

А.И. Улитенко, В.С. Гуров, В.А. Пушкин

# **Принципы построения индивидуальных систем охлаждения электронных приборов и устройств**

Москва  
Горячая линия – Телеком  
2012

УДК 621.396.6  
ББК 32.844  
У48

Рецензенты: заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат государственной премии РФ, доктор техн. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» *Ю. А. Быстров*; заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор техн. наук, профессор Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. *В. Ф. Некрашевич*

**Улитенко А.И., Гуров В.С., Пушкин В.А.**

**У48** Принципы построения индивидуальных систем охлаждения электронных приборов и устройств. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 286 с.: ил.

**ISBN 978-5-9912-0232-9.**

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование систем охлаждения электронных приборов с теплопередающим трактом на основе жидкостной магистрали, разработку конструкций высокоэффективных тепловых труб большой протяженности, создание методов проектирования теплорассеивающих элементов, построение систем охлаждения электронных приборов на основе унифицированных термоэлектрических батарей и разработку способов термостатирования приборов в условиях изменяющейся температуры окружающей среды.

Для инженерно-технических и научных работников, деятельность которых связана с разработкой радиоэлектронного оборудования, как общего, так и специального назначения. Будет полезна студентам и аспирантам при углубленном изучении вопросов теплового конструирования электронной аппаратуры.

**ББК 32.844**

Научное издание

**Улитенко Александр Иванович, Гуров Виктор Сергеевич,  
Пушкин Виктор Анатольевич**

**Принципы построения индивидуальных систем охлаждения  
электронных приборов и устройств**

*Монография*

Компьютерная верстка И. А. Благодаровой  
Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 17.12.2011. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 17,875. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-9912-0232-9 © А. И. Улитенко, В. С. Гуров, В. А. Пушкин, 2012  
© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2012

## Введение

Тенденция развития современных электронных приборов неразрывно связана с усложнением проблемы их охлаждения. Это объясняется непрерывным ростом плотности рассеиваемой мощности, жесткими условиями эксплуатации и многообразием конструктивного исполнения приборов, что в конечном итоге практически полностью исчерпало возможности интуитивных методов проектирования охлаждающих систем. Наиболее остро недостатки такого подхода проявляются при разработке индивидуальных систем жидкостного охлаждения приборов вакуумной и плазменной электроники.

Как правило, жидкостные системы выполняются по двухконтурной схеме, что способствует применению различных теплоносителей и длительному сохранению их высокого качества. В связи с этим они по-прежнему незаменимы при охлаждении приборов с высоким уровнем плотности рассеиваемой мощности, вплоть до значений порядка  $1 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. В основном это мощные генераторные лампы, клистроны, ЛБВ, твердотельные и газовые лазеры. В то же время, благодаря высокой универсальности, они часто используются для охлаждения приборов малой и средней мощности, конструктивные особенности которых ограничивают применение других способов теплоотвода.

Однако поскольку ценой универсальности жидкостных систем являются относительно низкие эксплуатационные характеристики, проблема их дальнейшего совершенствования продолжает оставаться актуальной. В частности, исследования условий теплообмена в каналах промежуточных теплообменников открывают новые возможности по снижению массо-габаритных и энергетических показателей разрабатываемых систем, повышению надежности и стабильности выходных параметров приборов и устройств в целом.

Помимо исследований, направленных на повышение эффективности работы жидкостных систем, в последнее время большое внимание уделяется разработке систем охлаждения приборов на основе более совершенных теплопередающих элементов – тепловых труб.

Специфические особенности тепловых труб позволяют трансформировать плотность тепловых потоков, разнести в пространстве источник и приемник теплоты, повысить изотермичность охлаждаемой поверхности и стабилизировать ее температуру без каких либо дополнительных затрат энергии. Однако широкому применению таких устройств препятствует ограниченность современных методов проектирования, позволяющих в наиболее полной мере реализовать их потенциальные возможности в условиях данного применения.

Разработка высокоэффективного теплопередающего тракта является решением важной, но не единственной проблемы, возникающей при создании индивидуальных систем охлаждения приборов. Не менее важной остается проблема интенсификации теплообмена с окружающей средой. При этом особые сложности возникают в ситуациях, когда температура окружающей среды существенно превышает предельные допустимые значения для того или иного типа прибора. В таких условиях становится актуальным широкое применение малогабаритных термоэлектрических холодильников, обладающих высокой устойчивостью к вибрационным нагрузкам, а также возможностью работы при любых ориентациях в пространстве.

Монография предназначена для инженерно-технических работников, деятельность которых связана с разработкой радиоэлектронного оборудования, как общего, так и специального назначения. Она также может быть использована в учебном процессе вузов, рабочие программы курсов которых содержат разделы теплового конструирования радиоэлектронной аппаратуры.

## Оглавление

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Проблема обеспечения теплового режима электронных приборов.....</b>	<b>5</b>
1.1. Влияние теплового режима на надежность и параметры приборов .....	5
1.2. Основные виды теплопередачи, используемые в системах охлаждения электронных приборов.....	8
1.2.1. Передача тепла излучением .....	9
1.2.2. Передача тепла теплопроводностью .....	10
1.2.3. Передача тепла конвекцией .....	12
1.3. Системы жидкостного охлаждения.....	21
1.3.1. Устройство и принцип работы жидкостных систем.....	21
1.3.2. Пути повышения эффективности жидкостного охлаждения.....	24
1.3.3. Проблема отложений .....	26
1.4. Использование тепловых труб в системах охлаждения электронных приборов .....	27
1.5. Проблема интенсификации теплообмена с окружающей средой .....	29
<b>Глава 2. Системы охлаждения электронных приборов с теплопередающим трактом на основе жидкостной магистрали .....</b>	<b>30</b>
2.1. Выбор теплоносителя промежуточного контура.....	30
2.2. Температурная диаграмма процесса охлаждения приборов, полный температурный напор в системе, нижняя граница массовых расходов теплоносителей.....	32
2.3. Элементы гидромеханики, затраты мощности на перемещение теплоносителя.....	34
2.3.1. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости .....	34
2.3.2. Гидравлические потери в системе .....	37
2.3.3. Затраты мощности на перемещение теплоносителя.....	42
2.4. Основные элементы индивидуальных систем охлаждения приборов .....	43
2.4.1. Нагнетатели .....	43
2.4.2. Расширительный резервуар .....	51

2.4.3. Стабилизатор потока .....	51
2.4.4. Арматура контура .....	54
2.4.5. Промежуточные теплообменники .....	55
2.5. Основные положения теплового расчета теплообменников .....	59
2.6. Общие замечания по выбору геометрии каналов теплообменника .....	61
2.7. Оценка граничных условий в каналах теплообменников ...	64
2.8. Исследование условий теплообмена в плоских каналах большой протяженности .....	70
2.8.1. Конструкция экспериментальных макетов .....	70
2.8.2. Схема экспериментальной установки .....	71
2.8.3. Исследование теплоотдачи при ламинарном режиме течения .....	72
2.8.4. Исследование теплоотдачи при переходном режиме течения .....	77
2.9. Влияние деформации стенок на условия теплоотдачи и проницаемость каналов .....	81
2.10. Расчет и проектирование систем .....	87
2.10.1. Параметр теплопередачи системы .....	87
2.10.2. Форма представления теплофизических свойств теплоносителей .....	89
2.10.3. Зависимость параметра теплопередачи в рубашке охлаждения прибора от мощности нагнетателя .....	89
2.10.4. Средняя температура теплоносителя промежуточного контура .....	93
2.10.5. Средняя температура теплоносителя внешнего контура системы .....	94
2.10.6. Средний температурный напор в теплообменнике .....	95
2.10.7. Среднелогарифмический температурный напор .....	95
2.10.8. Зависимость параметра теплопередачи в каналах теплообменника от критерия Рейнольдса .....	96
2.10.9. Критерий качества теплоносителя внутреннего контура ...	99
2.10.10. Длина каналов теплообменника .....	100
2.10.11. Эквивалентный диаметр каналов .....	100
2.10.12. Оптимизация систем охлаждения по массе .....	100
2.10.13. Оптимальное значение критерия Рейнольдса во внутреннем контуре теплообменника .....	103
2.10.14. Значение критерия Рейнольдса во внешнем контуре теплообменника .....	103

2.10.15. Методика расчета оптимизированных по массе систем .....	104
--	-----

### **Глава 3. Высокоэффективные тепловые трубы систем охлаждения электронных приборов ..... 108**

3.1. Основные принципы конструирования тепловых труб большой протяженности .....	108
3.1.1. Выбор рабочей жидкости .....	108
3.1.2. Корпус тепловой трубы .....	114
3.1.3. Капиллярная структура .....	114
3.2. Разработка гибкой артериальной структуры .....	118
3.2.1. Конструкция гибкой артерии .....	119
3.2.2. Исследование осевой проницаемости .....	120
3.2.3. Исследование радиальной проницаемости .....	127
3.2.4. Исследование капиллярных характеристик .....	131
3.2.5. Проектирование гибких артерий .....	137
3.3. Конструирование артериальных тепловых труб .....	141
3.3.1. Артериальные тепловые трубы с раздающей капиллярной структурой на основе сеточных полотен .....	141
3.3.2. Артериальные тепловые трубы с раздающей капиллярной структурой, выполненной методом электроискровой обработки .....	144
3.3.3. Артериальные тепловые трубы с раздающей капиллярной структурой, выполненной методом порошковой металлургии .....	149
3.4. Технология изготовления артериальных тепловых труб ..	155
3.4.1. Изготовление корпуса .....	155
3.4.2. Изготовление раздающей капиллярной структуры .....	157
3.4.3. Технология изготовления артерий .....	159
3.4.4. Заполнение тепловых труб теплоносителем .....	161
3.5. Исследование параметров артериальных тепловых труб..	163

### **Глава 4. Интенсификация теплообмена с окружающей средой..... 166**

4.1. Оптимизация условий теплоотдачи кольцевого ребра .....	166
4.2. Охлаждение электронных приборов естественной конвекцией .....	172
4.2.1. Сброс тепла с помощью массивных конструкционных элементов .....	173

4.2.2. Сброс тепла с помощью воздушного радиатора.....	175
4.3. Охлаждение электронных приборов вынужденной конвекцией.....	181
4.3.1. Воздушный теплообменник с пластинчатым оребрением .....	181
4.3.2. Воздушный теплообменник со спирально-проволочным оребрением .....	184

## **Глава 5. Обеспечение работоспособности приборов в условиях повышенной и изменяющейся температуры окружающей среды..... 190**

5.1. Разработка термоэлектрических холодильников на базе унифицированных термоэлектрических батарей .....	190
5.1.1. Холодильник на базе термобатарей типа «Селен» .....	191
5.1.2. Холодильник на базе термобатарей типа «ТЭМО».....	197
5.2. Стабилизация теплового режима приборов средней мощности .....	202
5.3. Стабилизация теплового режима мощных приборов .....	204

## **ГЛАВА 6. Жидкостные системы охлаждения газовых лазеров..... 210**

6.1. Стационарная система охлаждения ионного лазера с рассеиваемой мощностью 25 кВт .....	210
6.1.1. Конструкция активного элемента ионного лазера ЛГН-512 .....	210
6.1.2. Результаты оптимизации системы охлаждения типа «жидкость – жидкость» .....	212
6.1.3. Конструкция жидкостного теплообменника .....	214
6.1.4. Система охлаждения типа «жидкость – жидкость».....	216
6.2. Автономная система охлаждения ионного лазера с рассеиваемой мощностью 12,5 кВт .....	218
6.2.1. Конструкция активного элемента ионного лазера ЛГ-106.....	219
6.2.2. Результаты анализа теплового режима системы .....	219
6.2.3. Конструкция воздухоохлаждаемого теплообменника.....	223
6.2.4. Система охлаждения типа «жидкость – воздух» .....	224
6.3. Встроенная система охлаждения СО <sub>2</sub> -лазера с рассеиваемой мощностью 20 Вт .....	227
6.3.1. Устройство и принцип работы системы охлаждения.....	227
6.3.2. Основные расчетные соотношения.....	228



6.3.3. Силовая характеристика нагнетателя .....	230
6.3.4. Импульсный источник питания .....	232
6.3.5. Условия теплообмена в жидкостной магистрали .....	234
6.3.6. Теплоотсеивающий элемент.....	235
6.3.7. CO <sub>2</sub> -лазер с встроенной системой охлаждения .....	236
<b>Глава 7. Системы охлаждения приборов на основе</b>	
<b>артериальных тепловых труб .....</b>	<b>242</b>
7.1. Система охлаждения импульсного	
водородного тиратрона.....	242
7.1.1. Тепловой режим оболочки прибора.....	242
7.1.2. Обеспечение теплового режима	
катодно-сеточного узла тиратрона .....	244
7.1.3. Обеспечение теплового режима анодного	
узла тиратрона.....	247
7.2. Система охлаждения CO <sub>2</sub> -лазера	
с возбуждением разрядом постоянного тока .....	248
7.2.1. Анализ существующей системы охлаждения.....	248
7.2.2. CO <sub>2</sub> -лазер с системой охлаждения	
на базе гибкой тепловой трубы.....	252
7.3. Система охлаждения CO <sub>2</sub> -лазера	
с высокочастотным возбуждением.....	257
7.3.1. Анализ существующей системы охлаждения.....	257
7.3.2. Согласование теплопередающего тракта	
с системой возбуждения лазера .....	260
7.3.3. CO <sub>2</sub> -лазер с системой охлаждения	
на базе тепловых труб .....	265
7.4. Система охлаждения СВЧ-диода Ганна.....	267
7.4.1. Анализ теплового режима СВЧ-диода.....	267
7.4.2. Система охлаждения диода Ганна	
на основе тепловой трубы.....	271
<b>Заключение.....</b>	<b>273</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>274</b>