

сивности процесса конденсации и характеристик смачивания рабочей жидкости.

Поскольку механизм теплопередачи в зоне испарения менее сложный и, с другой стороны, термическое сопротивление передаче теплоты в этой области наиболее высокое, то проводимый анализ будет сосредоточен именно на этой области.

Джоем [3-30], а также Эггерсом и Серкицем [3-31] предложены идентичные модели, в которых рассматриваются одномерная теплопроводность вдоль ребра и одномерная теплопроводность у его вершины через жидкость к поверхности раздела жидкость — пар, на которой происходит испарение. В жидкой фазе средняя длина пути взята равной четверти ширины канала, а площадь теплопередающей поверхности равной произведению половины ширины канала на длину участка подвода теплоты. Таким образом,

$$\frac{\Delta T}{Q} = \frac{a}{k_s N f l_e} + \frac{1}{4k_l l_e N} + \frac{1}{h_c \pi b l_e}, \quad (3-3)$$

где N — число каналов; a — глубина канала; b — половина ширины канала; f — толщина ребра.

Косовски и Коссон [3-32] измерили максимальную теплопередающую способность и радиальное термическое сопротивление алюминиевой тепловой трубы с канавками, работавшей на фреоне-21, фреоне-113 и аммиаке. Используемые трубы имели следующие геометрические характеристики: $N=30$; $a=0,89$ мм; $2b=0,76$ мм; наружный диаметр трубы — 12,7 мм. В тепловой трубе № 1: $l_c=304,8$ мм; $l_c=477,6$ мм, а в тепловой трубе № 2: $l_c=317,5$ мм; $l_c=503$ мм.

В опытах были получены следующие значения коэффициентов теплоотдачи (отнесенные к наружной поверхности):

Жидкость	h_c , Вт/(м ² ·К)	h_c , Вт/(м ² ·К)
Фреон-21 (тепловая труба № 1)	1134	1700
Фреон-113 (тепловая труба № 2)	652	1134
Аммиак (тепловая труба № 3)	2268	2840

Преобразуя с учетом геометрических характеристик трубы полученные значения коэффициентов теплоотдачи в термические сопротивления, имеем:

Жидкость	R , К/Вт (испарение)	R , К/Вт (конденсация)
Фреон-21	0,0735	0,031
Фреон-113	0,122	0,044
Аммиак	0,035	0,0175

Термическое сопротивление ребра составляет 0,0018°С/Вт, [$f=0,25$ мм, $k_w=220$ Вт/(м·К)], и им можно пренебречь. Эти данные подтверждают наблюдения Косовски и Коссона, что процент заполнения канавок оказывает слабое влияние на термическое сопротивление.

Член, учитывающий испарение, также мал, и наиболее существенный вклад в суммарное термическое сопротивление вносит член, связанный с теплопроводностью через жидкость. Результаты сравнения теории и эксперимента говорят о том, что теория значительно завышает термическое сопротивление передачи теплоты теплопроводностью (на 50—300%). Поэтому более точно будет использовать интегральную длину пути теплового потока $(1 - \frac{\pi}{4})b$ вместо $b/4$. В итоге:

$$\frac{\Delta T}{Q} = \frac{(1 - \frac{\pi}{4})}{2k_l l_e N}. \quad (3-4)$$

Зная требуемую мощность и допустимый температурный напор по отношению к паровому пространству, можно рассчитать число канавок при различных геометриях последних и разных рабочих жидкостях.

В конденсаторе тепловой трубы, а также в случае покрытия каналов сеткой торцы ребер играют активную роль в процессе переноса теплоты, при этом сами каналы оказываются полностью заполненными жидкостью. В этом случае следует использовать уравнение для теплопроводности параллельных слоев

$$k_w = k_s \left[1 - \varepsilon \left(1 - \frac{k_l}{k_s} \right) \right], \quad (3-5)$$

где ε — доля объема, приходящаяся на жидкость, которая для канальной конструкции равна:

$$\varepsilon = 2b / (2b + f),$$

здесь f — толщина ребра.

3-3-4. Концентрические кольцевые каналы. В данном случае капиллярный эффект определяется узким каналом, заполненным рабочей жидкостью, т. е.

$$k_w = k_l. \quad (3-6)$$

Этот вариант может также использоваться при анализе случая нарушения прижатия сетки и спеченного фитиля к корпусу.

3-4. КОРПУС ТРУБЫ

Назначение корпуса — изолировать рабочую жидкость от окружающей среды. Поэтому корпус должен быть герметичным, выдерживать перепад давлений между внутренней его полостью и окружающим пространством, а также обеспечивать подвод теплоты к рабочей жидкости и отвод теплоты от нее.

Выбор материала корпуса определяется следующими факторами:

- 1) его совместимостью с рабочей жидкостью и окружающей средой;
- 2) отношением предела прочности к плотности;
- 3) теплопроводностью;
- 4) технологичностью, включая свариваемость, простоту механической обработки, пластичность;
- 5) пористостью;
- 6) смачиваемостью.

Большинство из этих характеристик не требует специальных разъяснений. Высокие значения отношения предела прочности к плотности более важны для космических приложений. Отсутствие пор в материале необходимо для предотвращения диффузии газа в тепловую трубу. Высокая теплопроводность обеспечивает минимальный перепад температур между источником теплоты и фитилем.

Теплопроводность некоторых материалов приведена в приложении 2.

3-5. СОВМЕСТИМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Проблема совместимости уже рассматривалась ранее в связи с выбором рабочей жидкости, материалов фитиля и корпуса тепловой трубы. Однако это проблема первостепенной важности и поэтому заслуживает специального рассмотрения в данной главе.

Два основных эффекта являются следствием несовместимости материалов: коррозия и выделение неконденсирующегося газа. Если материал стенки или фитиля растворяется в рабочей жидкости, то в тепловой трубе возникает перенос массы между конденсатором и испарителем, при этом твердая фаза будет откладываться в последнем. В результате этого процесса либо появятся местные горячие пятна, либо произойдет закупорка пор фитиля. Выделение неконденсирующегося

газа, по-видимому, является наиболее типичным индикатором повреждения тепловой трубы. Неконденсирующиеся газы стремятся сосредоточиться в зоне конденсации тепловой трубы, которая постепенно «выключается» из работы, что легко зафиксировать из-за наличия в этом случае резкого скачка температур на границе газ — пар.

Хотя некоторые данные по совместимости материалов, безусловно, содержатся в обычных научных публикациях, а также в торговых проспектах по химическим веществам и материалам, тем не менее, повсеместно применяемой практикой стало проведение ресурсных испытаний характерных конструкций тепловых труб, основной целью которых является установление совместимости материалов в условиях длительной эксплуатации при рабочих параметрах. В конце этих ресурсных испытаний могут проводиться газовый анализ, металловедческое исследование, а также химический анализ рабочей жидкости (см. также § 4-2).

Ресурсные испытания тепловых труб проводились многими лабораториями, в результате опубликовано большое число данных. Однако при этом важно помнить, что данные ресурсных испытаний, полученные в одной лаборатории, могут свидетельствовать об удовлетворительной совместимости каких-то материалов, тогда как иная технология сборки, применяемая в другой лаборатории, включая, например, нестандартные способы обработки материалов, могут в других случаях привести к появлению коррозии или выделению газа. Тем самым появляется необходимость проводить испытания по совместимости материалов всякий раз, когда меняется технология очистки или сборки тепловой трубы.

Нержавеющая сталь является с позиций совместимости подходящим материалом для изготовления фитилей и корпусов труб при использовании таких рабочих жидкостей, как ацетон, аммиак или жидкие металлы. Недостатком нержавеющей стали является ее низкая теплопроводность, поэтому там, где важно последнее свойство, используют медь или алюминий. Медь особенно привлекательна для серийных изделий с водой в качестве рабочей жидкости. В качестве материала корпуса были использованы пластмассы, а при очень высоких температурах обстоятельному рассмотрению подвергались керамика и тугоплавкие металлы, такие как тантал. Для того

чтобы обеспечить определенную эластичность стенки тепловой трубы, были использованы сильфоны из нержавеющей стали, а в тех случаях, когда требовалась хорошая электроизоляция, применяли керамические или стеклянно-металлические прокладки. В последнем случае, естественно, использовались неэлектропроводные рабочие жидкости и фитили.

Сравнительный обзор различных комбинаций материалов для диапазона умеренных температур выполнен Бейсьюлисом и Филлером [3-3-3], его основные результаты приводятся ниже. Приведенные в указанной статье данные получены для более широкой, нежели указанная в табл. 3-4, гаммы органических жидкостей, большая часть которых выпускается фирмой Dow Chemicals (DC).

Таблица 3-4

Данные по совместимости материалов
(низкотемпературные рабочие жидкости)

Материал фитиля	Рабочая жидкость					
	Вода	Ацетон	Аммиак	Метиловый спирт	Dow-A	Dow-E
Медь	РИ	РИ	НР	РИ	РИ	РИ
Алюминий	ВГЛТ	РЛ	РИ	НР	Н	НР
Нержавеющая сталь	ВГПТ	ВС	РИ	ВГПТ	РИ	РИ
Никель	ВС	ВС	РИ	РЛ	РИ	РЛ
Плетеное керамическое волокно (рефрасил)	РИ	РИ	РИ	РИ	РИ	РИ

Примечание. РИ—рекомендуется на основе осуществленного успешного применения; РЛ—рекомендуется на основе литературных данных; ВС—вероятная совместимость; НР—не рекомендуется; Н—неизвестна; ВГЛТ—выделение газа при любых температурах; ВГПТ—выделение газа при повышенных температурах, когда происходит окисление материала.

Испытания на совместимость пары алюминий—аммиак продолжались свыше 8000 ч, тогда как для пары алюминий—ацетон было достигнуто лишь 1008 ч. Для указанных испытаний Бейсьюлисом не приводится область рабочих температур. Тем не менее в настоящее время другими исследователями последняя комбинация проверена в течение более чем 16 000 ч работы.

Позднее в материалах Штутгартской конференции [3-34] были опубликованы результаты ресурсных испытаний, выполненных в ИКЕ на более чем 40 тепловых трубах. Опыты показали, что тепловые трубы медь—во-

да могут работать без ухудшения их характеристик в течение длительного времени (в настоящее время превзойдены 20 000 ч), однако в тепловых трубах нержавеющей сталь—вода наблюдалось сильное газовыделение. Фирма ИКЕ высказала некоторые оговорки относительно использования ацетона в паре с медью и нержавеющей сталью. Хотя эти пары и совместимы, но было подчеркнуто, что необходимо обращать должное внимание по обеспечению надлежащей чистоты как ацетона, так и металла. Аналогичные оговорки сделаны и для метилового спирта.

Всесторонние испытания тепловых труб нержавеющей сталь—вода были также выполнены в Испре [3-35], где опыты проводились до 250°C.

Обнаружилось, что ни изменения условий изготовления, ни добавление большого процента кислорода в газовую пробку не приводили к существенному снижению интенсивности выделения водорода при 250°C. В некоторых случаях водород выделялся в течение двух стартовых часов. В указанных опытах использовалась нержавеющая сталь 316, при этом в плане предотвращения выделения газа оказались неэффективными такие операции, как пассивация стали и дегазация. Все же было найдено, что образование окисного слоя на поверхности стали предотвращает в дальнейшем выделение водорода.

Джеррелс и Ларсон [3-36] также провели обширные ресурсные испытания тепловых труб, явившиеся частью исследования условий применения этих устройств для спутников. Цель этих исследований состояла в определении совместимости широкой гаммы рабочих жидкостей с алюминием (сплав 6061) и нержавеющей сталью 321. Использованный набор рабочих жидкостей включал в себя аммиак, который был признан приемлемым. Важно, однако, обеспечить очень низкое содержание воды в аммиаке. В паре с алюминием и нержавеющей сталью допустимая концентрация воды составляет всего лишь несколько миллионных частей.

Основные выводы Джеррелса и Ларсона по совместимости материалов приводятся ниже. Данные получены для следующих жидкостей: *n*-пентана; *n*-гептана, бензола, толуола, воды (с нержавеющей сталью 321), фреона-11, фреона-113, СР-32 и СР-34 (экспериментальные жидкости фирмы Монсанто), этилового спирта, метило-

вого спирта, аммиака и *n*-бутана. В паре с водой использовалась нержавеющая сталь 321.

Все ресурсные испытания проводились с трубами, обеспечивающими возврат конденсата под действием силы тяжести, причем отвод теплоты происходил за счет обдува трубы потоком воздуха, а подвод — путем погружения ее испарительной части в масляную ванну с регулируемой температурой.

Предварительная подготовка алюминиевого сплава состояла в следующем: предварительное отмачивание в горячем отмывающем щелочном растворе с последующей отмывкой от окислов раствором 112 г сульфита натрия и 150 мл концентрированной азотной кислоты в 850 мл воды в течение 20 мин при температуре 60°C. Кроме того, алюминий либо обтачивался, либо шлифовался в области сварных швов. В тепловые трубы вставлялись сетчатый фитиль из технически чистого алюминия. Корпуса сваривались дуговой сваркой под гелием в специальной сварочной камере, отвакуумированной и продутой инертным газом. После сварки проводилась проверка на отсутствие течей, корпуса также опрессовывались на давление до 7 МПа. Испытания на давление также сопровождались контролем утечек.

Корпус из нержавеющей стали 391 перед дальнейшей обработкой также отмачивался в горячем отмывающем щелочном растворе и травился в течение 15 мин при 58°C раствором, содержащим концентрированную азотную кислоту (объемная доля 15%), соляную кислоту (5%) и 80% воды. Кроме того, нержавеющая сталь пассивировалась погружением на 15 мин при 65°C в 15%-ный раствор азотной кислоты. В качестве материала фитиля использовалась нержавеющая сталь 316. Корпус сваривался аргонодуговой сваркой¹.

Дегазация корпуса осуществлялась кипячением.

При применении метилового спирта в процессе заполнения трубы было замечено протекание химической реакции, что безусловно сделало нецелесообразным проведение последующих ресурсных испытаний.

¹ В обеих сериях выполненных в США экспериментов использовались сочетания различных конструктивных материалов. В принципе применительно к ресурсным испытаниям это не очень хорошо, так как любое ухудшение характеристик не может быть соотнесено с использованием какого-либо конкретного материала.

Герметизация корпусов капсул осуществлялась обжатием с последующим погружением сжатого конца в эпоксидную смолу для окончательной заделки.

В опытах были получены следующие результаты.

n-Пентан: испытан в течение 750 ч при 150°C. Замечены эпизодические пульсации температуры со случайными отклонениями в 0,2°C. При осмотре капсулы на внутренней стенке обнаружены места измененного цвета (слегка коричневатые), однако сетка фитиля выглядела чистой. Никаких свидетельств коррозии не было найдено. Удаленная из капсулы жидкость была слегка коричневатого цвета.

n-Гептан: испытан в течение 600 ч при температуре 160°C. После 465 ч работы было замечено некоторое увеличение внутренних сопротивлений, однако после вскрытия капсулы в конце испытаний ее внутренность, включая сетку, была чистой, также чистой оставалась рабочая жидкость.

Бензол: испытан в течение 750 ч при 150°C (с кратковременным повышением температуры). Давление паров 0,67 МПа. На стенке обнаружены места с очень слабым изменением цвета, фитиль был чистым, свидетельства коррозии отсутствовали, жидкость была чистой. Сделан вывод о высокой стойкости бензола в сочетании с выбранным алюминиевым сплавом.

Толуол: опыты проводились в течение 600 ч при температуре 160°C. В течение первых 200 ч испытаний наблюдалось постепенное снижение температуры в конденсаторе, однако в последующий период изменения температуры не наблюдались. При вскрытии капсулы на стенке корпуса обнаружены места слегка измененного цвета. По-видимому, это были поверхностные отложения, без каких-либо признаков воздействия на алюминий. По окончании испытаний материал сетки был чистым, а рабочая жидкость прозрачной.

Вода (в контакте с нержавеющей сталью): испытана в течение 750 ч при температуре 150°C (с кратковременным повышением температуры). Давление паров 0,67 МПа. При анализе испытанной трубы обнаружена большая концентрация водорода. Частично это было связано с плохой технологией очистки трубы, поскольку в ней наблюдалось изменение цвета в местах сварки, и авторы полагают, что возникло окисление поверхности.

В испытанной тепловой трубе обнаружен также коричневый осадок.

Фреон-11: испытаны две капсулы: одна в течение 500 ч при температуре 68°C, другая в течение 500 ч при 95°C. При вскрытии первой капсулы на внутренней ее стенке обнаружены небольшие площадки измененного цвета. Сетка выглядела чистой, а жидкость — прозрачной. Внутренность второй капсулы была совершенно чистой, а жидкость — прозрачной.

Фреон-113: испытаны две капсулы при тех же температурах и в течение того же отрезка времени, что и образцы с фреоном-11. По окончании испытаний внутренность камер была чистой, а жидкость — прозрачной.

СР-32: испытана в течение 550 ч при температуре 158°C. Местами на внутренней поверхности обнаружены коричневые отложения. Сетка чистая, однако рабочая жидкость помутнела.

СР-34: испытана в течение 550 ч при температуре 158°C. Было обнаружено выделение газа. Имелось также обширное местное изменение цвета стенки капсулы вблизи поверхности жидкости. Цвет сетки не изменился. Жидкость сильно потемнела.

Аммиак: испытан в течение 500 ч при температуре 70°C. После опытов обнаружено некоторое изменение цвета стенки и сетки. Эти изменения были связаны с загрязнением аммиака некоторыми нелетучими примесями, которые могли попасть в капсулу при ее заполнении. В частности, в рабочую жидкость могла попасть смазка вентиля, когда он находился в положении на заполнение капсулы. (Это была единственная испытанная труба, заполнение которой осуществлялось через ventиль.)

n-Бутан: испытан в течение 500 ч при 68°C. Считалось, что в данном случае могло происходить выделение неконденсирующегося газа, однако ухудшение характеристик было связано с некоторым загрязнением n-бутана перед заполнением. Авторы полагают, что загрязняющим веществом мог быть изобутан. Последующие опыты с более чистым n-бутаном дали лучшие результаты, однако полностью от загрязнения избавиться не удалось.

При анализе надежности результатов приведенных ресурсных испытаний Джеррелс и Ларсон приводят следующие соображения: «Следует подчеркнуть, что данные опыты ставили своей целью исследовать совмести-

мость определенных сочетаний рабочей жидкости — материал в условиях длительной (пять лет) работы в радиаторе паровой камеры при заданных условиях. Исходные условия следующие: стационарная температура греющей жидкости на входе в радиатор 143°C с кратковременными повышениями ее до 160°C. Действительная температура рабочей жидкости в паровой камере должна быть несколько ниже температуры греющей жидкости, поскольку между последней и поверхностью испарения паровой камеры должен существовать некоторый перепад температур. Согласно оценкам при испытаниях капсул высокотемпературные рабочие жидкости находились при температурах, примерно на 10°C превышающих расчетные максимальные и примерно на 20°C превышающих расчетные стационарные температуры, при которых жидкости будут работать в реальных радиаторах. Длительность работы жидкостей во время испытаний капсул составила всего лишь примерно 1% планируемого срока службы радиатора, однако условия их работы были существенно тяжелее расчетных. Поэтому представляется разумным принять, что если испытания в капсулах определенного сочетания жидкости — материал не дали отрицательных результатов, то это сочетание может считаться потенциальным кандидатом на его использование в радиаторах со сроком службы пять лет».

На основании описанных выше испытаний Джеррелс и Ларсон выбрали следующие рабочие жидкости:

для алюминиевого сплава 6061 при температурах не более 150°C — бензол, n-гептан, n-пентан;

для алюминиевого сплава 6061 при температурах не более 94°C — фреон-11 и фреон-113;

для алюминиевого сплава 6061 при температурах не более 65°C — аммиак и n-бутан.

Согласно данным фирмы Дироп скорость коррозии алюминия во фреоне-11 составляет $1,25 \cdot 10^{-6}$ см/мес при 115°C. Другие исследования [3-37], проведенные на фреоне-113, показали отсутствие коррозии алюминия при его 100 часовых испытаниях при температуре кипения. Фреон-113 содержался в сосудах из различных металлов в течение двух лет при 150°C, при степени разложения фреона 0,3—0,4%.

Следующие рабочие жидкости, по-видимому, являются непригодными: вода (с нержавеющей сталью 321);

СР-32; СР-34; метиловый спирт; толуол (с алюминиевым сплавом 6061).

Джеррелс и Ларсон указывают, что в Лос-Аламосской лаборатории достигнут срок службы тепловой трубы, работающей на воде, превышающий 3000 ч без ухудшения характеристик трубы. Труба изготовлена из нержавеющей стали 347.

Согласно другим источникам [3-38] спирты в общем случае непригодны для работы с алюминием.

По результатам анализа Джеррелса и Ларсона для паровых камер с корпусом, изготовленным из алюминия, при температуре менее 65°C, в качестве наиболее подхо-

Таблица 3-5

Данные по совместимости материалов (ресурсные испытания высокотемпературных тепловых труб)

Рабочая жидкость	Материал		Температура пара, °C	Длительность работы, ч
	Стенка	Фитиль		
Цезий	Ti		400	>2000
	Nb + 1% Zr		1100	184
Калий	Ni		600	>6000
	Ni		600	16 000
	Ni		600	>24 500
Натрий	Хастеллой X		715	>8000
	Хастеллой X		715	>20 000
	Нержавеющая сталь 316		771	>4000
	Nb + 1% Zr		850	>10 000
	Nb + 1% Zr		1100	1000
Висмут	Ta		1600	39
	W		1600	118
Литий	Nb + 1% Zr		1100	4300
	Nb + 1% Zr		1500	>1000
	Nb + 1% Zr		1600	132
	Ta		1600	17
	W		1600	1000
	SGS — Ta		1600	1000
	TMZ		1500	9000
Свинец	Nb + 1% Zr		1600	19
	SGS-Ta		1600	1000
	W		1600	1000
	Ta		1600	>280
Серебро	Ta		1900	100
	W		1900	338
	W		1900	1000
	Re	W	2000	300

дящей рабочей жидкости был рекомендован аммиак, а для температур более указанной — *n*-пентан.

На другом конце температурной шкалы большие сроки службы тепловых труб были достигнуты при работе с литием или серебром в качестве рабочих жидкостей [3-5]. При изготовлении корпуса из сплава вольфрамовый (W-26Re) полагали, что длительность работы тепловой трубы на литии составит много лет при температуре 1600°C. При 1700°C значительная коррозия наблюдалась после одного года эксплуатации, а при 1800°C срок службы составил всего лишь один месяц. Полагали, что тепловые трубы W-26Re-Ag могут работать при 2000°C в течение 1000 ч. Некоторые другие данные приведены в табл. 3-5.

Специально должен быть рассмотрен вопрос о методике ресурсных испытаний и правомерности экстраполяции полученных данных на период в несколько лет. Например, для труб, устанавливаемых на спутниках, где ремонт в случае аварии затруднен, если не невозможен, семилетний срок службы согласно требованиям Европейской космической исследовательской организации является стандартным минимумом. Поэтому необходимо уменьшить длительность проведения ресурсных испытаний, но так, чтобы надежность работы труб в течение длительного времени могла быть определена с высокой степенью точности.

Ресурсные испытания тепловых труб обычно прежде всего связаны с определением любой несовместимости рабочей жидкости с материалом фитиля или корпуса. Кроме того, полные ресурсные испытания должны включать в себя длительные исследования характеристик трубы в условиях, близких к рабочим. При выполнении подобных работ, однако, трудно добиться ускорения ресурсных испытаний, скажем, путем увеличения теплового потока в испарителе, поскольку любое существенное увеличение этого параметра может привести к осушению фитиля из-за работы трубы в режиме, существенно превышающем ее расчетные возможности. Поэтому любое ускоренное ресурсное испытание, которое предусматривает, скажем, четырехкратное увеличение теплового потока относительно номинального, должно выполняться в условиях обеспеченного за счет естественного слива возврата конденсата и сопровождаться систематическим определением характеристик труб

с тем, чтобы иметь уверенность, что ее расчетная мощность все еще достигается.

Другая возможность уменьшения времени ресурсных испытаний заключается в ускорении любого процесса, ведущего к ухудшению характеристик трубы. Например, можно поднять рабочую температуру трубы, если конструкция испарителя допускает подобную операцию. Одной из теневых сторон этого метода является возможность термического разложения самой рабочей жидкости. Например, в присутствии окислов металлов может произойти крекинг ацетона с образованием диацетонowego спирта, имеющего значительно более высокую точку кипения, нежели чистый ацетон.

Несомненно, что многие факторы должны быть учтены при подготовке программы ресурсных испытаний, включая такие вопросы, как наличие клапанов в опытной установке или обеспечение ее полной герметичности, характерной для реальных устройств. Этот вопрос первостепенной важности. Методика ресурсных испытаний более детально обсуждается в гл. 4.

3-6. КОЛИЧЕСТВО РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

Одной из важных конструктивных характеристик тепловой трубы, если рассматривать небольшие трубы, а также устройства, предназначенные для работы в космосе, является степень их заполнения рабочей жидкостью. Обычно трубу заполняют с небольшим избытком относительно количества, необходимого для насыщения фитиля. Однако если объем парового пространства мал, то в конденсаторе может возникнуть существенный градиент температур, аналогичный тому, который появляется в нем в присутствии неконденсирующегося газа. В результате эффективная длина конденсатора уменьшается и тем самым ухудшаются его характеристики.

Другой недостаток, связанный с наличием избытка рабочей жидкости, специфичен для труб, работающих в космосе. В этом случае из-за нулевой гравитации жидкость может перемещаться по паровому пространству, что скажется на динамике космического корабля.

При дефиците рабочей жидкости аварийная ситуация может возникнуть из-за невозможности обеспечить заполнение артерии. Эта ситуация не столь опасна при использовании гомогенных фитилей, поскольку в этом

случае часть пор все еще способна развить капиллярный напор.

Маркусом [3-39] детально проанализированы эти эффекты и трудности, связанные с определением действительно необходимого для заполнения трубы количества рабочей жидкости.

Одним из путей решения этой проблемы является устройство специального резервуара для избыточной жидкости, который ведет себя подобно губке, впитывающей излишек рабочей жидкости.

3-7. ЗАПОЛНЕНИЕ ТРУБЫ

В тепловых трубах, имеющих артериальный фитиль того или иного вида, необходимо обеспечить «автоматическое» восстановление заполнения артерий рабочей жидкостью при их опорожнении по какой-либо причине.

Максимальный диаметр артерии, обеспечивающий ее повторное заполнение, может быть рассчитан.

Максимальная высота заполнения под действием капиллярных сил описывается уравнением

$$h + h_c = \frac{\sigma_l \cos \theta}{(\rho_l - \rho_v) g} \left(\frac{1}{r_{p1}} + \frac{1}{r_{p2}} \right), \quad (3-7)$$

где h — расстояние по вертикали до начала артерии; h_c — высота артерии, отсчитываемая по вертикали; r_{p1} — первый главный радиус кривизны мениска при заполнении; r_{p2} — второй главный радиус кривизны мениска при заполнении.

При заполнении второй главный радиус кривизны мениска очень велик (он приблизительно равен $l \sin \Phi$). Для цилиндрической артерии $h_c = d_a$, а $r_{p1} = d_a/2$, где d_a — диаметр артерии.

Отсюда приведенное выше уравнение примет вид:

$$h + d_a = \frac{2\sigma_l \cos \theta}{(\rho_l - \rho_v) g l_a}. \quad (3-8)$$

Решая это квадратное уравнение относительно d_a , получаем:

$$d_a = \frac{1}{2} \left[\sqrt{h^2 + \frac{8\sigma_l \cos \theta}{(\rho_l - \rho_v) g}} - h \right]. \quad (3-9)$$

3-8. ЗАПУСК ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Работу тепловой трубы в процессе запуска трудно рассчитать, и она может существенно меняться в зависимости от многих факторов. В работе [3-40] качествен-

но было исследовано влияние рода рабочей жидкости, а также свойств и конфигурации фитиля на запуск тепловой трубы и было получено общее описание процесса запуска тепловой трубы. Во время запуска для передачи теплоты от испарителя к конденсатору пар должен течь с относительно высокой скоростью, в итоге перепад давления вдоль оси канала оказывается большим. Поскольку осевой градиент температуры в тепловой трубе определяется перепадом давлений в паровом канале, то в начальный момент температура в испарителе будет значительно выше, чем в конденсаторе. Уровень температур, достигаемых в испарителе, безусловно, зависит от рода используемой рабочей жидкости. Если количество подводимой теплоты достаточно велико, то фронт температуры будет постепенно перемещаться в направлении зоны конденсации. Во время нормального запуска тепловой трубы температура в испарителе возрастает, пока фронт не достигнет конца конденсатора. Начиная с этого момента, будет возрастать температура в конденсаторе, пока вся труба не придет в приблизительно изотермическое состояние (при использовании в качестве рабочей жидкости лития или натрия этот процесс протекает при таких температурах, когда стенка трубы нагрета докрасна, в этих условиях степень изотермичности трубы видна на глаз).

Тепловые трубы с каналами, покрытыми сетками, обычно ведут себя нормально во время запуска, если только подвод теплоты не осуществляется слишком интенсивно. Кемме обнаружил, что запуск тепловых труб с открытыми каналами оказывается сложным процессом. Были зафиксированы очень большие градиенты температуры, и изотермическое состояние достигалось довольно специфическим образом. На начальной стадии подвода теплоты температура в испарителе была на уровне 525°C (рабочей жидкостью был натрий) и фронт с температурой 490°C захватывал только короткий участок зоны конденсации. Для того чтобы выйти на приблизительно изотермические условия, увеличивали количество подводимой теплоты. Однако при этом температура в испарителе возрастала неравномерно: на наиболее удаленном от конденсатора конце испарителя температура достигала 800°C. Температура большей части испарителя оставалась равной 525°C, и между двумя температурными зонами существовал резкий перепад.

При достаточном количестве подводимой теплоты фронт с температурой 490°C в конце концов достигал конца конденсатора. Однако перед тем, как это происходило, на значительной части испарителя наблюдались температуры, превышающие 800°C. После достижения конденсатором почти изотермического состояния его температура быстро возрастала, а очень горячая зона испарителя быстро охлаждалась, это говорило о том, что возврат рабочей жидкости в трубе действительно имел место. С этого момента тепловая труба работала нормально.

В ряде случаев в процессе запуска, когда плотность пара мала, а его скорость высока, возврат жидкости в испаритель может оказаться затрудненным. В конструкциях с открытыми каналами это происходит более часто по сравнению с трубами с пористыми фитилями.

В более поздней работе Ван Андела [3-41] были установлены некоторые количественные соотношения, помогающие определить условия, при которых успешный запуск трубы может быть осуществлен. Эти соотношения исходят из того, что кризис теплоотдачи из-за прекращения подпитки жидкостью не возникает, т. е. давление насыщения в зонах нагрева не будет превышать максимальный капиллярный напор. Если кризис теплоотдачи сможет произойти, то это приведет к осушению фитиля, препятствуя возврату рабочей жидкости.

Соотношение, определяющее максимально допустимую плотность подводимого теплового потока в процессе запуска, записывается следующим образом:

$$Q_{\max} = 0,4\pi r_c^2 \cdot 0,73L (P_E \rho_E)^{1/2}, \quad (3-10)$$

где r_c — радиус парового канала; L — скрытая теплота парообразования; P_E , ρ_E — давление и плотность пара в зоне испарения.

Особенно важно, чтобы критерии надежного запуска были удовлетворены в тех случаях, когда тепловая труба используется в устройствах, работа которых сопряжена с многократными включениями и отключениями, как, например, в системах охлаждения элементов электронного оборудования либо тормозных устройствах. Один из возможных путей решения этой проблемы состоит в использовании дополнительного источника теплоты, связанного при помощи небольшого ответвления с основной тепловой трубой, тем самым поддерживая ее все время в разогретом состоянии. В результате число за-

пусков уменьшается. Время запуска газорегулируемых тепловых труб (см. гл. 6) меньше.

В недавней работе Буссе [3-42] выполнен обстоятельный анализ характеристик тепловых труб. Им показано, что прежде чем будет достигнуто ограничение по скорости звука, т. е. прежде чем произойдет запираание трубы, можно столкнуться с вязкостным ограничением, которое в принципе отвечает области значительно менее интенсивных нагрузок. Детально этот вопрос обсужден в гл. 2.

3-9. ПРИМЕР КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА А

Техническое задание. Проектируемая тепловая труба должна передавать как минимум 15 Вт при температуре пара от 0 до 80°C на расстояние 1 м в условиях отсутствия гравитации (применение на спутниках). Конструктивные ограничения: длина зон испарения и конденсации не более 8 см каждая, они располагаются по концам тепловой трубы. Максимально допустимый перепад температур между наружной стенкой испарителя и наружной стенкой конденсатора 6°C. Из-за массовых и габаритных ограничений поперечное сечение парового пространства не должно превышать 0,197 см². Тепловая труба должна также выдерживать воздействие температур, связанных с технологией ее крепления к другим элементам конструкции.

3-9-1. Выбор материала трубы и рабочей жидкости. Выбор материала фитиля и корпуса основывается на критериях, рассмотренных в настоящей главе, при этом существенным параметром является масса конструкции.

В качестве материала корпуса выбран алюминиевый сплав 6061 (HT-30), фитиль изготавливается из нержавеющей стали.

Набор рабочих жидкостей, совместимых с этими материалами включает: фреон-11 (английский эквивалент — арктон-11), фреон-113 (английский эквивалент — арктон-113), ацетон, аммиак.

Для каждой рабочей жидкости должны быть оценены различные виды ограничений передаваемой мощности.

Ограничение по скорости звука. Значение максимального осевого теплового потока, определяемого ограничением по скорости звука, находится при минимальной рабочей температуре 0°C. Оно может быть рассчитано по уравнению

$$q_s = \rho_v L \sqrt{\frac{\gamma \bar{R} T_0}{2(\gamma + 1) m}}$$

Все свойства рабочих жидкостей рассчитывались при 0°C. Были получены следующие значения, кВт/см²:

Фреон-11	0,69
Фреон-113	3,1
Ацетон	1,3
Аммиак	86

Предельные тепловые потоки значительно превышают требуемый ($\frac{15}{0,197} = 76$ Вт/см²), поэтому звуковое ограничение не будет рас-

считываться в качестве параметра, определяющего выбор рабочей жидкости.

Ограничение по устойчивости границы раздела жидкость — пар. Максимальное количество теплоты, которое может быть передано в условиях ограничения по устойчивости границы раздела фаз (по условиям срыва жидкости), находят с помощью уравнения

$$Q_{enl} = \pi r_0^2 L \sqrt{\frac{12 \pi \rho_v \sigma_l \cos \theta}{\lambda}}$$

где λ — характерный размер для поверхности раздела жидкость — пар, для тонкой сетки его можно взять равным 0,036 мм (сетка 400 меш).

Определим Q_{enl} для ацетона при 80°C. Физические свойства ацетона при этой температуре следующие: $L = 495$ кДж/кг; $\sigma_l = 0,0162$ Н/м; $\rho_v = 4,05$ кг/м³; радиус канала $r_0 = 2,5$ мм. Тогда имеем:

$$Q_0 = \pi (2,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 495 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{2 \pi \cdot 4,05 \cdot 0,0162}{0,036 \cdot 10^{-3}}} = 1,04 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 1,04 \text{ кВт},$$

т. е. предельное значение мощности по условиям устойчивости границы раздела существенно превышает заданную расчетную мощность.

Проделав подобные расчеты для других рабочих жидкостей, приходим к аналогичным выводам.

Ограничение по передающей способности фитиля. На данной стадии расчета форма фитиля еще не определена, однако качественное сопоставление возможностей четырех выбранных рабочих жидкостей может быть осуществлено путем оценки их параметров «качества» $\rho_l \sigma_l / \mu_l$ в рабочем диапазоне температур. Результаты подобной оценки представлены на рис. 3-4. Они свидетельствуют о преимуществе аммиака и (в меньшей степени) ацетона над фреонами.

Радиальный тепловой поток. Кипение в фитиле может привести к блокированию паровыми образованиями доступа жидкости по всем частям испарителя. В артериальных тепловых трубах появление пузырей в артерии может привести даже к еще более серьезным проблемам (см. гл. 6). Поэтому желательно использовать рабочую жидкость с высоким перегревом ΔT с тем, чтобы уменьшить вероятность образования пузырьков. Значение перегрева, необходимого для образования пузырей, определяется соотношением

$$\Delta T_s = \frac{3,06 T_0 \sigma_l}{L \rho_v \delta}$$

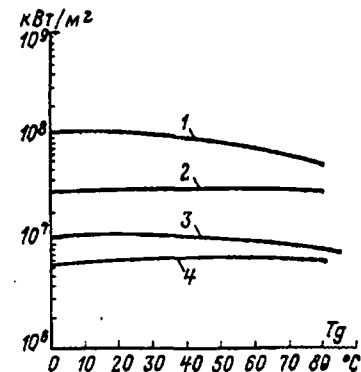


Рис. 3-4. Параметр «качества» для выбранных рабочих жидкостей.

1 — аммиак; 2 — ацетон; 3 — фреон-11; 4 — фреон-113.

где δ — толщина теплового слоя. Для целей настоящего расчета δ берется равной 0,15 мм [3-43].

T_s соответствует 80°C, поскольку наименьшее значение допустимого перегрева будет при максимальной рабочей температуре. В итоге получим следующие значения ΔT_s , °C:

Фреон-11	0,025
Фреон-113	0,04
Ацетон	0,58
Аммиак	0,002

Из приведенных цифр следует, что для фреонов и аммиака при 80°C для возникновения кипения необходим очень малый перегрев. С этой точки зрения наиболее подходящей рабочей жидкостью является ацетон.

Заполнение фитиля. Следующим фактором, определяющим выбор рабочей жидкости, являются ее способность к заполнению фитиля (см. гл. 3). Сравнение жидкостей по этому параметру может быть выполнено путем сопоставления значений отношения σ/ρ_l . Соответствующие кривые представлены на рис. 3-5. Видно, что ацетон и аммиак превосходят фреоны по этому параметру во всем рабочем диапазоне температур.

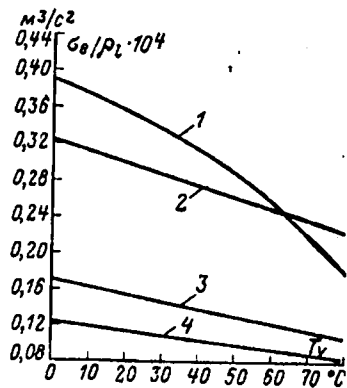


Рис. 3-5. Значения параметра σ/ρ_l , характеризующего эффективность заполнения фитиля, от температуры пара.

1 — аммиак; 2 — ацетон; 3 — фреон-11;
4 — фреон-113; 5 — температура пара, °C.

стенки при использовании аммиака составит 0,65 мм, а при работе с ацетоном 0,1 мм, т. е. использование аммиака сопряжено с некоторым проигрышем в массе.

Заключение по выбору рабочей жидкости. Как ацетон, так и аммиак обеспечивают передачу необходимой мощности, причем аммиак в этом плане превосходит ацетон. Возникновение зародышей пара более вероятно в тепловой трубе, работающей на аммиаке, при использовании аммиака больше окажется также и масса трубы. Проведение технологических операций с аммиаком (заправка и т. п.)

с сохранением его высокой чистоты затруднительно (см. гл. 4). Поэтому, несмотря на более низкие технические характеристики, в качестве рабочей жидкости для проектируемой трубы выбран ацетон.

3-9-2. Детальное проектирование. Для данной тепловой трубы предложены два типа фитильных структур: гомогенный и артериальный. Гомогенный фитиль может быть изготовлен из сетки, саржевой ткани или войлока. Артериальный фитиль обычно дополняется сеткой для распределения жидкости по периметру трубы. Гомогенные сетчатые фитили просты в изготовлении, но их характеристики как устройства передающего жидкость хуже по сравнению с артериальными. Поэтому сразу же возникает вопрос, сможет ли гомогенный фитиль передать требуемое количество жидкости на заданное расстояние в 1 м?

Для определения минимального проходного сечения по жидкости, обеспечивающего передачу 15 Вт мощности, нужно приравнять максимальный капиллярный напор сумме гидравлического сопротивления течению жидкости и гравитационного напора (перепадом давлений в паровом канале пренебрегаем)

$$\Delta P_l + \Delta P_g = \Delta P_c,$$

где

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma_l \cos \theta}{r_c};$$

$$\Delta P_g = \rho_l g l \sin \Phi;$$

$$\Delta P_l = \frac{\mu_l Q_{l,eff}}{\rho_l L A_w K}.$$

Свойства жидкости берутся при 80°C. Выбирается сетка 400 меш (размер пор примерно 0,036 мм). Полагая, что $l \sin \Phi = 1$ см (разность уровней концов плюс диаметр трубы), $l_{eff} = 100$ см, $\cos \theta = 1$, и рассчитывая K по уравнению Блейка — Козени,

$$K = \frac{d_w^2 \epsilon (1 - \epsilon)^2}{66,6 \epsilon^2},$$

где ϵ — объемная доля твердой фазы (0,314), а d_w — диаметр проволоки (0,025 мм), получим:

$$K = \frac{(25 \cdot 10^{-6})^2 (1 - 0,314)^2}{66,6 \cdot 0,314^2} = 3,07 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2;$$

$$\Delta P_l = \frac{0,00192 \cdot 10^{-1} \cdot 15 \cdot 1}{719 \cdot 495 \cdot 10^3 \cdot 0,307 \cdot 10^{-10} A_w} = \frac{0,27}{A_w} \text{ Н/м}^2$$

при A_w в м²;

$$\Delta P_c = \frac{2 \cdot 0,0162 \cdot 1}{29 \cdot 10^{-8}} = 1120 \text{ Н/м}^2;$$

$$\Delta P_g = 719 \cdot 9,81 \cdot 0,01 = 70 \text{ Н/м}^2.$$

Приравнивая $(\Delta P_g + \Delta P_l)$ и ΔP_c , имеем:

$$\frac{0,27}{A_w} + 70 = 1120,$$

откуда $A_w = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 2,6 \text{ см}^2$.

Можно сделать вывод, что гомогенный фитиль неприемлем, поскольку требуемое проходное сечение ($2,6 \text{ см}^2$) больше полного располагаемого проходного сечения парового канала ($0,197 \text{ см}^2$). Поэтому следует использовать артериальный фитиль.

Диаметр артерии. Уравнение (3-9) характеризует способность артерии к заполнению жидкостью, оно дает максимальное значение размера любой артерии

$$d_a = \frac{1}{2} \left[\sqrt{h^2 + \frac{8\sigma_l \cos \theta}{(\rho_l - \rho_v) g}} - h \right].$$

С помощью этого уравнения находим d_a при температуре 30°C (для удобства способность артерий к заполнению может быть определена при комнатной температуре). Максимально допустимое значение $d_a = 0,59 \text{ мм}$. Учитывая погрешность таблиц физических свойств жидкости, характеристик смачивания (угол θ принят равным нулю), а также технологический допуск, принимаем практически допустимое значение $d_a = 0,5 \text{ мм}$. При определении d_a значение h принято равным 1 см для удовлетворения условий вблизи верхней части парового пространства.

Распределение жидкости по периметру трубы. Толщина фитиля, обеспечивающего раздачу жидкости по периметру, ограничена заданным максимальным значением перепада температур между паровым пространством и наружной поверхностью тепловой трубы (или наоборот), которая не должна превышать 3°C . Считая перепад температур в алюминиевой стенке пренебрежимо малым, можно определить коэффициент теплопроводности фитильной структуры и с помощью уравнения стационарной теплопроводности найти толщину фитиля

$$k_{\text{фит}} = \left(\frac{\beta - \varepsilon}{\beta + \varepsilon} \right) k_l,$$

где $\beta = \left(1 + \frac{k_s}{k_l} \right) / \left(1 - \frac{k_s}{k_l} \right)$; здесь $k_s = 13 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ (сталь); $k_l = 0,165 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ (ацетон).

Тогда

$$\beta = \frac{1 + 97}{1 - 97} = -1,02.$$

Объемная доля твердой фазы составляет приблизительно $0,3$:

$$k_{\text{фит}} = \frac{(-1,02 - 0,3)}{(-1,02 + 0,3)} \cdot 0,165 = 0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}.$$

Из уравнения теплопроводности

$$Q = kA \frac{dT}{dx};$$

$$dx = kAT \frac{A}{Q} = 0,3 \cdot 3 \cdot \frac{10^{-4}}{1,2} = 0,075 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,075 \text{ мм}.$$

Таким образом, выступающий периметр трубы фитиля должен быть изготовлен из сетки 400 меш, толщина которой $0,05 \text{ мм}$. Более грубая сетка оказывается слишком толстой.

Артериальный фитиль. В предыдущем разделе было выявлено, что максимально допустимая глубина артерии составляет $0,5 \text{ мм}$. Для предотвращения образования пузырьков пара в артериях их необходимо располагать на удалении от стенки тепловой трубы и изготавливать из материала с низкой теплопроводностью. Необходимо также покрывать артерии мелкопористой структурой, в качестве последней выбрана нержавеющей сетка 400 меш.

Желательно иметь несколько артерий с тем, чтобы обеспечить некоторый запас. Рассмотрены два возможных варианта артериального фитиля. Один имеет шесть артерий, как это показано на рис. 3-3, а другой — четыре. В первом случае номинальная ширина каждой канавки 1 мм , во втором $1,5 \text{ мм}$. Теперь можно рассчитать полную теплопередающую способность тепловой трубы и проверить, насколько она отвечает заданию.

Ранее уже было показано, что ограничения по устойчивости поверхности раздела (срыву жидкости) и по скорости звука не являются лимитирующими и что значение радиального теплового потока приемлемо. Рассчитанная тепловая труба должна также обеспечить работу при заданном полном перепаде температур, а артерии достаточно узки, чтобы обеспечить их повторное заполнение при 30°C . Следующая из условий прочности толщина стенки трубы ($0,1 \text{ мм}$) легко может быть удовлетворена. Поэтому максимальная мощность трубы определяется гидравлическим сопротивлением канала возврата жидкости (фитиля).

Заключительный анализ. Ограничение по высоте капиллярного поднятия достигается в том случае, когда сумма потерь давления в жидкой и паровой фазах и гравитационного напора равна максимальному капиллярному напору, т. е.

$$\Delta P_{1a} + \Delta P_{1m} + \Delta P_g + \Delta P_v = \Delta P_c,$$

где ΔP_{1a} — перепад в артерии, а ΔP_{1m} — потери давления в раздающем фитиле.

Осевой поток по сетке оказывает слабое влияние, и им можно пренебречь.

Мак-Адамсом [3-44] предложено уравнение для расчета потерь давления в случае ламинарного течения в прямоугольном канале и показано, что это уравнение хорошо согласуется с экспериментом при отношениях глубины канала к его ширине $a/b = 0,05 \text{--} 1,0$. Это уравнение может быть записано как

$$\Delta P_{1a} = \frac{4K_l l_{\text{эф}} Q}{a^3 b^2 \Phi_c N},$$

где N — число каналов; Φ_c — функция отношения сторон канала, определяемая по графику рис. 3-6; а $K_l = \mu_l / \rho_l L$.

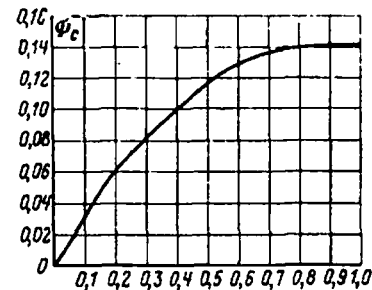


Рис. 3-6. Поправочный коэффициент на отношение сторон прямоугольного канала.

Суммарная потеря давления в конденсаторе и испарителе определяется формулой

$$\Delta P_{lm} = \frac{K_l l_{eff} Q}{2KA_c},$$

где l_{eff} — эффективная длина раздающего фитиля с расходом жидкости $\dot{m}/4$, приблизительно равная $\pi r_w/4$; здесь \dot{m} — массовый расход жидкости; A_c — проходное сечение раздающего фитиля (толщина сетки \times длина испарителя и конденсатора); K — проницаемость сетки в 400 меш = $0,314 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$.

Проходное сечение раздающего фитиля, образованного двумя слоями сетки в 400 меш, равно:

$$A_c = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Тогда гидравлическое сопротивление конденсатора и испарителя составит:

для каждой секции

$$\Delta P_{lm} = \frac{\pi 2,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4} \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{K_l}{0,314 \cdot 10^{-10}} = 4,0 \cdot 10^{12} K_l;$$

для шести каналов

$$\Delta P_{la} = \frac{4 \cdot 0,92 \cdot K_l Q}{(0,5)^2 (1,0)^2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,115 \cdot 6} = 21,3 \cdot 10^{12} K_l Q;$$

для четырех каналов

$$\Delta P_{la} = \frac{4 \cdot 0,92 \cdot K_l Q}{(0,5)^2 (1,5)^2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,088 \cdot 4} = 18,59 \cdot 10^{12} K_l Q.$$

Потеря давления в паровом потоке в двух приблизительно полукруглых каналах может быть найдена из уравнения Хагена—Пуазейля

$$\Delta P_v = \frac{1}{2} \left\{ \frac{8K_v l_{eff} Q}{\pi r_H^4} \right\},$$

где

$$K_v = \mu_v / \rho_v L.$$

Аксимальное число Рейнольдса Re_z определяется формулой

$$Re_z = \frac{Q}{\pi r_H \mu_l L}.$$

Тепловая нагрузка, соответствующая переходу от ламинарного течения к турбулентному, определяется из условия равенства $Re_z = 1000$ при определении Re_z по гидравлическому радиусу. Ограничивая ширину нержавеющей вставки на рис. 3-5 до 1,5 мм, получим значение $r_H = 1,07$ мм. Q , соответствующее точке перехода, может быть определено для различных рабочих температур между 0 и 80°C (т. е. для различных пар значений μ_l и L).

В итоге получим:

Температура пара, °C	Нагрузка в точке перехода, Вт
0	31,1
20	31,2
40	30,6
60	30,2
80	30,0

Во всех случаях нагрузка, отвечающая точке перехода, выше номинальных 15 Вт, однако поскольку тепловая труба может работать при нагрузке, превышающей расчетную, необходимо провести расчет гидравлических потерь также и для случая турбулентного течения. При $Re_z > 1000$ для двух паровых каналов имеем:

$$\Delta P_v = \frac{0,00896 \mu_v^{0,25} Q^{1,75} l_{eff}}{2 \rho_v^{0,75} r_H^{4,75} L^{1,75}}.$$

Это выражение известно как эмпирическая формула Блазуса. Теперь мы можем рассчитать ΔP_v для ламинарного и турбулентного течения

$$\Delta P_v^{(лам)} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{8 \cdot 0,92 \cdot K_v \cdot Q}{\pi \cdot 1,07^4 \cdot 10^{-12}} \right\} = 0,9 \cdot 10^{12} K_v Q;$$

$$\Delta P_v^{(турб)} = \frac{0,00896 \cdot 0,92}{2 \cdot (1,07 \cdot 10^{-3})^{4,75}} \cdot Q^{1,75} \times$$

$$\times \left(\frac{\mu_v^{0,25}}{L^{1,75} \rho_v} \right) = 0,53 \cdot 10^{12} Q^{1,75} \left(\frac{\mu_v^{0,25}}{L^{1,75} \rho_v} \right).$$

Граунтационный перепад давлений равен:

$$\Delta P_g = \rho_l g l \sin \Phi = 0,0981 \rho_l,$$

при этом принято $l \sin \Phi = 1$ см.

Капиллярный напор, развиваемый артерией, равен:

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma_l \cos \theta}{r_c} = \frac{2}{3 \cdot 10^{-6}} \sigma_l \cos \theta = 0,667 \cdot 10^6 \sigma_l.$$

В итоге имеем:

$$\Delta P_c = 0,667 \cdot 10^6 \sigma_l;$$

$$\Delta P_g = 0,0981 \rho_l;$$

$$\Delta P_{vl} = 0,9 \cdot 10^{12} K_v Q;$$

$$\Delta P_{vt} = 0,53 \cdot 10^{12} Q^{1,75} \left(\frac{\mu_v^{0,25}}{L^{1,75} \rho_v} \right);$$

$$\Delta P_{lm} = 4 \cdot 10^{12} K_l Q;$$

$$\Delta P_{la} = 21,3 \cdot 10^{12} K_l Q \text{ (6 каналов);}$$

$$\Delta P_{la} = 18,59 \cdot 10^{12} K_l Q \text{ (4 канала).}$$

Эти уравнения включают Q и свойства рабочей жидкости. Используя набор физических свойств при выбранном значении температуры (берутся с шагом 20°C) в заданном рабочем диапазоне, из условия равенства

$$\Delta P_c = \Delta P_{lm} + \Delta P_{la} \begin{cases} 6 \text{ каналов} \\ 4 \text{ канала} \end{cases} + \Delta P_g + \Delta P_v \begin{cases} \text{ламнарное} \\ \text{турбулентное} \end{cases}$$

получим значения мощности, приведенные в табл. 3-6. Данная тепловая труба была спроектирована с шестью канавками.

Таблица 3-6

Мощность тепловой трубы с шестью канавками

Температура пара, °С	Q, Вт			
	Ламинарное течение пара		Турбулентное течение пара	
	4 канала	6 каналов	4 канала	6 каналов
0	21,6	20,9	—	—
20	34,0	32,5	22,6	22,0
40	42,6	40,2	27,9	27,0
60	49,1	45,8	33,0	32,0
80	51,4	47,6	36,4	35,0

Таким образом, процесс расчета тепловой трубы включает в себя следующие операции:

- 1) выбор материала фитиля и корпуса;
- 2) выбор рабочей жидкости по критериям: ограничения; давление; заподниение; вспомогательные технологические операции; чистота и т. п.;
- 3) анализ типов фитилей: гомогенный отвергнут, артериальный выбран;
- 4) определение размера артерии;
- 5) анализ термического сопротивления радиальному тепловому потоку;
- 6) анализ полного баланса давлений в предполагаемой конструкции;
- 7) выбор окончательной конфигурации трубы на основе данных п. 6 и соображений технологичности изготовления и т. п.

3-10. ПРИМЕР КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА В

Задание. Найти приближенное соотношение для расхода жидкости и теплопередающей способности простой тепловой трубы, работающей на воде при температуре 100°C с фитилем из двух слоев сетки в 250 меш на внутренней стенке трубы. Тепловая труба имеет длину 30 см, внутренний диаметр корпуса 1 см. Труба работает с наклоном к горизонту 30°, испаритель размещен над конденсатором.

Максимальная теплопередающая способность трубы при заданной температуре пара может быть найдена из уравнения

$$Q_{\max} = \dot{m}_{\max} L,$$

где \dot{m}_{\max} — максимальный расход жидкости в фитиле.

Используя стандартное выражение для баланса давлений

$$\Delta P_c = \Delta P_v + \Delta P_f + \Delta P_g$$

и пренебрегая в первом приближении перепадом давлений в паровой фазе ΔP_v , после подстановки соответствующих соотношений для ΔP_c , ΔP_f и ΔP_g получим:

$$\frac{2\sigma_l \cos \theta}{r_c} = \frac{\mu_l}{\rho_l L} \frac{Q_{l,eff}}{A_w K} + \rho_l g l_{eff} \sin \Phi.$$

Раскрыв это равенство относительно \dot{m} , получим:

$$\dot{m} = \frac{\rho_l K A_w}{\mu_l l_{eff}} \left\{ \frac{2\sigma_l}{r_c} \cos \theta - \rho_l g l_{eff} \sin \Phi \right\}.$$

Диаметр проволоки в сетке в 250 меш обычно равен 45 мкм, тем самым толщина двух слоев этой сетки составит 4·45=180 мкм. Внутренний диаметр корпуса трубы 1 см. Тогда поперечное сечение фитиля A_w будет равно:

$$A_w = 180 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 10^{-2} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Из табл. 3-3 для сетки в 250 меш радиус поры $r_c = 20$ мкм, а проницаемость $K = 0,302 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$.

Допустим наличие идеального смачивания ($\theta = 0^\circ$), с учетом следующих значений физических свойств воды при температуре 100°C: $L = 2,258 \cdot 10^6$ Дж/кг; $\rho_l = 958$ кг/м³; $\mu_l = 0,283$ мНс/м²; $\sigma_l = 58,85$ мН/м; находим, что

$$\dot{m}_{\max} = \frac{958 \cdot 0,302 \cdot 10^{-10} \cdot 5,7 \cdot 10^{-6}}{0,283 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3} \times$$

$$\times \left\{ \frac{2 \cdot 58,85 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-4}} - 958 \cdot 9,81 \cdot 0,3 \cdot 0,5 \right\} = 1,93 \cdot 10^{-6} (5885 - 1410) = 8,63 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}.$$

Теперь

$$Q_{\max} = \dot{m}_{\max} L = 8,63 \cdot 10^{-6} \cdot 2,258 \cdot 10^6 = 19,5 \text{ Вт}.$$

3-11. ПРИМЕР КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА С

Задание. Передающая способность рассчитанной в примере В трубы низка. Какое улучшение характеристики трубы будет достигнуто в случае дополнения фитиля из сетки 250 меш двумя слоями сетки в 100 меш с целью увеличения расхода жидкости?

Диаметр проволоки в сетке 100 меш 100 мкм. Тогда толщина двух слоев новой сетки будет 400 мкм. Суммарная толщина фитиля составит 0,4+0,18=0,58 мм. Поперечное сечение фитиля

$$A_w = 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 10^{-2} = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Капиллярное поднятие в рассматриваемом варианте все еще определяется сеткой в 250 меш, т. е. порам с радиусом $r_c = 20$ мкм. Проницаемость использованной сетки в 100 меш согласно Ленгстону и Кунцу $1,52 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$.

Теперь рассчитаем массовый расход

$$\dot{m}_{\max} = \frac{958 \cdot 1,52 \cdot 10^{-10} \cdot 1,82 \cdot 10^{-5}}{0,283 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3} (5885 - 1400) = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}.$$

Данное значение более чем на порядок превосходит \dot{m}_{\max} , достижимое с фитилем из одной сетки в 250 меш.

$$Q_{\max} = 1,38 \cdot 10^{-4} \cdot 2,258 \cdot 10^6 = 310 \text{ Вт}.$$

* В данном случае важно не все поперечное сечение фитиля, а только часть его, образованная слоем сетки в 100 меш и равная $1,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. (Прим. пер.)

Производство и испытание тепловых труб

Процесс изготовления тепловых труб складывается из ряда относительно простых операций, особенно для тепловых труб, работающих в области умеренных температур, скажем, в диапазоне 50—200°C. Эти операции включают в себя сварку (пайку), механическую обработку, химическую очистку и неразрушающие испытания и могут быть осуществлены при относительно небольших затратах на основное оборудование. При этом наиболее дорогим, по-видимому, является оборудование по контролю герметичности соединений.

Во всех тепловых трубах чистота является главным фактором, обеспечивающим совместимость использованных материалов в период эксплуатации (естественно, при условии, что выбранные материалы фитиля, корпуса и рабочая жидкость в принципе совместимы, а также гарантируется смачиваемость фитиля и стенки рабочей жидкостью). Недостаточное внимание к технологии сборки может отрицательно сказаться на сроке службы тепловой трубы, а также снизить ее работоспособность вследствие, например, ухудшения смачивания. Загрязнение атмосферы тепловой трубы, а также примеси, которые могут содержаться в рабочих жидкостях, должны быть исключены. Помимо всего этого, тепловая труба должна быть в высшей степени герметичной. Реализация указанных условий может включать в себя дегазацию металла, использованного для изготовления корпуса тепловой трубы, крышек корпуса и т. д., хотя эта операция не является строго обязательной для труб, работающих при низких температурах.

Важность контроля за качеством изготовления тепловой трубы трудно переоценить, и в последующем обсуждении методов сборки труб на это будет часто обращать внимание.

Значительная часть настоящей главы посвящена обзору методов ресурсных испытаний тепловых труб.

Срок службы тепловой трубы зачастую требует очень тщательной оценки, учитывая многие факторы, которые могут сказаться на ее долговременных характеристиках, и большинство организаций, активно участвующих в

конструировании и изготовлении тепловых труб, в настоящее время осуществляют широкие программы ресурсных испытаний этих устройств. Как будет показано ниже, на основании имеющихся в литературе данных можно подобрать удовлетворительную комбинацию материала корпуса — материал фитиля — рабочая жидкость, однако технология сборки труб, используемая отдельными изготовителями, может оказаться различной, и это обстоятельство может внести неизвестный фактор в проблему совместимости материалов, который потребует дополнительных исследований.

Опытное определение характеристик тепловых труб также представляет собой необходимый этап работы по созданию изделия с требуемыми свойствами, при этом нужно сказать, что интерпретация результатов испытаний может оказаться затруднительной. Методы испытаний тепловых труб, предназначенных для использования на орбитальных спутниках, имеют свою специфику, которая связана с необходимостью определения характеристик трубы в условиях невесомости на основании данных испытаний, выполненных в наземных условиях.

4-1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА ТРУБЫ

4-1-1. Материал корпуса. Материал корпуса тепловой трубы, включая материал торцовых крышек и материал трубы для заполнения, выбирается с учетом ряда свойств используемых материалов. Они приведены в гл. 3. (Если не делается специальных оговорок, то в приведенном в настоящей главе анализе принимается, что тепловая труба имеет цилиндрическую геометрию.) Однако практические последствия выбора материала весьма многообразны.

Из многих материалов, пригодных для изготовления корпуса, наиболее часто используют три, а именно медь, алюминий и нержавеющей сталь. Медь является исключительно подходящим материалом для тепловых труб, работающих в диапазоне 0—200°C и используемых в таких областях, как системы охлаждения электронного оборудования. Хотя в принципе трубы из технической чистой меди являются подходящими, предпочтительнее использовать бескислородную медь с высокой теплопроводностью. Как и в случае применения алюминия или нержавеющей стали, имеется широкий выбор типораз-

меров труб из меди как по диаметру, так и по толщине стенки.

Алюминий реже используется в тепловых трубах, изготавливаемых промышленным способом. Однако он благодаря своей малой плотности привлек пристальное внимание специалистов по космическим исследованиям. Обычно алюминий используется в виде сплавов (преимущественно сплав 6061-Т6), причем из английских материалов к нему наиболее близок сплав НТ-30. Кроме того, он всегда имеется в наличии и может быть подобран для изготовления тепловой трубы в виде готовой заготовки или может быть отштампован в виде заготовки с канавками для перекачки жидкости.

К сожалению, в общем случае, если рабочей жидкостью является вода, нержавеющая сталь не может быть длительно использована в качестве материала корпуса из-за возникающего газовыделения. В то же время нержавеющая сталь вполне совместима со многими рабочими жидкостями. В ряде случаев она является единственным подходящим материалом, как, например, в случае работы с такими жидкими металлами, как ртуть, натрий и калий. Обычно используются нержавеющие стали марок 302, 316 и 321.

При сборке тепловой трубы необходимо предусмотреть оборудование для ее заполнения. Наиболее часто заполнение производится через торцевой колпак (крышку), снабженную трубой малого диаметра, как это показано на рис. 4-1. Другой конец тепловой трубы имеет глухой колпак. Материал колпаков и заполняющей трубы в общем случае тот же, что и корпуса тепловой трубы, хотя для удобства заполняющую нержавеющую трубу можно нарастить при помощи медной трубки, чтобы обеспечить возможность холодной сварки (см. § 4-1-9). Может возникнуть потребность в установке вентиля на заполняющей трубе, например, для проведения газового анализа после ресурсных испытаний (см. § 4-2). Материал вентиля, безусловно, должен быть совместим с рабочей жидкостью.

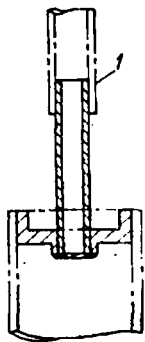


Рис. 4-1. Торцевая крышка тепловой трубы и трубка для ее заполнения.

1 — медная трубка, которая припаивается в требуемом месте.

Если тепловая труба должна работать при высоком давлении паров, то для проверки корпуса на прочность следует проводить соответствующие гидравлические испытания.

4-1-2. Материалы и типы фитилей. Количество материалов, испытанных в качестве фитилей тепловых труб, и число видов фитилей очень велико. Некоторые из них были уже упомянуты при анализе перепада давлений по жидкостному тракту в гл. 2 и при обсуждении критериев выбора рабочей жидкости в гл. 3.

Проволочная сетка. Наиболее часто встречающимся типом фитиля является плетеная проволочная сетка или саржевая ткань, которая может быть изготовлена из многих металлов. Нержавеющая, монелевая и медная проволоки могут быть сплетены в сетку с очень малыми размерами пор (см. табл. 3-3). Нержавеющая сетка 400 меш может быть получена от ряда фирм изготовителей. (В приложении 4 приведен перечень изготовителей и поставщиков материалов для производства тепловых труб.) Имются также алюминиевые сетки, однако из-за трудностей производства и плетения тонкой алюминиевой проволоки изготовление мелкопористой структуры фитиля оказывается невозможным.

Нержавеющая сталь является наилучшим материалом для изготовления сеток. Она может быть прокатана и хорошо сохраняет свою форму. Присущая крупной сетке упругость способствует хорошему прилеганию фитиля к стенке корпуса тепловой трубы, исключая в ряде случаев необходимость применения любого другого варианта фиксации расположения фитиля. В тепловых трубах с фитилем в 400 меш слой более крупной сетки в 100 меш, расположенный по внутреннему радиусу фитиля, может обеспечить сохранение формы более тонкой сетчатой структуры. Нержавеющая сталь представляет собой материал, который хорошо соединяется методом диффузионной сварки, что позволяет получать прочный сплошной фитиль, связанный со стенкой корпуса тепловой трубы. Диффузионная сварка лучше всего осуществляется в вакуумной печи при температуре 1150—1200°C.

Точечная сварка фитиля является удобным способом сохранения его формы или присоединения фитиля к стенке корпуса тепловой трубы в тех случаях, когда ее диаметр достаточно большой для ввода во внутреннюю по-

лость трубы электрода. При невозможности реализации этого метода для прижатия фитиля может быть использована спиральная пружина.

Важно обеспечить, чтобы независимо от типа фитиля он находился в тесном контакте со стенкой тепловой трубы, особенно в зоне испарения, иначе могут появиться горячие пятна. При наличии сетки наилучшей гарантией плотного прилегания фитиля является применение диффузионной сварки.

Спекание. Аналогичным устройством, обеспечивающим плотный контакт со стенкой тепловой трубы, является спеченный фитиль. Спекание часто используется при изготовлении металлических фильтров, и в настоящее время многие элементы машин изготавливаются этим способом вместо кокильного литья.

Процесс спекания состоит во взаимном соединении большого числа частиц в виде уплотненного металлического порошка. Размер пор получаемого подобным путем фитиля может регулироваться выбором порошков, каждый из которых имеет определенный размер частиц. Порошки, обычно состоящие из сферических частиц, засыпаются в сосуды, которые придают будущему фитилю требуемую форму и затем либо спекаются без дополнительного уплотнения, либо если используется временное связывающее вещество, может быть приложено небольшое давление. Спекание обычно производится при температуре на 100—200°C ниже точки плавления спекаемого материала.

Наиболее простым путем изготовления фитиля указанным методом является спекание порошка в трубе, которая будет служить корпусом. Преимущество указанного способа в том, что фитиль припекается также и к стенке трубы, что делает конструкцию более прочной. Для того чтобы в изделии остался свободный центральный паровой канал, в трубу нужно вставить временный сердечник. Порошок засыпается в зазор между сердечником и трубой. При спекании медного порошка хорошие результаты получаются при применении нержавеющей сердечника — медь не припекается к нержавеющей стали, и сердечник легко может быть вынут по завершении процесса спекания. Сердечник удерживается на оси трубы с помощью концевых нержавеющей втулок.

Ниже описывается типичный процесс спекания. В качестве материала спекаемого порошка и корпуса тепло-

вой трубы выбрана медь. Размер частиц порошка выбирается таким образом, чтобы в результате спекания диаметр частиц получился 50—100 мкм. В трубе устанавливаются сердечник и центрирующая втулка с одного конца сборки. После этого с другого конца сборки засыпается порошок. Никаких попыток уплотнить засыпку не делается, кроме обстукивания трубы, для того чтобы обеспечить отсутствие больших пустот. После наполнения трубы устанавливается и прижимается к засыпке вторая центрирующая втулка. После этого осуществляется процесс спекания путем нагрева в атмосфере водорода при температуре 850°C в течение 1/2 ч. После охлаждения трубы и выемки ее из печи сердечник удаляется из сборки. После этого сборка без сердечника подвергается повторному спеканию. (Основанием для повторения процесса спекания служит следующее соображение. В период, когда сердечник находится на месте, он препятствует свободному прохождению водорода через засыпку; в итоге спекание может быть недостаточно успешным, поскольку водород необходим для удаления окисной пленки, которая тормозит процесс.) После этой операции труба готова к использованию. На рис. 4-2 показано поперечное сечение изготовленной таким образом трубы. На рис. 4-3 представлено увеличенное изображение структуры спеченного медного фитиля. Пористость полученного фитиля 40—50%.

Для увеличения пористости изделия спекание можно осуществить другим способом. Для этого требуется инертный наполнитель, который действует как порообразователь. В процессе спекания наполнитель постепенно улетучивается, оставляя после себя развитую пористую структуру. В качестве наполнителя используется пластмассовый порошок, состоящий из частиц сферической формы. Этот порошок просеивается для того, чтобы выделить частицы размером 50—100 мкм. Наполнитель смешивается с равным объемом очень мелкого (20 мкм) медного порошка. При смешении медь равномерно покрывает пластмассовые сферы. Этот «составной» порошок в дальнейшем не проявляет склонности к разделению на компоненты.

Изготовление фитиля производится тем же путем, как и в описанном ранее случае, необходимо только более сильное сжатие засыпки для того, чтобы компенсировать очень сильную усадку материала в процессе

спекания. На начальной стадии процесса пластмасса испаряется и диффундирует сквозь медные частицы, оставляя при этом своего рода скелет из тонкого медного порошка с крупными порами. Окончательная пористость составляет примерно 75—85%.

Очевидно, что имеется много возможных вариантов фитилей, изготавливаемых спеканием. Пористость, высота капиллярного поднятия и объемный расход рабочей жидкости — все эти параметры могут быть оптимизированы правильным выбором размеров металлического порошка и наполнителя, их пропорции в смеси, добавкой соответствующих слоев наполнителя для образования каналов в фитиле.



Рис. 4-2. Поперечное сечение спеченного фитиля (медь).

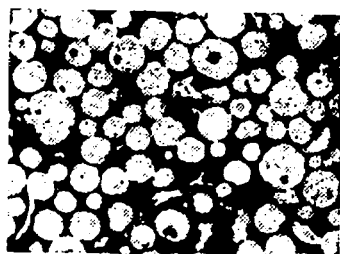


Рис. 4-3. Увеличенное изображение спеченой структуры.

Осаждение паров. Спекание не является единственным способом получения пористого слоя, находящегося в тесном контакте с внутренней стенкой тепловой трубы. Указанная цель может быть достигнута с помощью других технологий, которые включают в себя покрытие осаждением из паровой фазы, катодное и плазменное напыление. Фирма ВВ (английский патент 1313525) описывает процесс, известный как покрытие осаждением из паровой фазы, который был успешно применен при создании фитиля тепловой трубы. Этот процесс включает в себя покрытие внутренней поверхности тепловой трубы слоем вольфрама в результате реакции паров гексафторида вольфрама с водородом. Пористость образующегося слоя регулируется температурой покрываемой поверхности, скоростью перемещения подающего пар сопла и расстоянием от сопла до покрываемой поверхности.

Канавки. Типом фитиля, который широко применяется для космических приложений, но развивает незначительный капиллярный напор в наземных условиях, является фитиль с системой канавок. Наиболее простыми способами образования продольных канавок в стенке тепловой трубы является штамповка или протяжка. Горячая штамповка наиболее эффективна при использовании алюминия, при этом канавки могут быть сравнительно узкими и достаточно глубокими. Примером может служить алюминиевая труба с канавками, показанная на рис. 4-4. Наружной поверхности тепловой трубы может быть также придана форма, отвечающая ее конкретным применениям. Если тепловая труба долж-



Рис. 4-4. Фитиль с канавками (алюминиевый сплав).



Рис. 4-5. Артерия с винтовой нарезкой в алюминиевой стенке.

на крепиться к плите, то стенка трубы может быть выполнена плоской с тем, чтобы обеспечить лучший термический контакт с указанной плитой.

Другим способом образования канавок является нарезка резьбы на внутренней стенке корпуса тепловой трубы с помощью метчиков или реза с шагом резьбы до 40 ниток/см. Пример подобного типа фитиля изображен на рис. 4-5. Нарезка осуществлена с шагом 15 ниток/см на внутренней поверхности алюминиевой трубы диаметром 6 мм и длиной 1 м. Эти артерии с винтовой нарезкой привлекают возможностью эффективного распределения жидкости по периметру трубы и могут быть использованы в сочетании с различными артериальными системами, предназначенными для аксиальной подачи жидкости.

Войлоки и пенообразные материалы. В настоящее время ряд компаний выпускает металлические и керамические войлоки и металлические пенообразные мате-

риалы, которые с успехом могут быть использованы в качестве материала фитилей тепловых труб, в частности в тех случаях, когда изделие должно иметь некруглое поперечное сечение. Свойства некоторых подобных материалов приведены в табл. 3-3. Пенообразные материалы изготавливаются из никеля и меди, а войлок — из нержавеющей стали и плетеных керамических волокон (рефрасил). Названия и адреса фирм-изготовителей приведены в приложении 4. Пенообразные изделия изготавливаются в виде листов и прутков с заданными размерами пор. Металлический войлок обычно выпускается в виде листов, он более пластичен, нежели пенообразные материалы. Преимущество войлока состоит также в том, что, применяя вставные стержни и осуществляя процесс спекания, можно получить внутри пористой структуры продольные артерии, обеспечивая низкое гидравлическое сопротивление фитиля.

Вязаные керамические волокна имеют поры очень малых размеров и химически инертны по отношению к большинству рабочих жидкостей. Ввиду отсутствия жесткости изделий из керамических волокон, особенно при насыщении их жидкостью, целесообразно использовать их в сочетании с сетчатым фитилем из проволоки, который будет обеспечивать форму и требуемое местоположение войлочного фитиля. Керамические структуры могут быть получены в виде многослойных втулок, т. е. в виде, идеально подходящем для непосредственного применения в качестве фитиля. Имеется широкий подбор этих втулок разного диаметра. В случае несовпадения диаметра втулки с требуемым размером она может быть слегка растянута с целью уменьшения диаметра.

4-1-3. Очистка корпуса и фитиля. Все используемые в тепловых трубах материалы должны быть чистыми. Очистка преследует две цели. Во-первых, она обеспечивает смачивание материалов рабочей жидкостью, а во-вторых, она гарантирует отсутствие посторонних веществ, которые могут ослабить капиллярный напор или стать причиной несовместимости используемых основных материалов.

Технология очистки зависит от применяемых материалов. Она определяется также технологией изготовления и установки фитиля и типом используемой рабочей жидкости, поскольку одни рабочие жидкости смачивают материалы более эффективно, нежели другие. В том слу-

чае, когда соединение корпуса с фитилем осуществляется путем спекания или диффузионной сварки, проводимых в атмосфере инертного газа или под вакуумом, элементы тепловой трубы очищаются в процессе сварки, и если отрезок времени между окончанием этого процесса и окончательной сборкой невелик, то дополнительная очистка может не потребоваться.

Если рабочая жидкость является хорошим растворителем, как, например, ацетон, то никаких специальных мер для обеспечения хорошей смачиваемости не требуется, достаточно травления кислотой с последующей отмывкой рабочей жидкостью. Однако технология очистки сильно усложняется с ростом рабочей температуры, т. е. при работе в диапазоне температур, связанном с использованием в качестве рабочих жидкостей жидких металлов.

Кислотное травление для нержавеющей стали включает в себя погружение элементов трубы в раствор, содержащий 50% азотной кислоты и 5% плавиковой кислоты. За этим следует отмывка обессоленной водой. Если изделия предназначены для работы с водой, то фитиль должен быть после этого помещен в электрическую печь и нагреваться в атмосфере воздуха в течение 1 ч до 400°C. При этой температуре следы масла либо улетучиваются, либо разлагаются, а получающийся в итоге углерод выгорает с образованием двуокиси углерода. Поскольку на поверхности нержавеющей стали должно образоваться окисное покрытие, то в печи не нужно создавать защитную атмосферу из инертного газа.

Никель может быть подвергнут аналогичной обработке, разница состоит лишь в том, что травление производится 25%-ным раствором азотной кислоты. Травление меди нужно осуществлять смесью фосфорной и азотной кислот (1:1).

Степень произведенной очистки трудно оценить количественно, и лучший способ контроля — поместить каплю обессоленной воды на очищенную поверхность. Если капля тут же растечется по поверхности или полностью поглотится фитилем, то это означает, что хорошее смачивание достигнуто и качество проведенной очистки хорошее.

При очистке фитилей из нержавеющей стали для длинных тепловых труб иногда возникают проблемы,

вызванные отсутствием печей требуемых размеров, в которые можно было бы сразу поместить весь фитиль. В этом случае может быть применена очистка пламенем, фитиль перед его установкой в корпус трубы пропускается через пламя бунзеновской горелки.

Хорошим дополнительным средством ускорения процесса очистки может служить ультразвук, однако для низкотемпературных тепловых труб такая очистка не обязательна. При осуществлении указанного процесса или любого другого, связанного с погружением элементов тепловой трубы в жидкую среду для удаления загрязнений, грязь остается плавать на поверхности ванны и ее следует снять перед выемкой из ванны очищаемых элементов. Если этого не сделать, очищенные элементы при прохождении через поверхность жидкости могут вновь загрязниться. В качестве вспомогательного средства очистки металлических элементов может использоваться электрополировка.

Керамические материалы для фитилей в общем случае поступают от изготовителя хорошо очищенными благодаря технологии их производства и поэтому не нуждаются в обработке при условии, что их хранение и сборочные операции осуществляются в условиях, обеспечивающих чистоту изделия.

Важно, особенно при использовании воды в качестве рабочей жидкости, исключить контакт элементов тепловой трубы с поверхностью кожи рук. Незначительные жировые отложения, появляющиеся при этом, могут препятствовать смачиванию, и поэтому в процессе монтажа рекомендуется пользоваться хирургическими перчатками.

Смачивание может быть облегчено добавкой в рабочую жидкость специальных агентов [4-1], однако при этом могут возникнуть трудности, связанные с совместимостью материалов, кроме того, эти добавляемые вещества могут повлиять на значения поверхностного натяжения рабочей жидкости.

4-1-4. Дегазация материала. Если фитиль или корпус поместить в вакуум, то начнут выделяться газы, особенно в том случае, когда элементы тепловой трубы изготовлены из металла. Если эти газы до герметизации тепловой трубы не удалить, то они могут собраться в паровом пространстве трубы. Процесс удаления газов известен как дегазация.

Если дегазация не является необходимой для низкотемпературных тепловых труб, предназначенных для работы не в очень жестких условиях, то высокотемпературные (более 400°C) устройства и трубы для космоса должны быть предварительно дегазированы на стенде до их заполнения рабочей жидкостью и герметизации.

Продолжительность дегазации сильно зависит от температуры, резко возрастая с увеличением последней. Дегазацию элементов после их очистки целесообразно производить под вакуумом при температуре сушки примерно 400°C. После сушки система должна быть провентилирована сухим азотом. Продолжительность дегазации зависит от рабочего давления паров в тепловой трубе.

Если тепловая труба перед дегазацией была частично собрана и торцевые колпаки установлены, то необходимо убедиться в отсутствии течей в сварных швах и т. п. элементах, поскольку в противном случае дегазация не может быть осуществлена. В общем случае анализ откачиваемых газов при наличии течи покажет очень большое содержание воздуха, тогда как при нормальной дегазации должно обнаруживаться значительное количество водяных паров. Для анализа этих газов может быть использован масс-спектрометр. Обнаружение утечки описано в § 4-1-6.

Дегазационные характеристики металлов могут существенно отличаться. Например, удаление водорода из нержавеющей стали осуществляется значительно проще, чем из алюминия. Алюминий особенно трудно дегазировать, и он может содержать сравнительно большое количество неконденсирующихся газов. В одном из экспериментов [4-2] было установлено, что газ быстро улетучился из алюминия при нагреве его до температуры красного свечения под вакуумом. В 200 г металла содержалось 89,5 см³ газа, причем 88 см³ составлял водород, а остаток приходился на двуокись углерода. Полагают, что алюминиевая поверхность может удерживать водяные пары даже при нагреве до 500°C или при сушке в атмосфере пятиоксида фосфора. Последнее обстоятельство особенно важно потому, что несовместимость воды с алюминием общеизвестна (см. § 4-1-12 для высокотемпературных тепловых труб).

4-1-5. Установка фитиля и торцевых колпаков. Очистку элементов тепловой трубы лучше всего производить

до установки фитиля в корпус, поскольку в этом случае фитиль легче испытать на смачиваемость. Дегазацию можно осуществить перед сборкой или в момент нахождения тепловой трубы на стенде для заполнения (см. § 4-1-8).

В тех случаях, когда фитиль выполнен заодно с корпусом тепловой трубы, как это имеет место в случае применения канавок, спеченных порошков и сеток, соединенных с корпусом диффузионной сваркой, удобно осуществлять очистку тепловой трубы промывкой ее соответствующей жидкостью до приварки торцевых колпаков.

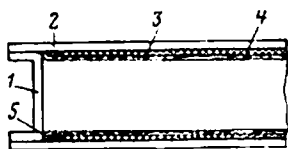


Рис. 4-6. Уплотнение крупной сетки концах тепловой трубы.

1 — торцевая крышка; 2 — стенка; 3 — сетка 200 меш; 4 — сетка 100 меш; 5 — сетка 200 меш загнута под сетку 100 меш.

Если применяется сетчатый фитиль и слои сетки не соединены между собой или со стенкой тепловой трубы, в частности, если используется только мелкая сетка, то для прижатия фитиля к стенке должна быть вставлена спиральная пружина. Это легко осуществить, плотно навив пружину на сердечник, вставляемый в трубу с надлежащим зазором. После этого пружина высвобождается, а сердечник удаляется, в результате пружина будет обеспечивать прижатие фитиля к стенке. Характерный шаг навивки пружин составляет примерно 1 см. (В тех случаях, когда могут использоваться сетки двух типоразмеров, например два слоя сетки 400 меш и один слой сетки 100 меш, поверхность раздела жидкость-пар всегда должна приходиться на тонкую сетку, т. е. на сетку 400 меш, чтобы обеспечить максимальное значение капиллярного поднятия. Поэтому рекомендуется обмотать сетку 400 меш вокруг концов сетки 100 меш, как это показано на рис. 4-6.)

Соединение торцевых колпаков с корпусом обычно осуществляется аргонодуговой сваркой. Эта операция не требует специальной камеры. Могут свариваться медь, нержавеющая сталь и алюминий. Преимущество сварки перед пайкой мягким или твердым припоем состоит в том, что она не требует применения флюсов, поэтому внутренняя поверхность очищенных труб не подвергается возможному загрязнению. Однако защита аргоном при наличии

высоких температур, характерных для процесса сварки, может оказаться недостаточной и привести к местному окислению материала, а образовавшиеся на внутренней стенке трубы окислы могут оказаться трудноудаляемыми. Сборка в камере, заполненной аргоном, позволит избежать этих трудностей, но она будет более дорогостоящей. Применение теплопоглощающей обмазки, такой как Rocol HS, наносимой на поверхность тепловой трубы по соседству с местом сварки, может существенно снизить количество образующихся окислов.

При сборке тепловой трубы может также использоваться электроннолучевая сварка, однако в большинстве случаев подобное удорожание технологии неоправдано.

4-1-6. Определение утечек. Все имеющиеся в тепловой трубе сварные швы должны быть проверены на герметичность. При необходимости контроля качества выполненных работ необходимо тщательно исследовать плотность швов, поскольку небольшие течи, которые сначала могут не сказаться на характеристиках тепловой трубы, в последующем, через месяцы работы устройства, дадут о себе знать.

Лучшим способом проверки тепловой трубы на плотность является масспектрометрия. Масс-спектрометр может быть использован для откачки тепловой трубы с помощью диффузионного насоса до глубокого вакуума, превосходящего 10^{-5} мм рт. ст. (10^{-3} Па). Сварной шов после этого испытывается на плотность путем обдува его небольшой струей гелия. Если течь имеется, то датчик масс-спектрометра почувствует присутствие гелия, как только тот проникнет в тепловую трубу. После испытания сварных швов и приблизительного определения места неплотности, если оно имеется, для тщательного обследования подозреваемой зоны может быть использована игла для инъекций, подсоединенная к гелиевой магистрали. Таким образом область течи может быть определена очень точно и может потребоваться лишь незначительная повторная проварка шва в целях его уплотнения.

Естественно, при наличии очень большой неплотности насос масспектрометра не сможет обеспечить получение вакуума глубже 10^{-2} или 10^{-3} мм рт. ст. (1-0,1 Па). Подобная неплотность может возникнуть при значительной пористости шва, обусловленной применением заг-

рязненного аргона или неподходящей присадочной проволоки.

Если течь очень мала, то присасываемые водяные пары могут сконденсироваться и закупорить, хотя бы временно, течь. Поэтому важно во время проверки на плотность держать тепловую трубу сухой.

4-1-7. Подготовка рабочей жидкости. Используемая в тепловой трубе рабочая жидкость должна обрабатываться с той же тщательностью, что и фитиль, и корпус тепловой трубы.

Получаемая рабочая жидкость должна быть максимально чистой, при этом может потребоваться ее дополнительная очистка. Подобная очистка достигается дистилляцией. В случае низкотемпературных рабочих жидкостей, таких как ацетон, метиловый спирт и аммиак, присутствие воды может вызвать химическую несовместимость материалов, поэтому содержание воды следует свести к минимуму.

Некоторые большие выдержки из работ по органическим растворителям [4-3] позволяют пролить свет на проблему содержания воды в ацетоне: «Ацетон значительно более химически активен, чем это обычно предполагается. Такие умеренно реакционноспособные материалы, как алюминиевый гель, могут вызвать альдольную конденсацию до диацетонового спирта, заметное количество которого образуется за короткий промежуток времени, если ацетон подогрет. Небольшое количество кислоты вещества, даже столь слабо реакционноспособного, как безводный сульфат магния, может вызвать конденсацию ацетона».

«Кремниевые и алюминиевые гели увеличивали содержание воды в ацетоне преимущественно из-за альдольной конденсации с последующей дегидратацией. При однократном пропускании ацетона над алюминиевым порошком содержание воды в нем возросло с 0,24 до 0,46%. Все другие опробованные обезвоживающие агенты вызывали некоторую конденсацию».

Аммиак обладает большим химическим сродством с водой. Было установлено, что для получения удовлетворительных характеристик необходимо, чтобы содержание воды было меньше десяти частиц на миллион. Фирма ICI может поставить аммиак высокой чистоты, причем его контакт с воздухом во время заполнения трубы должен быть исключен.

Описанные выше примеры являют собой крайние ситуации, однако они служат хорошей иллюстрацией проблем, которые могут возникнуть при ослаблении требований к операциям, сопровождающим заправку жидкости в тепловую трубу.

Методика, которая рекомендуется для всех рабочих жидкостей, используемых при температурах до 200°C, представляет собой вымораживание — дегазацию. В результате этой операции из рабочей жидкости удаляются все растворенные газы. Если же газы не будут удалены, они смогут выделиться во время эксплуатации тепловой трубы и скопиться в зоне конденсации. Операция вымораживания — дегазация, которая может быть осуществлена в контуре для заполнения тепловой трубы, весьма проста (см. § 4-1-8). Жидкость подается в сосуд, являющийся элементом контура и непосредственно соединяющийся с вакуумной системой, и замораживается в нем в результате охлаждающего действия жидкого азота, заливаемого в окружающий этот сосуд кожух. После того как рабочая жидкость полностью замерзнет, сосуд вакуумируется, затем отключается от остального контура, а жидкий азот сливается из кожуха. После этого рабочая жидкость плавится, а растворенные газы выделяются в виде пузырьков из жидкости. Затем рабочая жидкость снова замораживается и процесс повторяется. После трех или четырех циклов замораживания все газы будут удалены. После этого жидкость будет достаточно чистой для заполнения тепловой трубы.

4-1-8. Заполнение тепловой трубы. На рис. 4-7 приведена схема контура, который может быть использован для заполнения тепловой трубы. Одновременно этот контур может быть использован для осуществления следующих операций:

- 1) дегазации рабочей жидкости;
- 2) измерения количества рабочей жидкости;
- 3) дегазации тепловой трубы;
- 4) заполнения тепловой трубы инертным газом.

Перед тем как перейти к описанию контура и его работы, целесообразно привести общие требования, предъявляемые к проектируемым вакуумным контурам. Материалами, используемыми для сооружения контура, в общем случае являются либо стекло, либо нержавеющая сталь. Преимущество стекла в том, что капли рабочей жидкости, остающиеся в тех или иных местах контура, могут быть визуально обнаружены и их испарение под вакуумом может также контролироваться. Нержавеющая сталь обладает несомненным преимуществом в прочностных характеристиках, и должна использоваться во всех высокотемпературных контурах наряду с высокотемпературными вентилями, типа сильфонных вентилях Ноке, не имеющими «карманов», в которых может остаться жидкость. Описанный

ниже контур предназначен для операций с низкотемпературными тепловыми трубами.

Предпочтительно, чтобы вентили, установленные в вакуумной системе, имели уплотнения в виде кольцевых прокладок. Также важно, чтобы вакуумные линии не были слишком протяженными и слишком малого диаметра, поскольку оба указанных фактора могут существенно увеличить длительность откачки.

Вакуумные насосы могут быть диффузионного или же сорбционного типов; в последнем содержится вещество, поглощающее молекулы отсасываемого газа. Этот насос может создать вакуум до 10^{-4} мм рт. ст. (10^{-2} Па). При проектировании системы заполнения, безусловно, целесообразно обратиться за консультацией к специалистам в области глубокого вакуума.

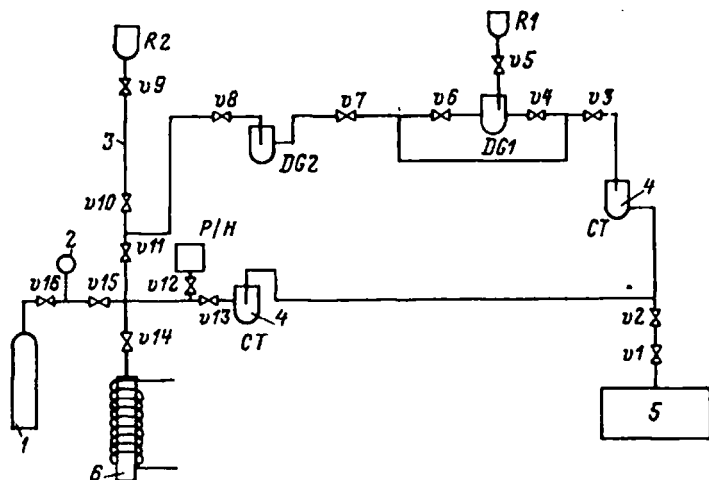


Рис. 4-7. Схема контура заполнения тепловой трубы.

1 — инертный газ; 2 — вакуумметр Пирани; 3 — бюретка; 4 — холодная ловушка; 5 — насос; 6 — тепловая труба.

Описание системы заполнения. В описанной ниже системе заполнения тепловой трубы большая часть линий выполнена из стекла. Обход контура начнем с правой стороны. Установленный насос — сорбционного типа. Он помещен в полистироловый кожух, заливаемый жидким азотом при необходимости получения глубокого вакуума. Над насосом установлены два вентиля, причем нижний предназначен для отключения насоса по достижении насыщения поглотителя. (Насос может быть регенерирован прокалкой сорбента в печи в течение нескольких часов.) Над вентилем V_2 находится переходник металл — стекло, остальные линии изготовлены из стекла. От этой точки отходят две линии, в каждую из которых врезана холодная ловушка в виде небольшой стеклянной колбы. Эти ловушки используются для улавливания «проскоков» жидкости и любых загрязнений, которые могут отрицательно повлиять на работу других частей контура или привести к «загрязнению» насоса. Холодные ловушки получают размещением каждой колбы внутри сосуда с жидким азотом.

Верхняя линия содержит элементы, необходимые для подачи рабочей жидкости в контур, и две колбы $DG1$ и $DG2$, предназначенные для дегазации жидкости. Участок контура, используемый для подачи дополнительной рабочей жидкости, может быть отключен, после того как достаточное количество жидкости поступило в колбу $DG2$ и, следовательно, в мерительную бюретку между вентилями $V9$ и $V10$.

Нижняя ветвь включает вакуумметр Пирани, используемый для измерения вакуума в контуре. Подлежащая заполнению тепловая труба подсоединяется к контуру ниже бюретки. Предусматривается возможность электрического обогрева тепловой трубы с целью обеспечения дегазации устройства непосредственно в контуре (см. также § 4-1-4). Вентиль $V15$ обеспечивает дополнительное подсоединение к контуру, которое используется для подачи инертного газа в трубы переменной проводимости.

Технология заполнения тепловой трубы. Используя описанный выше контур, заполнение тепловой трубы медь — этиловый спирт можно осуществить, например, при следующей последовательности операций.

1. Закрыть все вентили, соединяющие контур с атмосферой ($V5$, $V9$, $V14$, $V15$).
2. Подсоединить сорбционный насос к контуру через вентили $V1$ и $V2$, каждый из которых должен быть закрыт.
3. Залить в кожух насоса жидкий азот, также залить жидкий азот в холодные ловушки (если в первоначальный период обнаружится, что жидкий азот быстро испаряется, то необходимо систематически доливать азот в кожух и ловушки).
4. Спустя примерно 30 мин открыть вентили $V1$ и $V2$, начав вакуумирование контура. Откачивать контур примерно до 10^{-2} мм рт. ст. (1 Па). Необходимое для этого время зависит от производительности насоса, объема и чистоты контура.
5. Закрыть вентили $V4$ и $V6$, заполнить резервуар $R1$ этиловым спиртом.
6. Медленно приоткрыть вентиль $V5$, обеспечив доступ этилового спирта в колбу $DG1$. Закрыть $V5$ и выморозить этиловый спирт окружающим $DG1$ жидким азотом.
7. После вымораживания всего этилового спирта открыть $V4$ и осуществить откачку. Закрыть $V4$ и позволить этиловому спирту расплавиться. По мере плавления спирта любые газы, содержащиеся в нем, выделяются в виде пузырьков. После этого снова заморозить спирт.
8. Открыть вентиль $V4$ и удалить газ.
9. Закрыть $V4$, $V3$ и $V8$, открыть $V6$ и $V7$. Надеть кожух с жидким азотом на колбу $DG2$.
10. Расплавить этиловый спирт в $DG1$ и перепустить его в $DG2$. (Эту операцию лучше всего выполнить путем аккуратного прогрева замороженной массы с помощью фена для сушки волос. Необходимо также прогреть трубопроводы между $DG1$ и $DG2$ и далее до $V4$.)
11. Процесс дегазации в $DG2$ может повторяться до тех пор, пока не прекратится выделение газовых пузырьков из спирта. Вентили $V4$ и $V6$ теперь снова закрываются, отсекая $DG1$.
12. Закрыть $V7$ и $V11$, открыть $V8$ и $V10$ и перепустить этиловый спирт в бюретку, помня указания п. 10. Закрыть $V10$ и $V8$ и

открыть VII. Нижняя ветвь и верхняя ветвь до V8 теперь соединены с высоким вакуумом [$\sim 5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (0,67 Па)].

Подлежащая заполнению тепловая труба теперь должна быть подсоединена к контуру. В том случае, если тепловая труба не имеет своего собственного вентиля, ее трубка для заполнения может быть подсоединена к контуру ниже вентиля V14 с помощью толсто-стенного резинового шланга. Если же этот шланг подвержен воздействию рабочей жидкости, можно использовать гибкое трубчатое соединение из другого материала или же применить обжатие металла либо осуществить соединение с кольцевой прокладкой. Если используются мягкие трубные материалы, то соединения в целях их герметизации должны быть покрыты вакуумной замазкой на кремниевой основе.

Откачка тепловой трубы может быть осуществлена в результате открытия вентиля V14. После откачки, которая должна занять всего несколько минут в зависимости от диаметра заполняющей трубы, может быть осуществлена дегазация тепловой трубы нагревом. Для этой цели вокруг трубы намотан электрический нагреватель. Тепло подводится до тех пор, пока показания вакуумметра Пирани не возвратятся к своим исходным максимальным значениям до начала обогрева. (Следует подчеркнуть, что давление, фиксируемое датчиком Пирани, будет меньше, чем в тепловой трубе. Разница зависит от диаметров тепловой и заполняющей трубы. С этой точки зрения желательно иметь заполняющую трубу большого диаметра.)

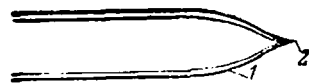


Рис. 4-8. Герметизация тепловой трубы обжимом и холодной сваркой.

1 — медная труба; 2 — обжим и холодная сварка.

в наиболее холодную зону, легко переместится к основанию тепловой трубы. Затем открывается вентиль V10 и точно требуемое для заполнения трубы количество жидкости (в большинстве случаев необходимое для насыщения фитиля количество жидкости плюс небольшой избыток) стекает в тепловую трубу. Если жидкость будет застревать в корпусах вентилях или в других элементах контура, то, применяя местный обогрев этих зон вентилятором, можно испарить эту жидкость, которая затем сконденсируется и замерзнет в тепловой трубе. Дальнейший процесс дегазации вымораживанием можно производить в тепловой трубе. Газ из жидкости выделяется в процессе ее таяния при закрытом вентиле V14, затем жидкость вновь замораживается, и после открытия V14 выделившийся газ откачивается. После этого тепловая труба может быть герметизирована.

- 4-1-9. Герметизация тепловой трубы. Если только тепловая труба не будет использоваться в качестве демонстрационного устройства или для проведения ресурсных испытаний (в этих случаях с одного конца трубы может быть оставлен вентиль), заполняющая труба должна быть окончательно герметизирована. Если заполняющая

труба медная, то герметизация обычно осуществляется обжимным устройством, который сминает трубу и обеспечивает ее холодную сварку. Типичный пережим, полученный подобным путем, показан на рис. 4-8. Необходимое сжатие осуществляется вручную.

Если в качестве материала заполняющей трубы используется нержавеющая сталь или алюминий, более

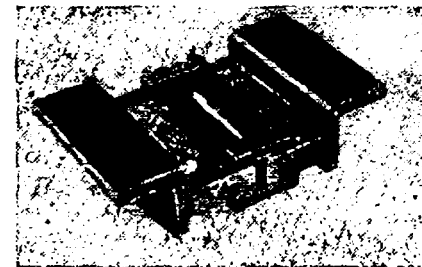


Рис. 4-9. Прижимы для обжатия трубы перед сваркой.

совершенной технологией является обжатие с последующей аргонодуговой сваркой. После достижения желаемого вакуума и ввода рабочей жидкости два прижима шириной 12,7 мм прикладываются к трубе для откачки,

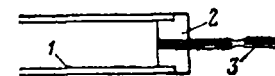


Рис. 4-10. Сплюснутый и заваренный аргонодуговой сваркой конец. 1 — медная труба; 2 — стальная торцевая крышка; 3 — труба для откачки. Пережим и точечная сварка.

и последняя сплющивается. После этого тепловая труба помещается между другими двумя прижимами шириной 6,35 мм, устанавливаемыми в нижней части 12,7 мм сплюснутой секции. К трубе откачки прикладывается уонлие, достаточное для образования временного вакуумного уплотнения, а оставшаяся 6,35 мм верхняя часть отрезается, и одновременно срез оплавляется аргонодуговой горелкой. Прижимы шириной 6,35 мм, устанавливаемые в стандартные тиски, приведены на рис. 4-9. Результаты описанной выше операции показаны на рис.

4-9. Результаты описанной выше операции показаны на рис. 4-10.

После герметизации заполняющая труба может быть защищена колпачком, имеющим тот же наружный диаметр, что и корпус тепловой трубы. Колпак может быть заполнен мягким припоем, смолой с металлическим наполнителем или любым другим подходящим материалом.

4-1-10. Сводка операций по сборке трубы. Ниже дается перечень описанных выше операций, которые должны быть выполнены в процессе сборки тепловой трубы:

- 1) выбор материала корпуса;
- 2) выбор материала и формы фитиля;
- 3) изготовление фитиля, торцевых колпаков и т. п.;
- 4) очистка фитиля, корпуса и торцевых колпаков;
- 5) дегазация металлических элементов;
- 6) установка фитиля в корпус и его крепление;
- 7) приварка торцевых колпаков;
- 8) контроль герметичности сварочных швов;
- 9) выбор рабочей жидкости;
- 10) очистка рабочей жидкости (в случае необходимости);
- 11) дегазация рабочей жидкости;
- 12) откачка и заполнение тепловой трубы;
- 13) герметизация тепловой трубы.

Может оказаться удобным приваривать свободный торцевой колпак до установки фитиля. В случае использования спеченного с корпусом или сваренного диффузионной сваркой фитиля дегазация может производиться после установки фитиля в корпус.

4-1-11. Тепловые трубы, содержащие инертный газ. Тепловые трубы переменной проводимости (см. гл. 6) в дополнение к обычной рабочей жидкости содержат инертный газ, поэтому процесс заполнения должен включать в себя дополнительные операции. Дополнительные элементы заполняющего контура обеспечивающие измерение подаваемого в трубу газа показаны на рис. 4-7.

Рабочая жидкость подается в тепловую трубу обычным путем, после этого система отключается, а линия, соединяющая тепловую трубу с баллоном с инертным газом, открывается, и инертный газ подается в тепловую трубу. По мере увеличения количества инертного газа в трубе давление в ней растет, что фиксируется датчиком давления на газовой линии. Значение давления, соответствующее требуемому количеству газа в трубе, может

быть рассчитано с учетом парциального давления паров рабочей жидкости в тепловой трубе (расчет массы см. в гл. 6). По достижении этого давления тепловая труба герметизируется обычным способом.

4-1-12. Жидкометаллические тепловые трубы. Ранние работы по тепловым трубам были связаны с их применением в термоионных генераторах; они описываются в гл. 7. Применительно к этой сфере приложений имеются два представляющих интерес температурных интервала: область рабочих температур эмиттера 1400—2000°C и рабочих температур коллектора 500—900°C. В обоих температурных диапазонах в качестве рабочей жидкости требуется применять жидкий металл. В настоящее время имеется значительный объем информации по технологии изготовления и характеристикам таких тепловых труб. Позднее тепловые трубы, работающие в более низком температурном диапазоне, были использованы для подвода теплоты от источника к батарее цилиндров в двигателе Стирлинга и в промышленных печах. Было установлено, что в этом диапазоне температур может быть использован широкий набор сочетаний материалов, была исследована их совместимость и детально проанализирован ряд других проблем. Щелочные металлы используются в сочетании с такими конструкционными материалами, как нержавеющая сталь, никель, ниобийциркониевые сплавы и другие тугоплавкие материалы. В работе [4-4] приводятся данные о более чем 20 000 ч ресурсе таких труб. Гровер [4-5] описывает тепловую трубу малой массы, изготовленную из бериллия с калием в качестве рабочей жидкости. Бериллий вставлялся между фитилем и стенкой трубы, оба указанных элемента были выполнены из сплава ниобийцирконий (1% Zr). Данная труба работала при 750°C в течение 1200 ч без каких-либо признаков коррозии, образования сплавов или переноса массы.

Создание тепловых труб для высокотемпературного диапазона оказалось более сложной задачей, однако определенный успех в этом направлении был достигнут, и полученный опыт описывается ниже.

В настоящее время жидкометаллические тепловые трубы, обладающие очень хорошими характеристиками и большим ресурсом, могут создаваться достаточно уверенно, однако они дороги. Следовательно, прежде чем начинать проектирование жидкометаллической тепловой

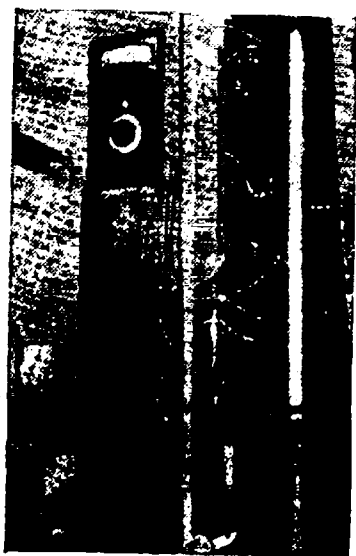


Рис. 4-11. Натриевая тепловая труба, работающая в Университете Ридинга.

трубы, важно решить, для каких задач требуется тепловая труба. Зачастую случается, что нет необходимости в работе трубы против силы тяжести, т. е. вполне можно обойтись термосифоном. Это сильно снижает требования к чистоте рабочей жидкости. С другой стороны, если требуется небольшой срок работы с малой нагрузкой, можно применить более дешевую технологию с меньшими затратами времени. Если можно использовать газовое регулирование, то это позволит применить более простые способы герметизации, например пережим.

Жидкометаллические тепловые трубы для диапазона температур 500—1100°C. Для этого диапазона температур наиболее подходящими рабочими жидкостями являются калий и натрий, а в качестве материала корпуса выбирается нержавеющая сталь.

На рис. 4-11 показана типичная тепловая труба натрия — нержавеющая сталь, работающая в университете «Ридинг» и описанная Райсом и Дженнингсом [4-6]. Конструкция и изготовление этой трубы будут описаны для того, чтобы проиллюстрировать используемые технологические процессы.

Корпус тепловой трубы изготавливается в виде трубы из нержавеющей стали типа 321 (EN 58 В) диаметром 25 и толщиной стенки 0,9 мм. Капиллярная структура образована двумя слоями нержавеющей сетки с ячейками 100 меш. Диаметр проволоки составляет 0,1016 мм, а размер отверстия — 0,152 мм. Труба имеет длину 0,9 м. Фитиль приваривался точечной сваркой с помощью специально созданного для этих целей приспособления.

Очистка и заполнение. Использовалась следующая технология очистки:

- 1) промывка водой и моющими растворами;
- 2) отмывка обессоленной водой;
- 3) погружение на 30 мин в 50-процентный водный раствор соляной кислоты;
- 4) отмывка обессоленной водой;
- 5) погружение на 20 мин в ультразвуковую ванну, наполненную ацетоном, и повторение операции с чистой жидкостью. После завершения сварки и пайки указанная процедура повторялась. Повсеместно использовалась аргонодуговая сварка. После проверки качества сварных швов труба дегазировалась при температуре 900°C и давлении 10^{-5} мм рт. ст. (примерно 10^{-3} Па) в течение нескольких часов для того, чтобы удалить газы и пары.

Для заполнения трубы жидким металлом могут использоваться различные методы:

1. Дистилляция, иногда с использованием губчатого геттера для удаления кислорода.
2. Раздавливание ампулы, находящейся в заполняющей трубе, путем сжатия последней.

Дистилляция необходима при обеспечении длительного ресурса тепловой трубы.

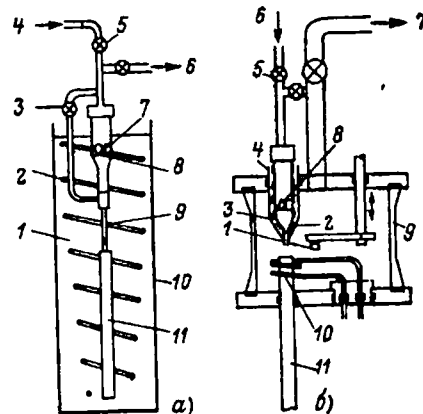


Рис. 4-12. Заполнение жидкометаллической трубы.

а — метод 1: 1 — ванна с расплавленным парафином; 2 — нагреватель; 3 — вентиль байпаса; 4 — гелий; 5 — вентили; 6 — вакуум; 7 — исходный натрий (чистота 99,9%); 8 — стеклянный фильтр; 9 — пережимная секция; 10 — стеклянный сосуд; 11 — тепловая труба; *б* — метод 2: 1 — пробка; 2 — фильтр; 3 — нагреватель; 4 — ванна с жидким парафином; 5 — вентили; 6 — гелий; 7 — вакуум; 8 — исходный натрий (чистота 99,9%); 9 — стекло; 10 — виток индукционного нагревателя; 11 — тепловая труба.

Метод, который был применен для описываемой трубы, следующий:

Технический натрий с чистотой 99,9% помещался в трубу со стеклянным фильтром, подсоединенную к заполняющей трубе. Наличие байпаса на фильтре позволяло осуществить предварительное вакуумирование и дегазацию трубы. Трубка для заполнения и тепловая труба погружались в ванну с подогретым жидким парафином

для того, чтобы поднять температуру натрия выше его точки плавления. Схема установки показана на рис. 4-12.

После этого вентиль байпаса закрывается и расплавленный натрий под давлением газообразного гелия передавливался через фильтр в тепловую трубу.

Герметизация. В университете «Ридинг» использовался изображенный на рис. 4-13 метод герметизации тепловых труб с помощью пробок. Был смонтирован специальный контур, позволявший осуществить дегазацию

тепловой трубы с открытым концом и ее заполнения натрием через описанную выше схему фильтрации. По завершении процесса заполнения торцевая уплотняющая пробка, перемещаемая в камере заполнения с помощью манипулятора, вставлялась в предназначенное ей место в тепловой трубе. Пробка затем нагревалась индукционными токами, образуя проваренное вакуумное уплотнение. Установка и последовательность операции иллюстрируются рис. 4-12. Торцевая уплотняющая пробка окончательно проваривается аргонодуговой сваркой после выемки трубы из установки для заполнения.

Работа трубы. Обнаружилось, что смачивание фитиля не наступает немедленно, для этого необходимо было прогреть тепловую трубу подобно термосифону в течение нескольких часов при температуре 650°C. Нагрев осуществлялся индукционным нагревателем на участке

длиной 10 см. На рис. 4-14 приведены профили температур вдоль оси натриевой тепловой трубы для двух значений подводимой мощности 1,2 и 1,4 кВт. Перед герметизацией тепловая труба заполнялась гелием до давления 20 мм рт. ст. (2,7 кПа) для защиты пережима медной трубки буферным газом. Видно, что длина газового демпфера, как это можно было ожидать, приблизительно обратно пропорциональна подводимой мощности.

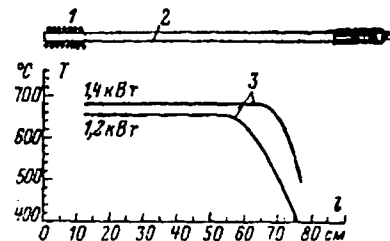


Рис. 4-14. Профили температур вдоль оси натриевой тепловой трубы.

1 — индукционный нагреватель; 2 — тепловая труба; 3 — граница зоны, занятой инертным газом.

Запуск тепловой трубы после ее выдерживания при заданном уровне температур выявил интересные моменты. При работе тепловой трубы в режиме термосифона, т. е. когда она была установлена вертикально и обогревалась в нижней своей части, наблюдались сильные колебания температуры, связанные с кипением в зоне испарения. Подобная картина отсутствовала при расположении зоны обогрева в верхней части тепловой трубы.

Опыт создания жидкометаллических труб описывается также в работах других авторов. Винцем с соавторами [4-7] описан интересный способ создания жестких тонкостенных тепловых труб с фитилями. В предыдущих работах, в которых использовались сетчатые фитили, соединение фитиля с корпусом осуществлялось точечной сваркой, вдавливанием в стенку при протяжке пуансона, а также вдавливанием с последующим спеканием. Первый способ не обеспечивает равномерного соединения фитиля со стенкой; методы, связанные с протяжкой, не могут быть применены для очень тонких сеток (тоньше 200—400 меш) из-за их повреждения в процессе протяжки. Метод Винца состоит в спиральной навивке проволоочной ленты на оправку и спекании ее после установки в корпус «ввинчиванием», т. е. протяжкой с одновременным вращением. Металлическая ткань 508 × 3600 меш была успешно применена для изготовления фитиля с хорошо воспроизводимым диаметром пор в $10 \text{ мкм} \pm 10\%$; доля свободной для испарения поверхности составила 15—20%.

Изготовленные протяжкой канавки могут быть использованы как сами по себе, так и в сочетании с фитилями из металлической ткани.

Особо высокотемпературные (температура более 1200°C) жидкометаллические тепловые трубы. Вблизи нижней границы данного температурного диапазона предпочтительной рабочей жидкостью является литий, а в качестве материала стенки может служить сплав ниобий-цирконий или тантал. При более высоких температурах рабочей жидкостью может быть серебро с корпусом из вольфрама или рения. Данные по совместимости этих веществ и по результатам ресурсных испытаний тепловых труб, выполненных из этих материалов, приведены в гл. 3. Подобного рода тугоплавкие материалы обладают высокой степенью сродства к кислороду, поэтому они должны работать в вакууме или в атмосфере инертного газа.

Буссе и его сотрудники выполнили большую программу работ по тепловым трубам на литии и серебре. Методы их очистки, заполнения, изготовления и герметизации описаны в [4-8] и [4-9].

Очистка с помощью геттеров. Окислы представляют большую опасность для жидкометаллических тепловых труб, поскольку они будут откладываться в зоне испарения. Растворенный кислород особо опасен для литиевых тепловых труб, так как он обуславливает коррозию материала корпуса трубы. Кислород может появиться как в результате недостаточной очистки рабочей жидкости тепловой трубы, так и выделиться из материала корпуса и фитиля. Ряд авторов описывают опыт применения геттеров. Например, Буссе [4-9] использовал циркониевую губку, через которую он проводил подачу лития в тепловую трубу. В качестве геттера может также использоваться кальций.

4-1-13. Вопросы безопасности. Хотя применение той или иной конкретной конструкции тепловой трубы и условия ее эксплуатации не таят в себе специфических опасностей, имеется ряд аспектов, которые следует иметь в виду.

При использовании жидких металлов должны соблюдаться известные меры по безопасному обращению с ними. Высокая степень химического сродства щелочных металлов с водой выдвигает ряд проблем. В одной лаборатории возник пожар при утечке натрия из повреж-

денной нержавеющей трубы и одновременном разрыве водяного трубопровода.

Ртуть является высокотоксичным веществом, причем плотность ее насыщенных паров при атмосферном давлении во много раз превышает максимально допустимые нормы.

Одной из опасностей, на которую временами не обращают внимания, является возможность существенного повышения давления в тепловой трубе, если ее температура случайно поднимется выше расчетного значения. В этом плане особо опасна вода. Критическое давление воды 22 МПа при температуре 374°C. Так, в одном случае тепловая труба из меди с водой в качестве рабочей жидкости была герметизирована пробкой с последующей ее пропайкой мягким припоем, и эта труба была случайно перегрета. В результате 30-сантиметровая тепловая труба и пробка вырвались из тисков, развив очень большую скорость, что едва не привело к довольно печальным последствиям. Крайне необходимо, чтобы в подобного рода трубах имелось предохранительное устройство типа уплотнения пережимом.

Криогенные тепловые трубы, использующие такие рабочие жидкости, как жидкий воздух, должны иметь специальные предохранительные устройства для срабатывания давления или должны выполняться достаточно прочными, поскольку их температура в период простоя часто поднимается до комнатной. Критическое давление азота равно 3,4 МПа.

4-2. МЕТОДИКИ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Вопрос о проведении ресурсных испытаний и определении характеристик тепловых труб, особенно в тех случаях, когда требуется выполнить их ускоренными темпами, является одним из наиболее существенных факторов, определяющих выбор типа тепловой трубы.

Ресурсные испытания тепловых труб обычно связывают прежде всего с выявлением возможной несовместимости рабочей жидкости с материалами корпуса и фитиля. В предельном случае ресурсные испытания заключаются в определении длительных характеристик тепловой трубы в условиях, соответствующих реальным. Даже если это и сделано, все же трудно в тех случаях, когда труба работает против силы тяжести, ускорить ресурсные испытания, скажем, путем увеличения тепло-

вого потока в испарителе. Указанный прием может одновременно привести к аварийной ситуации, так как труба будет работать в условиях, существенно превышающих расчетные. Поэтому подобные испытания следует производить в режиме возврата конденсата самотеком, т. е. под действием силы тяжести.

При разработке полной программы ресурсных испытаний должны быть учтены многие факторы. Ниже дается сравнительный анализ различных методик.

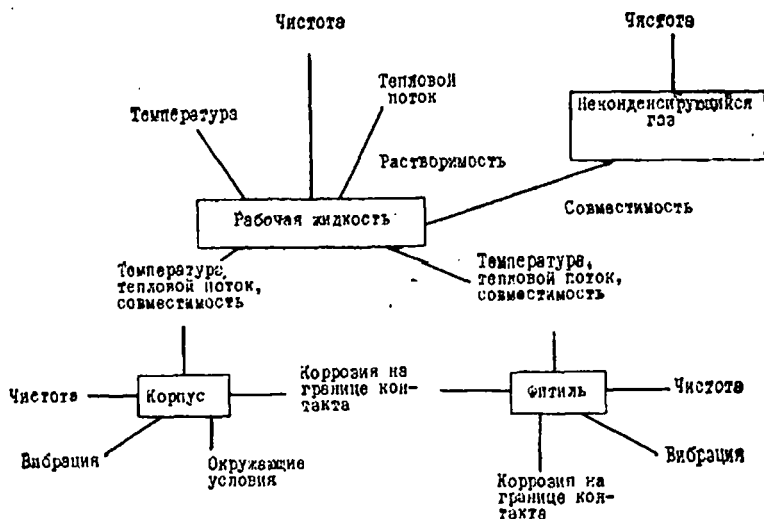


Рис. 4-15. Факторы, учитываемые при проведении ресурсных испытаний тепловой трубы.

4-2-1. Факторы, которые следует учитывать при проведении ресурсных испытаний. Число параметров, которые следует учитывать при анализе методики ресурсных испытаний конкретного сочетания рабочей жидкости — фитиля — материал корпуса, очень велико, и потребовалось бы провести испытания большого числа тепловых труб, чтобы получить исчерпывающую информацию.

Некоторые из этих факторов можно не рассматривать, поскольку данные по ряду частных вопросов уже имеются. Однако следует подчеркнуть одно важное обстоятельство — контроль качества технологических операций и методика сборки неизбежно меняются при их осуществлении в различных лабораториях. Эти отклоне-

ния могут проявиться в отличии полученных данных по совместимости материалов и по характеристикам тепловой трубы.

Факторы, которые требуется учитывать при ресурсных испытаниях тепловой трубы, представлены на рис. 4-15. (Неконденсирующийся газ включен для того, чтобы рассматриваемый набор параметров охватывал также тепловые трубы переменной проводимости.)

Рабочая жидкость. При выборе рабочей жидкости должны учитываться следующие факторы, каждый из которых может быть исследован экспериментально:

1. Чистота. Рабочая жидкость должна быть свободна от растворенных газов и других жидкостей, например воды. Для очистки рабочей жидкости могут использоваться такие методы, как дегазация вымораживанием и дистилляция. Важно также обеспечить надлежащие условия при последующих операциях с рабочей жидкостью с тем, чтобы она вновь не загрязнилась.

2. Температура. Некоторые рабочие жидкости чувствительны к рабочей температуре. Если подобная ситуация ожидается, то следует определить безопасный диапазон рабочих температур.

3. Тепловой поток. При высоких тепловых потоках в фитиле может возникнуть интенсивное кипение, которое может повести к эрозии.

4. Совместимость с материалами стенки и фитиля. Рабочая жидкость не должна реагировать с материалами корпуса и фитиля. Химическая реакция в свою очередь также может быть функцией температуры и теплового потока, причем вероятность реакции в общем случае возрастает с увеличением температуры или теплового потока.

5. Неконденсирующийся газ. В тепловых трубах переменной проводимости, в которых неконденсирующийся газ используется в контакте с рабочей жидкостью, выбор рабочей жидкости и газа должен основываться на их совместимости, а также на растворимости газа в рабочей жидкости. (В общем случае эти данные имеются в литературе, однако в специфических артериальных конструкциях степень влияния растворимости может стать очевидной только после соответствующих экспериментов).

Корпус тепловой трубы. В дополнение к уже упомянутому взаимодействию с рабочей жидкостью на поверх-

ности стенки, имеется ряд специфических требований, предъявляемых условиями длительной эксплуатации собственно к корпусу и связанным с ним элементам конструкции, таким как торцевые колпаки. Условия накладываются также и на взаимодействие с фитилем на поверхности контакта. Для того чтобы тепловая труба работала, необходимо принять во внимание следующее:

1. Вибрация и ускорение. Конструкция должна обладать способностью противостоять какой бы то ни было возможной вибрации и ускорениям, и любые способы, предназначенные для определения этих свойств, должны органически входить в любую программу ресурсных испытаний.

2. Гарантия химсостава материала. Выбор материала внешнего корпуса должен базироваться на его химическом анализе или, по крайней мере, на известном сертификате на используемый металл.

3. Внешние условия. Внешние условия могут влиять на свойства материала корпуса или вызвать коррозию наружной поверхности. Этот вопрос тоже должен быть включен в программу ресурсных испытаний, если ожидается какое-либо воздействие внешней среды.

4. Коррозия на границе контакта корпуса с фитилем. Возможно, что на поверхности контакта с фитилем будут протекать определенные коррозионные процессы, эта ситуация особенно вероятна при использовании разнородных металлов и в присутствии рабочей жидкости.

Фитиль. Фитиль тепловой трубы, в принципе, подвержен тем же отрицательным воздействиям, что и корпус тепловой трубы, за исключением действия внешней окружающей среды. Более опасной, однако, является вибрация. Фитиль сам по себе в большинстве случаев содержит много поверхностей, контактирующих с корпусом, где может происходить коррозия.

4-2-2. Методики ресурсных испытаний. Имеется много способов проведения ресурсных испытаний. Все они преследуют одну и ту же цель — показать, что можно с высокой степенью уверенности рассчитывать на эффективную работу тепловой трубы до конца ее расчетного срока службы.

Наиболее сложной частью любой программы ресурсных испытаний является интерпретация полученных результатов и их экстраполяция с целью расчета длительности работы тепловой трубы. (Одна из методик, исполь-

зованная для экстраполяции результатов измерений интенсивности газовой выделенности, описана в § 4-2-3.)

Основным недостатком проведения ресурсных испытаний с одним конкретным сочетанием материалов, независимо от того, являются ли эти испытания ускоренными или они проводятся при номинальной нагрузке, является следующее обстоятельство. Если какая-то реакция действительно происходит, то данных для того, чтобы выявить основные причины этой реакции, обычно недостаточно. Например, при некоторых ресурсных испытаниях, проведенных в IRD, в результате разложения рабочей жидкости (ацетона) образовывался диацетоновый спирт. Однако в то время без проведения дальнейших длительных испытаний не было достаточных оснований утверждать, что этот процесс является функцией рабочей температуры, поскольку аналогичные устройства, работающие при несколько отличных температурах пара, еще должны были испытываться. Возможно что даже обширные программы ресурсных испытаний никогда не смогут дать исчерпывающий ответ на некоторые вопросы. Каждое очередное исследование выявит новые аспекты.

Влияние теплового потока. Действительное влияние теплового потока на срок службы тепловой трубы и ее характеристики может быть исследовано только при работе устройств в режиме возврата конденсата самотеком, так как только в этом случае к тепловой трубе может быть подведен тепловой поток, намного превышающий расчетное значение.

Проведя опыты с рядом тепловых труб, работающих при одной и той же температуре пара, но при разных тепловых потоках в испарителе, можно исследовать внутреннюю поверхность испарителя на коррозию и т. п.

Если исследуется опытный образец тепловой трубы, то эксперименты по определению ее характеристик могут быть осуществлены через определенные промежутки времени в течение ресурсных испытаний.

Влияние температуры. Рабочая температура тепловой трубы может влиять как на совместимость, так и на состав рабочей жидкости.

Как показано в § 4-2-3, влияние температуры на выделение неконденсирующего газа может быть в определенных случаях рассчитано для длительного периода, исходя из данных значительно более краткосрочных испытаний опытных образцов тепловых труб.

Совместимость. Кроме анализа влияния теплового потока и температуры на рабочую жидкость саму по себе, необходимо исследовать совместимость рабочей жидкости с материалом корпуса и фитиля.

Здесь следует обратить внимание на реакции между материалами, которые могут изменить структуру поверхностей внутри тепловой трубы, привести к выделению неконденсирующегося газа или образованию инородных веществ в виде отложений, которые могут сказаться на работе испарителя. Безусловно, все три вышеупомянутых процесса могут протекать одновременно, но с различной интенсивностью, что может сделать анализ результатов существенно более сложным.

Опыты на совместимость с тепловыми трубами, работающими горизонтально или под наклоном к горизонту против действия силы тяжести, могут проводиться в расчетных условиях. Для получения достоверных результатов эти эксперименты должны длиться годами, однако, если, скажем, трехлетние испытания покажут удовлетворительную совместимость используемых материалов, то определенные заключения могут быть сделаны относительно их вероятного поведения в течение более длительного срока. Могут также проводиться ускоренные испытания на совместимость, сопровождающиеся периодическими опытами в реальном режиме работы тепловой трубы с целью проверки ее расчетных характеристик.

Другие факторы. На сроке службы тепловой трубы могут сказаться технология сборки и очистки. Важно убедиться, что испытываемые на ресурс тепловые трубы являются абсолютно типичными с точки зрения рассматриваемой технологии сборки. Используемая рабочая жидкость должна, безусловно, иметь максимальную чистоту.

Другой характерной особенностью ресурсных испытаний является желательность установки на трубах вентилей с тем, чтобы иметь возможность отбора проб газа из трубы без приостановки ее работы. Недостатком наличия вентилей является появление дополнительной возможности для нового рода несовместимости, в данном случае между рабочей жидкостью и материалом вентиля. Однако эта возможность может быть устранена применением современных вентилей из нержавеющей стали.

При испытании устройств в режиме работы тепловой трубы корпус вентиля может оказаться заполненным

рабочей жидкостью, удаление которой может быть сопряжено с определенными трудностями. Это обстоятельство нужно иметь в виду и при проведении подобного рода испытаний, так как в противном случае фитиль или артериальная система могут оказаться осушенными.

4-2-3. Расчет длительных характеристик по данным ускоренных ресурсных испытаний. Одним из основных недостатков ускоренных ресурсных испытаний была неопределенность, связанная с экстраполяцией полученных результатов для оценки характеристик трубы в условиях достаточно длительной работы. Бейкер [4-10] весьма успешно обобщил данные по генерации водорода в нержавеющей тепловых трубах, используя кривую Аррениуса, это обобщение было использовано для расчета выделения неконденсирующегося газа в течение 20-летнего периода.

Расчеты базировались на данных двухлетних ресурсных испытаний при различных рабочих температурах, при этом периодически измерялась масса выделяющегося водорода. Опыты проводились при температурах 37,7; 93,2 и 148,8°C. При каждой температуре были испытаны пять тепловых труб.

Для обработки этих полученных в лаборатории реактивных двигателей результатов Бейкер использовал кривую Аррениуса следующим образом.

Модель Аррениуса применима для описания процессов активации, включая коррозию, окисление и диффузию: Если кривая Аррениуса справедлива, то график зависимости логарифма скорости реакции F от обратной абсолютной температуры будет представлять прямую линию.

Скорость реакции определяется уравнением

$$F = \text{const} \cdot \exp(-A/kT), \quad (4-1)$$

где A — энергия активации; k — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T — абсолютная температура.

Бейкер описал процесс газовой выделении в тепловой трубе формулой

$$\dot{m}(t, T) = f(t) \cdot F(T), \quad (4-2)$$

где \dot{m} — расход выделяющегося газа; t — время; $F(T)$ определяется уравнением (4-1).

Начертив для каждой трубы график зависимости массы выделившегося водорода от времени для различных уровней температуры, можно с помощью этих гра-

фиков получить универсальную кривую, описывающую массу выделившегося водорода в виде функции времени, умноженной на масштабный коэффициент, которая в логарифмических координатах будет прямой линией. Наконец, если начертить график зависимости поправочных коэффициентов от обратной абсолютной температуры для исследованных температур, то наклон получившейся кривой даст значение энергии активации A в уравнении (4-1).

Масса выделившегося водорода при любом значении рабочей температуры может быть определена с помощью соответствующего поправочного коэффициента. Бейкер пришел к выводу, что тепловая труба нержавеющей сталь — вода может работать в течение многих лет при температурах на уровне 16°C , однако при $93,5^{\circ}\text{C}$ газовыделение будет чрезмерным.

Эта модель, по-видимому, может быть применена к другим сочетаниям материал стенки — фитиль — рабочая жидкость, при этом единственным отрицательным моментом будет большое число испытываемых комбинаций, необходимых для осуществления точных расчетов. Минимальное число составляет около дюжины, причем опытные результаты были получены для трех значений температур и четыре тепловые трубы испытывались при каждой температуре.

Недавно выполненное исследование было посвящено выделению водорода в тепловых трубах из никеля с водой. Андерсон [4-11] использовал модель коррозии, в основе которой лежала методика Бейкера. Она позволила ему рассчитать поведение тепловых труб в течение длительных периодов, основываясь на данных ускоренных ресурсных испытаний.

Он утверждает, что из теории окисления следует, что рост пассивирующей пленки происходит по параболической зависимости от времени и по экспоненциальной от температуры.

Андерсон приводит следующие значения энергии активации A : нержавеющая сталь 304 — вода — $8,29 \times 10^{-20}$ Дж, никель — вода — $10,3 \cdot 10^{-20}$ Дж и подтверждает модель Бейкера.

4-2-4. Программа ресурсных испытаний. Программа ресурсных испытаний должна обеспечивать получение детальных данных по влиянию температуры, теплового потока и технологии сборки на собственно рабочую

жидкость и ее совместимость с материалом стенки и фитиля.

Различные виды ресурсных испытаний были обсуждены в § 4-2-2, теперь остается сформулировать программу, обеспечивающую получение данных, достаточных для точного расчета срока службы тепловой трубы конкретной конструкции.

Для каждого вида ресурсных испытаний может быть определен порядок очередности (он обозначается числами от единицы до трех в порядке убывания значимости). Он приведен в табл. 4-1. В этой же таблице приводится минимальное число комбинаций, необходимых для соответствующих испытаний. Таблица не требует комментария.

Таблица 4-1

Приоритеты отдельных видов ресурсных испытаний тепловых труб

Приоритет	Минимальное число испытываемых труб	Число труб с фитилями	Назначение испытаний
1	—	—	Чистота материала
1	—	—	Чистота рабочей жидкости
1	—	—	Герметизация корпуса
1	—	—	Дегазация
2	2	2	Возврат конденсата самотеком при максимальной расчетной температуре
1	4 при каждой температуре	Все	Возврат конденсата самотеком в диапазоне температур до максимальной расчетной (включая температуру, обеспечивающую соединение фитиля со стенкой)
3	2	2	Возврат конденсата самотеком при максимальном расчетном тепловом потоке
2	2	1	Работа в режиме тепловой трубы; промежуточные опыты между испытаниями с возвратом конденсата самотеком
1	2	1	Работа в режиме тепловой трубы; длительные непрерывные испытания по определению характеристик
1*	2	0	Работа в режиме тепловой трубы; испытание на вибрацию с промежуточным определением характеристик
1	2	2	Растворимость газа в рабочей жидкости и его влияние на работоспособность артерии (труба переменной проводимости)

* В случае необходимости.

Программа должна дать информацию, достаточную для уверенного расчета на базе кривой Аррениуса характеристик тепловой трубы в условиях длительной работы, а также определить максимально допустимую рабочую температуру, исходя из условия стойкости рабочей жидкости. Программа включает в себя большое число опытов, однако затраты на подобного рода исследования должны быть оправданы необходимостью обеспечения удовлетворительных характеристик тепловой трубы в течение всего срока службы в тех приложениях, где надежность имеет первостепенное значение.

4-3. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Измерение характеристик тепловых труб осуществляется сравнительно просто и требует для своей реализации обычное оборудование, имеющееся в любой лаборатории, изучающей теплопередачу.

Измерения необходимы для того, чтобы показать, что тепловая труба отвечает заданным при ее проектировании техническим условиям. Описанные в гл. 2 ограничения передающей способности трубы, образующие своего рода огибающую рабочего диапазона параметров, также могут быть исследованы как и степень изотермичности трубы. Значительное число факторов может быть изучено в результате стендовых испытаний, включая ориентацию в поле силы тяжести, рабочую температуру, тепловой поток в испарителе, вибрацию и ускорение, вопросы запуска.

4-3-1. Схема установки для измерения характеристик. На рис. 4-16 показана типичная схема измерительного стенда. Стенд включает в себя следующие основные элементы:

- 1) нагреватель испарителя;
- 2) ваттметр для измерения подводимой мощности;
- 3) трансформатор, регулирующий подводимую мощность;
- 4) конденсатор для отвода теплоты;
- 5) устройство для измерения расхода и подогрева охлаждающей жидкости;
- 6) устройство для изменения угла наклона тепловой трубы;
- 7) термопары для измерения температур и соответствующую систему записи их показаний;
- 8) тепловую изоляцию,

Нагреватели могут иметь различную форму, поскольку подводимая теплота постоянна, а термическое сопротивление между нагревателем и испарителем мало. Они могут быть выполнены в виде стержневых нагревательных элементов, установленных в пазах медного блока, который плотно надевается на тепловую трубу, либо в виде изолированной проволоки, непосредственно намотанной на тепловую трубу. Во многих случаях удобно использовать индукционный нагрев, при этом конденсатор играет роль калориметра. Тепловые потери излучением и конвекцией в окружающую среду следует свести к минимуму путем установки тепловой изоляции на наружной поверхности нагревателя. В электрической цепи нагревателя имеются ваттметр высокого класса и трансформатор, регулирующий подводимую мощность. Если ориентация трубы может меняться, то для удобства целесообразно соединить нагреватель с регулирующей аппаратурой длинными проводами.

Эффективным способом измерения мощности, подводимой к тепловой трубе, работающей в диапазоне температур, характерных для большинства органических рабочих жидкостей и воды, является установка конденсирующей рубашки, через которую пропускается охлаждающая жидкость. Во многих случаях можно использовать воду. Количество теплоты, переданное воде, может быть определено по известным значениям разности температур воды на входе и выходе и ее расхода. Температура жидкости, протекающей через рубашку, может меняться с целью изменения рабочей температуры парового пространства тепловой трубы. Если требуется определить характеристики тепловой трубы при температуре пара около 0°C, можно использовать криостат.

Испытания криогенных тепловых труб следует проводить в вакуумной камере. Это предотвращает теплообмен конвекцией, а холодная стенка может быть ис-

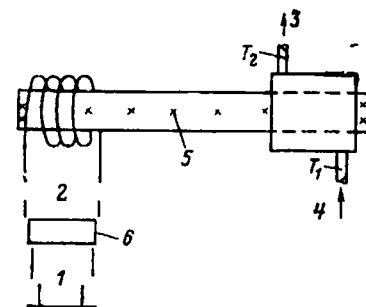


Рис. 4-16. Стенд для измерения характеристик тепловой трубы.

1 — регулирующий автотрансформатор; 2 — нагреватель; 3 — выход воды; 4 — вход воды; 5 — термопара; 6 — ваттметр.

пользована для поддержания температуры окружающей среды на требуемом уровне. В качестве защиты от подвода теплоты излучением сама тепловая труба, трубопроводы охлаждающей жидкости и холодная стенка должны быть покрыты суперизоляцией. Если тепловая труба закреплена таким образом, что все точки крепления оказываются при одной и той же температуре (холодная стенка и сток теплоты), то можно считать, что вся подводимая к испарителю теплота будет переноситься тепловой трубой так, как если бы никакого дополнительного сброса теплоты в окружающую среду не существовало. Дополнительную информацию по испытаниям криогенных тепловых труб можно найти в [4-12] и [4-13].

Важным фактором во многих практических приложениях является влияние ориентации трубы на ее характеристики. Теплопередающая способность тепловой трубы, работающей в условиях, когда испаритель расположен ниже конденсатора (термосифон или возврат конденсата самотеком), может оказаться на порядок выше, чем у трубы, использующей фитиль для возврата жидкости в испаритель из расположенного ниже его конденсатора. Во многих случаях фитиль может оказаться недееспособным даже при незначительном наклоне тепловой трубы к горизонту, когда испаритель оказывается расположенным всего лишь на несколько сантиметров выше конденсатора. Естественно, что выбор фитиля частично базируется на ожидаемой ориентации тепловой трубы в конкретных условиях.

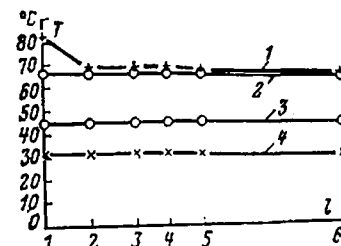
При испытаниях следует обеспечить возможность поворота тепловой трубы на 180° при работающих испарителе и конденсаторе. Угол наклона тепловой трубы должен быть точно зафиксирован и измерен. При испытаниях тепловых труб для спутников для проверки работы тепловой трубы может потребоваться наклон всего лишь в 0,5 см на длине 1 м, т. е. требуется очень точная нивелировка контура.

Измерение профилей температуры вдоль тепловой трубы обычно осуществляется с помощью термопар, установленных на наружной стенке трубы. Если же требуется провести измерения температур во время переходных процессов, например при запуске, кризисе теплоотдачи в испарителе или в тепловых трубах переменной проводимости, то необходимо использовать автомати-

ческую электронную систему сбора данных. При исследовании стационарных режимов вполне достаточно цифрового вольтметра с подсоединением термопар через переключатель или многоточечного самописца.

4-3-2. Методика эксперимента. После того как на тепловой трубе установлены необходимые датчики и сама она помещена в экспериментальный контур, можно

Рис. 4-17. Типичные экспериментальные профили температуры вдоль оси тепловой трубы.
По оси абсцисс цифрами отмечены термопары, расположенные по длине тепловой трубы.
1 — 44,7 Вт; 2 — 42,8 Вт; 3 — 29,8 Вт; 4 — 15,6 Вт.



начинать прокачку воды через охлаждаемую рубашку конденсатора и подачу теплоты к испарителю. Желательно, чтобы количество подведенной теплоты увеличивалось ступенями до достижения расчетной мощности, причем между ступенями следует делать временные интервалы, необходимые для достижения тепловой трубой стационарного температурного режима. По достижении стационарного состояния следует записать подводимую и отводимую мощности (т. е. расход охлаждающей жидкости через конденсатор и ΔT) и профиль температур вдоль трубы.

Если достигаются изображенные на рис. 4-17 профили температур, то тепловая труба работает удовлетворительно. Однако могут возникнуть различного рода аварийные ситуации, причем все они обнаруживаются по изменению температуры в испарителе или конденсаторе.

Наиболее часто встречающейся неполадкой является кризис теплоотдачи в испарителе, вызываемый подводом к нему слишком большой мощности. Он связан с неспособностью фитиля подать в испаритель достаточное количество жидкости и характеризуется резким ростом температуры в испарителе по сравнению с остальными участками тепловой трубы. Для состояния начала кризиса типична верхняя кривая на рис. 4-17.

После того как кризис произошел, необходимо чтобы фитиль вновь насытился жидкостью, это лучше всего осуществить путем полного отключения подводимой мощности. Как только перепад температур вдоль трубы снизится до 1—2°C, подвод мощности можно возобновить. Если ожидается работа тепловой трубы против силы тяжести или в условиях невесомости, то фитиль обязательно должен быть насыщен рабочей жидкостью вновь, т. е. он должен снова оказаться смоченным и заполненным рабочей жидкостью по всей его длине. Если предвидится работа в невесомости, восстановление нормальной передающей способности после кризиса должно быть продемонстрировано работой трубы в наклонном положении. В других случаях восстановление передающей способности трубы можно производить, используя силу тяжести.

Другой аварийной ситуацией, проявляющейся в увеличении температуры испарителя, является его перегрев, происходящий при повышенных рабочих температурах. Как указывалось в гл. 2 и 3, для каждой рабочей жидкости существует свой рабочий диапазон температур, определяемый критерием M , причем оптимум достигается при определенной температуре и при превышении ее значение критерия качества уменьшается. Это означает, что жидкость может передавать меньшее количество теплоты. Таким образом, температура в испарителе становится больше, чем в остальной части трубы. В общем случае температура испарителя в указанной ситуации не возрастает столь резко, как в случае кризиса теплоотдачи, но оба эти явления трудно различить.

Изменения температуры в зоне конденсации могут указывать на нарушение механизма теплоотдачи на этом участке или на ухудшение характеристик тепловой трубы. Резкое снижение температуры на конце трубы за охлаждающей рубашкой, происходящее при больших мощностях, может быть связано с накоплением рабочей жидкости в этой области и изоляцией стенки с образованием холодного пятна. Это явление может быть вызвано «отключением охлаждения» [4-14]. Подобное «отключение охлаждения» не обязательно приводит к полному нарушению работы трубы, однако суммарный ΔT существенно увеличится, а эффективная длина тепловой трубы уменьшится.

Аналогичное падение температур ниже по потоку от охлаждающей рубашки конденсатора может произойти в тепловых трубах малого диаметра (менее 6 мм), в которых количество заправляемой в трубу жидкости больше требуемого для полного насыщения фитиля. Пар стремится отогнать избыток жидкости в более холодный конец тепловой трубы, где из-за малого объема парового пространства небольшой избыток жидкости образует длинную холодную зону. Это может произойти при малых нагрузках, но если тепловая труба содержит вентиль, то количество рабочей жидкости может быть отрегулировано. Другой способ решения этой проблемы состоит в использовании емкости для избыточной жидкости, которая будет работать подобно губке, но поры этой «губки» должны быть достаточно большими, чтобы предотвратить отсос жидкости из фитиля. Этот способ применяется в тепловых трубах, работающих в космосе, подобная емкость может быть расположена в любой удобной точке тепловой трубы.

Неполадки могут быть связаны с несовместимостью материалов, обычно в виде появления иеконденсирующихся газов, которые накапливаются в зоне конденсации. В отличие от случая накопления жидкости объем газа зависит от рабочей температуры пара и его присутствие проще определить.

Неудовлетворительная очистка фитиля может воспрепятствовать смачиванию. При частичном смачивании пережог трубы произойдет достаточно быстро после приложения даже незначительной мощности.

4-3-3. Оценочные испытания медной тепловой трубы и ее типичная характеристика. *Передающие способности трубы.* Для определения температурных профилей и максимальной теплопередающей способности медная тепловая труба с водой в качестве рабочей жидкости была изготовлена и испытана.

Конструктивные характеристики трубы следующие:

Длина, мм	320
Наружный диаметр, мм	12,75
Внутренний диаметр, мм	10,75
Материал корпуса	Медь
Вид фитиля	4 слоя сетки 400 мш
Диаметр проволоки фитиля, мм	0,025
Эффективный радиус поры, мм	0,031
Расчетная пористость	0,686
Материал фитиля	Нержавеющая сталь
Длина фиксирующей пружины, мм	320
Шаг, мм	7
Диаметр проволоки, мм	1
Материал проволоки	Нержавеющая сталь

Рабочая жидкость	Вода (удельное сопротивление 10^6 Ом)
Количество жидкости, мл	2
Торцевые соединения	Медь
Количество измерительных термомпар	7

Методика испытаний. Испаритель помещался в нагревательный блок длиной 100 мм, а зона конденсации окружалась водяной рубашкой длиной 150 мм. Вся система покрывалась изоляцией.

Первые опыты были проведены с тепловой трубой, работавшей в вертикальном положении так, что сила тяжести способствовала возврату конденсата. Подавалась мощность, и по достижении стационарного состояния записывались показания термомпар на стенке трубы и подогрев охлаждающей воды в водяной рубашке, а также ее расход.

Мощность нагревателей увеличивалась маленькими ступенями, и показания приборов при установившихся режимах записывались до тех пор, пока не было замечено наступление кризиса теплоотдачи в испарителе. (Кризис фиксировался по резкому увеличению э. д. с. термомпар в испарителе по сравнению с показаниями остальных термомпар.)

Подобная процедура была осуществлена при различных значениях температуры пара и разной ориентации тепловой трубы относительно направления силы тяжести.

Результаты эксперимента. Типичные результаты проведенного эксперимента показаны на рис. 4-17. На нем представлены профили температур вдоль трубы при расположении испарителя на 10 мм выше конденсатора.

В приведенной ниже таблице представлены значения мощности, передаваемой тепловой трубой в зависимости от рабочей температуры пара:

Температура пара, °С	Подводимая мощность, Вт
84	17
121	30,5
162,5	54
197	89

Труба была изготовлена из меди, с наружным диаметром 9,5 мм и длиной 30 см. Труба имела составной фитиль из сеток 100 и 400 меш, с высотой поднятия жидкости (превышение уровня расположения испарителя над конденсатором), 18 см. Рабочей жидкостью вновь служила вода. При горизонтальном расположении трубы измеренная мощность составила 165 Вт (при возврате конденсата с помощью силы тяжести 290 Вт).

Специальные виды тепловых труб

В вышеизложенных разделах книги кратко упоминались некоторые виды тепловых труб, отличные от устройства простой цилиндрической формы. В данной главе целесообразно более подробно остановиться на их характеристиках, описать модификации труб, например тепловые трубы с электроосмотической перекачкой жидкости. Эти модификации улучшают характеристики труб и расширяют сферы их приложения. Трубы переменной проводимости рассматриваются в гл. 6.

В настоящей главе будут описаны трубы следующих типов:

- 1) плоские;
- 2) гибкие;
- 3) осмотические;
- 4) с электроосмотической и электрогидродинамической перекачкой жидкости;
- 5) антигравитационный термосифон;
- 6) диоды и переключатели;
- 7) вращающиеся.

5-1. ПЛОСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

Плоская тепловая труба, примером которой служит изображенная на рис. 5-1 конструкция, работает точно так же, как и обычная тепловая труба трубчатого типа. Основное различие между ними состоит в форме фитиля, которая обеспечивает распределение жидкости по всей развитой поверхности плоской трубы.

Основной чертой плоских труб является наличие протяженной поверхности с очень малым градиентом температур поперек нее. Эта почти изотермическая поверхность может быть использована для выравнивания

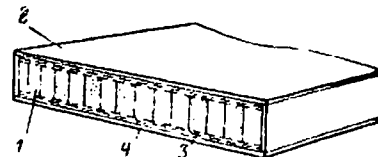


Рис. 5-1. Внутреннее устройство плоской тепловой трубы.
1 — спеченные металлические фитили; 2 — горячая пластина; 3 — сетчатый фитиль; 4 — испаритель.

температуры и устранения горячих пятен, связанных с наличием нагревателей. С ее помощью можно также создать очень эффективный радиатор для охлаждения размещенных на нем устройств. Кроме того, располагая ряд тепловыделяющих элементов на плоской тепловой трубе, можно обеспечить работу этих элементов при одинаковых температурах благодаря тому, что паровой объем тепловой трубы будет иметь фиксированную однородную температуру.

Конструкция фитиля плоской трубы, показанная на рис. 5-1, рассчитана на обеспечение возврата рабочей жидкости и ее распределение по поверхности верхней пластины в случае работы устройства против силы тяжести. Если тепловой поток подводится снизу, то спеченные вставки в фитиле могут быть исключены, необходимо только обеспечить должное распределение жидкости по нижней пластине.

Возможно расположение зоны испарения вдоль одного конца пластины, где испаритель будет занимать ограниченное пространство. Образующийся в испарителе пар может поступать в протяженную плоскую паровую камеру, и тем самым теплота окажется распределенной по плоской поверхности большего размера. Magconi Company (MC) разработала плоскую тепловую трубу с эластичной стенкой из тонкой полистироловой пленки (см. гл. 7). Эластичная стенка тепловой трубы во время работы прижимается к охлаждаемым элементам давлением пара и повторяет при этом форму лицевых поверхностей охлаждаемых элементов, обеспечивая хороший тепловой контакт. Существенным преимуществом подобной конструкции является то, что она исключает необходимость нарушения целостности корпуса самой тепловой трубы для устройства в нем болтовых соединений или электрических выводов.

5-2. ГИБКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

За последние три года не было опубликовано значительных работ по гибким тепловым трубам. Однако ряд фирм-изготовителей США предлагают подобные устройства. Их применение, безусловно, желательнее в тех случаях, когда имеет место вибрация источника теплоты или возникают трудности при соединении источника теплоты с жесткой тепловой трубой.

Гибкость тепловой трубы может быть обеспечена путем вставки в корпус трубы между испарителем и конденсатором гибкого элемента типа силфона или просто изготовлением трубы из какого-либо пластичного материала с включением обычных металлических секций для подвода и отвода теплоты.

Блисс с сотрудниками [5-1], RCA [5-2], а также Истмен [5-3] опубликовали данные по разработкам гибких тепловых труб с полыми силфонами в качестве гибкого элемента.

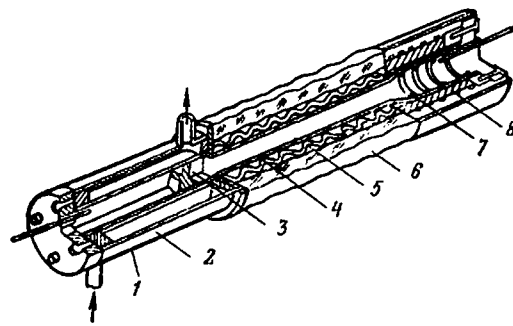


Рис. 5-2. Конструкция гибкой тепловой трубы.

1 — подвод охлаждающей жидкости; 2 — конденсатор; 3 — внутренние ребра жесткости; 4 — фитиль; 5 — гибкий силфон; 6 — изоляция; 7 — прижимное устройство фитиля; 8 — нагреватель.

Разработанная Блиссом система показана на рис. 5-2. Она была испытана в неподвижном состоянии при различных углах изгиба, достигающих до 90°, а также при отсутствии изгиба, но при наличии поперечных и продольных вибраций. Характеристики тепловой трубы действительно изменились из-за изгиба и вибраций. Эти изменения состоят в увеличении максимальной теплопередающей способности в горизонтальном положении и в снижении перекачивающей способности фитиля при работе против силы тяжести. Было также обнаружено, что существуют критические продольные вибрации, по достижении которых тепловая труба полностью перестает функционировать. При подводимой мощности 500 Вт это состояние достигалось при частоте 10 Гц.

Для обеспечения гибкости фитиля RCA предложила и запатентовала сетчатый фитиль, сплетенный таким образом, что все проволоки шли в направлениях, пер-

пендикулярных продольной оси тепловой трубы. Как указывается, это обеспечивает большую гибкость тепловой трубы и предотвращает механическое повреждение фитиля. RCA успешно применяла тепловые трубы малой мощности с описанными выше сетками.

Выпускаемые промышленностью гибкие тепловые трубы обычно имеют пластмассовую вставку между испарителем и конденсатором.

5-3. ТРУБЫ С ПРОСТОЙ ОСМОТИЧЕСКОЙ ПЕРЕКАЧКОЙ КОНДЕНСАТА

Использование осмоса без приложения какого-либо электрического или магнитного поля было предложено рядом исследователей. Эта идея является содержанием, по крайней мере, двух патентов (патенты США 3561525 и 3677337, авторы Бэр и Майдоло соответственно, см. приложения 6).

Оба автора, исходя из существования ограничений передающей способности тепловой трубы по капиллярному напору, утверждают, что осмос способствует существенному улучшению характеристик тепловой трубы в условиях нулевой гравитации и, возможно, в еще большей степени при работе против силы тяжести. Описанное Бэром устройство представлено на рис. 5-3. Оно по существу аналогично конструкции, приведенной в более позднем патенте Майдоло.

Изображенная на рисунке конструкция состоит, как и любая тепловая труба, из герметичного корпуса, в котором находятся только рабочая жидкость и ее пар.

Участки испарения и конденсации могут быть расположены так же, как и в системах с капиллярной подачей жидкости. Канал, по которому осуществляется возврат жидкости, отделен от центрального парового потока полупроницаемой мембраной, изготовленной, например, из целлюлозы. Хотя на рисунке это не показано, Бэр также предполагает использовать обычный фитиль для созда-

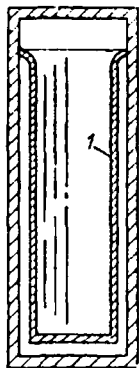


Рис. 5-3. Тепловая труба с осмотической перекачкой рабочей жидкости, изобретенная Бэром.

1 — полупроницаемая мембрана.

ния дополнительного напора за счет капиллярных сил. Одной из предложенных рабочих жидкостей был раствор сахара в воде. Для предотвращения загрязнения растворителя в паровом канале, а также жидкости за мембраной последняя уплотнялась в верхней части корпуса. При подводе теплоты к рабочему раствору происходит испарение чистого растворителя, который поступает в паровой канал, перетекает в более холодную зону корпуса, где конденсируется на полупроницаемой мембране. Чистый жидкий растворитель затем проходит через мембрану в раствор, находящийся в канале возврата жидкости. При прохождении растворителя через мембрану возникает осмотическое давление, значительно более высокое, нежели капиллярный напор, создаваемый поверхностным натяжением. Осмотическое давление значительно превышает гидростатический напор раствора в канале возврата жидкости, что обуславливает течение раствора к испарителю.

Майдоло утверждает, что передающая способность по жидкости такого устройства на порядок выше, чем в системе, использующей капиллярное поднятие. В качестве подходящих химических веществ для образования рабочих растворов он указывает растворимые в воде хлориды, хлораты и бораты.

5-4. ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПЕРЕКАЧКА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

Одним из успешно использовавшихся способов увеличения перекачивающей способности тепловых труб является применение электрокинетики, которая включает в себя электроосмотическую перекачку [5-4, 5-5].

Под электрокинетикой понимаются электрические явления, сопровождающие относительное движение жидкости и твердых тел. Эти явления обычно связывают с разностью потенциалов на границе раздела любых двух фаз, участвующих в относительном перемещении. Так, если образующаяся разность потенциалов является следствием существования на поверхности раздела электрически заряженных слоев противоположного знака, то приложением электрического поля можно обеспечить перемещение одного слоя относительно другого. Если твердая фаза неподвижна, как, например, фитиль тепловой трубы, а жидкость может пере-

мещаться, то в этих условиях под воздействием приложенного поля жидкость будет стремиться течь через поры фитиля. Это движение известно как электроосмос.

Электроосмотическая тепловая труба была спроектирована и испытана Абу-Ромия в Бруклинском политехническом институте в Нью-Йорке [5-6]. Ее размеры такие же, как и трубы типа «А», использовавшейся Косгровом с сотрудниками [5-7], т. е. полная длина 41 см, а диаметр приблизительно 5 см. Фитиль был

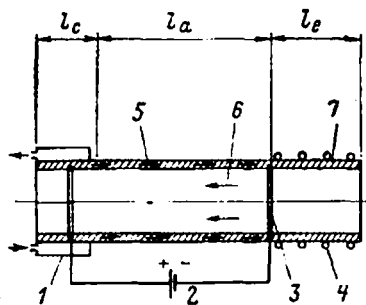


Рис. 5-4. Электроосмотический фитиль.

1 — охлаждающая рубашка конденсатора; 2 — приложенное напряжение; 3 — пористый электрод; 4 — греющая спираль; 5 — поток жидкости, несущей электрические заряды; 6 — поток пара; 7 — фитиль.

изготовлен из мелких стеклянных шариков. Рабочей жидкостью служила дистиллированная вода, находящаяся в равновесии с атмосферной двуокисью углерода и содержащая 10^{-5} HCl, 10^{-5} KCl и 10^{-5} KOH (концентрация выражена в молях на 1 литр).

Электроосмотический эффект достигался введением двух пористых электродов, как это показано на рис. 5-4 и приложением к ним разности потенциалов. Абу-Ромия проводил опыты при разности потенциалов 20 В. Он предполагает, что передающая способность трубы будет возрастать с увеличением разности потенциалов E , хотя при очень высоких напряжениях на передающую способность трубы будет влиять электрический нагрев среды.

Наиболее высокое значение передающей способности тепловой трубы было получено при использовании раствора гидроксида калия, оно превосходит передающую способность модели Косгрова при работе в горизон-

тальном положении более чем вдвое, а при работе в вертикальном положении с испарителем, расположенным над конденсатором, более чем втрое. В последнем случае передавались примерно 2,4 кВт. Был сделан вывод, что использование электроосмотического принципа перекачки жидкости в тепловых трубах может существенно улучшить их характеристики, особенно в тех случаях, когда максимальная теплопередающая способность трубы ограничивается способностью фитиля к передаче жидкости, как это имеет место при работе против силы тяжести. Этот принцип может также использоваться для облегчения запуска тепловых труб и улучшения переходных процессов. Главная трудность заключается в подборе фитилей и рабочих жидкостей с высоким электрическим сопротивлением.

Джонсом [5-8] предложена еще более радикальная модификация тепловой трубы. В ней сплошная капиллярная структура может быть заменена системой электродов, с помощью которых создается электрогидродинамическая сила.

Обычная тепловая труба ограничивается использованием диэлектрических жидкостей в качестве рабочего тела. Поскольку последние характеризуются относительно плохим смачиванием фитиля, но могут использоваться в области температур пара от 150 до 350°C, где вообще трудно найти подходящую рабочую жидкость, любое улучшение характеристик тепловой трубы является весьма полезным.

Предложенная Джонсом электрогидродинамическая тепловая труба должна состоять из тонкостенного корпуса из алюминия или какого-либо другого высокоэлектропроводного материала с торцевыми колпаками, изготовленными из изоляционного материала типа оргстекла. Между этими колпаками натянут тонкий ленточный электрод. Он располагается таким образом, что между ним и стенкой тепловой трубы по всей ее длине образуется небольшой кольцевой канал. (Этот канал занимает всего лишь примерно 20% периметра тепловой трубы, поэтому труба должна быть снабжена обычными устройствами для раздачи жидкости по всей поверхности испарителя.)

При приложении достаточно высокого напряжения рабочая жидкость собирается в зоне действия электрического поля большой напряженности между ленточным

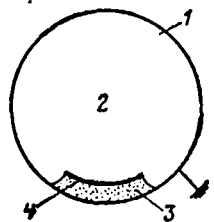


Рис. 5-5. Электрогидродинамическая перекачка жидкости в тепловой трубе.
1 — труба; 2 — паровое ядро; 3 — диэлектрическая жидкость; 4 — ленточный электрод.

электродом и стенкой тепловой трубы, т. е. образуется своего рода артерия, как это показано на рис. 5-5. В результате испарения жидкость в зоне испарения как бы втягивается в зазор, тогда как охлаждение в конденсаторе обуславливает выпучивание поверхности раздела наружу. Это обстоятельство приводит к неравенству поверхностных электромеханических сил, действующих по нормали к поверхности жидкости, и обуславливает появление отрицательного градиента давления в направлении от испарителя к конденсатору. В итоге между двумя концами тепловой трубы устанавливается поток рабочей жидкости.

Джонс рассчитал, что даутерм-А может перекачиваться на расстояние примерно 50 см против силы тяжести, что намного больше значений, достижимых с помощью обыкновенных фитилей. Приложения подобных устройств могут включать регулирование температуры и заполнение артерий.

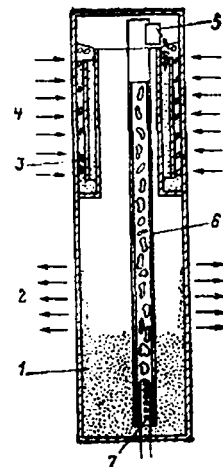
В числе других предложений по улучшению способности трубы к перекачке рабочей жидкости против силы тяжести упоминается описанный ниже «антигравитационный» термосифон.

5-5. АНТИГРАВИТАЦИОННЫЕ ИЛИ ОБРАЩЕННЫЕ ТЕРМОСИФОНЫ

В обычном термосифоне, описанном в гл. 1, для его успешной работы испаритель должен быть расположен под конденсатором, поскольку термосифон рассчитан на возврат конденсата под действием силы тяжести. Поэтому термосифон оказывается неэффективным в условиях отсутствия гравитации или в тех ситуациях, когда жидкость должна возвращаться в испаритель, преодолевая гравитационный напор, как бы он ни был мал.

Выполненные недавно в Национальной технической лаборатории работы [5-9] привели к созданию так называемого «антигравитационного термосифона», устройство которого иллюстрируется рис. 5-6. Как и в обычных тепловых трубах и термосифонах, корпус устройства герметичный и содержит только рабочую жидкость

Рис. 5-6. Антигравитационный термосифон.
1 — отстойник; 2 — конденсатор; 3 — перегородка; 4 — испаритель; 5 — выходное отверстие; 6 — стояк; 7 — вспомогательный нагреватель.



в жидкой и паровой фазах. Для возврата конденсата в испаритель служит «паровой подъемный насос». Этот насос представляет собой трубу (стояк), основание которой погружено в объем конденсата (отстойник), а другой конец имеет отверстие, выходящее в испаритель. Этот паровой подъемный насос требует для своей работы подвода небольшого количества теплоты в нижней части стояка. В результате образующаяся пароводяная смесь, имеющая меньшую по сравнению с жидкостью в отстойнике плотность, поднимается к верху стояка.

Испаритель выполнен в виде закрытого снизу кольцевого канала, в который жидкость подается паровым насосом. В испарителе установлена дополнительная кольцевая перегородка, назначение которой обеспечить циркуляцию в испарителе. Существенным преимуществом этого устройства является то, что для него, в отличие от обыкновенной тепловой трубы, не существует ограничения теплопередающей способности, связанного с возникновением кипения в испарителе.

В статье Чисхолма дается теория антигравитационного термосифона. В ней приводятся соотношения для осевого теплового потока в функции диаметра стояка и его тяги. А

При работе с водой в качестве рабочей жидкости, при температуре 100°C, диаметрах стояка 1 см и термосифона 2 см можно было поддерживать плотность осевого теплового потока 1,2 кВт/см² при высоте подъема 10 калибров. Если снизить эту высоту до 5 калибров, то плотность осевого потока увеличится до 4 кВт/см².

Можно также создать многоступенчатый подъемный паровой насос. Трехступенчатый аппарат теоретически может обеспечить передачу 14 кВт по вертикали на расстоянии 10 м при работе на воде с рабочей температурой 100°C.

5-6. ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ В РОЛИ ТЕПЛОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ТЕПЛОВЫХ ДИОДОВ

Кроме описанных ранее возможностей тепловой трубы при соответствующем исполнении она может выполнять роль управляемого термического сопротивления. Эти функции сильно расширяют область применения тепловых труб. Например, для космических кораблей часто очень существенно точное поддержание температуры, в то время как внутренняя диссипация теплоты и внешний тепловой поток могут претерпевать значительные изменения. В криогенной технике и ряде других приложений эффективная передача теплоты должна осуществляться в одном направлении, в то время как перенос теплоты в обратную сторону должен быть исключен.

Для того чтобы добиться регулирования процессов в тепловой трубе, необходимо модифицировать одну из четырех или несколько ступеней происходящего в ней циклического процесса. Эти ступени следующие:

- 1) испарение;
- 2) перетекание пара к конденсатору,
- 3) конденсация;
- 4) перетекание жидкости к испарителю.

Для обеспечения однонаправленной работы трубы (режим теплового диода) необходимо ввести некоторую асимметрию в процессы перетекания рабочей жидкости. Для функционирования трубы в качестве выключателя один из этих процессов должен быть полностью прерван, что может быть достигнуто, например, замораживанием рабочей жидкости, отсосом жидкости, осушением фитиля, перекрытием парового потока или экранированием конденсатора инертным газом. Переменное сопротивление или проводимость обычно достигается экранированием части поверхности конденсатора с помощью инертного газа. Этот процесс может регулироваться вручную изменением давления газа или путем применения большого буферного объема газа, действие которого аналогично поведению чувствительного к изменению температуры электрического резистора, или установкой температурного датчика и контура с активной обратной связью, изменяющий давление инертного газа. Тепловая труба переменной проводимости детально описана в гл. 6. Тепловые диоды и выключатели рассматриваются ниже.

5-6-1. Тепловой диод. Простейшим тепловым диодом является термосифон, в котором сила тяжести обеспечивает требуемую асимметрию процессов переноса, хотя это проявляется только в условиях фиксированного положения аппарата в пространстве. Гравитация будет обеспечивать реализацию однонаправленной передачи теплоты (эффекта диода) также и в тепловой трубе с фитилем, поскольку

$$\Delta P_c = \Delta P_l + \Delta P_v \pm \Delta P_g.$$

При изменении направления переноса теплоты (движения рабочей жидкости) меняется знак члена ΔP_g , и если $|\Delta P_g| > \Delta P_c$, то тепловая труба будет вести себя как диод.

Киркпатрик [5-10] описывает два типа тепловых диодов. В одном из них применяется захват жидкости, во втором — блокада жидкости. Если обратиться к рис. 5-7, то в схеме с подводом теплоты согласно рис. 5-7,а тепловая труба будет работать в обычном режиме. Если зоны испарения и конденсации меняются

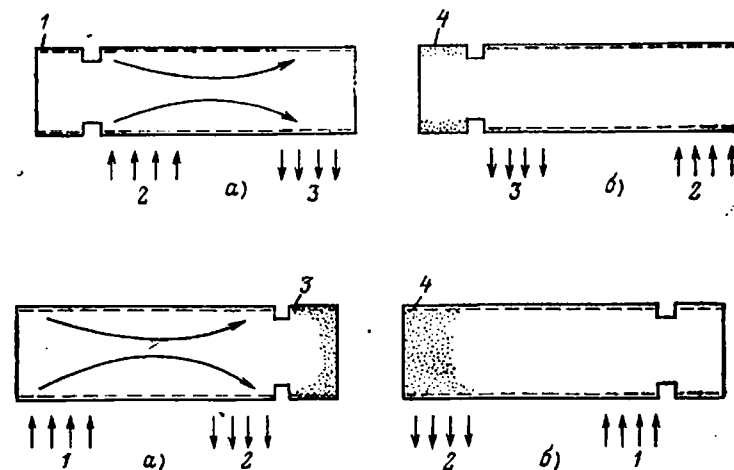


Рис. 5-7. Диод с ловушками для жидкости.

а — режим нормальной работы; б — режим с измененным направлением передачи теплоты; 1 — пустой резервуар; 2 — источник теплоты; 3 — сток теплоты; 4 — резервуар наполнен рабочей жидкостью.

Рис. 5-8. Диод с блокадой жидкостью стока теплоты.

а — режим нормальной работы; б — режим с измененным направлением передачи теплоты; 1 — источник теплоты; 2 — сток теплоты; 3 — жидкость находится в резервуаре; 4 — конденсатор, заблокированный жидкостью.

местами (рис. 5-7,б), то скопдившаяся жидкость захватывается резервуаром, фитиль которого не связан с левым концом фитиля собственно тепловой трубы, и тепловая труба перестает работать — теплота передаваться не будет.

На рис. 5-8 представлено похожее устройство, однако в нем избыток жидкости находится в трубе. Как показано на рис. 5-8,а жидкость скапливается в резервуаре у конденсатора тепловой трубы и тепловая труба

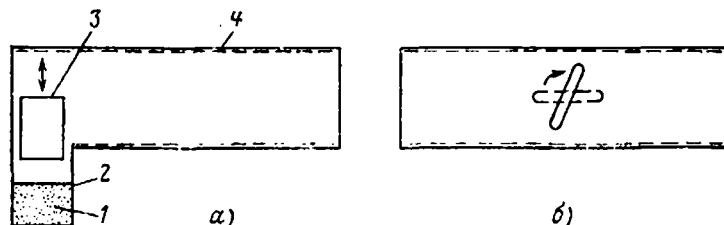
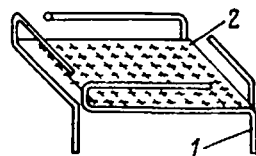


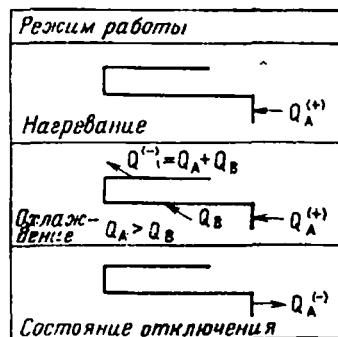
Рис. 5-9. Тепловые выключатели.

а — выключатель, работающий на принципе вытеснения: 1 — рабочая жидкость, 2 — бесфитильный резервуар, 3 — вытеснитель, 4 — тепловая труба; б — выключатель с заслонкой в паровом канале.

будет нормально работать. На рис. 5-8,б конденсатор и испаритель поменялись местами и избыток жидкости блокирует конденсатор — тепловая труба перестает работать.



а)



б)

Рис. 5-10. Применение теплового выключателя, разработанного в Университете Ридинга, в установке по выращиванию семян.

а — тепловой выключатель; 1 — тепловые трубы; 2 — плита для семян; б — режим работы.

5-6-2. Тепловой выключатель. В литературе указывается ряд способов отключения тепловой трубы. Некоторые из них обсуждаются в работах Броста и Шуберта [5-11], а также Эддлстона и Хекса [5-12]. Рисунок 5-9,а иллюстрирует простой способ вытеснения рабочей жидкости, в котором пребывающая в жидкой фазе рабочая жидкость может быть вытеснена из бесфитильного резервуара твердым телом — вытеснителем [5-11]. На рис. 5-9,б показано перекрытие парового потока с помощью заслонки с магнитным приводом. Рабочая жидкость может быть заморожена с помощью термоэлектрического охладителя. Подобного рода устройство, представленное в работе Райса [5-13], показано на рис. 5-10.

5-7. ВРАЩАЮЩИЕСЯ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ

Вращающаяся тепловая труба представляет собой двухфазный термосифон, в котором конденсат возвращается в испаритель под действием центробежных сил. Вращающаяся тепловая труба состоит из герметичной полой емкости, внутренняя часть которой слегка коническая и содержит определенное количество рабочей жидкости (рис. 5-11).

Подобно обычной тепловой трубе с капиллярной структурой вращающаяся тепловая труба имеет три характерных участка: испаритель, адиабатный участок и конденсатор. Вращение вокруг оси обуславливает появление центробежного ускорения $\omega^2 r$, составляющая которого вдоль стенки трубы равна $\omega^2 r \sin \alpha$. Соответствующая сила заставляет сконденсировавшуюся рабочую жидкость возвращаться по стенке к испарителю.

Первое упоминание о вращающейся тепловой трубе содержится в статье Грея [5-14].

Центробежные силы существенно влияют на процессы тепло- и массообмена во вращающейся тепловой трубе, и в этой связи в дальнейшем будет проанализировано влияние центробежных сил на процессе тепло- и

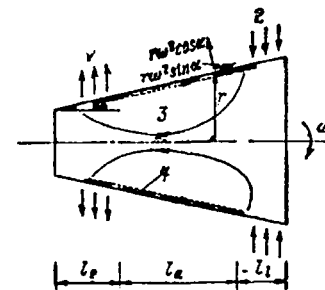


Рис. 5-11. Вращающаяся тепловая труба.

1 — отвод теплоты; 2 — подвод теплоты; 3 — паровой поток; 4 — возврат конденсата.

массообмена на трех вышеупомянутых участках.

В опубликованной Греем с соавторами работе [5-15] по характеристикам испарения во вращающихся парогенераторах предполагается, что при наличии больших центробежных ускорений поверхность раздела жидкой и паровой фазами становится гладкой и устойчивой. При работе с водой при давлении в одну атмосферу и центробежных ускорениях до 400 g были получены тепловые потоки до 257 Вт/см². Коэффициенты теплоотдачи при кипении были такими же, как и при 1 g, однако максимум теплового потока, или критическая плотность теплового потока, увеличивался с ростом центробежного ускорения. Костелло и Адамс [5-16] вывели теоретическое соотношение, согласно которому критический тепловой поток увеличивается с ускорением в степени одна четвертая.

Во вращающейся зоне конденсации высокие значения коэффициента конденсации поддерживаются благодаря эффективному удалению конденсата под действием центробежных сил. Болбек [5-17] провел анализ конденсации типа анализа Нуссельта, в котором пренебрег действием потока пара на поверхность жидкости. Даниэлс и Джумейли [5-18] провели аналогичный анализ, но с учетом силового взаимодействия между осевым потоком пара и вращающейся поверхностью жидкости. Они пришли к выводу, что влияние этого взаимодействия на теплоотдачу при конденсации мало и им можно пренебречь. Исключение составляет лишь случай больших тепловых потоков. Упомянутые авторы также сравнили свои теоретические расчеты с результатами измерений во вращающихся тепловых трубах, использующих арктон (фреон)-113, арктон (фреон)-21 и воду в качестве рабочих жидкостей. Они указывают, что имеется оптимальное количество рабочей жидкости, заправляемой в тепловую трубу данной геометрии, вращающейся с заданной скоростью при выбранном тепловом потоке. Результаты экспериментов, по-видимому, подтверждают теорию в охваченном опытами диапазоне тепловых потоков с учетом погрешности эксперимента. Интересным результатом, вытекающим из этой работы и полученным в [5-19], является установление критерия качества M' для рабочей жидкости:

$$M' = \frac{\rho_l^2 L k_l^3}{\mu_l}$$

где ρ_l — плотности жидкости; L — скрытая теплота парообразования; k_l — теплопроводность жидкости; μ_l — вязкость жидкости.

Зависимость M' от температуры для ряда рабочих жидкостей приведена на рис. 5-12.

Обычно вращающаяся тепловая труба имеет термическую проводимость, сравнимую или более высокую, нежели простая тепловая труба с капиллярной структурой. Малая эквивалентная проводимость, о которой говорится в работе Даннелса и Джумейли [5-18], может быть обусловлена сочетанием очень малой теплопроводности жидкого фреона с относительно большой толщиной слоя жидкости в конденсаторе.

На адиабатном участке, как и в соответствующей области обычной тепловой трубы с капиллярной структурой, жидкость и пар будут течь в противоположных направлениях, причем скорость пара будет значительно выше скорости жидкости.

5-7-1. Факторы, ограничивающие теплопередающую способность вращающейся тепловой трубы. Факторы, ограничивающие теплопередающую способность тепловой трубы, будут следующими: достижение скорости звука; неустойчивость границы раздела жидкости — пар, кипение в испарителе и ограничение по конденсации (а также наличие неконденсирующихся газов). Ограничение по скорости звука и влияние неконденсирующегося газа такие же, как и в обычной тепловой трубе с капиллярной структурой. Неустойчивость поверхности раздела (унос) появляется в том случае, когда касательные напряжения, связанные с противоточным движением потоков пара и жидкости, окажутся достаточными для срыва капель и переноса их в конденсатор. Радиальные центробежные силы играют очень

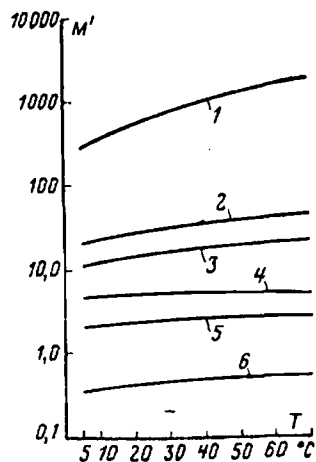


Рис. 5-12. Зависимость комплекса физических свойств (параметра качества) от температуры для различных рабочих жидкостей во вращающейся тепловой трубе.

1 — вода; 2 — метилловый спирт; 3 — ацетон; 4 — этиловый спирт; 5 — фреон-21; 6 — фреон-113.

Тепловая труба переменной проводимости

В предыдущих главах уже давалось краткое описание тепловой трубы переменной проводимости. Необычным свойством, которое выделяет тепловую трубу переменной проводимости из остальных типов тепловых труб, является ее способность поддерживать температуру закрепленного на испарителе источника теплоты приблизительно постоянной независимо от выделяемого этим устройством количества теплоты.

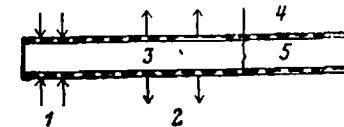


Рис. 6-1. Равновесное состояние в тепловой трубе с добавкой инертного газа.

1 — подвод теплоты; 2 — отвод теплоты; 3 — пар; 4 — зона неэффективной конденсации; 5 — газ.

важную роль, препятствуя образованию ряби на поверхности жидкого конденсата, из-за которой происходит срыв капель.

Влияние вращения на ограничение по кипению в испарителе уже упоминалось при рассмотрении работ [5-15] и [5-16] так же, как и на ограничение по условиям конденсации [5-18].

5-7-2. Применение вращающихся тепловых труб. Вращающаяся тепловая труба, несомненно, может быть использована для охлаждения вращающихся элементов, нагреваемых за счет энергии, выделяющейся при трении, например, роторов электрических машин, вра-

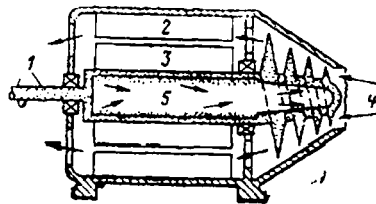


Рис. 5-13. Применение вращающихся тепловых труб для охлаждения роторов двигателей.

1 — вал; 2 — статор; 3 — ротор; 4 — воздух; 5 — пар.

щающихся отрезных резцов, тяжело нагруженных подшипников и валков прессов. Полачек [5-20] приводит результаты экспериментов по охлаждению двигателей переменного тока с вращающимися тепловыми трубами, смонтированными в полые валы двигателей (рис. 5-13). Он указывает, что можно повысить нагрузку двигателя с тепловой трубой на 15% без какого-либо увеличения температуры обмотки. Грей [5-14] предлагал использовать вращающуюся тепловую трубу в системах кондиционирования воздуха. Гроль с соавторами [5-21] описывают применение вращающейся тепловой трубы для выравнивания температуры во вращающемся барабане. Барабан использовался для натяжки пластмассовых волокон и вращался с частотой 4000—6000 об/мин; температура барабана равнялась 250 С. В качестве рабочей жидкости Гролем был выбран дифенил.

Способность к регулированию температуры у содержащей газ тепловой трубы впервые была обнаружена в результате выделения неконденсирующегося газа в тепловой трубе натрий — нержавеющей сталь. Оказалось [6-1], что при подводе теплоты к испарителю тепловой трубы выделившийся водород уносился в зону конденсации и достигалось изображенное на рис. 6-1 равновесное состояние.

Последующие визуальные наблюдения работы высокотемпературных тепловых труб и измерения температуры показали, что пары рабочей жидкости и неконденсирующийся газ оказались пространственно разделенными, причем между рабочей жидкостью и неконденсирующимся газом существовала резкая граница раздела. Неконденсирующийся газ эффективно блокировал занимаемую им часть конденсатора, прекращая в этой зоне всякую местную передачу теплоты.

Было также отмечено одно существенное обстоятельство: граница раздела пар — неконденсирующийся газ перемещалась вдоль трубы в зависимости от значения передаваемой парами рабочей жидкости тепловой энер-

гии. На основании этого было сделано заключение, что соответствующим перемещением границы газа можно регулировать температуру в зоне подвода теплоты в очень узких пределах.

Значительная часть последующих исследований по тепловым трубам, содержащим неконденсирующиеся или инертные газы, состояла в разработке способов регулирования положения газового фронта и в определении достижимой эффективности этих способов, обеспечивающих практическое постоянство температуры объектов регулирования, связанных с испарителем тепловой трубы, независимо от выделяемой ими мощности в широком диапазоне изменения последней.

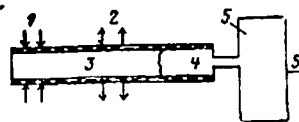


Рис. 6-2. Тепловая труба переменной проводимости с холодным резервуаром.

1 — подвод теплоты; 2 — отвод теплоты; 3 — пар; 4 — газ; 5 — резервуар.

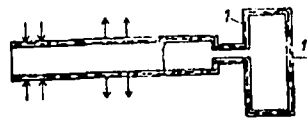


Рис. 6-3. Тепловая труба переменной проводимости со снабженным фитилем холодным резервуаром.

1 — резервуар с фитилем.

Первое усовершенствование простой газорегулируемой тепловой трубы (рис. 6-1) состояло в присоединении к ней резервуара вниз по потоку за зоной конденсации (рис. 6-2). Резервуар был добавлен для того, чтобы обеспечить эффективную работу на всей длине тепловой трубы при передаче ею максимальной мощности и создать условия для более тонкого регулирования температуры пара. Резервуар легко мог отключаться с помощью вентиля.

Авторам ранних работ, посвященных тепловым трубам переменной проводимости с холодным резервуаром, пришлось столкнуться с диффузией паров рабочей жидкости в резервуар и с их последующей конденсацией, которая происходила даже при условии, что перетекание жидкости в газовую зону было исключено. Для обеспечения возврата конденсата в тепловых трубах с холодным резервуаром необходимо снабдить этот резервуар фитилем. В этом случае парциальное давле-

ние паров в резервуаре будет равно давлению паров рабочей жидкости при температуре резервуара (рис. 6-3).

Описанный выше тип тепловой трубы переменной проводимости представляет собой пассивно регулирующую тепловую трубу. Активная длина конденсатора изменяется в соответствии с изменениями температуры в различных частях системы. Рост температуры в испарителе ведет к увеличению давления паров рабочей жидкости, что заставляет газ сжиматься до меньшего объема, высвобождая тем самым большую долю активной длины конденсатора для отвода теплоты. И, наоборот, падение температуры в испарителе вызывает уменьшение давления паров рабочей жидкости, при этом газ расширяется, экранируя дополнительную часть активной поверхности конденсатора. Результирующий эффект состоит в создании пассивно регулируемой переменной поверхности конденсатора, которая обеспечивает увеличение или уменьшение теплоотдачи в ответ на изменение рабочей температуры пара в тепловой трубе.

Одна из последних модификаций тепловой трубы переменной проводимости с холодным резервуаром была создана Коссоном с соавторами [6-2]. Тепловая труба работала на аммиаке. Для передачи 1,2 кВт мощности в тепловой трубе была применена система с артериальным фитилем, обладающим большой передающей способностью по жидкости. Номинальная длина тепловой трубы, включая резервуар, составляла 2 м при диаметре 25 мм. Регулирующим газом служил азот.

Важной чертой этой тепловой трубы было обеспечение переохлаждения жидкости в артерии. Это было сделано для уменьшения размеров пузырьков инертного газа и для облегчения поглощения жидкостью любого газа в пузырях. Это явление подробно описывается в § 6-8.

6-1. ПАССИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ СИЛЬФОНА

Уайэтт [6-1] еще в 1965 г. указал, что сильфоны могут быть использованы для регулирования объема инертного газа, однако он не предложил конкретных путей, с помощью которых можно было должным образом регулировать объем сильфонов.

В устройство с сильфоном вводить фитиль нецелесообразно. Следовательно, необходимо, чтобы в нем

имелась полупроницаемая втулка между участком конденсации и сильфоном с тем, чтобы предотвратить накопление рабочей жидкости в аккумулярующем объеме. Втулка должна быть непроницаемой для рабочей жидкости как в паровой, так и в жидкой фазах, однако она должна пропускать неконденсирующийся газ. Маркес и Флейшмен [6-3] предложили и успешно испытали перфорированную фторопластовую втулку, которая предотвращала попадание жидкости в резервуар во время вибрационных испытаний.

Уайэтт выдвинул идеи, направленные на преодоление основных проблем, связанных с использованием тепловых труб переменной проводимости с холодным резервуаром, хотя в то время он и не оценил значимость этих мер. Им было предложено обогревать сильфон электрическим током, причем этот сильфон в тепловом отношении должен был бы быть изолирован от окружающей среды. Он считал, что поддерживая подобным путем температуру сильфона на 1°C выше рабочей температуры пара, можно предотвратить конденсацию внутри сильфона случайно залетевших в него молекул рабочей жидкости. Тем не менее, регулируя температуру резервуара с неконденсирующимся газом, можно избавиться от наиболее нежелательного свойства исходной тепловой трубы переменной проводимости с холодным резервуаром, а именно от чувствительности содержащегося в резервуаре газа к изменению температуры окружающей среды, которая может подавить способность устройства к поддержанию постоянной температуры.

Тернер [6-4] исследовал применение сильфонов в целях изменения объема и (или) давления в резервуаре. Он предложил механическое перемещающее устройство для регулирования положения сильфонов между двумя точно заданными точками. В то же время он перечисляет ряд недостатков этого типа регулирования, включая потребность в электроэнергии для привода перемещающего устройства, а также то обстоятельство, что оно может отказывать вследствие «заедания» или трения. Предлагая использовать в качестве рабочей жидкости аммиак, он отдавал себе отчет, что большое давление паров рабочей жидкости приведет по условиям прочности к увеличению веса сильфонов, а также увеличит вероятность неполадок, связанных с усталостными напряжениями.

6-2. ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ С ГОРЯЧИМ РЕЗЕРВУАРОМ

Тепловые трубы переменной проводимости с холодным резервуаром особенно чувствительны к изменению температуры стока теплоты, которая может оказывать влияние на давление и температуру в резервуаре. В целях преодоления этого недостатка были разработаны устройства с горячим резервуаром.

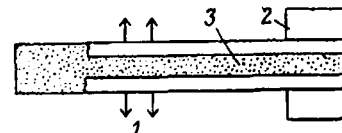


Рис. 6-4. Тепловая труба переменной проводимости с горячим резервуаром.

1 — отвод теплоты; 2 — источник теплоты; 3 — резервуар.

Одним из интересных вариантов компоновки системы с горячим резервуаром является размещение газового резервуара по соседству или даже внутри испарителя тепловой трубы. Тепловое взаимодействие с испарителем сводит к минимуму колебания температуры газа, ограничивающие регулируемую способность устройства. На рис. 6-4 представлен один из вариантов, реализующих эту идею.

Ранее указывалось, что проникновение рабочей жидкости в горячий резервуар нежелательно, а полупроницаемая втулка была предложена как один из путей предотвращения диффузии большого количества пара или жидкости в газовый объем. Если резервуар имеет фитиль и содержит рабочую жидкость, то давление паров этой жидкости будет соответствовать ее температуре, которая в случае тепловой трубы с горячим резервуаром внутри испарителя будет по существу такой же, как и температура во всем объеме тепловой трубы, и в резервуаре газа не будет.

Другой метод [6-5], который применяется для тепловых труб переменной проводимости с горячим резервуаром, заключается в установке холодной ловушки между конденсатором и резервуаром. Ловушка существенно снижает парциальное давление паров рабочей жидкости в газе, и система обеспечивает регулирование

температуры, которое относительно независимо от условий окружающей среды. Эта система неприменима к горячим резервуарам, распложенным внутри испарителя.

6-3. РЕГУЛИРОВАНИЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В ПРИМЕНЕНИИ К ТЕПЛОВЫМ ТРУБАМ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Тепловые трубы переменной проводимости с холодным резервуаром особенно чувствительны к изменению температуры стока, которая может влиять на давление и температуру в резервуаре. Для преодоления этого недостатка были разработаны описанные выше устройства с горячим резервуаром.

В идеальном варианте каждый из указанных типов тепловой трубы в лучшем случае способен поддерживать постоянной свою собственную температуру, и эта задача оказывается осуществимой только при использовании бесконечно большого аккумулирующего объема. Таким образом, если термическое сопротивление источника теплоты велико или мощность, которую требуется отвести от охлаждаемого элемента, подвержена колебаниям, выходящим за определенные пределы, то температура источника теплоты не будет поддерживаться постоянной и ее колебания могут оказаться значительными, т. е. система в целом будет неприемлемой.

Разработка тепловых труб переменной проводимости с регулированием на основе принципа обратной связи позволила осуществить абсолютное регулирование температуры, что было подтверждено экспериментально [6-6]. Эти тепловые трубы представляют собой третье поколение устройств для регулирования температуры, работающих по принципу тепловой трубы.

Возможны два вида регулирования на основе обратной связи: активное (электрическая связь) и пассивное (механическая).

6-3-1. Регулирование с электрической (активной) обратной связью. На рис. 6-5 схематически показана тепловая труба переменной проводимости с регулированием на базе активной обратной связи. Для должного перемещения границы раздела пар—газ, обеспечивающего постоянство регулируемой температуры, используется схема, включающая в себя датчик температуры, электронный регулятор и обогреваемый (внешним или внутренним нагревателем) резервуар. Как и в системе

с холодным резервуаром, фитиль выполняется сплошным и заходит в аккумулирующий газовый объем. Следовательно, термодинамически насыщенная жидкость всегда присутствует в резервуаре. Парциальное давление паров в резервуаре, находящихся в равновесии с жидкостью, определяется температурой резервуара, которая может изменяться с помощью вспомогательного нагревателя.

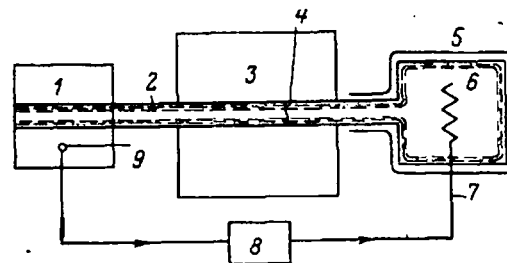


Рис. 6-5. Тепловая труба переменной проводимости с регулированием на основе активной обратной связи.

1 — источник теплоты; 2 — фитиль; 3 — радиатор; 4 — газовый фронт; 5 — защита от теплового излучения; 6 — аккумулирующий объем; 7 — к вспомогательному нагревателю; 8 — регулятор нагревателя; 9 — температурный датчик.

Два предельных случая регулирования системы определяются условиями подвода и отвода большой мощности и подвода и отвода малой мощности соответственно. В первом случае требуется обеспечить работу тепловой трубы с максимальной проводимостью, тогда как во втором случае, наоборот, минимальные подвод и отвод теплоты отвечают работе тепловой трубы в режиме минимальной теплопередающей способности.

Устанавливая датчик температуры у источника теплоты и соединяя его через регулятор с нагревателем резервуара, можно изменять мощность вспомогательного нагревателя, а тем самым и температуру резервуара таким образом, что будет осуществлено прецизионное регулирование положения газового фронта, поддерживая тем самым температуру источника на заданном уровне.

6-3-2. Регулирование с механической (пассивной) обратной связью. В большинстве работ по регулированию с механической обратной связью использовался резервуар с сильфоном, как это предлагалось в ряде ранних работ по тепловым трубам переменной про-

димости с пассивным регулированием без обратной связи. Предложенная система с пассивной обратной связью, использующая сильфон, была спроектирована Бинертом с сотрудниками [6-7, 6-8], она показана на рис. 6-6. Регулирующее устройство состоит из двух сильфонов и чувствительного баллончика, размещенного рядом с источником теплоты. Во внутреннем сильфоне находится вспомогательная жидкость, в общем случае она несжимаема; сильфон соединяется с чувствительным баллоном капиллярной трубкой.

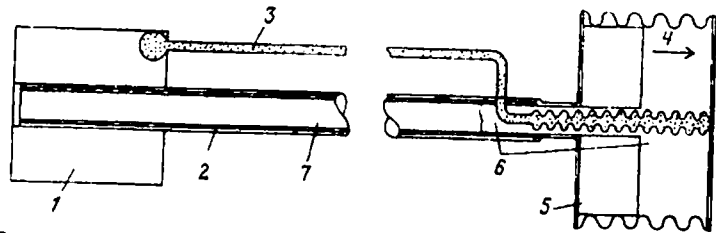


Рис. 6-6. Тепловая труба переменной проводимости с регулированием на основе пассивной обратной связи.

1 — источник теплоты; 2 — фитиль; 3 — вспомогательная жидкость; 4 — перемещение сильфона; 5 — втулка (вытеснитель); 6 — конденсирующийся газ; 7 — рабочая жидкость.

Изменение температуры источника теплоты вызовет изменение давления вспомогательной жидкости и перемещение внутреннего сильфона. Это перемещение приведет к изменению положения основного сильфона. Сопутствующее перемещение основного сильфона и тем самым изменение положения границы раздела пар — газ в тепловой трубе с температурой источника теплоты, получаем систему регулирования температуры источника с обратной связью.

В работе Делью с сотрудниками [6-9] описан опыт создания и испытания тепловой трубы переменной проводимости на метиловом спирте с регулированием по принципу пассивной обратной связи. В качестве буферного газа использовался азот. Система была испытана в диапазоне подводимой мощности 2—30 Вт при температуре источника теплоты, равной температуре окружающей среды, и номинальном значении температуры стока теплоты 0°C. Регулирование осуществлялось при помощи металлического сильфонного газового резервуара. Перемещение основного сильфона происходило

под действием внутреннего сильфона, заполненного жидкостью. Жидкостный сильфон перемещался под действием давления расширяющегося метилового спирта, находящегося во вспомогательном резервуарчике, размещенном в нагревательном блоке. С помощью этого устройства было достигнуто регулирование температуры источника теплоты в пределах $\pm 4^\circ\text{C}$.

6-4. ДРУГИЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Во всех рассмотренных выше способах регулирования для изменения площади поверхности, через которую осуществляется отвод теплоты, используется перемещение поверхности раздела пар — газ. Имеются и другие способы регулирования мощности тепловой трубы, их обзор дается в литературе [6-10, 6-11, 6-12]. В ранней работе Энеида [6-13] было предложено использовать заслонки для дросселирования парового потока. В количественном отношении регулирующие возможности этого метода ограничены. Во-первых, термическое сопротивление по тракту рабочей жидкости составляет всего лишь небольшую часть полного сопротивления системы. Во-вторых, перепад давлений в паровом потоке может изменяться лишь в ограниченных пределах, без превышения капиллярного напора трубы, за исключением случая абсолютных давлений (Шлезингер [6-14]). Операция «включение — отключение» может быть осуществлена перекрытием парового потока, однако при этом еще возникнет передача теплоты теплопроводностью по фитилю и стенке трубы.

Было предложено использовать в целях регулирования изменение степени сплошности фитиля. Однако это трудно осуществимо. Высказывались также идеи по блокированию резервуара с избытком жидкости (см. также гл. 5).

Катцф [6-15] выдвинул идею применения фитиля с большим термическим сопротивлением, сочетающегося с дополнительной артериальной системой, которая осуществляет регулирование температуры при помощи сильфона. При падении температуры в испарителе ниже определенного значения сжимаемый сильфон закупоривает артерию, осуществляя, таким образом, термостатирование источника теплоты.

Ряд предлагаемых методов носит в большой степени умозрительный характер. Они включают в себя регулирование путем замораживания — растапливания рабочей жидкости, когда выбранная рабочая жидкость становится «работоспособной» только по достижении определенного уровня температур в испарителе.

6-5. СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ

Сравнение некоторых систем дается в табл. 6-1. Сопоставление двух типов регулирования с обратной связью (активной и пассивной) показывает, что более эффективное регулирование температуры достигается при использовании систем с активной обратной связью. В системе с активной обратной связью весь неконденси-