

зисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000.

4.57. *Брусницин П.С., Кораблев В.А., Савинцева Л.А., Шарков А.В.* Аккумуляционная система термостатирования твердотельного лазера // Юбилейная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000.

4.58. *Тихонов С.В.* Выбор схемы системы термостатирования большого зеркала телескопа // Труды международной конференции « Прикладная оптика-96». СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 1996.

4.59. *Тихонов С.В., Семенов Ю.В.* Термостабилизация микропроцессора с повышенной мощностью тепловыделения // XXXI научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.

4.60. *Брусницин П.С., Шарков А.В.* Малогабаритный термостат одночастотного источника света // Юбилейная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000.

4.61. *Беляков А.П., Дульнев Г.Н., Шарков А.В.* Термостат с газорегулируемой тепловой трубой // Учебно-технические разработки. Изд. СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 139.

4.62. *Брусницин П.С., Кораблев В.А., Шарков А.В.* Применение термоэлектрических элементов в системах охлаждения // Изв. вузов. Приборостроение, 2000. № 6. С. 81-86.

4.63. *Дульнев Г.Н., Кораблев В.А., Шарков А.В.* Испарительное охлаждение силовых полупроводниковых приборов // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. Part A, 1996. Vol. 19. № 3. P. 431-435.

4.64. *Брусницин П.С., Кораблев В.А., Шарков А.В.* Элементы Пельтье в системах термостабилизации // Научно-техническая конференция профессорско-пре-

зисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000.

4.57. *Брусницин П.С., Кораблев В.А., Савинцева Л.А., Шарков А.В.* Аккумуляционная система термостатирования твердотельного лазера // Юбилейная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000.

4.58. *Тихонов С.В.* Выбор схемы системы термостатирования большого зеркала телескопа // Труды международной конференции « Прикладная оптика-96». СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 1996.

4.59. *Тихонов С.В., Семенов Ю.В.* Термостабилизация микропроцессора с повышенной мощностью тепловыделения // XXXI научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.

4.60. *Брусницин П.С., Шарков А.В.* Малогабаритный термостат одночастотного источника света // Юбилейная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000.

4.61. *Беляков А.П., Дульнев Г.Н., Шарков А.В.* Термостат с газорегулируемой тепловой трубой // Учебно-технические разработки. Изд. СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 139.

4.62. *Брусницин П.С., Кораблев В.А., Шарков А.В.* Применение термоэлектрических элементов в системах охлаждения // Изв. вузов. Приборостроение, 2000. № 6. С. 81-86.

4.63. *Дульнев Г.Н., Кораблев В.А., Шарков А.В.* Испарительное охлаждение силовых полупроводниковых приборов // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. Part A, 1996. Vol. 19. № 3. P. 431-435.

4.64. *Брусницин П.С., Кораблев В.А., Шарков А.В.* Элементы Пельтье в системах термостабилизации // Научно-техническая конференция профессорско-пре-

подавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 1999.

4.65. *Корнев П.А., Шарков А.В.*, Исследование параметров подогревного термостата с двухпозиционным регулятором // Учебно-технические разработки. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 142-143.

4.66. *Шарков А.В., Беляков А.П., Корнев П.А., Алешкевич Ю.В., Кораблев В.А.* Камера для климатических испытаний оптико-электронных приборов // Научно-технические разработки. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 229.

4.67. *Шарков А.В., Кораблев В.А., Кузьмин К.А.* Двухконтурная система термостабилизации лазерных твердотельных систем // Научно-технические разработки. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 268-269.

4.68. *Дульнев Г.Н., Кораблев В.А., Савинцева Л.А.* Бытовой комфортер. Научно-технические разработки. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 268-269.

4.69. *Шарков А.В., Кораблев В.А., Макаров С.Л., Лукьянов Г.Н.* Система термостатирования для исследований диэлектрических свойств жидкости // XXXI научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.

4.70. *Шарков А.В., Корнев П.А., Беляков А.П., Алешкевич Ю.В.* Комплекс термостатов для оптических элементов с источниками тепловыделений // Научно-технические разработки. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 272-273.

4.71. *Дульнев Г.Н., Кораблев В.А., Спокойный М.Ю., Шарков А.В.* Термостат для кварцевого резонатора // Научно-технические разработки. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 272-273.

4.72. *Дульнев Г.Н., Польщиков Б.В., Корнев П.А.* Выравнивание поля температур в объекте термостатирования // Изв. вузов. Приборостроение, 1983. Т. 26. № 7. С. 90-95.

4.73. *Дульнев Г.Н., Корнев П.А., Польщиков Б.В., Сигаева С.В.* Программное

регулирование температуры объектов с импульсным законом внутренних тепло-выделений // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. 1983. Вып. 3. С. 48-54.

4.74. Шарков А.В., Кораблев В.А., Савинцева Л.А., Полковникова А.Н. Кондуктивный теплоотвод в герметичном радиоэлектронном аппарате // XXXI научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава. Тезисы докладов. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.

4.75. Цинь Юнь-ле. Экспериментальное исследование погрешности измерения температур поверхностей // Изв. вузов. Приборостроение, 1965. № 6.

4.76. Геращенко О.А. Основы теплотрии. Киев: «Наукова думка», 1972. – 190 с.

4.77. Douglas B. Instrum. and Contr. Syst, 45. № 5. 1975.

4.78. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В. Об измерении нестационарных тепловых потоков различной длительности действия // Изв. вузов. Приборостроение. Л.: ЛИТМО, 1977.

4.79. Дульнев Г.Н., Кузьмин В.А., Пилипенко Н.В., Тихонов С.В. Особенности измерения нестационарных тепловых потоков // ИФЖ, май. Т. XXXII. № 5, 1997, с. 773-776.

4.80. Дульнев Г.Н., Завгородний В.И., Кузьмин В.А., Пилипенко Н.В. Изменения нестационарных тепловых потоков датчиками "вспомогательная стенка" / ИФЖ, июль. Т. XXXVII. № 1. 1979. С. 99-103.

4.81. Пилипенко Н.В., Ключев В.М., Кузьмин В.А. Стенд для исследования преобразователей нестационарного теплового потока // Изв. вузов. Приборостроение, 1978, № 7.

4.82. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Кузьмин В.А. Об инерционности измерений с помощью тепломеров "вспомогательная стенка" // ИФЖ, август. Т. XXXIX. № 2. 1980. С. 298-305.

- 4.83. Дульнев Г.Н. Теоретические основы метода измерения энергии, меняющейся во времени // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 1. № 2. 1958.
- 4.84. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Платунов Е.С. Динамический биокалориметр // Изв. вузов. Приборостроение. Т. XIV. № 5. 1971.
- 4.85. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В., Платунов Е.С. А.с. № 355551. Б.и., № 31, 1972.
- 4.86. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. М.: изд-во стандартов, 1972.
- 4.87. Дульнев Г.Н., Пилипенко Н.В. Метод определения теплоты гидратации цемента // ИФЖ, Т. 23. № 1. 1972. С. 403-409.
- 4.88. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1961. С. 703.
- 4.89. Запорожец И.Д., Окороков С.Д., Порейский А.А. Тепловыделение бетона. М.: Стройиздат, 1966.
- 4.90. Чередниченко Л.К. Физиологическая калориметрия. М.: Наука, 1965.
- 4.91. Дульнев Г.Н., Миндлин А.М., Семяшкин Э.И. Калориметрический метод измерения мощности рассеивания головой собаки // Физиологический журнал СССР, 1967.
- 4.92. Миндлин А.М. Приборы для определения газового обмена теплокровных животных // Изв. вузов. Приборостроение, 1962. № 4.
- 4.93. Миндлин А.М. Установка для измерения мощности источников энергии и ее применения в биокалориметрии // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 1. № 2. 1958.
- 4.94. Пилипенко Н.В., Чередниченко Л.К. Прямые калориметрические исследования теплового обмена при действии на организм низких температур // Материалы Всесоюзной конференции. Владимир, 1972.

4.95. *Круглов А.А., Медведев К.Е.* Определение эквивалентных энергетических параметров // Изв. вузов. Приборостроение. № 5. 1967.

4.96. *Пилипенко Н.В., Лукьянок Г.Н.* Проектирование приборов и устройств для тепловых измерений: лабораторный практикум. Л.: ЛИТМО, 1984. – 85 с.

4.97. *Пилипенко Н.В.* Методы и устройства нестационарной теплотометрии. Л.: ЛИТМО, 1985. – 52 с.

# **РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ, ЭЛЕКТРОННЫХ, ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

## **Введение**

В конце пятидесятых годов XX века возникла острая проблема обеспечения теплового режима РЭУ, и для ее решения были развернуты широкие исследования как в нашей стране, так и за рубежом.

С 1950 года к этим исследованиям была подключена кафедра тепловых и контрольно-измерительных приборов, которые затем продолжились в рамках проблемной лаборатории. На первых порах в основном изучался тепловой режим отдельных деталей РЭУ: сопротивлений и термосопротивлений, трансформаторов, полупроводниковых выпрямителей радиаторного типа, полупроводниковых диодов и триодов. На базе этих исследований возникло целое научное направление по изучению тепловых режимов РЭУ и были защищены диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Н.Н. Тарновским, Э.М. Семяшкиным, В.П. Савиновым, А.И. Смирновым, В.В. Володиным, В.М. Черкисовым, а в 1963 году эти исследования были обобщены Г.Н. Дульневым в монографии [5.1].

С 1960-х годов фронт работ по тепловым режимам РЭУ расширился, и сотрудники приступили к изучению тепловых режимов и электронных аппаратов. Сразу возникла проблема разработки приближенных методов анализа теплового режима сложных неоднородных систем тел.

В конце 1960-х – 1970-х годов, аналогичные задачи встали и при создании различных оптико-электронных устройств: объективов аэрокосмической оптики; твердотельных, полупроводниковых, жидкостных и других типов лазеров; элементов волоконной и интегральной оптики; конденсаторов мощных осветительных систем; гироскопов и так далее. В настоящее время сформировалась целая отрасль науки и техники, в которой работает большое число специалистов, занимающихся обеспечением тепловых режимов различных приборных комплексов. В этих исследованиях в разные годы принимали участие сотрудники лаборатории А.М. Ка-

рапетян, А.И. Кайданов, Н.М. Дульнева, Э.Ф. Буц, Э.Ф. Трудкова, В.С. Кондратьев, И.В. Глушицкий, А.В. Шарков, А.А. Акаев, Б.В.Польщиков, О.Б. Ага, Е.Ф. Буцько, В.Г. Парфенов, Д.П. Беляков, В.И. Егоров, Э.И. Ермолина, П.А. Коренев, А.Е. Михайлов, А.Ю. Потягайло, Е.Д. Ушаковская, Е.Д. Сахова, А.О. Сергеев, Л.А. Савинцова, В.В. Гасанова, А.С. Столярков, Ю.А. Гаврилов, Ю.П. Заричняк, М.Ю. Спокойный, Е.Н. Колтунова, В.А. Кораблев; которые в дальнейшем защитили по этой тематике кандидатские и докторские диссертации. Эти исследования нашли отражение в книгах [5.2–5.5] и многочисленных статьях.

В последние годы исследования тепловых режимов приборов стали развиваться в направлении создания методов теплового проектирования, базирующихся на широком применении ЭВМ и разработки систем автоматического проектирования

Автоматизацию теплового проектирования радиоэлектронных устройств следует рассматривать как составную часть комплексной проблемы машинных методов проектирования с учетом всех технико-экономических параметров: функциональных, весовых, габаритных, технологических, надежностных и стоимостных. Необходимость автоматизации проектирования вызвана ускоряющимся темпом роста производства, усложнением устройств, переходом к новой технологии и уменьшением времени разработки.

Автоматизация проектирования РЭУ охватывает широкий круг взаимосвязанных проблем, одна из которых – тепловое проектирование – является подсистемой в общей системе автоматизированного проектирования. Для создания системы автоматизированного теплового проектирования РЭУ необходимо решить ряд задач:

разработать физико-математические модели устройств и методы расчета их тепловых режимов при различных способах термостатирования и охлаждения;

рассмотреть принципы и методы оптимизации тепловых режимов, а также способы обеспечения заданного уровня температур;

создать автоматизированную систему управления теплофизическими расчетами, предусматривающую расчет тепловых полей; оптимизацию конструкций и систем охлаждения; стыковку подсистемы теплового проектирования с другими подсистемами проектирования.

Необходимо отметить, что примерно до 70-х годов XX века основные расчеты тепловых режимов приборов проводились на основе аналитических методов. В настоящее время эти методы, несмотря на возросшее применение компьютеров, сохранили свое значение в основном для оценочных расчетов, а уточнение проводится, как правило, с помощью



численных методов. Широкое распространение получил такой подход при тепловом проектировании, он будет рассмотрен в главе 22.

Ниже приведены типичные конструкции приборов, на базе которых впоследствии будут предложены ряд тепловых моделей.

Позже стал появляться интерес к тепловым режимам оптико-электронных приборов (ОЭП). Этот тип приборов широко применяется как индивидуально, так и в составе приборных комплексов самого различного назначения. Их особенность – обработка входного сигнала как оптическими, так и электронными входными устройствами. Оптико-электронный прибор – сложная система, состоящая из механических и оптических устройств и электронных блоков. Анализ температурных полей такого прибора является составной частью в общей процедуре проектирования прибора. Как отмечалось в главе двадцать второй, нормальный тепловой режим РЭА связан с обеспечением допустимого значения температуры. В ОЭП необходимо выполнить ограничения на вид температурного поля, связанные как с отклонением уровня температуры от номинального значения, так и со степенью неравномерности поля температур. Например, при расчете объектива ОЭП предполагается вначале, что его температурное поле равномерное и соответствует некоторому номинальному значению. На втором этапе следует знать реальное температурное поле, отклоняющееся от номинального; это приводит к изменению в оптической схеме. Из-за теплового расширения материалов изменяются радиусы кривизны и толщины линз и зеркал, расстояния между элементами и т. д., а также может меняться и форма элементов. Например, плоскопараллельная пластина может превратиться в линзу. Из-за температурной зависимости показателя преломления возникают его отклонения от номинального значения. Кроме того, при неравномерном поле температур в элементе возникают термонапряжения, которые из-за фотоупругого эффекта могут изменить показатель преломления.

Перечисленные выше возмущения в оптической системе вызывают дополнительные термические aberrации: тепловую расфокусировку, термическую сферическую aberrацию, термическую кому и т. д. – в конечном итоге ухудшение качества изображения [5.27, 5.28]. Итак, «тепловое» проектирование ОЭП нельзя отделять от его «функционального» проектирования.

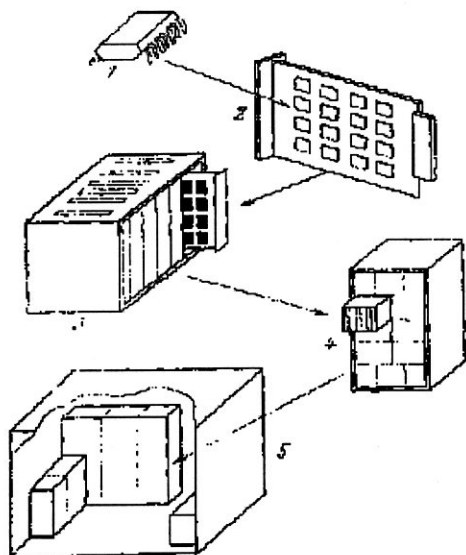
# ГЛАВА 22. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

## 22.1. Тепловые модели радиоэлектронных аппаратов

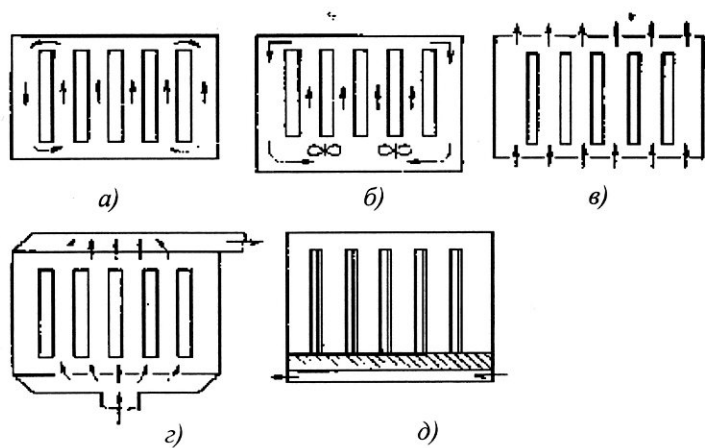
Тепловые модели создаются в результате идеализации их конструкций и протекающих в них процессов переноса тепла. Рассмотрим более подробно радиоэлектронную аппаратуру (РЭА). Она включает в себя электронные устройства различного функционального назначения, например цифровую вычислительную аппаратуру, приемопередающие устройства, устройства силовой электроники и источники вторичного электропитания и др. Эти установки содержат в качестве элементной базы микросхемы и микросборки, дискретные электроэлементы (резисторы, конденсаторы, дроссели), полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы), электровакуумные приборы и так далее. Отдельные устройства объединяются в радиоэлектронные комплексы и системы, служащие для решения различных задач.

Нормальное функционирование РЭА возможно лишь при условии поддержания температур ее элементов в определенных пределах. Изменение теплового режима оказывает влияние на характеристики элементов и может привести к возникновению физико-химических процессов, выводящих элемент из строя. При этом дестабилизирующими тепловыми воздействиями являются рассеиваемая при работе элементов энергия, изменение температуры внешней среды и тепловые потоки от окружающих прибор объектов. Поэтому на этапе конструкторского проектирования РЭА при выборе вариантов конструкции и компоновки наряду с задачами обеспечения монтажно-коммуникационных требований, помехоустойчивости, технологичности, вибропрочности необходимо решать задачи обеспечения нормального теплового режима.

Применение новой элементной базы, позволяющей уменьшить массу и объем устройств, во многих случаях увеличивает рассеиваемые удельные мощности, что заставляет искать новые пути решения задач обеспечения теплового режима. Часто требования к тепловому режиму приводят к необходимости использования систем охлаждения и термостатирования, конструкции которых во многом определяют конструкцию самой аппаратуры, причем массогабаритные показатели и энергозатраты системы охлаждения могут быть соизмеримы или превышать соответству-



*Рис. 22.1.1*



*Рис. 22.1.2*

ющие характеристики функциональных устройств. Из этого следует, что проблема конструирования РЭА неразрывно связана с разработкой систем охлаждения, и эти процессы нельзя разрывать.

Рассмотрим, например, широко распространенные конструкции микроэлектронной аппаратуры (рис. 22.1.1). В ней следует различать следующую иерархию при компоновке приборов такого типа: микросхемы (1), из которых созданы печатные платы (2), последние входят в блоки (3), из блоков собираются многоблочные конструкции (4), расположенные в отсеках или аппаратных помещениях (5) [5.5].

Остановимся отдельно на тепловых системах охлаждения блоков (рис. 22.1.2): естественное воздушное охлаждение в герметическом корпусе (а); внутреннее перемешивание воздуха в герметическом корпусе (б); естественная вентиляция блока в перфорированном корпусе (в); принудительная вентиляция, осуществляемая централизованно, кондуктивное охлаждение (г) плат с отводом тепла на корпус или специально охлаждаемое основание (д).

Примером одной из эффективных систем охлаждения является комбинированная кондуктивно-воздушно-жидкостная система, приведенная на рис. 22.1.3. Здесь на каждом этаже основание 3 охлаждается с помощью жидкости 5; с плат 2 теплостоки передают тепло на основание 3; кроме того, предусмотрено воздушное охлаждение 1, причем между этажами работает теплообменник 4 типа «воздух-жидкость» [5.5].

Влияние теплового режима на работу РЭА проявляется в изменяемых выходных характеристиках (помехоустойчивость, интенсивность отказов), а последние, как правило, связаны с электрическими параметрами. Например, электрическое сопротивление  $R$  изменяется с температурой  $t$  по следующему закону

$$R(t) = R(t)_0 [1 + \alpha_R (t - t_0)], \quad (22.1.1)$$

где  $R(t)_0$  – сопротивление при температуре  $t_0$ ,  $\alpha_R$  – температурный коэффициент сопротивления. Надежность аппаратуры характеризуется вероятностью  $P(\tau)$  безотказной работы и интенсивностью отказов  $\Lambda(\tau)$  за единицу времени  $\Delta(\tau)$  [5.6].

$$\Lambda(\tau) = \frac{\Delta N}{N \Delta \tau}, \quad (22.1.2)$$

где  $\Delta(N)$ ,  $N$  – число отказов  $\Delta(N)$  из общего числа  $N$  элементов.

Вероятность безотказной работы в течение времени  $t$  имеет экспоненциальный закон распределения

$$P(\tau) = \exp(-\Lambda \tau),$$

а среднее время отказа

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{1}{\Lambda}. \quad (22.1.3)$$

Повышение температуры является основным фактором, увеличивающим вероятность отказов в полупроводниковом кристалле:

$$\Lambda(T) = \Lambda(T_0) A^{\frac{(T-T_0)}{10}}.$$

Здесь  $\Lambda(T_0)$  – множитель, показывающий степень роста интенсивности отказов при увеличении температуры на 10К.

Исследованию тепловых режимов РЭА различных классов при комплексных тепловых воздействиях посвящено большое количество работ. Однако они носят сравнительно частный характер. Ниже приведены общие схемы для теплового и математического моделирования, позволяющие составить тепловые модели широкого класса приборов. При этом учитываются различные способы отвода тепла (естественная и вынужденная вентиляция, кондукция, жидкостное охлаждение, тепловые трубы, радиаторы, теплообменники и т. д.).

В работах [5.5, 5.6] приведен довольно обширный набор конструкций РЭУ, показывающий большое разнообразие в исполнении приборов. Все возможные конструкции устройств рассмотрим как системы тел с внутренними и внешними источниками тепла и разделим их на два класса: системы, состоящие из неупорядоченного расположения тел (НР); системы с упорядоченным расположением тел (УР).

**Модель с неупорядоченным расположением конструктивных элементов.** Рассмотрим систему тел, состоящую (рис. 22.1.4) из крупных элементов 2, 3, 4, 5, заключенных в общую оболочку 1, произвольной формы. Эта оболочка в зависимости от назначения может быть как однослойной, так и представлять собой систему оболочек. Она подвергается различным энергетическим воздействиям (находится в теплообмене с окружающей средой, температурой  $t_c$ , на нее может падать внешний тепловой поток и т. д.).

Каждое из тел внутри оболочки 1 может, в свою очередь, представлять многосоставное тело. Например, тело 2 является корпусом блока, внутри которого расположены тела 6, 7, 8; тело 3 представляет собой систему нескольких замкнутых оболочек; тело 4 – электронный прибор кассетного типа. Тела 2, 3, 4, 5 разделены средами и связаны между собой различными конструктивными узлами; отдельные части системы тел содержат внутренние источники или стоки тепла. Тепловой режим системы тел во многом зависит от того, замкнута оболочка, или нет. В замкнутой оболочке

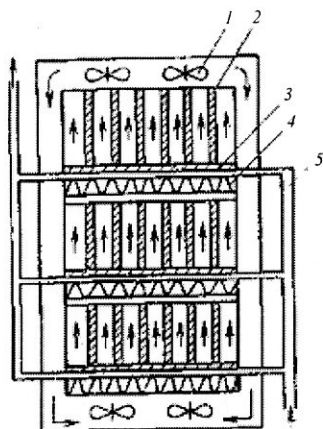


Рис. 22.1.3

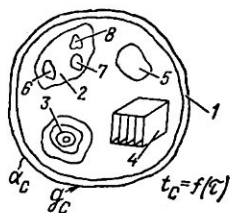


Рис. 22.1.4

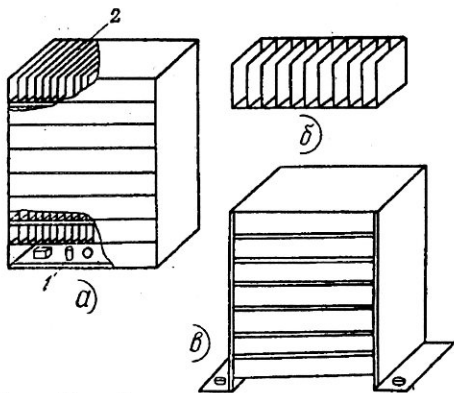


Рис. 22.1.5

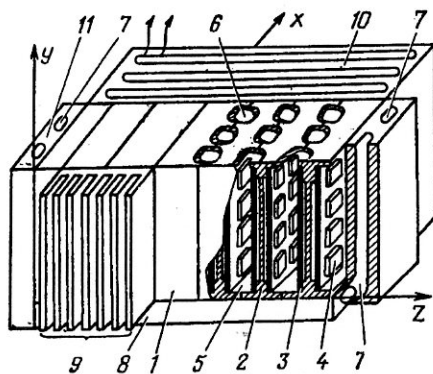


Рис. 22.1.6

(аппарат в герметичном или пылезащищенном корпусе) исключена возможность массообмена между средами внутри и вне оболочки, через незамкнутую оболочку (например, вентилируемый аппарат) может протекать жидкая или газообразная среда. Тепловой режим существенно зависит также и от выбранной системы охлаждения. Кроме общей вентиляции, аппаратура может иметь локальные стоки тепла, выполненные с помощью вентиляции отдельных элементов, водяного охлаждения, термобатарей, теплостоков, теплообменников. Наиболее полные сведения о тепловом режиме таких тел содержатся в задании температурных полей каждого из тел. Однако математическое описание и анализ такой модели громоздки, требуют для реализации большого времени и, как правило, содержат избыточную информацию. Поэтому при решении практических задач часто используют упрощенные модели, что делает модель справедливой для частных случаев и усложняет возможность обобщения результатов исследования на более широкий класс аппаратов.

**Модель с упорядоченным расположением конструктивных элементов (УР).** К таким моделям можно свести стойки электронных приборов (рис. 22.1.5, а), блоки кассетных аппаратов (рис. 22.1.5, б), сборки на больших интегральных схемах (рис. 22.1.5, в) и т. д. Модель с УР можно рассматривать независимо от других объектов или как одну из частей, входящих в систему НР элементов, блок и т. д. В последнем случае тепловые воздействия на корпус прибора определяются из анализа модели НР.

Рассмотрим наиболее распространенную конструкцию РЭУ в форме параллелепипеда (рис. 22.1.6), выполненного из плотно расположенных блоков 1, например кассет, плат с микромодулями, корпусов с УР или НР. Зона частично или полностью охватывается корпусом, который часто образован рамками или каркасом блоков. Наличие каналов 5 между платами 3 создает условие для возникновения конвекции, которая может происходить в замкнутом объеме и быть сквозной при наличии перфорационных отверстий 6. В последнем случае конвекция бывает как естественной, так и вынужденной. От элементов тепло рассеивается излучением, если каналы заполнены газом, а также через платы 3 и теплостоки 2.

От периферии аппарата тепловой поток рассеивается различными способами: кондукцией, жидким теплоносителем или тепловыми трубами 7 на термостатируемую плоскость 8 либо к наружным теплообменникам 10; 11, а также конвекцией и излучением с радиаторов 9 и открытых поверхностей корпуса в окружающую среду. Существенно отметить, что тепловой поток встречает на своем пути многочисленные контактные соединения, которые, как правило, не являются идеальными, то есть на переходах всегда существует конечное контактное тепловое сопротивление.

## 22.2. Математические модели РЭА

Для модели с НР, как уже отмечалось, тепловой режим наиболее полно характеризуется температурным полем каждого тела в системе. Однако во многих случаях достаточно знать средние поверхностные температуры нагретых зон, корпуса, системы оболочек и среднеобъемную температуру воздуха внутри прибора.

Математическая постановка задачи в этом случае [5.8] сводится к решению системы  $N$  уравнений, составленных в соответствии с законом сохранения энергии,

$$\left. \begin{aligned}
 C_1 \frac{d\vartheta_1}{d\tau} + \sum_{i=2}^N \sigma_{1,i} (\vartheta_1 - \vartheta_i) &= P_1 - g_1, \\
 \dots\dots\dots \\
 C_{N-2} \frac{d\vartheta_{N-2}}{d\tau} + \sum_{\substack{i=2 \\ i \neq N-2}}^N \sigma_{N-2,i} (\vartheta_{N-2} - \vartheta_i) &= P_{N-2} - g_{N-2}, \\
 \sum_{\substack{i=2 \\ i \neq N-1}}^N \sigma_{N-1,i} (\vartheta_{N-1} - \vartheta_i) &= -Q, \\
 C_N \frac{d\vartheta_N}{d\tau} + \sum_{i=2}^{N-1} \sigma_{N,i} (\vartheta_N - \vartheta_i) + \sigma_{N,c} \vartheta_N &= -g_N,
 \end{aligned} \right\} \quad (22.2.1)$$

при начальных условиях

$$\vartheta_i(\tau = 0) = \vartheta_{i0} \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (22.2.2)$$

Здесь:  $\vartheta_i = t_i - t_c$  – средний перегрев зоны  $i$  над средой;  $t_p, t_c$  – средние температуры зоны над средой;  $P_i$  – мощность источника в  $i$ -й зоне ( $i = 1, 2, \dots, N-2$ );  $C_i$  – полные теплоемкости зон и корпуса ( $i = 1, 2, \dots, N-2, N$ );  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  – тепловые проводимости между телами системы;  $\sigma_{N,c}$  – тепловая проводимость от корпуса в среду;  $g_i$  – мощность стока тепла в  $i$ -й зоне.

Первые два уравнения (22.2.1) характеризуют взаимный теплообмен между  $i$ -ми областями зоны с перегревами  $\vartheta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N-2$ ); третье – между протекающим через аппарат воздухом (газом) с перегревом  $\vartheta_{N-1}$  и зоной. Последнее соотношение описывает теплообмен между корпусом с перегревом  $\vartheta_N$ , зоной и протекающим воздухом.

Сток тепловой энергии согласно [5.3] выражается в виде

$$Q = Gc(\vartheta_{\text{вых}} - \vartheta_{\text{вх}}), \quad (22.2.3)$$



где  $G$  – массовый расход протекающего через оболочку воздуха;  $c$  – его удельная теплоемкость;  $\vartheta_{\text{вых}}$ ,  $\vartheta_{\text{вх}}$  – среднерасходные перегревы относительно  $t_c$  на входе и выходе аппарата.

Способ расчета  $G$  зависит от конкретного исполнения элемента  $i$  и будет рассмотрен ниже.

На основании (22.2.3) с учетом приближенного соотношения

$$\vartheta_{\text{в}} = 0,5(\vartheta_{\text{вых}} - \vartheta_{\text{вх}}) \quad (22.1.4)$$

систему уравнений (22.2.1) при начальных условиях (22.2.2) приведем к виду:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\vartheta_1}{d\tau} + \sum_{i=2}^N \sigma_{1,i} (\vartheta_1 - \vartheta_i) &= P_1 - g_1, \\ \dots\dots\dots \\ C_{N-2} \frac{d\vartheta_{N-2}}{d\tau} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq N-2}}^N \sigma_{N-2,i} (\vartheta_{N-2} - \vartheta_i) &= P_{N-2} - g_{N-2}, \\ \sum_{i \neq N-1}^N \sigma_{N-1,i} (\vartheta_{N-1} - \vartheta_i) + 2Gc\vartheta_{N-1} &= 2Gc\vartheta_{\text{вх}}, \\ C_N \frac{d\vartheta_N}{d\tau} + \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_{N,i} (\vartheta_N - \vartheta_i) + \sigma_{N,c}\vartheta_N &= -g_N. \end{aligned} \right\} \quad (22.2.5)$$

Существует несколько способов реализации системы (22.2.5) [5.1, 5.2, 5.8, 5.9]. Выбор каждого из них определяется условиями задачи и возможностями разработчиков.

Для модели с УР температурное поле описывается различными дифференциальными уравнениями [5.5, 5.12, 5.13]. Уравнение теплопроводности квазистационарного параллелепипеда с учетом объемной конвекции и сложного распределения источников тепла имеет вид

$$\begin{aligned} \lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial z^2} - c_1 \rho_1 \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \tau} &= \\ = - \sum_{i=1}^N 1\{n_i\} W_i + \sum_{i=1}^r 1\{r_i\} \alpha_{Vi} (\vartheta_1 - \vartheta_f), \end{aligned} \quad (22.2.6)$$

уравнение энергии движущейся среды в канале –

$$\sum_{i=1}^r 1\{r_i\} \alpha_{\nu_i} (\vartheta_1 - \vartheta_f) = \sum_{i=1}^r 1\{r_i\} w_i \frac{\partial \vartheta_f}{\partial y} + \sum_{i=1}^r 1\{r_i\} c_f \rho_f \frac{\partial \vartheta_f}{\partial \tau}, \quad (22.2.7)$$

а уравнение теплопроводности для корпуса теплоаппарата –

$$\lambda_2 \frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial z^2} - c_2 \rho_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \tau} + \sum_{i=x,y} \left[ \alpha_{1i} (\vartheta_1 - \vartheta_2) \Big|_{1i} + \alpha_{0i} (\vartheta_1 - \vartheta_2) \Big|_{0i} \right] \times \\ \times \frac{\ell_x \ell_y}{f_2 \ell_i} = \sum_{j=1}^k 1\{k_j\} \alpha_i (\vartheta_2 - \vartheta_j) \frac{S_j}{f_2 \ell_{zj}}, \quad (22.2.8)$$

где

$$w_i = c_f (G_p)_i / F_i; \quad \alpha_{\nu_i} = \alpha_{mi} 2 / (b_1 + \delta_1); \\ f_2 = 2(\ell_x + \ell_y) \delta_2; \quad \vartheta_\eta = t_\eta - t_c; \quad \eta = 1, 2, f, i, j.$$

Локальное распределение источников и стоков тепла учтено с помощью единичных функций  $1\{n\}$ ,  $1\{r\}$ ,  $1\{m\}$ ,  $1\{k\}$ .

В случае локальных воздействий [5.10] краевые условия задачи с учетом начальных условий

$$\vartheta_1 \Big|_{\tau=\tau_0} = \vartheta_0(x, y, z); \quad \vartheta_f \Big|_{\tau=\tau_0} = \vartheta_{f0}(x, y, z); \quad \vartheta_2 \Big|_{\tau=\tau_0} = \vartheta_{20}(z); \\ \alpha_j = (R_j S_j)^{-1}, \quad (j = 1z, 0z, 1i, 0i)$$

и единичных функций

$$1\{n\}, 1\{r\}, 1\{m\}, 1\{k\} \begin{cases} 1 - \text{в областях } n, r, m, k \\ 0 - \text{вне областей } n, r, m, k \end{cases}$$

имеют вид

для нагретой зоны по оси  $z$

$$\left[ \lambda_z \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} + \alpha_{1z} (\vartheta_1 - \vartheta_{1n}) \right]_{z=\ell_z} = \sum_{j=1}^{m_{1z}} 1\{m_{1z}\}_j (g_{1z})_j, \\ \left[ \lambda_z \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} + \alpha_{0z} (\vartheta_1 - \vartheta_{0n}) \right]_{z=0} = \sum_{j=1}^{m_{0z}} 1\{m_{0z}\}_j (g_{0z})_j, \quad i = x, y;$$

$$\left. \begin{aligned} &\text{для нагретой зоны по осям } x \text{ и } y \\ &\left[ \lambda_i \frac{\partial \vartheta_1}{\partial i} + \alpha_{1i} (\vartheta_1 - \vartheta_2 |_{1i}) \right]_{i=\ell_i} = \sum_{j=1}^{m_{1i}} 1\{m_{1i}\}_j (g_{1i})_j, (i = x, y); \\ &\left[ \lambda_i \frac{\partial \vartheta_1}{\partial i} + \alpha_{0i} (\vartheta_1 - \vartheta_2 |_{0i}) \right]_{i=z=0} = \sum_{j=1}^{m_{0i}} 1\{m_{0i}\}_j (g_{0i})_j; \end{aligned} \right\} (22.2.9)$$

для воздуха

$$\vartheta_f |_{y=0} = \vartheta_{\text{вх}};$$

для корпуса по оси  $z$

$$\begin{aligned} &\left[ \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} + \alpha_{2z} (\vartheta_2 - \vartheta_{1n}) \right]_{z=\ell_z} = 0; \\ &\left[ \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} + \alpha^*_{2z} (\vartheta_2 - \vartheta_{0n}) \right]_{z=0} = 0. \end{aligned}$$

При записи краевых условий приняты обозначения:  $t_1(x, y, z, \tau)$  – температура нагретой зоны в точке  $(x, y, z)$  в момент времени  $\tau$ ;  $t_1(x, y, z, \tau)$ ,  $t_2(z, \tau)$ ,  $t_{1n}$ ,  $t_{0n}$ ,  $t_j$ ,  $t_c$  – температуры воздуха в канале, корпуса, теплообменников, окружающей среды соответственно;  $c_1$ ,  $\rho_1$ ,  $c_p$ ,  $\rho_p$ ,  $c_2$ ,  $\rho_2$  – удельные теплоемкости и плотности зоны, воздуха и корпуса;

$$\sum_{i=1}^n 1\{n_i\} W_i; \quad \sum_{j=1}^m 1\{m_j\} g_j - \text{запись с помощью единичной функции}$$

неравномерного распределения источника тепла в объеме нагретой зоны и на ее гранях;

$$\sum_{i=1}^r 1\{r_i\} \alpha_{vi} (\vartheta_1 - \vartheta_j), \quad \sum_{j=1}^k 1\{k_j\} \alpha_j (\vartheta_2 - \vartheta_j) \frac{S_j}{f_2 \ell_{zj}} - \text{запись с помощью}$$

единичной функции неравномерных стоков тепла из-за внутренней конвекции и неравномерности отдачи с корпуса прибора, обусловленной локальными теплообменниками;

$G_{\rho}$ ,  $F_i$  – массовый расход воздуха или жидкости через область  $r$  и площадь поперечного сечения аппарата;  $\alpha_{ii}$  и  $\alpha_m$  – объемный и местный коэффициенты теплообмена;  $b_1$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_1$  – ширина канала, толщина плат и корпуса;  $\alpha_j$  – коэффициент теплообмена между гранями нагретой зоны и холодными плитами или корпусом; корпусом и плитами; корпусом и теплообменником;

$F_j = 1/(\alpha_j S_j)$  – контактные тепловые сопротивления;  $\vartheta_{\text{вх}}, \vartheta_{\text{вых}}$  – температуры воздуха на входе и выходе из аппарата;  $\vartheta_0(x, y, z), \vartheta_{\text{ж}}(x, y, z), \vartheta_{20}(z)$  – начальные распределения температур в нагретой зоне, воздухе и корпусе;  $l_x, l_y, l_z$  – размеры нагретой зоны;  $S_j, l_{zj}$  – площадь поверхности контакта теплообменника с корпусом и размер теплообменника в направлении оси  $z$ .

Температура теплообменника  $\vartheta_j$  в общем случае неизвестна; чаще всего известными величинами являются температура хладагента на входе в теплообменник, расход, его физические свойства. Поэтому при решении задачи проектирования конструкции РЭА и системы охлаждения приходится рассматривать модель ЭА совместно с тепловой моделью теплообменника, то есть исследовать сопряженную систему (22.2.9)-(22.2.12) вместе с уравнениями, описывающими теплоперенос в теплообменниках. В этих случаях рассеиваемые теплообменниками потоки зависят от его конструкции, типа и мощности. Приведем примеры описания сопряженных задач для внешних жидкостных и воздушных теплообменников.

**1. Жидкостный теплообменник** (рис. 22.1.6) представляет собой примыкающие к корпусу  $\delta, l_l$  плоскости, охлаждаемые протекающими по каналам теплоносителем. В этом случае уносимый жидкостью тепловой поток  $P_j$  зависит от расхода  $G_{\rho j}$ , теплоемкости теплоносителя  $c_{\text{ж}}$ , площади омываемой поверхности  $S_j$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha_j$  между жидкостью и омываемой поверхностью.

Согласно закону сохранения энергии и закону Ньютона

$$P_j = G_{\rho j} c_{\text{ж}} [(\vartheta_{\text{вх}})_j - (\vartheta_{\text{вых}})_j]; \quad (22.2.10)$$

$$P_j = \alpha_j S_j \left[ \vartheta_j - \bar{\vartheta}_{\text{ж}} \right], \quad \bar{\vartheta}_{\text{ж}} = \frac{(\vartheta_{\text{вх}})_j - (\vartheta_{\text{вых}})_j}{2},$$

где  $(\vartheta_{\text{вх}})_j, (\vartheta_{\text{вых}})_j$  – температуры жидкости на входе и выходе теплообменника.

После тождественных преобразований (22.2.9) и (22.2.10) получаем

$$P_j = \alpha_j S_j \left[ \vartheta_j - \frac{\vartheta_j - n(\vartheta_{\text{вх}})_j}{n+1} \right], \quad n = \frac{2G_{\rho j} c_{\text{ж}}}{\alpha_j S_j}.$$

Для элементарного участка корпуса протяженностью  $dz$  мощность отводимого потока равна

$$dQ_j = \frac{P_j dz}{l_{zj}} = \frac{\alpha_j S_j}{l_{zj}} \left[ \vartheta_j - \frac{\vartheta_j - n(\vartheta_{\text{вх}})_j}{n+1} \right] dz.$$

При решении нестационарной задачи необходимо учитывать теплоемкость теплообменника, то есть

$$dQ_j = \frac{P_j dz}{\ell_{zj}} = \frac{\alpha_j S_j}{\ell_{zj}} \left[ \vartheta_j - \frac{\vartheta_j - n(\vartheta_{\text{вх}})_j}{n+1} \right] dz + c_j \rho_j \frac{d\vartheta_j}{d\tau},$$

где  $c_j, \rho_j$  — соответственно теплоемкость и плотность материала теплообменника.

**2. Воздушный теплообменник** (рис. 22.1.6) представляет собой объемную систему воздушных каналов 10. В этом случае процесс тепло-массообмена можно описать с помощью системы уравнений, аналогичных (22.2.6), (22.2.7), при условии, что  $1\{r\} \equiv 1, 1\{n\} = 0$ . Имеем

$$\begin{aligned} \lambda_{xj} \frac{\partial^2 \vartheta_j}{\partial x^2} + \lambda_{yj} \frac{\partial^2 \vartheta_j}{\partial y^2} + \lambda_{zj} \frac{\partial^2 \vartheta_j}{\partial z^2} - c_j \rho_j \frac{\partial \vartheta_j}{\partial \tau} = \\ = \alpha_{vj} |\vartheta_j - \vartheta_{fj}|; \quad \alpha_{vj} |\vartheta_j - \vartheta_{fj}| - c_{fj} \rho_{fj} \frac{\partial \vartheta_{fj}}{\partial \tau} = w_j \frac{\partial \vartheta_{fj}}{\partial y}, \end{aligned} \quad (22.2.12)$$

где  $\lambda_{xj}, \lambda_{yj}, \lambda_{zj}$  — эффективные коэффициенты теплопроводности объемных теплообменников,  $\vartheta_j, \vartheta_{fj}$  — температура теплообменника и воздуха;  $c_j, \rho_j, c_{fj}, \rho_{fj}$  — теплоемкость, плотность материала теплообменника и воздуха;  $w_j = c_{fj} G_p / F_j$ ;  $G_p, F_j$  — массовый расход воздуха через теплообменник и площадь поперечного сечения каналов;  $\alpha_{vj}$  — местный объемный коэффициент теплообмена.

Поскольку тело 10 (рис. 22.1.6) одной гранью контактирует с корпусом, а через другие грани обменивается теплом с окружающей средой, то граничные условия запишутся в виде

$$\begin{aligned} \left[ \lambda_{xj} \frac{\partial \vartheta_j}{\partial x} + \alpha_{j|1x} \vartheta_1 \right]_{x=\ell_x + \ell_{xj}} = 0; \quad \left[ \lambda_{xj} \frac{\partial \vartheta_j}{\partial x} + \alpha_{j|0x} (\vartheta_j - \vartheta_2) \right]_{x=\ell_x} = 0; \\ \left[ \lambda_{yj} \frac{\partial \vartheta_j}{\partial y} \pm \alpha_{j|0y} \vartheta_j \right]_0^{\ell_{yj}} = 0; \quad \left[ \lambda_{zj} \frac{\partial \vartheta_j}{\partial z} \pm \alpha_{j|0z} \vartheta_j \right]_0^{\ell_{zj}} = 0; \\ \vartheta_{fj}|_{y=0} = \vartheta_{\text{вх}j}; \quad \vartheta_{j}|_{\tau=0} = \vartheta_{j0}(x, y, z); \quad \vartheta_{fj}|_{\tau=0} = (\vartheta_{f0})_j(x, y, z), \end{aligned}$$

где  $\ell_{xj}, \ell_{yj}, \ell_{zj}$  — габаритные размеры теплообменника, м;  $\alpha_j$  — коэффициенты теплообмена с соответствующими гранями, причем  $\alpha_{0x} = 1/R_{0x} (R_{0x} -$

удельное контактное сопротивление между корпусом и гранью теплообменника).

Математическое описание температурного поля платы с элементами, как показано в [5.14], можно свести к решениям краевых задач теплопроводности для следующих моделей: параллелепипед с локальными поверхностными источниками тепла; пластина с локальными источниками тепла и теплообменом на торцах. Приближенные решения указанных задач содержатся в главе одиннадцатой, а также в [5.12, 5.13, 5.16]. Применяя принцип суперпозиции, можно использовать эти решения для случая  $n$  источников [5.3].

В приведенных моделях фигурируют коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности, расходы воздуха и газа, контактные тепловые сопротивления и другие, определение которых является самостоятельной большой задачей и здесь не рассматривается.

Приведенные выше системы уравнений можно решить различными методами: аналитическими (приближенными и точными), численными, аналоговыми и т. д. Выбор метода определяется возможностями и конкретными задачами, стоящими перед разработчиками. Реализация некоторых частных случаев модели с УР приведена в [5.1, 5.2, 5.3, 5.15, 5.15, 5.16].

### 22.3. Приближенные методы анализа температурных полей

При анализе теплового режима сложной системы тел с источниками и стоками энергии часто прибегают к приближенным методам описания этих полей. Они обычно базируются на ряде общих закономерностей и приемов, применение которых значительно облегчает задачу. Ниже будут рассмотрены некоторые такие закономерности и приемы [5.1-5.4].

**Температура условной среды.** Рассмотрим стационарный режим системы, то есть положим в уравнении (2.12)  $dT/dt = 0$ , и запишем эти уравнения в виде:

$$\sum \sigma_{ij} (T_i + T_j) + P_i = 0. \quad (22.3.1)$$

Из (22.3.1) определяем температуру  $T_i$

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{ij} T_j + P_i}{\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^I \sigma_{ij}}. \quad (22.3.2)$$

Введем понятия собственной температуры  $\theta$  и температуры условной среды  $\tilde{T}_i$ , выражаемые соответственно равенствами

$$\theta = \frac{P_i}{\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \sigma_{ij}}, \quad \tilde{T}_i = \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{ij} T_j}{\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \sigma_{ij}}. \quad (22.3.3)$$

В частном случае, при  $P_i = 0$ , температура  $i$ -го тела в стационарном режиме равна температуре условной среды, в которую помещено тело.

**Принцип местного влияния** может быть сформулирован так: *любое местное возмущение температурного поля является локальным и не распространяется на удаленные участки тела [5.2, 5.3, 5.4].*

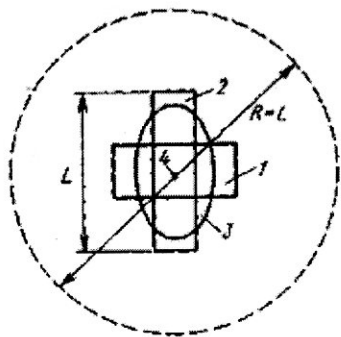


Рис. 22.3.1

Благодаря этому принципу можно менее детально описывать процессы в удаленных частях системы. Принцип местного влияния позволяет сложные пространственные распределения источников теплоты заменять более простыми, многосоставные тела заменять квазиоднородными областями с эффективными теплофизическими свойствами; сложные пространственные распределения тепловых процессов на границах заменять их средними значениями.

В работе [5.49] исследована возможность замены пространственных неоднородных воздействий на границах тела неоднородными воздействиями. Получены оценки погрешности расчета точности температурных полей, что позволяет обосновано подходить к принципу местного влияния.

При исследовании принципа местного влияния выявлена следующая закономерность: конфигурация области  $D$ , занятой источником, практически не влияет на характер температурного поля на расстоянии от центра  $R$  того же порядка, что и наибольший размер этой области (рис. 23.3.1).

**Переход к квазиоднородному телу.** Модель квазиоднородного тела наиболее естественно применять в случае, когда система состоит из большого числа близких по конструкции элементов. Например, нагретая зона РЭА кассетного типа, обмотки электрической машины, зеркала оптической системы с облегчающими отверстиями и так далее. Для подобных сис-

тем можно выделить элементарную ячейку, то есть минимальную часть конструкции, повторение которой приведет к воспроизведению всей конструкции. Неоднородная система (рис. 22.3.2) может быть замещена квазиоднородным телом с эффективными теплофизическими свойствами  $\lambda_{эф}$ ,  $\alpha_{эф}$ , а ее температурное поле может быть описано уравнением

$$\frac{1}{\alpha_{эф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla^2 T + \frac{q_V}{\lambda_{эф}}.$$

На рисунке 22.3.3 показаны простейшие системы, состоящие из совокупности слоев. Эти системы анизотропны и эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\perp}$  и  $\lambda_{\parallel}$  при движении теплового потока в перпендикулярной и параллельной к поверхности пластин плоскости может быть определен по формулам

$$\lambda_{\perp} = \left( \frac{n_1}{\lambda_1} + \frac{n_2}{\lambda_2} \right)^{-1}; \quad \lambda_{\parallel} = n_1 \lambda_1 + n_2 \lambda_2, \quad (22.3.4)$$

где  $n_i$  – объемная концентрация  $i$ -ого компонента. Методы расчета эффективных теплопроводностей неоднородных систем с различной структурой хорошо изучены и представлены в работах [5.17, 5.18].

## 22.4. Метод поэтапного моделирования

*Исходная математическая модель.* При проектировании сложных систем обычно используют особенности блочно-иерархического принципа конструкции. Эти особенности позволяют последовательно рассматривать разные уровни иерархии с постепенно нарастающей степенью детализации. Такой подход получил название метода поэтапного моделирования. Он с успехом применялся при анализе теплового режима РЭА [5.4, 5.5, 5.19], энергетики [5.20], электротехники [5.21], оптико-электронных систем [5.22] и т. д. Основная его идея состоит в возможности свести все многообразие приборных комплексов к ограниченному числу моделей. Можно представить тепловую модель такой системы в виде комбинации многих областей разных конфигураций с источниками и стоками  $i$  теплоты удельной мощности  $q_{Vi}$ , омываемых  $\ell$  потоками теплоносителей из газов или жидкостей (рис. 22.4.1). Математическая модель такой системы [5.5, 5.23] сводится к системе нестационарных уравнений теплопроводности для твердых тел

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \nabla^2 T_i + q_{Vi}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (22.4.1)$$



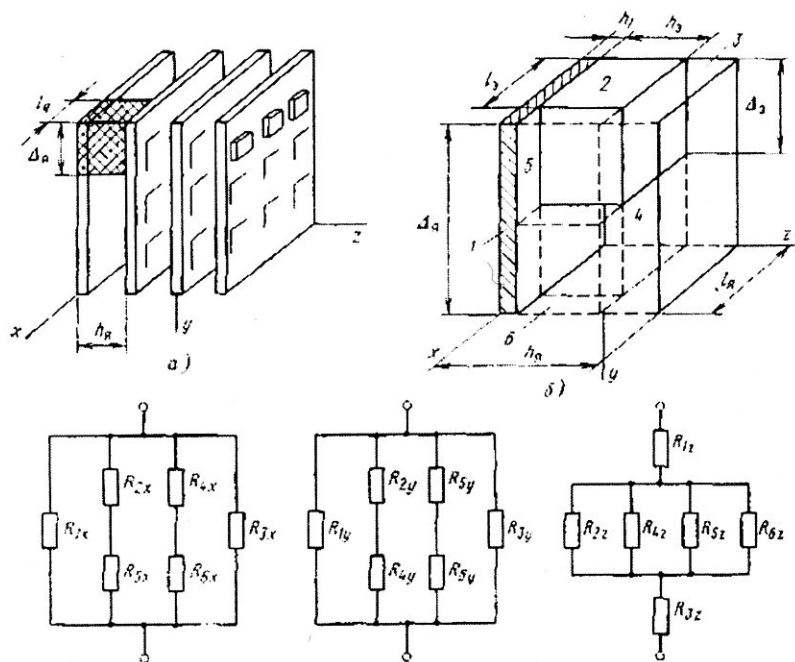


Рис. 22.3.2

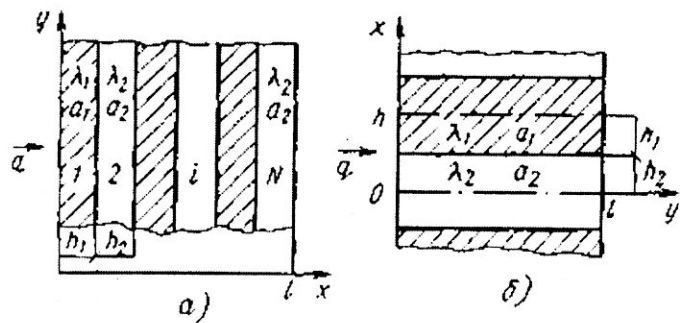


Рис. 22.3.3

Применим оператор (22.4.3) почленно к уравнению (22.4.1)

$$\frac{1}{V_i} \int_V c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} dV = c_i \rho_i \frac{\partial T_{iV}}{\partial \tau}.$$

Второй член уравнения преобразуем с использованием теоремы Грина [5.25]. Получим

$$\frac{1}{V_i} \int_V \lambda_i \nabla^2 T_i dV = \frac{\lambda_i}{V_i} \int_S \text{grad } T_i dS.$$

Запишем третий член уравнения (22.4.1) в виде

$$\frac{1}{V_i} \int_V q_{V_i} dV = \frac{P_i}{V_i},$$

где  $P_i$  – полная мощность, выделяющаяся в теле с объемом  $V_i$ .

Окончательно уравнение преобразуется к виду

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_{iV}}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{V_i} \int_S \text{grad } T_i dS + \frac{P_i}{V_i}. \quad (22.4.5)$$

Используя теорему Остроградского-Гаусса [5.25], преобразуем уравнение (22.4.2). Получим

$$\int_V \text{grad } U_\ell dV = \int_S \vec{n} U_\ell dS. \quad (22.4.6)$$

Со вторым членом этого уравнения проведем операцию осреднения по (22.4.6):

$$\frac{1}{V_\ell} \int_V c_\ell \rho_\ell \vec{v} \text{grad } U_\ell dV = \frac{1}{V_\ell} \int_{S_\ell} c_\ell \rho_\ell \vec{v} \vec{n} U_\ell dS,$$

что позволит записать уравнение (22.4.2) в форме

$$c_\ell \frac{\partial U_\ell}{\partial \tau} = \int_{S_i} \lambda_\ell \text{grad } U_\ell \vec{n} dS - \int_{S_\ell} c_\ell \rho_\ell \vec{v} \vec{n} U_\ell dS. \quad (22.4.7)$$

Здесь  $S_i$  и  $S_\ell$  – площади поверхностей, ограничивающих объемы  $V_i$  и  $V_\ell$ ;

$\vec{n}$  – орт внешней нормали к поверхности.

На рис. 22.4.2 показано тело, омываемое потоком  $\ell$  при этом  $S_\ell^{\text{вх}}, S_\ell^{\text{вых}}$  – площади, через которые входит и выходит поток в канал  $\ell$ ,  $S'_\ell$  – площадь

внешней омывающей поверхности тела. Так как поверхность тела сплошная, без отверстий, то сквозь ее поверхность нет потока жидкости, и, следовательно,  $\vec{\nabla} \bar{n} = 0$ . Полная поверхность тела выражается равенством

$$S_\ell = S'_\ell + S_\ell^{\text{вх}} + S_\ell^{\text{вых}},$$

а поверхностный интеграл по  $S_\ell$  имеет свойство

$$\int_{S_\ell} c_\ell \rho_\ell \vec{\nabla} \bar{n} t_\ell dS = \int_{S_\ell^{\text{вх}} + S_\ell^{\text{вых}}} c_\ell \rho_\ell \vec{\nabla} \bar{n} t_\ell dS,$$

где  $G_\ell = G_\ell^{\text{вх}} = G_\ell^{\text{вх}}$  – поток теплоносителя через канал  $\ell$ .

Пренебрежем кондуктивным переносом тепла через  $S_\ell^{\text{вх}}$  и  $S_\ell^{\text{вых}}$  по сравнению с конвективным. Это позволяет записать последний член в уравнении (22.4.7) в виде:

$$\int_{S_\ell^{\text{вх}} + S_\ell^{\text{вых}}} c_\ell \rho_\ell \vec{\nabla} \bar{n} t_\ell dS = c_{\text{уд}} (G_\ell^{\text{вх}} t_\ell^{\text{вх}} - G_\ell^{\text{вх}} t_\ell^{\text{вх}}),$$

где среднерасходная температура

$$t_\ell^k = \frac{\int_{S_\ell^k} \rho \vec{\nabla} \bar{n} t_\ell dS}{G_\ell^k}, \quad G_\ell^k = \int_{S_\ell^k} \rho \vec{\nabla} \bar{n} dS, \quad k = \text{вх}, \text{вых}. \quad (22.4.9)$$

Окончательно уравнение (22.4.7) перепишем в виде

$$C_\ell \frac{dU_{\ell V}}{d\tau} = \int_{S'_\ell} \lambda_i \text{grad} U_\ell \bar{n} dS - C_\ell G_\ell (U_i^{\text{вх}} - U_i^{\text{вх}}). \quad (22.4.10)$$

Уравнения (22.4.5) и (22.4.10) выражают в интегральной форме закон сохранения энергии для 2-го тела и  $\ell$ -го потока теплоносителя.

**Выражения для тепловых потоков.** В их определении состоит следующий шаг перехода к модели с сосредоточенными параметрами. Обычно для описания тепловых потоков между поверхностями  $i$ -го и  $j$ -го тел используют понятие тепловой проводимости  $\sigma$

$$P_{ij} = \sigma_{ij} (T_{iS} - T_{jS}), \quad P_{i\ell} = \sigma_{i\ell} (T_{iS} - U_{\ell V}), \quad (22.4.11)$$

где  $T_{iS}$ ,  $T_{jS}$  – среднеповерхностные температуры  $i$ -го и  $j$ -го тел;  $U_{\ell V}$  – среднеобъемная температура потока  $\ell$ .

Далее в выражении (22.4.5) и (22.4.10) подставляются значения тепловых потоков (22.4.11), и получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для осредненных значений температур  $i$ -х тел и потоков  $\ell$ :

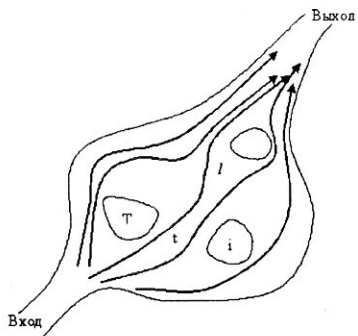


Рис. 22.4.1

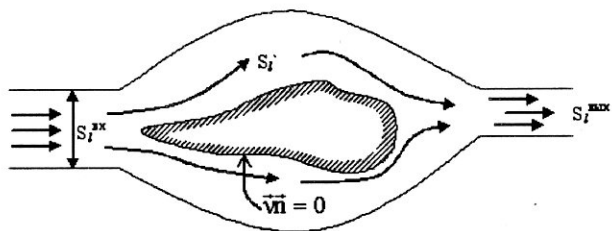


Рис. 22.4.2

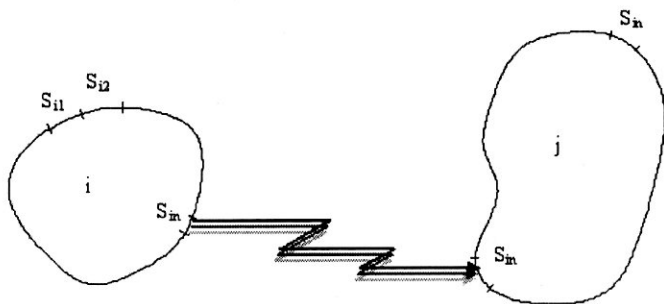


Рис. 22.4.3

$$\left. \begin{aligned} C_i \frac{dT_{iV}}{d\tau} &= \sum_{j=1}^I \sigma_{ij} (T_{iS,m} - T_{iS,n}) + \sum_{\ell=1}^L \sigma_{i\ell} (U_{iV} - T_{iS,n}) + P_i, \\ C_\ell \frac{dU_{\ell V}}{d\tau} &= \sum_{i=1}^I \sigma_{i\ell} (T_{iS,n} - U_{i\ell}) + c_\ell G_\ell (U_\ell^{\text{ввх}} - U_\ell^{\text{вх}}), \\ i &= 1, 2, \dots, I; \quad \ell = 1, 2, \dots, L. \end{aligned} \right\} \quad (22.4.12)$$

Можно при составлении уравнений (22.4.12) выделить на телах  $i$  и  $j$  отдельные поверхности  $m$  и  $n$  и более подробно описать теплообмен между ними (рис. 22.4.3), а потом их суммировать, что выполнено в [5.5]. В уравнения (22.4.12) входят следующие неизвестные: среднеобъемные и среднеповерхностные температуры  $T_{iV}$  и  $T_{iS}$ , для теплоносителей среднеобъемная температура  $U_{iV}$  и среднерасходная температура на выходе  $U_\ell^{\text{ввх}}$ . Температура  $U_\ell^{\text{вх}}$  либо задается, либо рассчитывается по температуре  $U_k^{\text{ввх}}$  выходящих потоков, смешением которых образуется данный поток

$$G_\ell^{\text{вх}} U_\ell^{\text{вх}} = \sum G_k^{\text{ввх}} U_k^{\text{ввх}}.$$

Видно, что число неизвестных в системе превышает число уравнений; для замыкания системы можно привлечь дополнительные уравнения, привлекая следующие допущения:

- поле в телах равномерное, то есть  $T_{iS} = T_{iV} = T_i$ , такой способ использован в работах [5.19, 5.21];
- можно представить ряд тел как некоторое условное тело и перейти к системе с меньшим числом тел [5.19];
- иногда находят связь  $T_{iS} = \Psi T_{iV}$  через коэффициент неравномерности, который можно оценить по формулам первого раздела.

Замыкая уравнений (22.4.12) для потоков теплоносителей сводится к установлению дополнительной связи между  $U_{iV}$ ,  $U_\ell^{\text{вх}}$ ,  $U_\ell^{\text{ввх}}$ . Наиболее часто допускают идеальное перемешивание теплоносителя  $U_\ell^{\text{ввх}} = U_\ell^{\text{вх}}$  или линейное изменение температуры по длине канала, то есть  $U_{\ell V} = 0,5(U_\ell^{\text{ввх}} + U_\ell^{\text{вх}})$ .

## 22.5. Естественное охлаждение перфорированных блоков и кассет

Основные базовые схемы охлаждения таких блоков приведены на рисунке 22.1.2. Рассмотрим метод приближенной оценки средних температур блоков с воздушным охлаждением, для этого введем понятие средней температуры нагретой зоны  $\bar{T}_{\text{н.з.}}$ , среднеобъемной температуры

воздуха  $\bar{U}_в$  и среднеповерхностной температуры корпуса  $\bar{T}_к$ . Будем полагать, что все каналы имеют одинаковую ширину  $b$ , а источники теплоты с суммарной мощностью  $P$  распределены по всем платам равномерно. Расход воздуха  $G$  также равномерно распределен по всему каналу. Стационарный тепловой режим такой простой модели блока описывается [5.3] системой трех уравнений:

для нагретой зоны

$$P = \sigma_{з^к} \left( \bar{T}_{н.з.} - \bar{T}_к \right) + \sigma_{з.в.} \left( \bar{T}_{н.з.} - \bar{U}_в \right), \quad (22.5.1)$$

для корпуса

$$P = \sigma_{к.ср.} \left( \bar{T}_к - \bar{T}_{ср} \right) + 2cG \left( \bar{U}_в - U_{в}^{вх} \right), \quad (22.5.2)$$

для воздуха

$$\sigma_{з.в.} \left( \bar{T}_{н.з.} - \bar{U}_в \right) + \sigma_{в.к.} \left( \bar{T}_к - \bar{U}_в \right) = 2cG \left( \bar{U}_в - U_{в}^{вх} \right), \quad (22.5.3)$$

где  $\sigma_{з^к}$  – лучистая тепловая проводимость между нагретой зоной и корпусом;

$\sigma_{з.в.}$ ,  $\sigma_{в.к.}$  – конвективные тепловые проводимости между нагретой зоной и воздухом, между воздухом и корпусом;

$\sigma_{в.ср.}$  – суммарная тепловая проводимость от корпуса в среду.

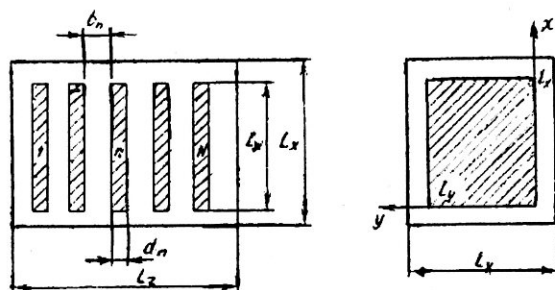


Рис. 22.5.1

В уравнениях (22.5.2) и (22.5.3) предполагается, что температура воздуха  $\bar{U}_в$  равна полусумме расходных температур на входе и выходе  $U_{в}^{вх}$  и  $U_{в}^{вых}$ .

Из уравнений (22.5.1)-(22.5.2) нетрудно получить выражения для температур  $\bar{T}_{н.з.}$ ,  $\bar{T}_K$ ,  $\bar{U}_B$  [5.4]. Все тепловые проводимости вычисляются по формуле  $\sigma_i = \alpha_i S_i$ , где характерные площади поверхностей (рис. 22.5.1)

$$S_k = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z), \quad S_3^n = 2(l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z), \\ S_{3.в.1} = 2(N-1)l_x l_y, \quad S_{3.в.2} = 2l_x l_y + 2Nd(l_x + l_y)$$

При оценочных расчетах рекомендуется применять  $\sigma_{3.в.к} = 6$ ,  $\sigma_{в.ср.} = 9 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Тепловая проводимость  $\sigma_{3.в.} = \sigma_{3.в.1} + \sigma_{3.в.2}$  - к внутренней и наружной поверхности нагретой зоны. Конвективные коэффициенты теплоотдачи в прослойках одинаковы и равны  $2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Можно показать [5.3, 5.5], что с учетом сделанных замечаний температуры оцениваются равенствами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{T}_k &= T_{ср} + \frac{P}{9S_H}, \quad \bar{T}_{н.з.} = T_{ср} + \left( \bar{T}_k - T_{ср} \right) (1 + CA), \\ \bar{U}_B &= T_{ср} + \left( \bar{T}_k - T_{ср} \right) (1 + C), \\ A &= 1 + \frac{S_k}{S_{3.в.2} + 0,055 S_{3.в.1} / b}, \quad C = \frac{4,55 S_k}{S_k + 3 S_{3.в.1} A}. \end{aligned} \right\} \quad (22.5.4)$$

При неравномерном распределении мощностей  $P_n$  по платам, среднюю температуру  $\bar{T}_n$   $n$ -ой платы можно оценить [5.3] по формуле:

$$\bar{T}_n = T_{ср} + \left( \bar{T}_3 - T_{ср} \right) (0,88 + 0,12 K_{p_n}), \quad (22.5.5)$$

$$\text{где } K_{p_n} = \frac{P_n}{\bar{P}}, \quad \bar{P} = \frac{P}{N}.$$

Оценку теплового режима блока с естественной вентиляцией необходимо дополнить условием, учитывающим «самотек» со среднеобъемным перегревом воздуха  $(U_B - T_{ср})$  и положить  $U_B^{вх} = T_{ср}$ :

$$\beta \text{гр} \left( \bar{U}_B - T_{ср} \right) = \left( \xi^{вх} + \xi^{вых} \right) \frac{\rho V_0^2}{2} + \xi \frac{\rho V^2}{2},$$

где  $\beta$ ,  $\rho$  – коэффициент объемного расширения и плотности воздуха;  $\xi_{вх}$ ,  $\xi_{вых}$ ,  $\xi$  – коэффициенты гидравлического сопротивления перфорированных дна и крышки в канале нагретой зоны [5.3];  $\bar{v}$ ,  $v_0$  – средняя скорость воздуха в каналах и отверстиях, связанная с массовым расходом  $G$  соотношениями:

$$\bar{v} = \frac{G}{\rho(N-1)b\ell_y}, \quad v_0 = \frac{G}{\rho S_0} = \frac{G}{\rho K_n L_z L_y}, \quad (22.5.6)$$

где  $K_n = S_0/(L_z L_y)$  – коэффициент перфорации.

Коэффициенты гидравлического сопротивления зависят от скоростей  $\bar{v}$ ,  $v_0$  и вычисляются по формулам, приведенным в [5.26]. Более подробные сведения о расчете теплового режима можно найти в [5.4, 5.5].

## 22.6. Нетрадиционные методы охлаждения радиоэлектронной аппаратуры

*Электронная аппаратура с твердыми теплостоками.* Для обеспечения нормального теплового режима электронной аппаратуры (ЭА) с высокой плотностью заполнения плат элементами применяются конструкции, в которых на платах расположены металлические теплостоки, через которые осуществляется отвод теплоты к охлажденному основанию с теплообменником. В работе [5.38] предложена методика расчета пространственного распределения температуры в блоке на основе квазиоднородного параллелепипеда с равномерным распределением мощностей источников. Позже эти методы были обобщены и предложена методика для выбора параметров блока на начальной стадии проектирования [5.39]. Методика позволяет находить одномерное распределение температуры на плате  $t_n(x)$ , а температурное поле корпуса и основания блока считаются равномерными. При расчете теплообмена на боковой поверхности плат с соседними платами, корпусом и основанием принимаются среднеповерхностные температуры окружающих тел.

Согласно общим принципам поэтапного расчета теплового режима системы тел [5.5], после указанных выше оценок температур можно перейти к задаче определения температур элементов на некоторых участках отдельной платы.

В работе [5.40] приведено экспериментальное исследование эффективности кондуктивных теплостоков при охлаждении РЭА с плотным монтажом. Показано, что неравномерность поля температур и максимальная температура в центре блока снижались почти вдвое при незначительном увели-



чении (до 10%) веса блока за счет применения поверхностных теплообменников.

**Испарительно-кондуктивная система охлаждения.** Возможности этой системы охлаждения изучались на макетах для аппаратов каскадной конструкции. Макеты были собраны из пяти плоских вертикальных нагревателей, между нагревателями располагались текстильные хлопчатобумажные фитили. Нижние концы фитилей были опущены в воду, жидкость из резервуара под влиянием капиллярных сил поднималась по фитилям охлаждая нагреватели и испарялась в окружающее пространство. Между фитилями и платой помещались различные теплоизоляционные прослойки. Второй макет отличался от первого тем, что имитаторы располагались с одной стороны. Распределение источников в обоих макетах было равномерным.

Из приведенных исследований следует, что

- испарительная система эффективна при близости температур охлаждающего устройства и температуры кипения;
- с ростом мощности температура практически не изменяется и близка к температуре кипения;
- наличие теплоизоляционных прослоек не приводит к существенному повышению температуры;
- увеличение открытой поверхности фитиля приводит к увеличению эффективности системы;
- при малых мощностях, когда температура ниже температуры кипения рабочей жидкости, эффективность системы резко падает.

Такая система охлаждения весьма перспективна.

**Конвекция в плоском канале.** Естественная конвекция в плоских каналах, образованных между платами с источниками энергии, присутствует во многих РЭА.

Многие РЭА состоят из плоских плат с источниками энергии и образуют систему вертикальных каналов со входом и выходом для воздуха. Поэтому изучение естественной конвекции таких устройств является центральной проблемой при анализе теплового режима РЭА. Приближенный анализ естественной конвекции в канале при стабилизированном течении жидкости выполнен в работе [5.41] и получено значение начального числа Нуссельта  $Nu_x = (\alpha_x \ell) / \lambda = 4,12$  для любого распределения температуры стенки  $T_w(x)$  по высоте. Этот результат был в дальнейшем положен в основу анализа тепловых режимов РЭА [5.42].

**Конвекция при течении жидкости в каналах.** В лаборатории большое внимание было уделено течению жидкости в гладких каналах и каналах с глубокими впадинами. Первая проблема была освещена в работах [5.4, 5.43] для нестабилизированного течения и были предложены

формулы для расчета коэффициента теплоотдачи в этих условиях. Вторая задача потребовала построения и математического описания процесса для оценки коэффициента теплоотдачи. Расчет среднего коэффициента теплоотдачи дал удовлетворительное совпадение с опытом [5.44].

**Конвективный теплообмен в условиях разрежения.** Для анализа теплового режима РЭА в условиях разрежения необходимо знать зависимость коэффициента теплообмена от давления газа. В работе [5.45] предложен метод оценки конвективного теплообмена, справедливый для трех типов течения газа: континуального, течения со скольжением и свободно-молекулярного. Для решения этой задачи исходным является критериальное уравнение типа

$$Nu = F(Gr, Pr, Re, L/H),$$

где  $Gr$ ,  $Pr$  и  $Re$  - критерии Грасгофа, Прандтля и Рейнольдса;  $L$  и  $H$  - размеры тела и газовой прослойки.

В критерии подобия входят зависимые от давления физические параметры газа:  $\lambda$  - теплопроводность,  $a$  - температуропроводность,  $\nu$  - кинематическая вязкость. Соответствующие зависимости приведены в монографии [5.46]; подставляя последние в выражения для критериев и проводя необходимые преобразования, получили расчетные зависимости для критерия  $Nu$  от давления газовой среды. В работе [5.48] приведены результаты экспериментального исследования этих формул и методы расчета теплового режима в одноблочных РЭА в условиях невесомости.

# ГЛАВА 23. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

## 23.1. Уровни иерархии оптико- электронных и оптических приборов и термооптические процессы в осветителе

При описании этих приборов будем, как и в случае РЭА, придерживаться иерархического принципа. Анализ основных конструкций ОЭП и ОП позволяет выделить следующие уровни иерархии.

**Первый уровень** – элементы набора, которые невозможно разделить (рис. 23.1.1, *а*), например, детали оптических систем (зеркала 1, 2, линзы, призмы, бленда 3, трубы объективов); детали механических устройств; источников излучения (твердотельные лазеры, световоды, лампы накаливания и т. д.); элементы волоконной и интегральной оптики.

**Второй уровень** – отдельные блоки, состоящие из элементов первого уровня и являющимися обычно узлами с самостоятельным функциональным значением: объективы, механические и электронные блоки, квантроны твердотельных лазеров, электрооптические элементы с индивидуальными системами термостатирования, приемники излучения с индивидуальными системами охлаждения и т. д. Как правило, они имеют свой корпус, а в ряде случаев – индивидуальную систему обеспечения теплового режима.

Например, на рис. 23.1.1, *б* изображен зеркальный объектив ОЭП, состоящий из корпуса 2 и двух зеркал 1, 3, и приемник излучения 6 с индивидуальной системой охлаждения, представляющей собой гелиевый криостат 4, окруженный экраном 5. На рис. 23.1.2, *а* представлен линзовый объектив с защитным элементом 4, блендой 5 и крышкой 6, а на рис. 23.1.2, *б* – зеркально-линзовый, отличающийся по составу входящих в них элементов и конструктивному оформлению. Линзы 3 устанавливаются с помощью оправ 2 в трубы 1 с цилиндрическими внутренними поверхностями симметрично относительно осей труб. Малое зеркало 8 крепится к трубе или большому зеркалу 7 при помощи пилонов 9.

**Третий уровень** иерархии ОЭП включает отдельные блоки второго уровня и элементы первого уровня; он часто имеет свою систему обеспечения теплового режима. Прибор представляет собой законченную конструкцию, выполняющую определенную функцию. На рис. 23.1.1, *в* схема

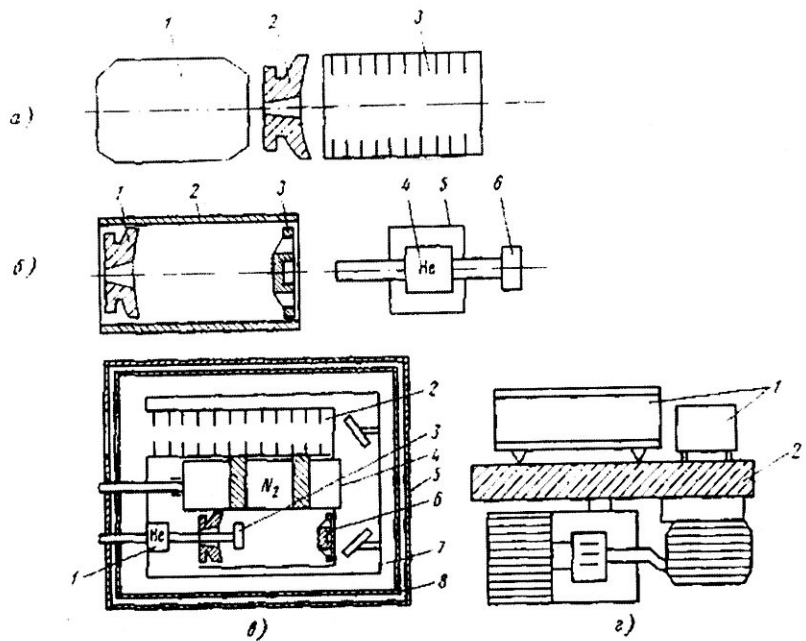


Рис. 23.1.1

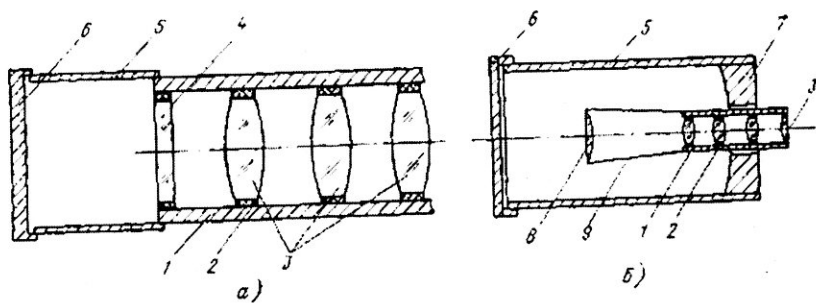


Рис. 23.1.2

тически показана конструкция ОЭП, состоящего из объектива 6 с блендой 2 и приемника излучения 3 с индивидуальной системой охлаждения 1. Бленда и объектив охлаждаются путем контакта с азотным сосудом 4, эти узлы окружены двумя экранами 7 и 8, весь прибор помещен в корпус 5.

К *четвертому уровню* можно отнести группу приборов и устройств 1, расположенных в одном приборном отсеке или на одной платформе 2 (рис. 23.1.1, з).

На более высоких уровнях приборный отсек или платформа с ОЭП рассматриваются в составе объекта размещения приборного комплекса.

**Квантрон твердотельного лазера** – широко распространенное оптико-электронное устройство, это так называемый твердотельный излучатель. Квантрон включает активный элемент 4, источник оптической накачки 2, отражатель 1 и элементов 5, 6, 7 для спектральной фильтрации излучения (рис. 23.1.3).

В лазерных излучателях часто используются также элементы для управления излучением – электрооптические 3, акустооптические, пассивные или оптико-механические затворы, нелинейные элементы для преобразования генерируемого лазерного излучения в излучение удвоенной частоты 7, оптические вентили, дисперсионные элементы и т. д.

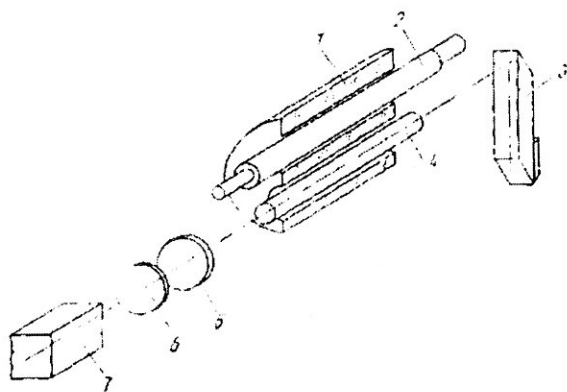
В квантроне осуществляется преобразование подводимой электрической энергии в энергию излучения оптической накачки и поглощение излучения накачки в активном элементе, вызывающее возникновение в нем инверсной заселенности. В некоторых лазерах может быть несколько квантронов, один из которых входит в состав задающего генератора, а остальные – в состав усилительных каскадов. Основная часть подводимой к лазеру энергии выделяется в виде теплоты в элементах его квантронов.

Остановимся подробнее на конструкциях квантронов, а также особенностях протекания в них теплофизических и термооптических процессов.

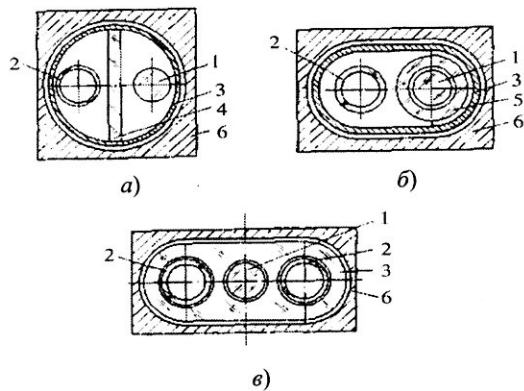
Основным функциональным элементом квантрона является активный элемент. Наиболее распространенными видами активных лазерных сред являются неодимовые фосфатные и силикатные стекла, а также кристаллы алюмоитриевого граната (АИГ), калий-гадолиниевого вольфрамата (КГВ), активированные неодимом, гадолиний-скандий-галиевого граната (ГССГ), активированные ионами неодима и хрома, рубина [5.29].

Источниками оптической накачки обычно служат газоразрядные ксеноновые или криптоновые трубчатые лампы, оси которых параллельны оси главного элемента. Отражатель обеспечивает передачу энергии излучения от лампы к активному элементу.

Квантроны могут отличаться друг от друга по числу ламп накачки, виду и форме отражателя, форме активного элемента, виду элементов, ис-



*Рис. 23.1.3*



*Рис. 23.1.4*

пользуемых для фильтрации излучения накачки и улучшения теплоотвода, применяемому способу отвода теплоты от элементов квантрона и т. д. Некоторые примеры конструкций одноламповых и двухламповых квантронов представлены на рис. 23.1.3.

На рис. 23.1.4, *а* изображен одноламповый квантрон с активным элементом цилиндрической формы 1, полым отражателем 3 и фильтром в форме пластины 4; на рис. 23.1.4, *б* – одноламповый квантрон с полым отражателем 3 в форме «беговой дорожки», у которого активный элемент 1 помещен в лейкосапфировую трубку 5, на рис. 23.1.4, *в* – двухламповый квантрон с отражателем 3 моноблочной конструкции, осуществляющим фильтрацию излучения ламп накачки 2.

По способу отвода теплоты от элементов, квантроны можно разделить на четыре группы: с принудительным жидкостным охлаждением, с естественным и принудительным воздушным охлаждением, со смешанным охлаждением.

В процессе работы лазера возникает сильный газовый разряд, излучение которого поглощается в активном элементе и в других частях квантрона. Малая часть поглощенного излучения (не более 10%) идет на создание инверсной заселенности в активной среде, а большая часть переходит в энергию источников теплоты. В результате изменения под их действием теплового режима возникают термические aberrации, изменяющие спектроскопические параметры активной среды [5.30, 5.,31]. Тепловой режим квантронов довольно подробно изучен в восьмидесятые годы двадцатого века, а методы расчета их температурных полей изложены в [5.5].

*Термооптические процессы в осветителе.* Преобразование энергии накачки в тепло вызывает неоднородность активных элементов, приводящую к появлению тепловой линзы, двулучепреломления, расходимости излучения. В работах, посвященных расчету тепловых режимов осветителей, рассматривается тепловое состояние только активного элемента без учета его связей с другими элементами системы. Тепловые и математические модели осветителей рассмотрены в [5.50 – 5.53].

## **23.2. Термооптические процессы в зеркально-линзовых объективах**

Во второй половине XX века стала развиваться дисциплина, которую можно назвать термооптикой. В термооптике проводится совместный анализ тепловых и оптических процессов, возникающих при прохождении света через конденсированные и газовые среды. Оптики давно обратили внимание на влияние тепловых процессов на качество изображения оптической