **Исследование** тепло- и массопереноса в тепловой трубе с натриевым теплоносителем/ М. Н. Ивановский, В. П. Сорокин, В. И. Субботин, М. В. Шустов. — Теплофизика высоких температур, 1970, т. 2, № 8, с. 319.
8. **Shefsiek P. K., Ernst D. M.** Heat pipe development for thermionic applications. — In: Proc. Fourth Intercosiety Energy Conversion Engineering Conf. Washington, September 1969, p. 879.
9. **Kotani.** Heat transfer measurement in a sodium heat pipe at low temperatures. — J. Nucl. Sci. Technik, Tokyo, 1974, v. 11, N 4, p. 159.
10. **Исследование** процесса испарения и звуковых ограничений в натриевых тепловых трубах/М. Н. Ивановский, В. В. Просветов, В. П. Сорокин, Б. А. Чулков, И. В. Ягодкин. — Инж.-физ. журн., 1977, т. 32, № 5, с. 832.
11. **Eastman G. J.** The heat pipe-a progress report. — In: Proc. Fourth Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. Washington, September 1969.
12. **Grover C. M., Kemme J. E., Keddy E. S.** Advances in heat pipe technology. — In: Proc. Second Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation. Stresa, Italy, 1968, p. 477.
13. **Dunn P. D., Reay D. A.** Heat pipes. Oxford, Pergamon Press, 1976.

14. **Birnbreier H., Gammel G.** Long time tests of Nb—1% Zr—heat pipes fillied with sodium and cesium. — In: Proc. Intern. Heat Pipe Conf. Stuttgart, FRG, 1973, Paper 4—3.
15. **Basilius A., Prager R. C., Lamp T. R.** Compatibility and reliability of heat pipe materials. — In: Proc. Second Intern. Heat Pipe Conf. Bologna, Italy, 1976, v. 1, p. 357.
16. **Strabek E. A., Bienert W. B.** Heat pipe design handbook. — In: Dynatherm Corporation. Covkeysville, USA, 1972, v. 1
17. **Деверолл.** Ртуть как теплоноситель тепловой трубы. — В кн.: Тепловые трубы. Пер. с англ. и нем. Под ред. Э. Э. Шпильрайна. М., Мир, 1972, с. 271.
18. **High temperature** lithium heat pipes/C. A. Busse, F. Geiger, H. Strub, M. Pötzschke, G. Kraft. — In: Proc. Second Intern. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa, Italy, 1968, Paper D-2.
19. **Status** report on theory and experiments on heat pipe at Los Alamos/ T. P. Cotter, I. Deverall, G. F. Erickson, G. M. Grover, I. E. Kemme, E. W. Salmi, E. S. Keddy. — In: Proc. Intern. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation. L., 1965.
20. **Busse C. A., Caron R., Geiger F., Pötzschke M.** Performance studies on heat pipes. — In: Proc. Intern. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation. L., 1965.
21. **Heat pipe** lifetests at 1600° C and 1000° C/ C. A. Busse, F. Geiger, D. Quataert, P. Pötzschke. Paper presented at the Thermionic Conversion Specialist Conf., Houston, USA, 1966.
22. **Armand M., Shroff A. M.** Resultates preliminaires d'une etude sur les coloducs nente temperature. — In: Proc. Second Intern. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation, Stresa, Italy, 1968, Paper D-7.
23. **Johnson C. D.** Compatibility of various high temperature heat pipe alloys with working fluids. 1968 IEEE Conf. Record of the Thermionic Conversion Specialist Conf., Institute of Electrical and Electronics Engineers, N. Y., 1968, p. 258.
24. **Johnson C. D.** Corrosion of liquid metal heat pipe systems at 1000 to 1800° C.— In: Corrosion by liquid metals, Plenum Publishing Corp., N. Y., 1970, p. 321.
25. **Busse C. A.** Korrosion in Hochtemperature-Lithium-Wärmerohren mit Niob-1Zirkon oder Tantal als Wandmaterial. — Corrosion Science, 1970, Bd 10, S. 64.
26. **Буссэ С. А.** Коррозия высокотемпературных тепловых труб на литии. — В кн.: Тепловые трубы. Пер. с англ. и нем. Под ред. Э. Э. Шпильрайна. М., Мир, 1972, с. 316.
27. **Busse C. A.** Werkstoffprobleme bei Hochtemperatur-Wärmerohren. — Forsch. Ing.-Wes., 1971, Bd 37, N 2, S. 38.
28. **Quataert D., Busse C. A.** Investigation of the corrosion mechanism in tantalum—lithium high temperature heat pipes by ion analysis. — J. Nucl. Mater., 1973, v. 46, N 6, p. 329.
29. **Quataert D., Busse C. A., Geiger F.** Long time behavior of high temperature tungsten-rhenium heat pipes with lithium or silver as working fluid. — In: Proc. Intern. Heat Pipe Conf. Stuttgart, FRG, 1973, Paper 4—4.
30. **Geiger F., Quataert D.** Corrosion studies of tungsten heat pipes at temperatures up to 2650° C. — In: Proc. Second Intern. Heat Pipe Conf. Bologna, Italy, 1976, v. 1, p. 347.
31. **Chi S. W., Cygnarowicz T. A.** Theoretical analysis of cryogenic heat pipe. — ASME Paper MHT-SpT-6, June 1970.
32. **Joy P.** Optimum cryogenic heat pipe design. — Advances in Cryogenic Engng, 1970, v. 17, p. 438.
33. **Paulus G., Lang S.** Theoretical investigations of hydrogen, nitrogen and oxygen homogeneous and annular-wick heat pipes. — ASME Paper WA/HT-13, 1971.
34. **Arterial** and grooved cryogenic heat pipes/P. Brennan, D. Trimmer, A. Sherman, T. Cygnarowicz. — ASME Paper WA/HT-42, 1971.
35. **Armaly B. F., Dudheker J.** Experimental study of nitrogen heat pipe. — ASME Paper WA/HT-28, 1971.
36. **Murshburn J. P.** Techniques associated with thermal-vacuum testing of the

OAO—C heat pipes — Space Simul Proc Symp New York Sity, N Y, 1972, p 933
37 **Johnson G D, Saaski E. W** Arterial wick heat pipe — ASME Paper, WA/HT 36 1972
38 **Sun K., Tien G. L** Simple conduction model for theoretical steady state heat pipe performance — AIAI J, 1972 v 10, N 8, p 105
39 **Васильев Л. Л, Конев С. В.** Теплопередающие трубки Минск, Энергия 1972
40 **Смирнов Г. Ф, Мищенко Л. Н.** Исследование процессов тепло- и массопереноса в низкотемпературных тепловых трубах — В кн Тепломассоперенос Минск, 1972, т 2, ч 2
41 **Исследование** горизонтальной тепловой трубы/В Г Воронин, А В Ревякин, В С Тарасов, В Я Устинов — Холодильная техника, 1972, № 9, с 26
42 **Смирнов Г. Ф., Мищенко Л. Н.** Приближенная методика расчета температурного поля тепловой трубы — Вопросы радиоэлектроники Серия ТРТО, 1972, вып 2, с 103
43 **Верба М., Сасин В. Я., Щелгинский А. Я.** Физические условия теплопереноса и расчет тепловых трубок в испарительном режиме работы в области умеренных температур — Инж физ журн, 1972, т 23, № 4, с 597
44 **Смирнов Г. Ф., Мищенко Л. Н.** Методика выбора геометрических параметров низкотемпературных тепловых труб — Теплоэнергетика, 1973, № 8, с 82
45 **Барсуков В. В., Мищенко Л. Н., Смирнов Г. Ф.** Предельные характеристики низкотемпературных тепловых труб — Инж физ журн, 1973, т 25, № 2, с 249
46 **Armaly B F.** Effective thermal conductivity of a nitrogen heat pipe — Cryogenics, 1973, v 13, N 5, p 304
47 **Charles C., Roberts Ir.** Predicting the performance of extruded groove heat pipes — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG, 1973, Paper 1—2.
48 **Kissner G L.** Development of a cryogenic heat pipe — Ibid, Paper 10—2
49 **Sherman A., Brennan P.** Cryogenic and low temperature heat pipe/cooler studies for spacecraft application — AIAA Paper N74—753. AIAA/ASME 1974 Thermophysics and Heat Transfer Conference, Boston USA, 1974
50 **Schlitt K. R, Brennan P. S, Kirkpatrick I. P.** Parametric performance of extruded axial grooved heat pipes from 80 to 300° C AIAA/ASME Thermophysics and Heat Transfer Conf, Paper 74—724, July 1974
51 **Saaski E. W, Wright J. P.** A flexible cryogenic heat pipe — In Proc AIAA tenth Thermophysics Conference Denver, USA, May 1975
52 **Низкотемпературные** тепловые трубы/Л Л Васильев, С Л Вааз, В Г Киселев, С В Конев, Л П Гракович Минск, Наука и техника, 1976
53 **Экспериментальное** исследование процессов тепло- и массопереноса в криогенной тепловой трубе/ Л Л Васильев, В Г Киселев, М А Литвинец, А В Савченко — Инж физ журн, 1975, т 28, № 1, с 29
54 **Смирнов Г. Ф.** Основы расчета эффективности системы с низкотемпературными тепловыми трубами — Там же, т 28, № 2, с 197
55 **Мищенко Л. Н.** Исследование процессов теплообмена и гидродинамики в низкотемпературных тепловых трубах Автореф дис на соиск учен степени канд техн наук Одесский технологический институт холодильной промышленности, Одесса, 1975
56 **Molt W** Performance investigation of cryogenic heat pipes — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p 49
57 **Groll M., Pittman R. B** Parametric performance of circumferentially grooved heat pipes with homogeneous and graded-porosity slab wicks at cryogenic temperatures — Ibid, p 63
58 **Koch H, Kreeb H, Perdu M.** Modular axial — grooved heat pipes — Ibid, p 77
59 **Kamotani Ya.** Thermal analysis of axially grooved heat pipes — Ibid, p 83
60 **Finlay I. C, Loy B, Gree D. G.** Manufacture and performance of a water-filled heat pipe with a sintered copper wick. — Ibid, p 93

61 **Savage C J.** Development of artery heat pipes in Europe under ESA sponsorship — Ibid p 373
62 **McIntosh R, Ollendorf S., Harwell W.** The international heat pipe experiment — Ibid, p 589
63 **Performance** evaluation of the ESRO heat pipes included in the international heat pipe experiment/W D Munzel, C J Savege, A Accensi, B G Aalders — Ibid, p 593
64 **Sounding—rocket** heat pipe and PCM thermal capacitor experiments/H Koch, J Lorschiedter, R Strittmatter, P H Pawlowski — Ibid, p 607
65 **Galzin F** A heat pipe flight-test aboard a sounding rocket — Ibid, p 621.
66 **Brennan P J, Kirkpatrick J P.** Long-term performance of the advanced thermal control flight experiment — Ibid, p 629
67 **Operation** peculiarities of low temperature heat pipes with crimped capillary structure/M N Ivanovsky, Ju A Ilyin F F Kolgotin, V I Korneev, V V Privesentsev, B I Rybkin, V I Serbin, Yu Yu Sergeev, **E. M. Sidorenko,** V P Sorokin — Ibid, p 699
68 **Некоторые** результаты исследования низкотемпературных тепловых труб, работающих против поля тяжести/ Ю Ф Гераснмов Ю Ф Майданик, Ю Е Долгирев, В М Киселев Г А Филиппов, Л Г Стариков — Инж-физ журн 1976, т 30 № 4, с 581
69 **Низкотемпературные** тепловые трубы для летательных аппаратов/В Г Воронин, А В Ревякин, В Я Сасин В С Тарасов М, Машиностроение, 1976
70 **Cenkner A A, Nelson Jr B E, Petrie W.** Extended cryogenic performance of lobar wick heat pipe (radiator) — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf. Bologna Italy 1976, v 2 p 683
71 **Kreeb H, Groll M, Zimmermann P** Lifetest investigation with low temperature heat pipes — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart FRG 1973, Paper 4—1
72 **Petrick S W** Hydrogen generation in water / stainless steel heat pipes — ASME Paper N 72 WA/HT-37 November 1972, N Y
73 **Schwartz J** Performance map of the water heat pipe and the phenomenen of noncondensible gas generation — ASME Paper, N69 HT-15, August 1969, Minneapolis USA
74 **Busse C. A., Loens J** Hydrogen generation in water heat pipes at 250° C — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG 1973, Paper 4—1
75 **Baker E.** Prediction of long time heat pipe performance from accelerated life test — AIAA J, 1973 v 11 N 9, p 1345
76 **Томановская В. Ф., Колотова Б. Е.** Фреоны Свойства и применение Л, Химия, 1970
77 **Elsey H H, Fowers L. C., Kelly J. B** — Ref Engng, 1952, v 60, N 7, p 737
78 **Savage C J** Development of artery heat pipes in Europe under ESA sponsorship — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p 373
79 **Münzel W. D** Lifetests of artery heat pipe for low temperature range — Ibid, p 383
80 **Reay D A., Johnson M. P.** The formation of diacetone alcohol during life-tests on acetone heat pipes constructed using aluminium and stainless steel — Ibid, p 393
81 **Siber M, Haston G., Rudolph P.** Radiation demade to freon — CR 56 8-198, August 1956
82 **Michelson C.** Radiation demade to freon CR 55 9 163, Sept 1955
83 **Basilulis A, Filler M** Operating characteristics and long life capabilities of organic fluid heat pipes — AIAA Paper N 71 408, Tullahoma, Tennessee, 1971.
84 **Polasek F, Stulc P** Heat pipe for the temperature range from 200 to 600° C — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 2, p 711
85 **Polasek F** Contribution to the determination of the liquid metals heat pipe heat performance limits — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG, 1973
86 **Bacon R F, Fanelli R.** The viscosity of sulpiur — J Amer Chem Soc, 1943, v 65, N 4, p 639

К главе 5

1 **Groll M., Kirkpatrick J. P.** Heat pipes for spacecraft temperature control—an assessment of the state-of-the art — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p 167
2 **Grover G. M., Cotter T P, Erickson G. F.** Structures of very high thermal conductivity — J Appl Phys, 1964, v 35, N 6, p 1990
3 **Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Субботин В. И.** Испарение и конденсация металлов М, Атомиздат, 1976
4 **Bienert W.** Heat pipe for temperature control. — In: Proc. of the Fourth Intersociety Energy Conversion Eng Conf Washington, 1968, p 1033
5 **Edwards D K., Markus B. D.** Heat and mass transfer in the vicinity of the vapor—gas front in a gas-loaded heat pipe — J Heat Transfer Trans ASME, Ser C, 1972, v 94, N 2, p 155
6 **Colwell G. T. e. a.** A study of noncondensable effects in a heat pipe — Nucl. Technology, March 1972, v 10
7 **Rohani A. R, Tien C. L.** Study two dimensional heat and mass transfer in vapor gas region of a gas loaded heat pipe — J Heat Transfer Trans ASME, Ser C, 1973, v 95, N 3, p 377
8 **Depew C. A., Sauerbrey W. J., Benson B A** Construction and testing of a gas loaded, passive control, variable conductance heat pipe — AIAA Paper N73-724, 1973
9 **Vasiliev L. L., Grakovich L. P., Kiselyov V. G.** Experimental study of heat and mass transfer in heat pipes with non—condensible gas — In Proc. Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG, 1973, Paper 7—2
10 **Control** of operating characteristics of heat pipes at the range of moderate temperature/V V Galaktionov V Ya Sasin, O M Shalia, L V Dolgorukova — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG, 1973, Paper 7—1
11. **Münzel W. D, Groll M, Hage M** Development of a passive not—gas reservoir variable—conductance heat pipe — In Proc Second Intern. Heat Pipe Conf, Bologna, Italy, 1976, v 1, p 197
12 **Heat** and mass transfer in cryogenic gas loaded heat pipes/L L Vasiliev, S V Konev, A M Marchenko, A D Shnyiyov, I S Desyukevich, V. V. Gill — Ibid, p 207
13 **Casarosa C, Latrofa E.** Heat pipe at the range of moderate temperatures with gas presence — Ibid, p 215
14 **Kelleher M. D, Batts W. H.** Effects of gravity on gas loaded variable-conductance heat pipes — Ibid, p 225
15 **Labrande J. P.** Measurement of the isothermality of a gas controlled heat pipe — Ibid, p 235
16 **Низкотемпературные** тепловые трубы/Л Л Васильев, Л П Гракович, В Г Киселев, С В Конев Минск, Наука и техника, 1976
17 **Bienert W, Kroliczek E.** Experimental high performance heat pipe for the OAO—C spacecraft — ASME Paper, N71 AV26, July 1971
18 **Development** of a high capacity variable conductance heat pipe/ R Kosson, R Hambach, J Edelstein, J Loose — AIAA Paper N 73-728, July 1973
19 **Saaski E. W** Arterial gas occlusions in operating heat pipes — AIAA Paper N 75-657, 1975
20 **Ивановский М. Н, Сорокин В. П, Ягодкин И. В.** Физические основы тепловых труб М, Атомиздат, 1978
21 **Шлозингер Н. К.** Конструкция тепловых труб для регулирования температуры в космическом скафандре Пер с англ М, Мир, 1972
22 **Schlitt.** Design and testing of a passive, feedback controlled, variable conductance heat pipe — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG, 1973, Paper 7—4
23 **An electrical** feedback controlled high capability variable conductance heat pipe for satellite application/ M Groll, M Hage, W D Munzel, P Zimmermann — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG, 1973, Paper 8—1
24 **Groll M., Hage M** Development of an electrical feedback controlled variable conductance heat pipe for space application — AIAA Paper N 74-752, 1974
25 **Marcus B. D, Eninger J. E.** Development of vapor-flow-modulation variable-

conductance heat pipes — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p 257
26 **Roberts C. C.** A variable-conductance heat pipe using bubble pump injection — Ibid, p 269
27 **Brost O, Schubert K P** Development of alkali metal heat pipes as thermal switches — In Proc Intern Heat Pipe Conf Stuttgart, FRG, 1973, Paper 12—2
28 **Антонова Г. С.** Тепловая труба Авторское свидетельство № 386215 кл F25в 19/14 — Открытия изобретения промышленные образцы товарные знаки, 1973, № 26 с 13
29 **Kosson R L, Quadrini J A., Kirkpatrick J. P** Development of a blocking orifice thermal diode heat pipe — AIAA Paper, N 74-754, 1974.
30 **Баржин В. Я. и др.** Тепловая труба Авторское свидетельство № 276463, кл 42i, 12/02 — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1970 № 23, с 125
31 **Basilius A** Heat pipe having a substantially unidirectional thermal path Patent USA N 3587725, k 165 32 1971
32 **Noren D.** Heat pipes Patent USA N 3700028 k 165—32, 1972
33 **Morrison D. R.** Improvements in relating to phase change control device Patent UK N 1280405, F4U, 1972
34 **Apparatus** for the conduction or exchange heat Patent UK N 1275946, F4U, 1972
35 **Heat pipe** control device Patent UK, N 1302839 F4U, 1972
36 **Heat transfer** apparatus Patent UK, N 1315198, F4U, 1973
37 **Cotter T. P.** Theory of heat pipes LA 3247 MS, 1965
38 **Katzoff S** Heat Pipes and vapor chambers for thermal control of spacecraft — AIAA Paper N67 310 1967
39 **Feldman K. T., Witlow G. L.** Experiments with a two fluid heat pipe — In Proc Fourth Intersociety Energy Conversion Engng Conf, 1969
40 **Tien C L** Two component heat pipe — AIAA Paper, N69 631, 1969
41 **Tien C L, Rohani A. R.** Theory of two component heat pipes — ASME Paper, N 71 WA/HT 30 1971
42 **Brommer H J** Theoretical and experimental investigation of two component heat pipes — AIAA Paper, N74-720, 1974
43 **Вревский М. С.** В кн Работы по теории растворов Под ред К П Мищенко, Б П Никольского М, Химия, 1953
44 **Киреев В. А.** Курс физической химии М, Химия, 1975
45 **Hoffmann R** Untersuchung der Stoffaustauschwiderstande im Dampf und in der Flussigkeit bei Zweistoffgemischen Dusseldorf 1969
46 **Schindler M** Grundgleichungen fur den Konzentrationsverlauf in Zweikomponent-warmerohren Bericht N5 1785 Institut fur Kernenergetik der Universitat Stuttgart FRG, 1974
47 **Hassel, Jankovski.** Two metal heat pipe oven operation — J Appl Phys, 1972, v 43, N 1 p 209
48 **Блиер Б. М., Цинман М. М.** Способ и устройство для замораживания грунта — Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1947, № 3, с 6
49 **Бадылькес И. Ц., Цинман М. М.** Устройство для безрассольного замораживания грунта — Авт свид № 78715 кл 17с, с 312
50 **Lee J., Mital U.** A two-phase closed thermosyphon — Intern J Heat Mass Transfer, 1972, v 15, p 1695
51 **Горбис З. Р., Савченков Г. А.** Исследование влияния неконденсирующихся примесей на эффективность теплопереноса испарительного термосифона — Теплоэнергетика, 1973, № 10, с 70—73
52 **Gorbis Z R., Savchenkov G. A** Low temperature two-phase closed thermosyphon investigation — In Proc Second Intern Heat Pipe Conf Bologna, Italy, 1976, v 1, p 37
53 **Abhat A, Nguyechi H** Investigation of performance of gravity-assisted copper water heat pipes — Ibid, p 23
54 **Deverall J E., Keddy E. S** Helical wick structures for gravity assisted heat pipes — Ibid, p 3

55 **Kemme J. E** Vapor flow considerations in conventional and gravity assisted heat pipes — Ibid, p 11
56 **Ruch M A, Grover G. M.** Heat pipe thermal recovery unit applications — Ibid, p 439
57 **Fiebelman P, Neu H, Rinaldini** A heat pipe thermionic reactor concept — In Proc Second Intern Conf on Thermionic Electrical Power Generation Stresa, Italy, 1968, p 13–8

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных обозначений, индексов и сокращений 3

Предисловие 4

Глава 1 **Выбор теплоносителей и конструкционных материалов** . . 6
§ 1 1 Критерии выбора теплоносителя 6
§ 1 2 Теплофизические основы выбора теплоносителя 8
§ 1 3 Коррозионные ограничения при выборе теплоносителя и конструкционных материалов тепловой трубы 14

Глава 2 **Конструкция тепловых труб** 21
§ 2 1 Выбор типа капиллярной структуры 21
§ 2 2 Методы определения капиллярных характеристик 32
§ 2 3 Конструкционные формы и методы изготовления тепловых труб 37

Глава 3 **Заполнение тепловых труб теплоносителями** 44
§ 3 1 Очистка жидкометаллических теплоносителей 44
§ 3 2 Очистка конструкционных материалов 60
§ 3 3 Заполнение тепловых труб теплоносителями 62

Глава 4 **Методы экспериментальных исследований Характеристики тепловых труб** 72
§ 4 1 Методы подвода и отвода тепла 72
§ 4 2 Высокотемпературные тепловые трубы 76
§ 4 3 Тепловые трубы с корпусом из тугоплавких материалов 90
§ 4 4 Низкотемпературные и криогенные тепловые трубы 100
§ 4 5 Среднетемпературные тепловые трубы 117

Глава 5 **Особые типы тепловых труб** 119
§ 5 1 Тепловые трубы переменной проводимости 119
§ 5 2 Многокомпонентные тепловые трубы 134
§ 5 3 Гравитационные капиллярные тепловые трубы 142

Список литературы 146

ИБ № 904

Михаил Николаевич Ивановский,

Владимир Павлович Сорокин,

Борис Александрович Чулков,

Иван Васильевич Ягодкин

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Редактор *О А Степеннова*
Художественный редактор *А Т Кирьянов*
Обложка художника *И А Ибрагимова*
Технический редактор *Л. Ф Шкилевич*
Корректор *И В Косарева*

Сдано в набор 02 11 79 Подписано к печати 05 03 80
Т 03774 Формат 60×90¹/₁₆ Бумага тип № 1
Гарнитура литературная Печать высокая Усл печ л 10 0
Уч изд л 11 59 Тираж 2500 экз Зак тип 898
Зак изд 77200 Цена 1 р 80 к

Атомиздат, 103031 Москва К 31, ул Жданова, 5

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств полиграфии и книжной торговли
109088 Москва Ж 88 Южнопортовая ул, 24