



**Смирнов, Г. Ф.** Моделирование процессов в тепловых трубах и термосифонах [Текст] : монография / Смирнов Генрих Федорович, Бурдо Олег Григорьевич. - Одесса : Полиграф, 2012. - 294 с. : табл., рис. - Библиогр.: с. 268-289. - ISBN 978-966-2326-21-5.

Книга содержит представительную информацию по конструктивным особенностям, современному уровню аналитического и экспериментального моделирования процессов переноса в перспективных схемах тепловых труб (ТТ) и термосифонов. Представлен критический анализ принципов моделирования, предложенных механизмов и результатов экспериментальных исследований классических ТТ с сеточными, гофрированными, металловолоконистыми и пр. капиллярно-пористыми структурами. Обсуждаются проблемы испарительных термосифонов и их модификаций (пульсационных и коллекторных схем). Рассмотрены особенности контурных ТТ. Представляются результаты комплексных исследований теплопереноса при парообразовании и конденсации на профилированных поверхностях и ТТ с такими структурами. Обсуждаются возможные режимы парообразования (испарительный, испарительно-пульсационный и кипение). Приводятся результаты ресурсных исследований ТТ и обобщающие модели «старения» ТТ.

Книга предназначена для студентов, магистров, аспирантов, докторантов, научных сотрудников, которые занимаются исследованием низкотемпературных ТТ и разработкой систем термостабилизации на их основе. Книга представляет интерес для специалистов - проектировщиков технологического оборудования с использованием ТТ.

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

С 60х годов прошлого века у специалистов, изучающих различные проблемы теплопередачи в аппаратах и системах, предназначенных для переноса теплоты, разных схем термо-стабилизации и термо-регулирования, проявился заметный интерес к простым устройствам, получившим название «тепловые трубки» (ТТ). Первоначально это было связано с их применением для условий невесомости и для высоких температур, порядка 700 - 1000 °С. Последние впоследствии называли «высокотемпературными» тепловыми

трубками. Почти одновременно развивались исследования и работы с «низкотемпературными» тепловыми трубками (НТТ). При этом вспомнили, что ещё в первой половине 19-го столетия при организации выпечки хлеба были предложены и запатентованы замкнутые, герметичные, передающие теплоту трубки, заполненные частично жидкостью. В топочных объёмах располагались участки, к которым подводилось тепло. В них происходило испарение (кипение) теплоносителя. На тех участках, на которых тепло отводилось (в случае хлебопечения к поверхностям, на которых осуществлялась выпечка хлеба) имел место процесс конденсации внутри трубки.

Параллельно изучались теплопередающие возможности таких трубок, у которых внутренний перенос теплоты не был связан с фазовыми переходами: «жидкость - пар - жидкость», а реализовался однофазной конвекцией. Естественно, последние теплопередающие трубки были значительно менее привлекательными для практических задач, хотя имели как свои достоинства, так и недостатки. Достоинством было примерное постоянство состояния теплоносителя внутри, недостатком - существенно меньшие возможности по интенсивности и масштабам переноса теплоты, большая масса, больший рост внутреннего давления и др.

Интерес к ТТ возрастал ещё и в связи с непрерывным расширением областей и форм их использования. Оказалось, что, во многих случаях, их применение в качестве основы конструирования теплообменников открывает множество перспективных направлений разработки новых, более эффективных, экономичных и требующих меньших затрат труда, как это ни странно, теплообменников. Это оказалось особенно актуальным в энерго- и ресурсосберегающих технологиях.

Среди реальных сфер применения «низкотемпературных» тепловых труб следует выделить охлаждение, термо-стабилизацию и термо-регулирование электронной и электротехнической аппаратуры и оборудования. В этой сфере показали свои достоинства не только НТТ, но и ТТ, «работающие» при температурах существенно ниже температуры окружающей среды, включая криогенные температуры.

Такие особенности развития этого направления тепло - хладотехники обеспечили потребность в создании необходимых для инженерной практики обобщающих книг, справочных пособий, монографий и проч. Их и вышло достаточно много, как на английском, так и на русском языках (включая переводы первых книг, изданных на английском). Назовём их [1 - 18] и кратко охарактеризуем основные. Отметим также, что кроме указанных в списке 18 книг разного года и объёма, начиная с 1973 года, каждые 3 года проводились Международные конференции по тепловым трубам и, как правило, их основные презентации оформлялись в общих томах под названием: “Heat Pipe Science Technology Application” и близкого типа.

Таким образом, накопилось достаточно обширная обобщающая информация по многим фундаментальным и прикладным проблемам технологии тепловых труб, включая в первую очередь НТТ. Тем не менее,

авторы настоящей монографии обнаружили существенные пробелы по некоторым важным проблемам. Так, например, при общем значительном интересе к проблемам пульсационных тепловых труб, во всех указанных ниже монографиях не находится для них места.

Обращает на себя внимание тот факт, что в тех материалах, список которых приведен, весьма скромнен уровень дискуссионного обсуждения и критические обзоры спорных основ теоретического моделирования практически отсутствуют. Это относится, например, к представлениям о физической природе влияния поверхностных (капиллярных) сил на интенсивность процесса конденсации в канальных тепловых трубах, в особенности в условиях ослабленной (или отсутствия) гравитации. Это же относится и к представлениям о физической природе устойчивости процессов в пульсационных тепловых трубах и объяснений их успешной «работы» в поле сил тяжести при расположении участков нагрева над участками охлаждения. Известны, исключительно высокие достижения в практике применения для решения различных проблем терморегулирования в условиях невесомости (космоса) контурных тепловых труб - капиллярных насосов. Однако на наш взгляд ещё не достаточен уровень понимания физических механизмов, определяющих масштабы и условия успешной работы этих устройств.

Авторы также обратили внимание, что, по не совсем понятной причине, не исследуются, и, даже не обсуждаются, перспективы развития, разработки и применения «коллекторных НТТ», на которых ранее в коллективе одного из авторов были получены интересные и перспективные (прежде всего в прикладном отношении) результаты.

Некоторые интересные экспериментальные факты, установленные в известных пионерских работах (например, Моритца для артериально-канавчатым НТТ), так и не нашли своего объяснения, хотя в нескольких публикациях одного из авторов были представлены важные опытные данные, раскрывающие истинные причины этих явлений. Особую важность для инженерной практики представляет проблема ресурса ТТ и, в том числе НТТ, в особенности для их применения в условиях космоса. По не совсем понятным причинам, исследования этой проблемы, начатые в 70х -- 80х годах, так и не получили должного развития и обобщения. У авторов были определенные успешные наработки в этом направлении, частично ранее опубликованные, но в ограниченном объёме. Остановимся кратко на оценках сущности информации, представленной в обобщающих монографиях, книгах, не претендуя на исчерпывающее заключение и безупречность.

Итак, в [1,2,4,7] приведены общие сведения о принципах действия тепловых труб, снабжённых капиллярной структурой, как основой обеспечения их нормального функционирования. Указываются различные вероятные формы технологии этих структур. В [3,6] представляются сведения о возможностях и основных проблемах их применения в системах терморегулирования летательных аппаратов. В [5,8,9,13] излагаются общие правила конструирования теплообменников с применением тепловых труб и

обсуждаются их достоинства. Но ограничения целесообразности перехода от обычной конструкции теплообменного аппарата к аппарату на ТТ не рассматриваются. В [10] рассматриваются те же вопросы, что и в выше названных монографиях, но с акцентом на применение в качестве ключевой капиллярно - пористой структуры - металловолокнуистой. Впоследствии, оказалось, что те преимущества, которые предполагались у этих структур, как ключевые, перестали такими видаться и интерес к ним существенно упал. В [12] в очень сжатой форме излагаются ключевые проблемы организации процессов в так называемых испарительных термосифонах или попросту двухфазных термосифонах (ИТС или ДТС), а также перспективные направления их применения на практике. Позже в [18] эти вопросы были представлены значительно обстоятельней и шире. Эту монографию следует считать ключевой по этому направлению НТТ.

В зарубежных монографиях [14,15,16] рассматриваются совместно как вопросы анализа процессов на отдельных участках ТТ, НТТ и высокотемпературных ТТ, так и различные особенности их применения в аппаратах и системах. В [11, 17, 19] с различным уровнем детализации и с разных физических позиций рассматриваются процессы в НТТ с капиллярными структурами (преимущественно капиллярно - пористыми), но без учёта тех факторов (исключая [17] и [19]), о которых упоминалось выше). Таким образом, несмотря на обилие обобщающих источников, их содержание оказывается далеко не достаточным для успешной разработки теплопередающих двухфазных устройств, аппаратов и систем на их основе.

Ещё одно важное обстоятельство побуждало авторов к работе над этой монографией. Один из авторов в течение последних почти 20 лет занимался разнообразными проблемами совершенствования пищевых технологий, в том числе и на основе применения аппаратов и систем на низкотемпературных тепловых трубах, включая перспективы успешного решения задач энерго- и ресурсосбережения [20, 21, 22].

Перечисленные факты и явились важными причинами подготовки настоящей монографии.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящая монография посвящена проблемам описания процессов в низкотемпературных тепловых трубах. Ею предваряется эти проблемы в связи с последующим представлением научно - технических основ теплообменных аппаратов и систем, базирующихся на использовании теплопередающих трубок (как обычных, содержащих внутри пористые, покрытия различного типа, так и без них - Испарительные Термосифоны, Пульсационные Тепловые Трубы и проч.).

Из анализа и рассмотрения в этой монографии исключены тепловые трубки, в которых циркуляция теплоносителя определяется действием сил осмоса; электрогидродинамических сил; центробежных сил; не включены в

рассмотрение также предложенные ранее авторами и реализованные в макетах тепловые трубки, производящие не только перенос тепла, но и холод и названные ими «холодильными зрубам» и другие подобные устройства, не нашедшие такой реализации на практике, как указанные выше или имеющие, на сегодня весьма ограниченное практическое применение (Центробежные ТТ).

Монография основана на результатах многолетних исследований, выполненных авторами, их аспирантами, сотрудниками и, в некоторой степени, ранее опубликованных в статьях, материалах презентаций, текстах докладов, а также у одного из авторов в его 3х монографиях (2х на английском в 2004 и 2009 годах и 1ой на русском, в соавторстве в 1999году). Однако и эти монографии оказались далеко не полными. Одна из них, в частности посвящена процессам конденсации в разных условиях (V.G.Rifert & H.F. Smirnov "Condensation Heat Transfer Enhancement", WIT Press 2004, 371pp.), но, к сожалению, из - за активного отказа проф. Риферта В.Г., в упомянутую книгу не вошли материалы, освещающие важные исследования, связанные с учётом правильного влияния поверхностных сил на особенности плёночной конденсации, как в поле сил тяжести, так и в условиях их отсутствия, т.е. в условиях невесомости (космоса).

В них также не вошли представительные исследования авторов, по пульсационным трубам, «коллекторным» тепловым трубкам и испарительным термосифонам; экспериментальным исследованиям ресурсных характеристик НТТ и их обобщению; результатам авторских исследований режимов кипения и испарительно - пульсационного; критические обзоры авторов существующих физических представлений о механизмах переноса тепла в режимах кипения в пористых структурах, включая структуры испарителей контурных тепловых труб. Эти вопросы, впервые обстоятельно представленные в монографиях [17, 19], также требовали дополнений, связанных с появлением большого числа новых работ, в особенности по контурным и канавчатым тепловым трубам. Все перечисленное и определило содержание и объём данной монографии, в которой, в связи с упомянутыми обстоятельствами, некоторые проблемы повторяли частично, но в сжатой форме. Другие, как, например, информация по «коллекторным тепловым трубам»; «пульсационным ТТ»; режимам кипения и конденсации в тепловых трубках с канавчатой структурой; ресурсным исследованиям и предложениям по их обобщению и др. были, по существу, представлены впервые.

Монография составлена из семи глав - разделов. Первые главы 1 и 3 в некоторой степени повторяют соответствующие материалы в выше указанных монографиях одного из авторов, но и в них есть новое — это материалы по «коллекторным испарительным термосифонам» и «коллекторным тепловым трубам». В главе 2 впервые представляются материалы разных авторов и свои результаты по пульсационным тепловым трубкам, здесь же существенное внимание уделяется обсуждению некоторых ключевых проблем: 1) условий их устойчивой работы; 2) физическим пред-

ставлениям, без противоречий объясняющим почему в пульсационных трубках при их вертикальном расположении и размещении участка подвода тепла сверху, имеет место устойчивый режим переноса теплоты. Приводится сущность предложенной одним из авторов физической полу - эмпирической модели, имеющей три эмпирические константы и иллюстрируемой сравнением расчётных и опытных данных. В главе 4 приводится критический анализ разных физических представлений и их модельным интерпретациям, анализ, по своей сути повторяет, в основном то, что представлено ранее в упомянутых его монографиях, но с сильным расширением источников других авторов. Глава 5 впервые обобщает известные аналитические исследования, преимущественно авторов, хотя и не только их, определяющих в объективной постановке влияние сил поверхностного натяжения на формы и динамику развития течения пленки конденсата в условиях отсутствия или при сильно ослабленном действии сил тяжести. На этой основе в главе формулируются предложения по интенсификации переноса теплоты в этом процессе, а также задачи дальнейших экспериментальных и аналитических исследований.

Глава 6 впервые представляет результаты исследований авторов закономерностей переноса теплоты при парообразовании в каналах НТТ, в режимах испарения, кипения и испарительно - пульсационном. Даже для известного достаточно простого, с точки зрения понимания ключевого механизма переноса теплоты, через представительные исследования методами электро-тепловой аналогии, для разных картин размещения жидкости в каналах (с разной формой мениска, разным уровнем «затопления» внутреннего объёма канавки и проч.) получены, для разных сочетаний материал канала - жидкость, с позиции отношения коэффициентов теплопроводности стенки и конденсата аппроксимационные формулы для определения локальных коэффициентов теплоотдачи при режимах испарения в каналах. Подвергаются критическому анализу известные предложения по этой проблеме, сделанные в работах проф. Шекриладзе И.Г. с сотрудниками.

Глава 7 также впервые представляет экспериментальные результаты и их анализ по исследованиям ресурсных характеристик НТТ для разных сочетаний теплоноситель + материал стенки; обсуждаются известные подходы к моделированию процессов, ограничивающих время стабильной работы ТТ, под которым предлагается понимать длительность работы НТТ или ТТ, в течение которого термическое сопротивление её не меняется или меняется в допустимых пределах. Обсуждаются также особенности теоретического анализа проблемы ресурса при использовании в ТТ или НТТ, для подавления коррозии, ингибиторов. В завершении представляется полученное авторами обобщение данных по ресурсу.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	7
Список основных условных обозначений.....	10
<b>ГЛАВА 1. ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ТЕРМОСИФОНЫ.....</b>	<b>12</b>
1.1. Конструктивные схемы и принцип работы.....	12
1.2. Задачи моделирования процессов в ИТС.....	16
1.3. Гидродинамические режимы в ИТС.....	19
1.4. Теплоотдача на участке подвода теплоты.....	25
1.5. Теплоотдача на участке отвода теплоты.....	28
1.6. Кризисные явления в испарительных термосифонах.....	29
1.7. Влияние характерного размера на тепловые и гидравлические явления в испарительных термосифонах.....	31
1.8. Конструкции коллекторных испарительных термосифонов системы охлаждения РЭА.....	34
1.8.1. Коллекторные испарительные термосифоны на уровне блока или первичный термосифон.....	34
1.8.2.Общая конструктивная схема стойки охлаждения РЭА на основе коллекторного ИТС (тип "А").....	36
1.8.3.Конструктивная схема стойки охлаждения на основе коллекторного испарительного термосифона (тип В).....	37
1.8.4. Конструктивная схема стойки охлаждения источника питания (тип "С") на основе коллекторного испарительного термосифона.....	39
<b>ГЛАВА 2 . ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ.....</b>	<b>43</b>
2.1. Исторические предпосылки.....	43
2.2. Принцип действия и конструктивно - технологические схемы реализации ПТТ.....	44
2.3. Экспериментальный стенд для исследований характеристик ПТТ.....	51
2.4. Результаты экспериментальных исследований характеристик ПТТ.....	53
2.5. Влияние основных факторов на работу ПТТ.....	55
2.6. Приближенная модель действия ПТТ.....	57
2.7. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета.....	63
2.8. Основные выводы.....	65
<b>ГЛАВА 3. КЛАССИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ.....</b>	<b>66</b>
3.1. Конструктивные схемы и специфика работы.....	66
3.2. Экспериментальные исследования процессов парообразования в сетчатых структурах ТТ.....	69

3.3. Экспериментальные исследования ТТ с металловолоконистыми структурами.....	82
3.4. Экспериментальные исследования ТТ с гофрированными структурами.....	86
3.5. Экспериментальные исследования ТТ с металлизационными структурами.....	90
3.6. Экспериментальные исследования процесса парообразования криогенных жидкостей.....	95
3.7. Экспериментальные исследования процесса парообразования сжиженных газов.....	100
3.8. Моделирование теплоотдачи при кипении на поверхностях пористых отложений.....	101
3.9. Режимы кипения на пористых поверхностях	<b>106</b>
3.10. Моделирование контурных ТТ .....	НО

## **ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПАРООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С ПОРИСТЫМИ СТРУКТУРАМИ.....123**

4.1. Анализ «теории перколяции».....	123
4.2. Моделирование теплообмена при кипении на поверхностях, покрытых капиллярно - пористыми структурами.....	129
4.2.1. Режимы и механизмы парообразования.....	129
4.2.2. Обобщение опытных данных по кипению на поверхностях с сеточными или слоевыми структурами.....	133
4.2.3. Модель кипения ИВТАН.....	136
4.2.4. Условия противоточного движения пара и жидкости в пределах одного канала.....	141
4.2.5. Развитие подходов при моделировании кипения.....	141
4.3. Модели с учетом конструктивных и технологических параметров структуры.....	143
4.4. Классификация режимов парообразования.....	150
4.5. Проблемы практической реализации аналитических моделей.....	154

## **ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ НА ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТТ.....157**

5.1. Моделирование теплообмена на пористых поверхностях конденсации ТТ.....	157
5.2. Конденсация при отводе жидкости за пределами поверхности теплообмена.....	160
5.3. Конденсация на неизотермическом прямоугольном ребре.....	168
5.4. Пленочная конденсация на поверхности с треугольными рёбрами.....	170



<b>ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ НА ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТТ.....</b>	<b>176</b>
6.1. Обзор исследований теплообмена на профилированных поверхностях ТТ.....	176
6.2. Моделирование максимального теплового потока на профилированных поверхностях ТТ.....	178
6.3. Моделирование процесса испарения на профилированных поверхностях.....	181
6.4. Моделирование процесса кипения на профилированных поверхностях.....	185
6.5. Режимы парообразования на профилированных поверхностях.....	187
6.6. Постановка задачи моделирования теплоотдачи при испарении в капиллярных каналах, на основе метода электротепловой аналогии.....	192
6.7. Результаты моделирования теплоотдачи при испарении в капиллярных каналах.....	196
6.8. Результаты экспериментальных исследований парообразования на профилированных поверхностях теплообмена.....	203
6.9. Испарительно-пульсационный режим парообразования.....	212
6.9.1 Гидродинамический механизм испарительно-пульсационного режима.....	212
6.9.2 Физическая модель испарительно-пульсационного режима.....	214
6.9.3 Тепловая модель испарительно-пульсационного режима.....	217
6.9.4 Обобщение экспериментальных данных по теплообмену в испарительно-пульсационном режиме.....	220
6.10. Теплоотдача при кипении на профилированных поверхностях.....	222
6.11. Теплоотдача при конденсации на профилированных капиллярных поверхностях.....	224
6.12. Рекомендации по расчету теплоотдачи при кипении и конденсации на профилированных поверхностях.....	225
<b>ГЛАВА 7. РЕСУРСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ И ТЕРМОСИФОНОВ.....</b>	<b>229</b>
7.1. Физико-химические процессы в тепловых трубах при длительной эксплуатации.....	229
7.2. Технологические аспекты стабилизации ресурсных характеристик тепловых труб.....	234
7.3. Организация и методика ресурсных испытаний	

тепловых труб.....	238
7.4. Результаты ресурсных исследований тепловых труб.....	242
7.5. Исследования тепловых труб "углеродистая сталь-хладон".....	244
7.6. Обобщение результатов ресурсных испытаний тепловых труб.....	252
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	266
<b>Литература</b> .....	268