



Т. В. Молодечкина
В. Ф. Алексеев
М. О. Молодечкин

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Часть 1

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ
КОМПЛЕКС



Татьяна Викторовна МОЛОДЕЧКИНА

кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств.

Окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры».

В 1989 г. начала работать в НПИ.

В 2004 г. защитила кандидатскую диссертацию. Область научных исследований – материаловедение.



Виктор Федорович АЛЕКСЕЕВ

кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

В 1977 г. окончил Минский радиотехнический институт. Получил квалификацию «инженер-конструктор-технолог радиоаппаратуры».

Занимается исследованиями в области конструирования радиоэлектронных средств и моделирования тепловой нестационарности полупроводниковых структур и интегральных схем.

Автор более 300 публикаций.



Максим Олегович МОЛОДЕЧКИН

магистр технических наук, ассистент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

В 2008 г. окончил БГУИР.

ISBN 978-985-531-376-3



9 789855 313763

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

Т. В. Молодечкина
В. Ф. Алексеев
М. О. Молодечкин

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-39 02 01
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»

В 2 частях

Часть 1

Новополоцк
ПГУ
2013

УДК 621.396(075.8)
ББК 32.844я 73
М 75

Рекомендовано к изданию методической комиссией
радиотехнического факультета (протокол № 2 от 16.11.2011)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

канд. техн. наук, доц. каф. микро- и наноэлектроники УО «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники»
В. Р. СТЕМПИЦКИЙ;
канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физики УО «Полоцкий государственный
университет» **С. А. ВАБИЩЕВИЧ**

Молодечкина, Т. В.

М 75 Физические основы проектирования радиоэлектронных средств :
учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-39 02 01 «Мо-
делирование и компьютерное проектирование РЭС». В 2 ч. Ч. 1 /
Т. В. Молодечкина, В. Ф. Алексеев, М. О. Молодечкин. – Новополоцк :
ПГУ, 2013. – 204 с.
ISBN 978-985-531-376-3.

Разработан в соответствии с учебным планом, типовой программой
курса. Содержит рабочую программу курса, лекционный курс, указания к
выполнению лабораторных и практических работ, рекомендуемую литературу.

Предназначен для студентов радиотехнических специальностей.

Будет полезен магистрантам, аспирантам, преподавателям вузов и сред-
них учебных заведений, инженерно-техническим работникам.

УДК 621.396(075.8)
ББК 32.844я 73

ISBN 978-985-531-375-6
ISBN 978-985-531-376-3 (ч. 1)

© Молодечкина Т. В., Алексеев В. Ф., Молодечкин М. О., 2013
© УО «Полоцкий государственный университет», 2013

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физические основы проектирования РЭС» предусматривает освоение понятий и методов, используемых:

- для характеристики условий эксплуатации конструкций радиоэлектронных средств (РЭС);

- для изучения физических процессов, происходящих в элементах и конструкциях РЭС при действии высоких и низких температур; основных законов теплообмена; тепловых моделей конструкций РЭС и их использование для анализа и расчета температурных режимов элементов и конструкций РЭС различного конструктивного исполнения;

- для изучения физических явлений, происходящих в элементах и конструкциях РЭС при высокой влажности, низком и высоком атмосферном давлении;

- для изучения физических явлений, происходящих в элементах и конструкциях РЭС при действии механических нагрузок; способов защиты элементов и конструкций РЭС от механических нагрузок; моделирования воздействия механических нагрузок и расчета эффективности защиты конструкций РЭС;

- для изучения действия радиации на конструкционные материалы изделий электронной техники, полупроводниковые приборы и интегральные схемы, радиодетали и компоненты; методов повышения радиационной стойкости элементов и конструкций РЭС;

- для изучения источников возникновения электромагнитных помех и их влияния на работоспособность РЭС; способов защиты конструкций РЭС от действия паразитных связей и наводок; моделирования влияния на конструкцию РЭС паразитных связей и наводок; использования моделей для анализа и расчета эффективности защиты от электромагнитных полей и паразитных связей.

Авторы выражают благодарность студентам гр. _____, оказавшим помощь в оформлении УМК.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Цель дисциплины – формирование знаний, навыков и умений по основным понятиям, законам, физическим явлениям и моделям теплообмена, влажности, радиации, механических и электромагнитных воздействий.

Дисциплина «Физические основы проектирования РЭС» обеспечивает понимание последующих специальных дисциплин и позволяет оценить процесс проектирования и моделирования конструкторских и технологических решений с точки зрения физических процессов, протекающих в элементах и конструкциях РЭС при воздействии различных дестабилизирующих факторов.

В результате изучения дисциплины обучаемый должен

знать:

- характеристику воздействий, которым подвергаются РЭС при эксплуатации;
- физические явления, происходящие в конструкциях РЭС при действии тепловых и механических нагрузок, электромагнитных помех и других факторов;
- методы защиты РЭС от действия дестабилизирующих факторов;

уметь:

- выбирать конструкторские способы, обеспечивающие защиту РЭС от дестабилизирующих факторов;
- моделировать воздействие дестабилизирующих факторов на конструкцию РЭС;
- выполнять расчеты по оценке эффективности защиты конструкции РЭС от дестабилизирующих факторов.

Примерный тематический план дисциплины

Наименование раздела, темы	Всего аудит. часов	Лекции, ч	Практические занятия, ч	Лабораторные занятия, ч
1	2	3	4	5
Введение	2	2		
Раздел 1. Характеристика условий эксплуатации конструкций РЭС	10	6		4
Тема 1. Факторы, определяющие конструкцию РЭС	2	2		
Тема 2. Окружающая среда и ее воздействие на радиоэлектронные средства	8	4		4
Раздел 2. Физико-математические основы конструирования РЭС	6	4	2	
Тема 3. Обобщающие физические модели конструкций радиоэлектронных средств	2	2		
Тема 4. Математические методы анализа физических полей радиоэлектронных средств	4	2	2	
Раздел 3. Тепло- и массообмен в радиоэлектронных средствах	54	30	14	10
Тема 5. Основы тепло- и массообмена	2	2		
Тема 6. Перенос тепловой энергии конвекцией	6	4	2	
Тема 7. Перенос тепловой энергии теплопроводностью	8	6	2	
Тема 8. Перенос тепловой энергии излучением	6	4	2	
Тема 9. Тепловая чувствительность элементов радиоэлектронных средств	10	4	2	4
Тема 10. Математические основы характерных тепловых расчетов	4	2	2	
Тема 11. Моделирование тепловых режимов РЭС	10	4	2	4
Тема 12. Системы обеспечения тепловых режимов РЭС	8	4	2	2
Раздел 4. Защита конструкций РЭС от атмосферных воздействий	14	8	2	4
Тема 13. Механизмы влияния влаги на эффективность конструкций РЭС	5	4	1	
Тема 14. Герметизация РЭС	9	4	1	4

Окончание табл.

1	2	3	4	5
Раздел 5. Защита конструкций РЭС от динамических механических воздействий	24	12	4	8
Тема 15. Особенности проектирования РЭС с учетом влияния механических факторов	14	8	2	4
Тема 16. Математические методы расчетов вибраций прочности конструкции РЭС	10	4	2	4
Раздел 6. Действие проникающей радиации на элементы РЭС	18	14	4	
Тема 17. Виды проникающей радиации и их основные характеристики	2	2		
Тема 18. Действие радиации на конструкционные материалы	5	4	1	
Тема 19. Действие радиации на полупроводниковые приборы и интегральные схемы	5	4	1	
Тема 20. Действие радиации на пьезокварцевые материалы и изделия, электро-радиоизделия	6	4	2	
Раздел 7. Обеспечение электромагнитной совместимости при проектировании РЭС	42	26	8	8
Тема 21. Виды паразитной связи	4	4		
Тема 22. Физические процессы, протекающие в элементах и компонентах РЭС при воздействии электромагнитных помех	18	10	4	4
Тема 23. Математические методы расчета электромагнитных полей РЭС и экранирование	20	12	4	4
Итого:	170	102	34	34

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ТЗ – техническое задание;
ТУ – технические условия;
tK – температура Кюри;
TK – температурный коэффициент;
TKЛР – температурный коэффициент линейного расширения;
TKρ – тепловой коэффициент объемного удельного сопротивления;
TKμ – тепловой коэффициент магнитной проницаемости;
ТПМ – теория подобия и моделирования;
РЭС – радиоэлектронное средство;
ПП – пассивный преобразователь;
ПА – активный преобразователь;
ОГМ – обобщенная геометрическая модель;
БИС – большая интегральная схема;
ИС – интегральная схема;
САПР – система автоматизированного проектирования.

Тема 1. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ РЭС

1.1. Факторы, определяющие конструкцию РЭС

Основные определения

Проектирование – это разработка основных показателей того конечного изделия, для которого оно проводится, и путей их практической реализации. Результатом процесса проектирования является конструкция.

Конструирование – это объективный процесс организации, выявления и отражения в конструкторской и технологической документации электрических, механических, тепловых и других связей между элементами изделия.

Организация связей предполагает создание монтажных, электрических принципиальных схем, макетирование и наладку реальных приборов и систем, создание тепловых и других макетов, их проверку и совершенствование.

С течением времени изменялось понятие РЭС. Вначале использовалось понятие «аппаратура». *Радиотехническая аппаратура* – аппаратура, используемая для решения технических задач обнаружения целей, наведения, навигации и т.д. Развитие ЭВМ и систем автоматики привело к появлению понятия «*электронная аппаратура*». Дальнейшее усложнение аппаратуры привело к понятию «*радиоэлектронная аппаратура*». Введение в состав аппаратуры различных электромеханических устройств, систем питания, теплоотвода и контроля привело к понятию «*радиоэлектронное средство*».

1.1.1. Классификация РЭС

Конструкция РЭС зависит от большого количества факторов, основными из которых являются функциональное назначение аппаратуры, объект установки, условия эксплуатации, эксплуатационные требования, производственно-технологические требования, экономические показатели. При разработке конструкции, полностью удовлетворяющей заранее поставленным требованиям, в процессе конструирования необходимо учитывать эти факторы. Однако современная РЭА настолько многообразна, что требуется определенная специализация при ее конструировании.

Прежде всего необходима классификация РЭА, которая четко отражала бы конструктивные особенности аппаратуры.

Конструкции РЭС различного назначения, устанавливаемые на объекты техники, – так называемые носители имеют особенности, вытекающие из специфики назначения и условий эксплуатации.

Категории характеризуют РЭС по продолжительности работы.

Различают четыре категории РЭС:

- многократного,
- однократного,
- непрерывного,
- общего применения.

Радиоэлектронное средство многократного применения способно выполнять свои функции несколько раз по мере необходимости, однократного – один раз за период эксплуатации; РЭС непрерывного применения предназначено для непрерывной работы все время, за исключением плановых и вынужденных перерывов в работе; РЭС общего применения работает в смешанном режиме, как, например, бытовое РЭС.

Классы подразделяют РЭС по трем глобальным зонам использования:

- наземное РЭС (суша);
- морское (океан);
- бортовое (воздушное и космическое пространство).

Внутри классов различают специализированные *группы* в зависимости от объекта установки. Классообразующий признак группы – комплексный: назначение и тактика использования, условия совместимости с объектом, требования к составляющим надежности, к защите от внешних воздействий и т.д.

При конструировании аппаратуры пользуются классификацией, приведенной в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Классификация РЭС

Класс аппаратуры	Группа аппаратуры
Бортовая	Самолетная (вертолетная) Ракетная Космическая
Морская	Судовая (корабельная) Буйковая
Наземная	Стационарная Для подвижных объектов (возимая, носимая) Переносная Бытовая

1.1.2. Особенности проектирования наземных РЭС

Класс наземной РЭС включает в себя три основные группы:

- стационарное;
- для подвижных объектов;
- носимое РЭС.

Дополнительная группа – бытовое РЭС.

При конструировании РЭС наземного класса возникает общая задача защиты от вибраций, ударов, пыли в условиях нормального атмосферного давления. *Стационарное* РЭС характеризуется: 1) особой продолжительностью эксплуатации и необходимостью постепенной модернизации; 2) работой в помещении с нормальными климатическими условиями; 3) отсутствием механических перегрузок во время работы; 4) транспортированием в амортизирующей упаковке; 5) хранением в складских условиях в климатических зонах изготовителя и потребителя; 6) высокой ремонтнопригодностью при ремонте на месте установки.

Для стационарного РЭС имеются ограничения на габариты и массу одной стойки шкафа, определяемые удобством транспортирования, выгрузки, передвижения внутри помещения и т.п.

При конструировании РЭС вещательных станций необходимо предусматривать возможность их постепенной модернизации. Конструкция должна допускать модернизацию путем незначительного усовершенствования, замены отдельных блоков или введения приставок.

Разновидностью стационарного РЭС является подгруппа *переносного* РЭС, к которой относят лабораторные, медицинские и иные РЭС. Объектом установки является поверхность стола, пола и т.п. Переносное РЭС всегда работает в комнатных условиях и не должно работать во время переноса с места на место. Перенос осуществляется, как правило, одним – двумя человеками.

Группа РЭС *для подвижных объектов* отличается тремя особенностями: повышенные требования к защите от вибраций и ударов; погрузка и разгрузка легко расчленяемых частей должна осуществляться силами двух человек; усиленное воздействие абразивной дорожной пыли.

К РЭС для подвижных объектов относят мобильные связные, радиолокационные и пеленгаторные станции, диспетчерские станции строительных, сельскохозяйственных и транспортных предприятий, включая железнодорожный транспорт, передвижные телевизионные студии, автомобильные приемники и магнитолы и пр.

Общая масса комплекса РЭС для одной грузовой автомашины должна составлять примерно 2/3 ее грузоподъемности; оставшаяся 1/3 идет на запас для проезда по плохим дорогам, на ЗИП и бытовое оборудование операторов. Масса каждого моноблока не должна превышать 60 кг для осуществления демонтажа с автомашины в аварийных условиях.

Радиоэлектронные средства, размещаемые в кузове автомашины (фургоне), имеют ограничение мощности рассеяния. Нормальная мощность рассеяния на единицу объема фургона для естественного воздушного охлаждения составляет 0,5 кВт/м³; предельной является мощность 1 кВт/м³.

Носимые РЭС характеризуются размещением на человеке и необходимостью защиты от случайных значительных ударов, неизбежных в полевых условиях. К носимым РЭС относят станции ближней связи, портативные радиопеленгаторы, некоторые виды медицинской аппаратуры. Требование пространственной совместимости совпадает с эргономическими требованиями. Один человек может носить продолжительное время за плечами 10 кг, на ремне через плечо – 3 кг, в кармане – 0,7 кг. Важность миниатюризации в этом случае проявляется наиболее весомо. Кроме общих климатических требований при работе носимого РЭС добавляются усложненные условия в холодное время года, связанные с конденсацией росы в результате отпотевания при внесении с холодного воздуха в теплое помещение. Конструкция носимого РЭС сильно зависит от габаритов и массы источников питания. Носимое РЭС для полевых условий выполняют в герметичном корпусе.

Бытовое РЭС отличается следующими тремя особенностями: повышенное эстетическое значение внешнего вида и акустических данных, приспособленность к эксплуатации совершенно неподготовленным человеком, массовость производства и определяющее значение стоимости. Современное бытовое РЭС разрабатывается по общим правилам соответствующей профессиональной группы.

1.1.3. Особенности проектирования морских РЭС

Класс морского РЭС включает в себя три основные группы:

- судовое;
- корабельное;
- буйковое.

Морское РЭС отличается тремя особенностями:

1) комплексное воздействие климатических и механических факторов – 100 %-я влажность при повышенной температуре и солевом тумане в

сочетании с непрерывной вибрацией от двигателей, ударными перегрузками и линейными ускорениями;

- 2) длительное автономное плавание с отрывом от ремонтных баз;
- 3) акустические, магнитные и радиационные воздействия.

Морское РЭС должно разрабатываться в тропическом исполнении, предусматривать коррозионную стойкость и плеснестойкость, водо- и брызгозащищенность. Прямое воздействие воды наблюдается во время штормов, в аварийных ситуациях, при противопожарном и противорадиоактивном самоорошении помещений. В ряде случаев морское РЭС предназначается для работы в погруженном в воду состоянии. Судовое и корабельное РЭС обладают следующими классообразующими признаками:

- 1) высоким уровнем типизации в целях упрощения материально-технического снабжения судов запасными узлами;
- 2) возможностью ремонта на месте установки при минимальном количестве персонала и ограниченных контрольно-измерительных и ремонтных средствах без захода на ремонтную базу;
- 3) необходимостью учета ограниченности размеров люков и проходов на судне;
- 4) защищенностью от сильных высокочастотных и низкочастотных (работа гидроакустических станций) электромагнитных полей;
- 5) вибростойкостью (работа механизмов) и ударостойкостью при ударах волн и при стрельбах (для корабельного РЭС на судне, имеющем ракетное, торпедное, артиллерийское вооружение), стойкостью к ускорениям, возникающим при качке.

Судовые РЭС устанавливаются на пассажирские, грузовые суда (сухогрузные, наливные, промысловые, буксиры, ледоколы и др.).

Корабельные РЭС связи представляют собой размещенные на судах, надводных кораблях и подводных лодках радиотехнические средства кораблевождения, к которым относятся средства коррекции корабельных навигационных систем (радионавигационные и радиолокационные станции, радиомаяки), навигационные гидроакустические и телевизионные средства наблюдения (эхолоты, гидроакустические станции) и т.д. Разнообразие РЭС, сосредоточенных на судне или корабле, затрудняет снабжение запасными узлами. Особое внимание при конструировании судовых и корабельных РЭС должно уделяться стойкости при ударах. Радиолокационные установки, устройства передачи сигналов бедствия и т.д. должны сохранять работоспособность в случае повреждения самого судна или корабля в результате столкновения и при других аварийных ситуациях.

Ограниченные габариты рубок, предназначенных для размещения РЭС, должны учитываться конструктором при обеспечении требуемой ремонтпригодности на месте установки РЭС.

В благоприятных условиях находится связанное РЭС, размещаемое в радиорубке. Согласно международным правилам в радиорубке должна быть вентиляция, обеспечивающая 20 обменов воздуха в час, и должна поддерживаться температура от 18 до 23 °С.

Автоматизированное РЭС устанавливают в необитаемых помещениях (отсеки, трюмы), где климатические условия тяжелые. Часть специального корабельного РЭС размещается на открытой палубе или за бортом ниже ватерлинии.

Обеспечение электромагнитной совместимости является одной из сложных задач, возникающих при размещении судового и корабельного РЭС. Эффективно обеспечить совместимость можно только принятием мер при конструировании самого судна. Для соединений между стойками должен применяться экранированный кабель. Броня кабеля заземляется через небольшие интервалы по всей длине. Радиорубка должна представлять собой тщательно экранированное помещение.

Буйковое РЭС служит навигационным и другим целям и характеризуется:

- 1) особой продолжительностью необслуживаемой эксплуатации;
- 2) воздействием сильных ударов, связанных с волнением моря и с постановкой буя способом сбрасывания.

Температурные условия для буйкового РЭС считаются хорошими благодаря интенсивному теплоотводу от корпуса. К группе буйковых РЭС следует относить переносные радиостанции спасательных средств. Спасательное РЭС должно выполняться в легком герметичном корпусе, стойком к соленой воде, обладать дополнительной плавучестью и выдерживать без повреждения удар о воду при сбрасывании с высоты 10 м.

1.1.4. Особенности проектирования бортовых РЭС

Класс бортовой РЭС включает в себя группы:

- авиационная;
- космическая;
- для ракетной техники.

Бортовым называют РЭС, устанавливаемое на летательных объектах. Постоянная потребность в усложнении функций РЭС бортового класса ограничивается возможностями летательных объектов по массогабаритным

показателям, поэтому уменьшение габаритов и массы бортового РЭС принято считать первой задачей при конструировании. Вторая задача связана с необходимостью для бортового РЭС, располагаемого вне гермоотсека, работать в условиях разреженной атмосферы. На большой высоте воздух разрежен (на высоте 26 км – до 2 кПа), что приводит к снижению его электрической прочности. На участках конструкции, имеющих острые углы и находящихся под высоким потенциалом, возможно коронирование. Герметизированное РЭС, расположенное вне гермоотсека, испытывает внутренние разрывающие усилия.

Помимо названных двух общих задач, стоящих при конструировании бортового РЭС и являющихся классообразующими признаками, каждая группа имеет свои особенности.

Вертолетное и самолетное РЭС характеризуются относительной кратковременностью непрерывной работы, измеряемой часами, в остальное время РЭС находится под контролем персонала ремонтной базы: осуществляются периодические осмотр и контроль, перед каждым вылетом должна проводиться предполетная проверка. Конструкция такого РЭС должна обеспечивать свободный доступ к внутренним частям для уменьшения времени на поиск неисправности. Чем меньше времени расходуется на предполетную проверку, тем больше экономический эффект от эксплуатации самолетов гражданского воздушного флота. Отсюда вытекает требование высокой контролепригодности.

Температура корпуса самолета изменяется в широких пределах. Летом на аэродроме в южных районах корпус нагревается более чем до 50 °С на высоте 10 км. На сверхзвуковых самолетах при полете в плотных слоях атмосферы корпус может нагреваться до 150 °С. В результате РЭС, расположенное вне гермоотсека, испытывает тепловые удары.

Вибрационные, ударные и линейные перегрузки для конструкций РЭС самолетной группы значительны.

Во всех случаях задается диапазон частот вибрации. Нижние частоты возникают во время движения самолета по взлетно-посадочной полосе, а верхние связаны с работой двигателя. На взлете и посадке образуются ударные перегрузки с хаотическим чередованием ударов. При любом изменении скорости возникают линейные перегрузки.

В процессе полета летчик непрерывно поддерживает радиосвязь с диспетчерами. Он должен быть проинформирован о зонах грозовой облачности, местонахождении других самолетов и т.д. Весь посадочный маневр осуществляется с помощью радиотехнических систем посадки. Результаты работы РЭС используются летчиком или штурманом, для которых эти ре-

зультаты – не цель действий, а только средство для выполнения другой задачи. Следовательно, РЭС должно работать автоматически, самостоятельно обрабатывать результаты и выдавать их в виде, удобном для быстрого восприятия – отклонение стрелки влево-вправо, зажигание сигнала, совмещение визиров.

Разрабатывая конструкцию самолетного РЭС, нужно иметь в виду, что не только заняты зрение, слух и руки летчика, но и ограничено место, где могут быть установлены органы управления и средства отображения информации.

Блоки самолетной РЭС приходится выносить в те места самолета, где есть удобный доступ для смены и осмотра. Поэтому характерной особенностью являются коммуникации дистанционного управления. На самолетах и вертолетах предусмотрены радиоотсеки, где РЭС komponуются в виде стоек или на монтажных рамах.

К *космическим и ракетным РЭС*, помимо общих требований к бортовому классу, предъявляют дополнительные требования:

- 1) особой ограниченности массы и объема в связи с необходимостью иметь минимальную стартовую массу ракеты-носителя;
- 2) чрезвычайно высокой безотказности;
- 3) высокой ремонтпригодности в предстартовый период;
- 4) совместного действия вибрационных и линейных нагрузок во время старта.

Следует особо отметить требования к безотказности во время полета и к ремонтпригодности в предстартовый период. Практически любые затраты на повышение этих показателей будут малы по сравнению с общей стоимостью запуска космического корабля. Весь успех космической экспедиции в конечном счете определяется безотказностью работы РЭС. Поэтому функциональные узлы многих систем должны иметь резервирование. Резервирование включается как автоматически, так и экипажем. Для определения вышедшего из строя блока космонавты наблюдают за бортовыми индикаторами и принимают решение о переключении на резервный блок. Переключение должно проводиться одним движением. Пульт управления в кабине космического корабля напоминает самолетный, но проектируется с учетом состояния невесомости оператора.

Радиоэлектронные средства искусственных спутников Земли относятся к группе космических средств, но являются необслуживаемыми. Эта аппаратура характеризуется:

- 1) особой продолжительностью эксплуатации без обслуживания (годы);

- 2) работой в условиях атмосферы с постоянным газовым составом низкой влажности или в вакууме;
- 3) циклическим изменением температуры;
- 4) отсутствием механических нагрузок во время работы;
- 5) опасностью воздействия радиации.

Спутник представляет собой контейнер, заполненный РЭС и физическими приборами, которые служат датчиками для РЭС. Источником питания являются химические элементы, работающие совместно с солнечными батареями, установленными на раскрывающихся створках большой площади. Дополнительные отличительные черты ракетного РЭС:

- 1) разовость использования;
- 2) необходимость в особой кратковременности предстартовой проверки и высокой ремонтпригодности в предстартовых условиях;
- 3) работа в условиях быстрого возрастания окружающей температуры на обшивке ракеты – до нескольких сотен градусов;
- 4) длительная сохраняемость при многолетнем хранении;
- 5) большие ударные нагрузки.

Для того чтобы измерять режим и производить подстройку непосредственно перед пуском, в конструкции ракетного РЭС должно быть предусмотрено дистанционное управление с выводом контрольных точек на корпус ракеты в места, удобные для доступа. Для более полного использования объема отсека, выделяемого на малых ракетах, РЭС имеет вид цилиндра.

1.2. Окружающая среда и ее воздействие на радиоэлектронные средства

1.2.1. Основные определения

Радиоэлектронные средства эксплуатируются в условиях воздействия на них целого ряда систематических и случайных факторов. *Систематические факторы* определяют рабочие функции аппаратуры и могут быть учтены в процессе проектирования РЭС. *Случайные факторы* по своему характеру и времени воздействия проявляются случайным образом, в связи с чем учет их влияния в процессе разработки РЭС достаточно затруднен.

Факторы могут быть *субъективными*, т.е. зависящими от действий конструктора, технолога и обслуживающего персонала, и *объективными*, не зависящими от человека.

По характеру воздействия на РЭС объективные факторы разделяются на климатические, биологические, механические, радиационные.

В зависимости от размещения РЭА – на поверхности земли (в том числе в горных местностях), в атмосфере или в толще вод рек, морей и океанов характер и интенсивность внешних естественных дестабилизирующих факторов будут различными. Их влияние может быть как усилено, так и ослаблено при размещении РЭС на или внутри различных объектов. Освоение космического пространства требует учета дестабилизирующих факторов космического пространства и знаний условий работы РЭС на поверхности планет и других космических тел. Для земных РЭС определяющими естественными дестабилизирующими факторами являются климатические.

Климат – характерная для данной области (региона) на поверхности земли совокупность типичных изменений атмосферных процессов, обусловливаемых географическими координатами, уровнем солнечной радиации, строением земной (подстилающей) поверхности, вертикальным теплообменом и другими определяющими метеорологическими факторами за длительное (обычно 20 – 30 лет) время. В зависимости от размеров пространства земной поверхности различают макро-, мезо- и микроклимат.

Макроклимат определяется географическими координатами, положением по отношению к океану, большими горными массивами и регулярными циркуляциями воздуха; местные условия при оценке макроклимата не учитываются.

Мезоклимат определяется только местными влияниями (местные изменения рельефа поверхности, влияние реки или озера и т.п.). Параметры макро-и (частично) мезоклимата учитываются при конструировании РЭС.

Параметры *микроклимата* (сухой или сырой участок земной поверхности) весьма локальны, характерны для малых объемов (десятки м³) и практически не учитываются. Большая динамичность факторов окружающей среды требует не только их дифференцированного учета, но и четких определений.

Климатические факторы внешней среды включают в себя температуру, влажность воздуха, давление воздуха или газа (высоту над уровнем моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль (в том числе снежную), соляной туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибов, а также содержание в воздухе коррозионно-активных агентов.

Динамичность этих параметров заставляет рассматривать нормальные, номинальные, рабочие и предельные значения.

Нормальными называют уточненные при проектировании значения климатических факторов в пределах данной географической зоны с учетом места расположения изделия.

Нормальными значениями климатических факторов внешней среды принято считать следующие:

температура – от +15 до +35 °С;

относительная влажность воздуха – от 45 до 80 %;

атмосферное давление – от 630 до 800 мм рт. ст.

Предельные значения климатических факторов проявляются чрезвычайно редко, в течение не более 6 ч, и допускают в этих условиях только сохранение работоспособности РЭС (без соблюдения номинальных значений параметров, отклонения которых оговариваются в ТУ).

Рабочие значения характеризуют области сохранения номинальных параметров при экономически целесообразных сроках службы РЭС. Записанные в ТЗ, ТУ или стандарты рабочие значения являются номинальными значениями параметров, при которых обеспечивается нормальная эксплуатация.

1.2.2. Влияние различных факторов на работоспособность РЭС

Воздействие *температуры* приводит к изменению физико-химических и механических свойств материалов и элементов, что оказывает влияние на электрические свойства и параметры РЭС и, как следствие,

на количественные характеристики их надежности. На рис. 1.1. приведена зависимость, показывающая изменение температуры воздуха от высоты.

Различают эффективную температуру внешней среды; температуру для тепловых расчетов изделий; среднюю (из ежегодных максимумов или минимумов) в виде среднеарифметического значения за многолетний период и температуру внешней среды при эксплуатации. Для изделий с естественным воздушным (водяным) охлаждением темпера-

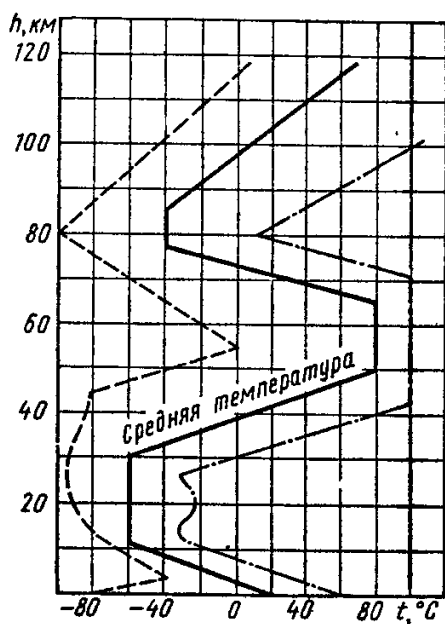


Рис. 1.1. Изменение температуры воздуха в зависимости от высоты

тура внешней среды – это температура газовой среды (воды) на уровне расположения РЭС, на расстоянии, при котором влиянием рассеивания тепла от РЭС можно пренебречь (оно оговаривается в ТУ). Для РЭС с принудительным газовым или вторичным водяным охлаждением за температуру внешней среды принимают температуру газа или жидкости на входе в систему охлаждения, а для РЭА, работающей в почве, – температуру почвы на уровне погружения в нее РЭА и на расстоянии, при котором влиянием тепла от РЭА можно пренебречь.

При повышении температуры механические свойства большинства металлов снижаются и увеличивается их электрическое сопротивление. У меди, например, при повышении температуры до 100 °С сопротивление возрастает на 40 %. При понижении температуры у всех материалов понижается пластичность, а при достаточно низких температурах она практически исчезает и материал становится хрупким. В значительной степени зависят от температуры электрические свойства диэлектриков и полупроводников. При повышении температуры у диэлектриков резко падает сопротивление изоляции, растут диэлектрические потери и изменяется диэлектрическая проницаемость.

Аппаратура, которая продолжает нормально работать и сохраняет свои параметры в заранее установленных пределах при воздействии повышенных температур, называется теплоустойчивой, а при воздействии пониженных температур – холодоустойчивой.

Влияние *влажности* на конструкционные материалы: разрушение исходной структуры вещества или изменение его физических, химических, электрических и механических свойств.

В зоне влажных субтропиков и на побережье Ледовитого океана влажность достигает 85 – 90 %, а в зоне пустынь – 5 – 10 %. На показатели влажности влияет температура окружающего воздуха. При температурах ниже нуля влага конденсируется и выпадает в виде инея, поэтому присутствие ее в атмосфере становится незначительным. При температуре воздуха 20 – 40 °С может иметь место наибольшая влажность, достигающая 100 %.

Наиболее опасна относительная влажность порядка 80 – 90 %, так как в этом случае влага находится в воздухе в газообразном состоянии и легче поглощается толщей материалов, проникая сквозь тонкие щели и мелкие поры. При более высокой влажности, в том числе и при 100 %, влага поглощается поверхностью материала и меньше проникает в толщу материала. Различные сочетания той или иной относительной влажности, температуры или последовательности в смене этих факторов образуют разнообразие климатических воздействий на РЭА. Увеличение влажности

быстро изменяет диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность воздуха. Это сказывается на изменении емкости между элементами незащищенной конструкции и может стать причиной пробоев. Особенно заметно это явление при высоких температурах.

Медленнее (в течение нескольких часов) сказывается действие влаги на поверхностное электрическое сопротивление изоляционных материалов. Тончайшая пленка влаги, адсорбированная поверхностью изоляционного материала при 80 – 100 %-й влажности воздуха, снижает сопротивление изоляции на несколько порядков. Еще медленнее (месяцы, годы) проявляется действие влаги в виде коррозии металлических элементов. Коррозия проявляется в разрушении паяных и сварных швов, что нарушает герметизацию и снижает механическую прочность; может произойти обрыв электромонтажных связей; увеличивается сопротивление контактных пар, что ведет к обгоранию контактов разъемных соединений и к увеличению шумов неразъемных соединений. К воздействию влаги очень чувствительны элементы и структуры интегральных микросхем.

Влияние влаги может привести к отказам в аппаратуре, снижению эффективности и качества РЭА. Лучшим средством защиты конструкции от влаги является герметизация, которая обычно защищает и от других воздействий – пыли, грибков, агрессивных сред, а в отдельных случаях и от определенных механических воздействий.

Аппаратура, которая продолжает нормально работать и сохраняет свои параметры в заранее установленных пределах при воздействии повышенной влажности, называется *влагоустойчивой*.

Устойчивость разработанной РЭА к повышенной влажности проверяют при температуре 40 °С и влажности 98 %, так как именно в этих условиях происходит наиболее быстрое окисление большинства металлов и развитие грибковых образований (плесени), а электрические характеристики слоистых диэлектриков, поглощающих воду из воздуха, изменяются на несколько порядков.

На поверхности Земли атмосферное давление принято считать нормальным, но с увеличением высоты оно резко падает. С увеличением высоты воздух становится сильно разреженным, а электрическая прочность очень низкой. При этом на деталях, имеющих острые углы и высокий потенциал, может возникнуть коронный разряд, может происходить пробой воздушных промежутков, что приводит к выходу аппаратуры из строя. Кроме того, в аппаратуре ухудшается тепловой режим, так как при пониженном давлении уменьшается отвод теплоты от нагреваемых элементов, в результате чего их температура повышается и создаются условия для перегрева аппаратуры.

Изменения *давления* воздуха или газа (вызванные, в частности, ростом высоты над уровнем моря) могут привести к таким последствиям, как изменение емкости и допустимых рабочих напряжений конденсаторов с воздушным диэлектриком, изменение величины допустимого пробивного напряжения в изоляторах, а также между проводниками монтажа. С ростом высоты и уменьшением в связи с этим плотности воздуха может произойти фактическое повышение температуры всех видов изделий, в том числе РЭА.

Солнечное излучение (ультрафиолетовые лучи, видимое и инфракрасное излучение) вызывает окисление полярных диэлектриков; химическое разложение органических материалов; поверхностное окисление материалов и ухудшение их физико-химических и электрических свойств; старение материалов.

Для средней климатической полосы наиболее характерно наличие в атмосфере песка, пыли, различных газов. Их влиянию подвергается аппаратура, работающая в зоне пустынь или расположенная на подвижных объектах, передвигающихся по грунтовым дорогам. Обладая высокой твердостью и гигроскопичностью, песок или пыль проникает в трущиеся части механизмов (контакты, зазоры), что приводит или к поломке аппаратуры, или к быстрому износу ее частей, снижает изоляцию токонесущих элементов. Влияние *пыли и песка* на работу РЭС: увеличивается емкость конденсаторов с воздушным диэлектриком; увеличиваются электростатические заряды; увеличиваются шумы; ускоряется износ контактов; возникают замыкания на печатных платах; абразивное воздействие на наружные поверхности.

Для защиты от пыли и песка в конструкции предусматриваются соответствующие уплотнители.

Соляной туман способствует возникновению коррозии.

При эксплуатации РЭС под водой на конструкцию воздействует гидростатическое давление воды.

В районах с влажным тропическим климатом воздух может быть заражен микроорганизмами, вызывающими появление плесени на органических материалах. Особенно интенсивно развивается плесень при повышенных влажности и температуре. Ее наличие ухудшает физико-химические и электрические свойства изоляционных материалов, а длительное воздействие ведет к их полному разрушению.

Плесневые грибы приводят к образованию различного вида кислот, которые вызывают коррозию металлов и способствуют разложению изоляционных материалов. Наиболее подвержены действию плесени напол-

нители и пластификаторы. Плесенью могут поражаться стеклянные призмы и линзы, хорошей питательной средой для нее являются остатки канифоли в местах пайки.

В числе **биологических** факторов серьезную опасность для РЭС представляют различные грызуны, которые способны перегрызать кабели и жгуты, а также термиты, муравьи и другие насекомые.

К **механическим** факторам воздействия на РЭС относят вибрацию, удары, линейные и центробежные ускорения, шум и акустические удары. Все они могут действовать как отдельно, так и в совокупности.

Вибрация проявляется в процессе эксплуатации на подвижном объекте и транспортировки РЭС и представляет собой периодические сложные колебания аппаратуры. Особую опасность представляет вибрация, частота которой близка к собственной резонансной частоте узла или элемента конструкции; при возникновении такого состояния разрушающие усилия могут возрасти в десятки раз. Основными параметрами вибрации являются частота и ускорение.

Удар возникает в случае, когда аппаратура претерпевает быстрое изменение ускорения. Параметрами удара являются ускорение и длительность удара.

Линейные и центробежные ускорения возникают при быстром изменении скорости движения на прямолинейном участке либо во время криволинейного движения. При этом может возникнуть многократное возрастание усилий на элементы крепления РЭС.

Шум и акустические удары вызывают опасную высокочастотную вибрацию конструктивных элементов РЭС. Указанные воздействия проявляются при расположении РЭС вблизи мощных источников шумов, которыми, в частности, являются работающие двигатели летательных аппаратов и пр. Акустический удар можно охарактеризовать мощностью колебаний источника звука, давлением и силой звука.

На борту космических аппаратов и искусственных спутников Земли РЭС оказывается под воздействием *невесомости* – механического фактора, характеризующегося отсутствием гравитационных сил или равновесием центробежной силы и силы притяжения Земли.

Радиационные факторы проявляются в виде космической радиации и облучения ядерными частицами. Последствия космической радиации – возникновение процесса ионизации в материалах, что и воздействует на РЭС, установленные на космических объектах. Характер облучения зависит от вида ядерных частиц, их комбинаций и может вызвать обратимые, полуобратимые и необратимые явления в аппаратуре.

Проявления радиационных факторов и степень их воздействия на свойства РЭС зависят от природы материалов конструктивных элементов. Наиболее устойчивы к радиации металлы, что связано с высокой концентрацией в них свободных носителей зарядов. У органических материалов при облучении ухудшаются механические и диэлектрические свойства. При облучении полупроводников в них образуются дополнительные носители зарядов, искажающие физические процессы, происходящие в р-п-переходах.

1.2.3. Условия использования и климатическое исполнение РЭС

Конструктивное исполнение РЭС во многом определяется макроклиматическим районом его эксплуатации.

В соответствии с **ГОСТ 15150-69** «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды» по воздействию климатических факторов внешней среды рассматриваются 10 разновидностей исполнения изделий:

- У** – для умеренного климата со среднегодовым максимумом и минимумом рабочих температур 313 и 228 К;
- УХЛ** – для умеренного и холодного климата, когда абсолютные минимумы температуры воздуха ниже 228 К;
- ТВ** – для влажного тропического климата, где сочетание температуры (равной или выше 293 К) и относительной влажности (равной или выше 80 %) наблюдается примерно 12 ч или более в сутки за непрерывный период (от 2 до 12 месяцев в году);
- ТС** – для районов сухого тропического климата, в которых средняя ежегодная абсолютная максимальная температура воздуха выше 313 К и которые не отнесены к макроклиматическому району с влажным тропическим климатом;
- Т** – как для сухого, так и для влажного тропического климата;
- О** – для любого климата (общеклиматическое);
- М** – для умеренно холодного климата (в районах морей, океанов или непосредственно на морском берегу, если эти районы расположены севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты);
- ТМ** – для тропического морского климата при нахождении изделия в морях и океанах между 30° северной широты и 30° южной широты;
- ОМ** – общеклиматическое морское исполнение для кораблей с неограниченным районом плавания;
- В** – всеклиматическое исполнение для суши и моря (кроме Антарктиды).

1.2.4. Категории размещения изделий РЭС

Изделия РЭС различного климатического исполнения изготавливают по определенным категориям размещения, характеризующимся местом их эксплуатации в воздушной среде на высотах до 4300 м.

Действующей нормативной документацией предусмотрено 5 основных укрупненных категорий размещения изделий.

Изделия, предназначенные для эксплуатации на открытом воздухе, относятся к *категории 1*. При этом учитывается воздействие всей совокупности климатических факторов, характерных для того или иного макроклиматического района.

К *категории 2* относятся изделия, предназначенные для эксплуатации в укрытиях типа навеса или в помещениях (объемах) с колебаниями температуры и влажности воздуха, существенно не отличающимися от соответствующих колебаний на открытом воздухе. К числу таких помещений могут относиться металлические помещения без теплоизоляции, кузова и прицепы автомашин и др.

Для эксплуатации в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий предназначены изделия, относящиеся к *категории 3*. К числу таких помещений относятся бетонные, каменные и деревянные помещения, а также металлические помещения с теплоизоляцией.

Изделия, предназначенные для эксплуатации в помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями, относят к *категории 4*. Подобными условиями обладают закрытые и отапливаемые либо охлаждаемые и вентилируемые лабораторные, производственные и жилые помещения, в том числе с кондиционированным воздухом, в которых отсутствует воздействие прямого солнечного излучения, атмосферных осадков, ветра, песка и пыли наружного воздуха, существенно уменьшена или полностью отсутствует конденсация влаги.

К *категории 5* относятся изделия, которые используются в помещениях (объемах) с повышенной влажностью. К числу таких помещений могут относиться неветилируемые и неоткрываемые корабельные помещения, шахты, некоторые дома гидрметаллургических производств и др., в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке.

Кроме рассмотренных выше основных категорий изделий существует ряд дополнительных категорий. В частности, для РЭС могут представлять практический интерес следующие из них.

Категория 1.1 охватывает изделия, предназначенные для работы и хранения в условиях категории 4, а также кратковременной работы в других условиях (в том числе на открытом воздухе).

Для обозначения изделий, предназначенных для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 1, 1.1 и 2, например, внутри РЭС, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах, введена дополнительная *категория 2.1*.

Изделия, используемые в нерегулярно отапливаемых помещениях (объемах), относят к дополнительной *категории 3.1*; в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом – к дополнительной *категории 4.1*. Изделия для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях относятся к *категории 4.2*.

Изделия РЭС, предназначенные для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 5, конструкция которых в части конденсации влаги аналогична ранее рассмотренной категории 2.1, относятся к дополнительной *категории 5.1*.

Приведенные выше основные и дополнительные категории размещения изделий РЭС не распространяются на летательные аппараты, предназначенные для эксплуатации на высотах более 1000 м.

Изготовление подобных изделий осуществляется в зависимости от пониженного атмосферного давления по группам (при разработке и изготовлении РЭС, предназначенных для размещения на высотных летательных аппаратах, большое значение имеет учет ряда дополнительных факторов, связанных с уменьшением плотности воздуха).

Наиболее серьезным фактором, связанным с ростом высоты, является снижение пробивных напряжений электрической изоляции изделий, расположенных вне герметичного отсека или корпуса.

1.2.5. Особенности проектирования радиоэлектронных средств с учетом климатического исполнения и категории изделий

Стандарт (ГОСТ 15150-69) устанавливает нормы температуры, влажности и других эксплуатационных параметров для данного вида условий эксплуатации (класса или категорий). Например, для изделия исполнения УХЛ4 рабочие температуры от +1 до +35 °С, средняя рабочая температура +20 °С, предельные температуры +1 °С, +50 °С, предельная относительная влажность 80 %. Некоторые виды исполнений изделий стандартом исключены. Так, требования к исполнениям У4, У4.1, У4.2 полностью перекрываются требованиями к исполнениям УХЛ4, УХЛ4.1, УХЛ4.2.

Для категории размещения изделий 1 стандартом установлены следующие *типы атмосферы* с предельным содержанием коррозионно-активных веществ:

1) условно чистая, сернистого газа не более 20 мг/м^2 за сутки ($0,025 \text{ мг/м}^3$), хлоридов – не более $0,3 \text{ мг/м}^3$ за сутки;

2) промышленная, сернистого газа не более $20 - 250 \text{ г/м}^2$ за сутки ($0,025 - 0,31 \text{ мг/м}^3$), хлоридов – не более $0,3 \text{ мг/м}^2$ за сутки;

3) морская, сернистого газа не более 20 мг/м^2 за сутки ($0,025 \text{ мг/м}^3$), хлоридов – не более $30 - 300 \text{ мг/м}^2$ за сутки;

4) приморско-промышленная, сернистого газа не более $20 - 250 \text{ мг/м}^3$ за сутки ($0,025 - 0,31 \text{ мг/м}^3$), хлориды от $0,3$ до 30 мг/м^2 за сутки.

Для категорий размещения 2, 3, 4 содержание коррозионно-активных веществ в атмосфере составляет $30 - 40 \%$ от установленных для категории 1.

Для изделий климатических исполнений У, УХЛ (ХЛ), ТС, ТВ, Т, как правило, назначаются условия эксплуатации в атмосфере типов 1 и 2, кроме специально оговоренных случаев.

При выборе того или иного климатического исполнения разработчику РЭС следует также учитывать содержание в окружающей атмосфере коррозионно-активных агентов. Для характеристики указанных воздействий нормативной документацией определены четыре основных типа атмосферы, приведенные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Разновидности атмосферы по коррозионному воздействию на РЭС

Тип атмосферы		Климатическое исполнение РЭС, обеспечивающее экономически целесообразную защиту от атмосферы
Обозначение	Наименование	
I	Условно-чистая	У, УХЛ, ТС, Т, ТВ
II	Промышленная	У, УХЛ, ТС, Т, ТВ
III	Морская	М, ТМ, ОМ, В
IV	Приморско-промышленная	О, В

Коррозионную активность атмосферы характеризуют увлажнение поверхности материалов и загрязнение воздуха коррозионно-активными агентами.

Увлажнение поверхности изделий может осуществляться фазовой или адсорбционной пленками влаги. Причем в ряде случаев может осуществляться одновременное их проявление.

Параметры загрязнения воздуха коррозионно-активными веществами устанавливаются по концентрации двуокиси серы, хлоридов и аммиака, превышающих фоновую концентрацию, которая составляет для двуокиси серы и аммиака $0,02 \text{ мг/м}^3$ и для хлоридов – $0,002 \text{ мг/м}^3$.

Тема 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭС

2.1. Обобщающие физические модели конструкций РЭС

2.1.1. Общие положения

При анализе и синтезе конструкций РЭА чаще всего приходится представлять исходные материалы в виде графических или знаковых моделей (графики, уравнения, формулы, таблицы). В более сложных случаях приходится прибегать к использованию методологии теории подобия и физическому моделированию.

График – двух-, иногда трехмерное изображение связи двух (трех) групп параметров в виде одной или семейства линий или поверхностей. Обладает наивысшей степенью наглядности, имеет ограниченную точность и область отображения. Значения параметров могут иметь как численную, так и качественную характеристику.

Уравнение – символическая запись связи многих групп параметров (минимум – двух параметров). Обладает наивысшей степенью компактности записи, но и высокой неопределенностью использования, так как дополнительно нужно знать область существования данной функции. Инвариантно (независимо) относительно систем единиц.

Формула – символическая запись связи ограниченного числа параметров для конкретной конструкции и конкретной системы единиц, часто включающая в себя числовые коэффициенты. Обладает наивысшей степенью определенности, но пригодна только в узкой области изменения параметров данной функции. Вид формулы зависит от используемой системы единиц и их конкретных численных значений.

Таблица – одно- или многорядная форма записи числовых значений взаимосвязанных параметров. Составляется либо по результатам эксперимента, либо по уравнению или формуле. Дает высокую точность, но весьма громоздка. Численные значения зависят от используемой системы единиц.

Характер этих графических и знаковых моделей зависит не только от их сущности и системы единиц, но и от системы координат. Графически наиболее наглядными и широко используемыми в инженерной практике являются три системы координат: прямоугольная (декартова), цилиндрическая и сферическая и их частные (дву- и одномерные) случаи. В номограммах и сложных графиках используют косоугольные и криволинейные

системы координат (параболические, эллиптические, бицилиндрические, софокусные и т.п.). Если по ходу решения задачи приходится иметь дело с большим, чем три, числом групп независимых параметров, то прибегают к формальным представлениям о многомерном пространстве. Оптимальный выбор графических или знаковых моделей и их пространства отображения позволяет дать наиболее компактное и наглядное представление о конструкции.

Сравним средства, которыми можно описать динамическую систему, – графики (рис. 2.1 а), уравнения (см. рис. 2.1, б), таблицу (табл. 2.1).

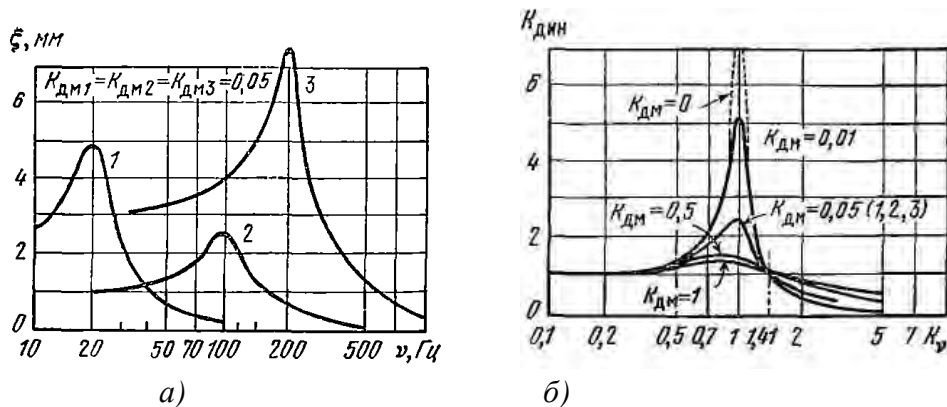


Рис. 2.1. Частные (а) и обобщенные (б) резонансные характеристики

На рис. 2.1, а построены графики функции $\xi = f(\nu)$ для трех динамических систем (1, 2, 3). Из рисунка следует, что частоты собственных колебаний систем ν_0 равны соответственно 20, 100 и 200 Гц, виден также характер изменения функции и то, что значение коэффициента $K_{дин} = \text{const} = 0,05$. Если ввести относительные (безразмерные) параметры демпфирования $K_{дин} = \xi / \xi_0$ и $K_v = \nu / \nu_0$ (см. рис. 2.1, б) то информативность и наглядность графика возрастут. Три кривые рис. 2.1, а сольются в одну, так как каждая кривая теперь отражает целое семейство кривых в относительных единицах. Из этого графика видно, что максимальные значения функции при $K_{дм} > 0,05$ лежат в дорезонансной области:

- при $K_{дм} \rightarrow 0$ величина $\xi \rightarrow \infty$;
- при $K_v = 1,41$ величина $\xi = 1$ (т.е. только для $K_v > 1,41$ возможно уменьшение колебаний амортизируемого блока);
- чем больше функция ξ при $K_v = 1$, тем она меньше при $K_v > 1,41$.

Однако для получения численных значений функции ξ и аргумента ν надо знать их начальные значения (например при $K_v = 1$).

Наивысшей общностью формы записи поведения динамической системы, возбуждаемой силой $F_0 \sin \omega t$, обладает уравнение

$$m\xi + \beta\xi + k\xi = F_0 \sin \omega t, \quad (2.1)$$

где m – масса; β – параметр, пропорциональный коэффициенту демпфирования $K_{\partial m}$, k – жесткость.

Это уравнение справедливо для любой системы единиц.

Частные решения уравнений в виде формул пригодны для решения узкого класса задач в определенной системе единиц (относительных или абсолютных).

$$K_{\partial ин} = \sqrt{\frac{1 + 4K_v^2 K_{\partial m}}{(1 + K_v^2) + 4K_v^2 K_{\partial m}}}; \quad (2.2)$$

$$K_{\partial ин} = \sqrt{\frac{1 + K_{\partial m}^2}{0,56 + K_{\partial m}^2}}; \quad (2.3)$$

$$m\xi + \beta\xi + k\xi = F_0 \sin \omega t. \quad (2.4)$$

Таблица дает наиболее точные значения как для относительных, так и для абсолютных значений параметров, но весьма громоздка (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

$K_{\partial m}$	1	0,7	0,5	0,2	0,1	0,07	0,05	0,02	0,001
$K_{\partial ин}$	1,132	1,191	1,242	1,317	1,331	1,334	1,335	1,336	1,336
ξ , мм	47,54	50,02	52,16	55,31	55,90	56,03	56,07	56,11	56,11

В общем случае *уравнение* представляет собой формальную запись взаимосвязи множества пар значений аргумента и функции, для выделения из которых конкретных областей значений требуется наложение дополнительных условий.

2.1.2. Методы теории подобия и моделирования

Конструкции современной РЭА – сложные системы, состоящие из взаимосвязанных элементов. Поэтому приложение к их анализу и синтезу классических математических методов наталкивается на ряд ограничений методического и принципиального характера, в основе которых лежат отсутствие общей теории конструирования РЭА, обилие разнообразных фи-

зических эффектов, используемых в РЭА и требующих специфических подходов, большое число параметров, с помощью которых необходимо описывать конструкцию РЭА.

Методы теории подобия и моделирования (ТПМ) по существу решают одну и ту же задачу: обобщение результатов ограниченного числа опытов с получением на их основе достоверной (в пределах разумных требований) математической модели системы.

Изучение системы начинается с качественных исследований, позволяющих ответить на вопрос: лучше или хуже, больше или меньше. Затем, обобщая разрозненные данные опыта, переходят к нахождению закономерностей и созданию математической модели явления, т.е. переносу полученной информации на другие подобные системы.

Так как конструкция РЭА изучается в условиях неполной исходной информации, то для конструктора очень важно знание основных положений теории подобия и моделирования. Эти методы позволяют проводить анализ конструкций по ограниченному числу параметров, заменять ее упрощенной физической или математической моделью, сокращать число анализируемых параметров без потери полноты описания.

Основными наиболее доступными методами ТПМ являются анализ размерностей, π -теорема, метод подобия, физическое моделирование.

Анализ размерностей

Последовательность решения подобных задач следующая: записывают функциональную зависимость, составляют уравнение размерностей, решают систему уравнений для показателей степени и составляют требуемую зависимость, вводя в нее константу или функцию C .

Анализ размерностей, оперируя понятиями высокого уровня абстрактности, позволяет синтезировать формулы размерностей физических величин на базе строгих математических доказательств.

π -теорема

Эта теорема лежит в основе анализа размерностей. Суть ее в следующем.

Если имеется функциональная зависимость (исходная информация) n размерных параметров

$$f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0, \quad (2.5)$$

то ей всегда соответствует эквивалентное соотношение m безразмерных параметров:

$$\psi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0, \quad (2.6)$$

и при этом всегда $n > m$. Обычно $m + q = n$, где q – число независимых размерностей.

π -теорема дает возможность описать конструкцию не только в пространстве первичных параметров, но и вторичных (в виде обобщенных характеристик безразмерного вида).

Таким образом решается задача, условия которой сформулированы только в виде системы физических характеристик, без задания их функциональных связей.

Метод подобия

Метод включает в себя две теоремы, устанавливающие условия подобия и закон моделирования систем, принадлежащих заданному классу исследования.

Первая теорема подобия. У подобных явлений определенные сочетания параметров, в виде критериев подобия, численно одинаковы. В соответствии с первой теоремой признаками подобия физических систем, кроме геометрического подобия, являются подобие отношений свойств материалов, сил и энергий.

Третья теорема подобия. Необходимым и достаточным условием подобия реальной системы и ее модели является пропорциональность всех сходственных характеристик, входящих в условия однозначности. Это означает, что если в совокупность первичных характеристик включаются граничные условия, то они также должны быть подобны. Отсюда следует необходимость соблюдения геометрического и физического подобия всех основных характеристик системы, допустимость (при некоторых заранее известных и количественно оцененных упрощающих допущениях) использования приближенного подобия.

Если исходная информация о конструкции неполна, недостаточно изучено физическое содержание процессов, неизвестно математическое описание или метод его решения, то одним из эффективных способов ее исследования является модельный (физический) эксперимент. В этом случае последовательно определяют: основные процессы, подлежащие моделированию, законы и масштабы моделирования, требования к установке для моделирования и оценки точности физического моделирования.

2.1.3 Преобразование – определяющий физический эффект работы и конструкции РЭА

Радиоэлектронную аппаратуру и ее элементы можно представить в виде преобразователей, соединенных в сложные структуры с помощью ди-

намических и статических электрических, магнитных, механических, тепловых и других связей. Поэтому в основу обобщающих физических моделей РЭА можно положить *эффект преобразования*.

Простейшим является идеализированный двухсторонний преобразователь, на входе и выходе которого действуют силы одной и той же (или разной) физической природы, а эффекты преобразования происходят без потерь (рис. 2.2, а). Примерами таких преобразователей могут служить электрические трансформаторы и механические редукторы, КПД которых – 0,9 – 0,98 (см. рис. 2.2, б, в). При заметных потерях необходимо учитывать и эту сторону (см. рис. 2.2, г).

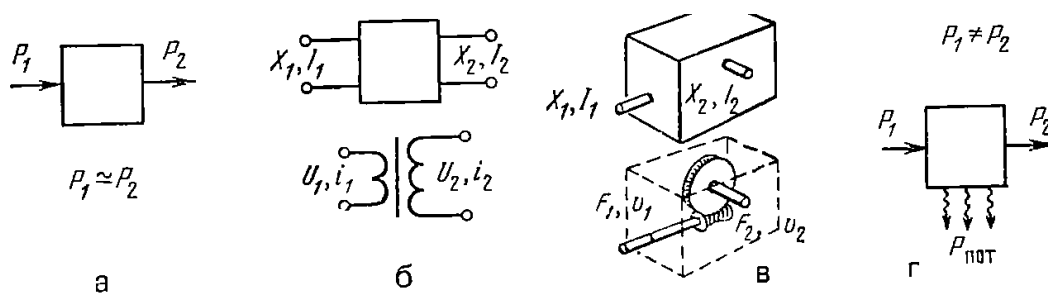


Рис. 2.2. Схемы преобразователей: а – идеальный ППр; б – идеализированный ППр в виде трансформатора; в – идеализированный ППр в виде редуктора; г – реальный ППр

Для создания внутренней структуры конструкции (преобразователя) необходимо элементы соединить так, чтобы эффект преобразования был максимальным, а структура преобразователя (конструкции) сохраняла свои свойства в течение заданного времени эксплуатации.

Если внутренняя статическая структура конструкции обеспечивает заданные эффекты преобразования, то имеем дело с конструкцией в виде *пассивного преобразователя* (ППр), который для своей работы не требует отдельных источников энергии питания. В конструкции, представляющей собой *активный преобразователь* (ПА), эффекты преобразования возможны только при подключении к источникам питания, энергия которых превращается в энергию выходного сигнала; ПА – по существу, комбинация как минимум двух ППр. Так как работа конструкции в виде ППр и ПА в общем случае без потерь невозможна, то их следует представлять в виде трех- и четырехстороннего преобразователей (рис. 2.3).

Радиоэлектронная аппаратура в целом – сложный ПА (см. рис. 2.3, б), который включает в себя:

- источник энергии питания $W_{ВХ}$ (например, гальванический элемент или аккумулятор) 1;

- потребитель энергии ПА $W_{вых}$ (ухо или глаз человека, измерительный прибор, самописец и т.п.) 2;
- потребитель энергии, которую бесполезно теряет ПА, $W_{пот}$ (среда, поглощающая, например, тепловую энергию) 3;
- источник энергии управления ПА $W_{упр}$ (магнитная лента, датчик и т.п.) 4;
- собственно активный преобразователь 5.

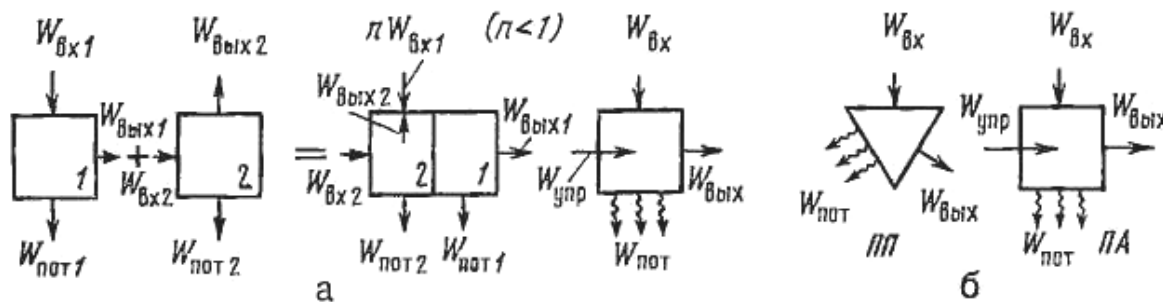


Рис. 2.3. Схемы преобразователей: а – построение ПА из двух ППр; б – условные изображения ППр и ПА

Сближая все эти элементы, получаем «закрытую» систему (рис. 2.4, б), не связанную с окружающей средой. Эта система имеет только внутренние связи с РЭА и между элементами (этих связей может и не быть).

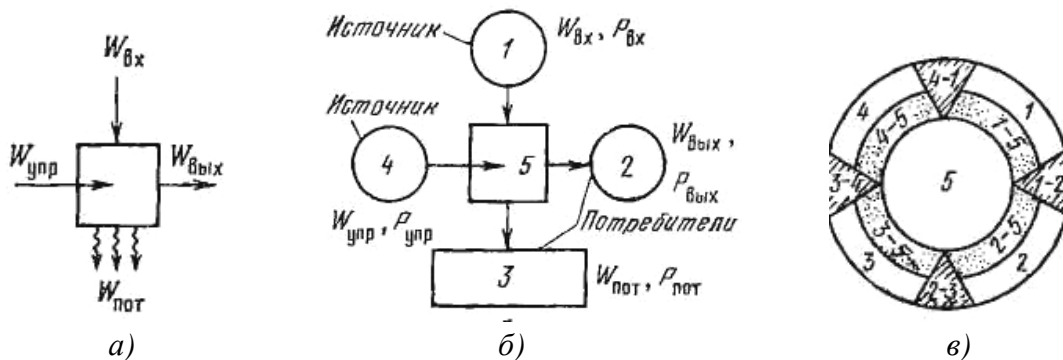


Рис. 2.4. Преобразователь: а, б – связанные со средой, в – замкнутая термодинамическая система

Модель системы (см. рис. 2.4, в), включающая РЭА, ее связи, источники и потребители энергии, удобна тем, что представляет собой закрытую термодинамическую систему, для которой просто составить энергетические уравнения существования конструкции. Из ее рассмотрения следует, в частности, что энергоемкость источника 1 не может превышать энерго-

емкость РЭА 5, энергоемкости потребителей 2 и 5 не могут быть меньше $W_{\text{вых}}$ и $W_{\text{ном}}$, а источника 4 – больше энергоемкости устройства управления радиоэлектронной аппаратурой.

2.1.4. Обобщающая физическая модель РЭА

Радиоэлектронная аппаратура состоит из множества ППр и ПА, соединение которых можно представить и в виде, показанном на рис. 2.5, а.

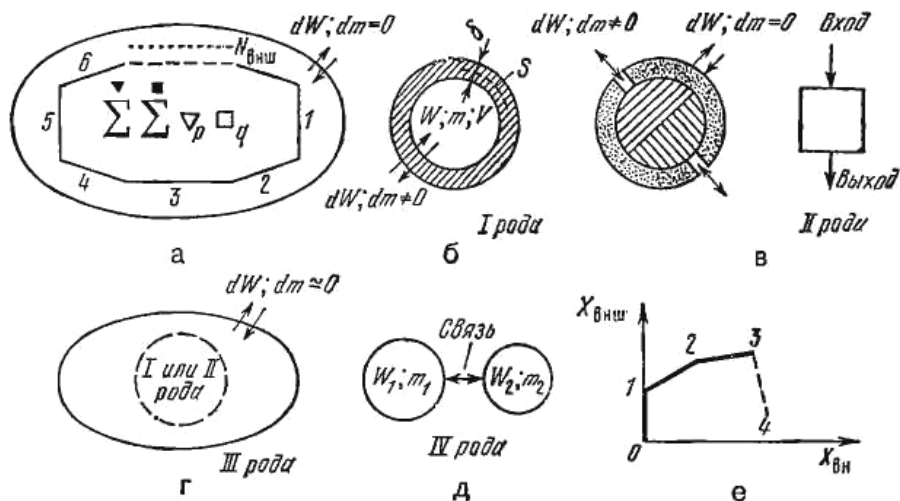


Рис. 2.5. Обобщающая физическая модель РЭА

Радиоэлектронная аппаратура имеет определенное число внешних связей. Многие из связей ППр и ПА оказываются общими. В число внешних связей входят электрические, магнитные, электромагнитные, тепловые, химические, механические и другие связи, которыми определяется взаимодействие РЭА со средой. Для упрощения анализа часто исследуют порознь различные внешние связи. Это обычно допустимо, потому что корреляционные связи между внешними влияниями РЭА обычно малы, а dW и dm можно считать равными нулю.

Выполним упрощения обобщающей физической модели РЭА: примем число внешних связей равным 1 и контрольную поверхность представим в виде границ ядра (собственно РЭА) и полупрозрачной для определенных воздействий оболочки (в виде или кожуха РЭА, или пристеночных областей окружающего пространства). Определяющими параметрами упрощенной модели (назовем ее моделью I рода) будут энергия W (или ее поток P) и масса m , содержащиеся в объеме ядра V , толщина оболочки δ и ее сечение (поверхность) S , а также физические характеристики материала ядра и оболочки, определяющие их обобщенную проводимость требуемой природы.

Модель I рода (см. рис. 2.5, б) – основа расчетов эффектов энерго-массопереноса при теплообмене, электромагнитном экранировании, защите от проникающей радиации, влагозащите и герметизации, движении электрического тока в проводниках и электролитах, защите от акустических и механических воздействий и т.п. Определяющим конструкторским параметром является обобщенная проводимость оболочки (в частном случае она имеет смысл теплопроводности, электропроводности и т.п.).

Модель II рода. Если в модели I рода полупрозрачную оболочку заменить непрозрачной, ввести абсолютно прозрачные каналы и сложную структуру ядра из двух частей разной физической природы, то получим модель II рода (см. рис. 2.5, в) – основу для расчетов эффектов преобразования. Определяющие параметры упрощенной модели II рода: энергия W (или ее поток P), обобщенные координаты E (обобщенное перемещение) или I (обобщенная скорость) и сопряженные с ними обобщенные жесткость c_{ij} или сопротивление z_{ij} , а также V , S и (при необходимости) толщина δ . Простейший двухсторонний преобразователь в теории цепей рассматривается как четырехполюсник (трехсторонний – как шестиполюсник и т.д.). Модель II рода позволяет рассматривать конструкцию, элементы и РЭА в целом в виде преобразователей, определять условия получения максимального КПД в функции конкретных конструкторских параметров и оценивать качество конструкции РЭА и ее частей.

Модель III рода. Если в модели I рода увеличивать толщину полупрозрачной оболочки, то можно добиться того, что по границе контрольной поверхности эффекты энерго-массопереноса будут столь незначительны, что в каких-либо конкретных задачах можно приравнять $dW \approx 0$ и $dm \approx 0$ и получить модель III рода (см. рис. 2.5, г). Эта модель в виде обобщенной геометрической модели (ОГМ) элемента или РЭА используется при решении компоновочных задач. Значение потенциала соответствующей физической природы выбирается на минимальном уровне, так как синтетические ОГМ элементов РЭА представляют собой плоские или объемные геометрические модели, гарантирующие отсутствие паразитных полевых взаимодействий и сводящие компоновку к чисто геометрической задаче размещения без взаимного наложения или проникновения друг в друга плоских или объемных фигур.

Определяющими параметрами ОГМ являются потенциал dW/dx и геометрические размеры. В практике компоновочных работ чаще используются упрощенными обобщенными геометрическими моделями (V_{ycm} и S_{ycm}).

Модель IV рода. Наличие связей между элементами конструкции требует рассмотрения простейшей модели связи двух элементов (см. рис. 2.5, *д*). Эта модель представляет собой совокупность моделей I, II или III рода и канала связи между ними. Такая модель используется при анализе и расчетах параметров взаимосвязей в системе «человек – машина», при кинематическом воздействии механических усилий и выборе амортизаторов. Связи могут иметь следующий характер (см. рис. 2.5, *е*): воздействие не вызывает ответной реакции (внутренние силы связи больше, чем воздействующие внешние) – участок 0-1; реакция связи линейно или нелинейно пропорциональна усилию воздействия, сопротивление большое – участок 1-2; реакция связи линейно или нелинейно пропорциональна усилию воздействия, но сопротивление уменьшилось – участок 2-3, воздействие уменьшается, но реакция возрастает – связь разрушается – участок 3-4. Рабочими являются связи, при которых реакция либо превышает действующие усилия (статический режим, участок 0-1), либо пропорциональна им (динамический режим, участок 1-2).

2.1.5. Принципы описания конструкций в обобщенных параметрах

Все воздействия на элементы (заготовки) конструкции принято описывать как результат действия некоторых сил. При этом удобно оперировать с понятиями *обобщенных координат*, по которым в данной конструкции происходит изменение ее энергии (энергоемкости). Такими величинами в статических механических элементах конструкции принимают длину (линейное перемещение), угол поворота, площадь, объем. Характерными величинами в других случаях могут быть масса, термический заряд (в частном случае – энтропия), электрический или магнитный заряд, векторы поляризации или намагничивания или (в динамических) скорости их изменения.

Рассмотрение обобщенных координат в виде обобщенных перемещений (зарядов) для статических элементов конструкций и обобщенных скоростей (потоков зарядов) для динамических элементов конструкций позволяет дать общее, простое и наглядное описание различных эффектов в системе обобщенных параметров.

Физический смысл законов, полученных по моделям I – IV рода с использованием обобщенных координат, одинаков: величина потока энергии или массы вещества прямо пропорциональна градиенту потенциала соответствующей обобщенной силы и обобщенной проводимости соответствующей физической природы (которая зависит от материала). Однако их

непосредственное использование для конструкторских расчетов в ряде случаев невозможно, так как требует соблюдения и знания начальных и граничных условий и применения конкретных математических приемов.

2.1.6. Методика обобщенного исследования преобразования потоков энергии в РЭА

Метод обобщенного исследования позволяет отказаться от концепции «черного ящика» и вместо формальной математической аналогии теории четырехполюсника использовать физическую аналогию систем с потоками различных видов энергии. При этом возможно получение в общем виде решения обобщенной модели РЭА, представленной уравнениями в обобщенных координатах при любых заданных граничных условиях. А исследования процессов передачи и преобразования потоков энергии по законам механики, термодинамики и электродинамики не только не заменяют друг друга, но наоборот, становятся единой теоретико-методологической базой широкого класса практических задач.

Сопряженные с обобщенными координатами обобщенные силы измеряются количеством энергии в обобщенном силовом поле. Использование представлений об обобщенном силовом поле позволяет одним методом решать задачи теплового режима, вибрации и электромагнитных полей в РЭА. В качестве такого метода можно использовать вариационный принцип Остроградского – Гамильтона (принцип наименьшего действия).

2.2. Математические методы анализа физических полей РЭА

2.2.1. Общие положения

В общем случае физические эффекты, возникающие в конструкции РЭА в процессе ее функционирования, могут быть описаны совокупностью алгебраических, дифференциальных и разностных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

Математическое исследование конструкции РЭА может иметь целью ее анализ и синтез. Под анализом понимается исследование полей или характеристик элементов РЭА при заданной конструкции и параметрах РЭА. Под синтезом – определение оптимальных параметров, обеспечивающих заданное распределение полей или заданные конструктивные требования при определенных внешних воздействиях, условиях работы и ограничениях, накладываемых на РЭА.

Задачи анализа физических полей РЭА приводят к исследованию дифференциальных уравнений с частными производными второго и более порядка.

Уравнение, связывающее неизвестную функцию $U(x, y, z, t)$, независимые переменные x, y, z, t и частные производные от неизвестной функции, называется дифференциальным уравнением с частными производными.

Оно имеет вид:

$$F\left(x, y, z, U, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}, \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right) = 0,$$

где F – заданная функция своих аргументов.

Уравнение с частными производными называется квазилинейным, если оно линейно относительно всех старших производных от неизвестной функции. Так, например,

$$\begin{aligned} & A\left(x, y, z, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + B\left(x, \dots, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + \dots + \\ & + C\left(x, \dots, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + f\left(x, \dots, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

есть квазилинейное уравнение второго порядка.

Уравнение с частными производными второго порядка называется линейным, если оно линейно относительно неизвестной функции и ее частных производных.

Рассмотрим уравнение второго порядка с двумя независимыми переменными

$$A \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2B \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + F\left(x, y, U, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}\right) = 0, \quad (2.8)$$

где коэффициенты A, B и C одновременно не обращаются в нуль. Уравнению (2.7) соответствует квадратичная форма

$$A\zeta_1^2 + 2B\zeta_1\zeta_2 + C\zeta_2^2 = 0. \quad (2.9)$$

Тогда тип дифференциального уравнения (2.7) будет:

- 1) гиперболический, если $B^2 - AC > 0$ (квадратичная форма (2.9), знакопеременная);
- 2) параболический, если $B^2 - AC = 0$ (квадратичная форма (2.9), знакпостоянная),
- 3) эллиптический, если $B^2 - AC < 0$ (квадратичная форма (2.9), знакоопределенная).

Строго говоря, задачи расчета физических полей РЭА являются нелинейными. Однако в целях упрощения нахождения решений в первом приближении многие задачи теплового режима, экранирования и др. могут считаться линейными. Поэтому здесь рассматриваются математические методы исследования линейных задач, для которых сравнительно просто построить регулярные решения.

Изучение различного вида электромагнитных и механических колебаний в РЭА приводит к волновым уравнениям (уравнениям гиперболического типа)

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + F, \quad (2.10)$$

где c – скорость распространения волны в данной среде; F – возмущающая сила.

Процессы распространения тепловой энергии в РЭА описываются уравнением теплопроводности (уравнением параболического типа)

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \rho, \quad (2.11)$$

где $a^2 = \lambda / c\rho$ – коэффициент температуропроводности; ρ – плотность источников тепла.

Стационарные электрические поля и установившееся тепловое состояние РЭА описываются уравнениями эллиптического типа. При наличии источников тепла или электрических зарядов приходим к уравнению Пуассона

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho. \quad (2.12)$$

При отсутствии источников тепла и зарядов справедливо уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (2.13)$$

Введя в рассмотренные выше уравнения оператор Лапласа

$$\nabla^2 = \Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (2.14)$$

получим основные уравнения математической физики:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \Delta U + F; \quad \frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \Delta U + \rho; \quad \Delta U = -\rho, \Delta U = 0, \quad (2.15)$$

изучение которых дает возможность решить ряд задач, возникающих при конструировании РЭА, в частности, теплового режима, экранирования, вибраций и т.д.

2.2.2. Постановка краевых задач

Постановка задач математической физики включает: а) основное уравнение (или систему уравнений), которому удовлетворяет искомая функция, описывающая исследуемое явление, б) дополнительные условия.

Дополнительными условиями являются так называемые граничные (краевые) условия, заданные на границе рассматриваемой области, и начальные условия, относящиеся к одному какому-нибудь моменту времени, с которого начинается изучение данного физического поля РЭА. Задачи в такой постановке называются краевыми или граничными. Краевые условия определяются физическим характером явления и могут иметь разнообразный (в том числе и нелинейный) характер. Приведем постановку краевых задач для уравнений гиперболического и параболического типов:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \Delta U + F(M, t); \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \Delta U + P(M, t), \quad (2.17)$$

где

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.18)$$

– дифференциальный оператор; a^2 , c^2 , F и P – функции точки M .

Краевые задачи для уравнений параболического и гиперболического типов формулируются следующим образом: найти функцию $U(M, t)$, удовлетворяющую в области $G \equiv \{M \in D, t > 0\}$ уравнению (2.17) (соответственно, (2.16) и дополнительным условиям

$$\left\{ \gamma_1(M) \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2(M) U \right\}_S = \beta(M, t). \quad (2.19)$$

При $\gamma_1 \equiv 0$ получаем краевое условие 1-го рода, при $\gamma_2 \equiv 0$ – второго рода, а при $\gamma_1 \neq 0$ и $\gamma_2 \neq 0$ – третьего рода.

Для уравнения эллиптического типа (2.12) краевые задачи формулируются так: найти функцию $U(M)$, удовлетворяющую в области D ($M \in D$) уравнению

$$\Delta U = -\rho(M), \quad (2.20)$$

а на границе S – аналогичному условию общего вида

$$\left\{ \gamma_1(M) \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2(M) U \right\}_S = \beta(M). \quad (2.21)$$

Если $\gamma_1 \equiv 0$, то имеем первую краевую задачу, если $\gamma_2 \equiv 0$ – вторую, а при $\gamma_1 \neq 0$ и $\gamma_2 \neq 0$ – третью.

Замкнутая поверхность S физической модели (элемента) РЭА ограничивает две области – внутреннюю D и внешнюю D_1 . При постановке краевых задач надо оговаривать, для какой из двух областей (по координатам) требуется искать решение и различать внутренние и внешние задачи, что существенно прежде всего для уравнений эллиптического типа.

Краевые задачи, поставленные в целях аналитического исследования типовых конструкторских задач, должны удовлетворять следующим трем требованиям: 1) решение должно существовать; 2) оно должно быть единственным и 3) устойчивым. Задача, удовлетворяющая всем трем требованиям, называется корректно поставленной задачей.

В конструкторских расчетах для решения краевых задач нашли применение методы: 1) разделения переменных (метод Фурье); 2) конечных интегральных преобразований; 3) операционный; 4) функций Грина; 5) конечных разностей.

2.2.3. Метод разделения переменных

Метод разделения переменных, или метод Фурье, является одним из наиболее распространенных методов решения уравнений с частными производными. Сущность его заключается в следующем. Искомую функцию выражают через произведение функций, каждая из которых зависит только от одной переменной (координат или времени). При подстановке этого произведения в исходное дифференциальное уравнение в частных производных получаем систему из двух или более обыкновенных дифференциальных уравнений, каждое из которых решается известными методами.

Метод разделения переменных применим, если выполнены следующие условия: а) основное дифференциальное уравнение – линейное; б) граничные условия – линейные; в) область интегрирования – простейшая.

Ввиду линейности исходного дифференциального уравнения полученные частные решения позволяют составить общее решение уравнения в виде сходящегося ряда, удовлетворяющее заданным начальным и граничным условиям.

Суть метода состоит в следующем. Пусть требуется найти функцию $U(M, t)$, удовлетворяющую линейному однородному уравнению с постоянными коэффициентами

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \Delta U \quad (2.22)$$

в области D , ограниченной замкнутой поверхностью S , непрерывную в замкнутой области $G \equiv \{M \in D, t > 0\}$ и удовлетворяющую дополнительным условиям:

краевому

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2 U \right)_S = 0 \quad (2.23)$$

и начальному

$$U(M, 0) = \varphi(M). \quad (2.24)$$

В областях, допускающих разделение переменных (линейность уравнения (2.22) и граничных условий (2.23), (2.24), решение краевой задачи (2.23) – (2.24) может быть найдено методом Фурье по следующей схеме.

1. Находим частные решения уравнения (2.22), удовлетворяющие только краевым условиям (2.23), среди функций вида

$$U(M, t) = v(M)T(t). \quad (2.25)$$

Подставляя функцию $v(M)T(t)$ в уравнение (2.22) и деля обе части на $a^2 v(M)T(t)$, получаем:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{T'}{a^2 T}, \quad \Delta v = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}; \quad T' = \frac{dT}{dt}. \quad (2.26)$$

Из требования тождественности этого равенства необходимо и достаточно, чтобы обе части, $\Delta v/v$ и $T'/a^2 T$, были равны одной и той же константе: $\Delta v/v = -\lambda$, $T'/a^2 T = -\lambda$.

Следовательно, в качестве функций $T(t)$ и $v(M)$ надо брать нетривиальные решения уравнений

$$T' + \lambda T = 0, \quad (2.27)$$

$$\Delta v(M) + \lambda v(M) = 0, \quad (2.28)$$

причем функция $v(M)$ должна удовлетворять краевому условию

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial v}{\partial n} + \gamma_2 v \right)_S = 0. \quad (2.29)$$

Задачу (2.27), (2.28) называют задачей Штурма – Лиувилля.

2. Решаем задачу Штурма – Лиувилля. Пусть $v_1(M), \dots, v_n(M) \dots$ – суть собственные функции этой задачи, а $\lambda_1, \dots, \lambda_n, \dots$ – отвечающие им собственные значения.

3. Уравнение (2.27) решается для каждого собственного значения $\lambda = \lambda_n$. Общее решение его имеет вид

$$T_n(t) = C_n e^{-\lambda_n t}. \quad (2.30)$$

4. Произведения функций $v_n(M)T_n(t)$

$$U(M, t) = C_n e^{-\lambda_n t} v_n(M) \quad (2.31)$$

образуют частные решения уравнения (2.22). В силу линейности уравнения и однородности краевых условий линейная комбинация таких частных решений является решением краевой задачи (2.22) – (2.24). Запишем это решение:

$$U(M, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\lambda_n t} v_n(M). \quad (2.33)$$

5. Подставляя решение (2.33) в начальное условие (2.24), определяем значения коэффициентов C_n , пользуясь разложением в ряд по системе собственных функций $\{v_n(M)\}$:

$$U(M, 0) = \varphi(M) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n v_n(M), \quad (2.34)$$

где C_n – коэффициенты Фурье функции $\varphi(M)$, находятся по формуле

$$C_n = \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_D \varphi(M) v_n(M) dM, \quad \|v_n\|^2 = \int_D v_n^2(M) dM. \quad (2.35)$$

Число $\|v_n\|$ называется нормой функции $v_n(M)$.

2.2.4. Метод интегральных преобразований

Методы интегральных преобразований возникли позднее «классического» метода разделения переменных, а метод конечных интегральных преобразований появился лишь несколько лет назад. Для метода интегральных преобразований характерны те же ограничения, что и для метода разделения переменных: он применим только к линейным дифференциальным уравнениям с линейными граничными условиями для простейших

областей изменения независимых переменных. Однако применение этих методов более целесообразно в связи с более простой техникой вычислений и возможностью представления решения в удобном для конкретной задачи виде. Кроме того, решение уравнений в области изображений проще, нежели в области оригиналов.

Преобразование Фурье. При бесконечном интервале переменной x используют интеграл Фурье, т.е. интегральное представление

$$U(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\rho) e^{i\rho x} d\rho, \quad (2.36)$$

обратным которому является преобразование Фурье

$$U(\rho) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\rho x} U(x) dx. \quad (2.37)$$

При этом функция $U(x)$ называется оригиналом, а $U(\rho)$ – изображением или Фурье-спектром. Если функция $U(x)$ задана на промежутке $[0, +\infty]$ и удовлетворяет на нем условиям Дирихле, то применяются синус- и косинус-преобразования Фурье.

Прямое синус-преобразование Фурье имеет вид

$$U(\rho) = \int_0^{\infty} \sin \rho x U(x) dx. \quad (2.38)$$

Обратное преобразование выражается интегралом

$$U(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \sin \rho x U(\rho) d\rho. \quad (2.39)$$

Преобразование Лапласа. Условие абсолютной интегрируемости значительно сужает круг практических задач. С целью расширения класса решаемых задач вводят в рассмотрение преобразование Лапласа

$$U(\rho) = \int_0^{\infty} U(x) e^{-\rho x} dx \quad (2.40)$$

(ρ – некоторое комплексное число) с обратным преобразованием

$$U(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{\rho x} U(\rho) d\rho, \quad (2.41)$$

где интегрирование на плоскости ρ ведется по оси, параллельной мнимой оси и отстоящей от нее на величину c .

Конечные интегральные преобразования. Преобразования Фурье и Лапласа используются при решении конструкторских задач, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями и их системами. Одна-

ко методы интегральных преобразований можно применить для решения дифференциальных уравнений в частных производных, которыми описываются пространственные задачи теплового режима, электромагнитных явлений в РЭА и др. В этом случае необходимо выбрать такое интегральное преобразование, которое позволило бы дифференциальные операции по одной из переменных заменить алгебраическими выражениями.

Таким образом, задача сразу упрощается: теперь интегрируется уравнение в частных производных, которое содержит на единицу меньше независимых переменных, чем заданное уравнение. Найдя решение преобразованной задачи, с помощью обратного преобразования находят и решение исходной. Основным отличием от преобразований Фурье и Лапласа в применении интегральных преобразований к уравнениям с частными производными является то, что пределы интегрирования конечны, что соответствует реальным моделям радиоконструкций. Такие интегральные преобразования получили название конечных интегральных преобразований.

В этом случае с искомой функцией трех пространственных координат и времени $U(x, y, z, t)$ сопоставляется функция

$$\bar{U}(y, z, t, p) = \int_a^b U(x, y, z, t) K(x, p) \rho(x) dx \quad (2.42)$$

двух пространственных переменных y, z , времени t и переменной p . Интегральное преобразование (2.42) по переменной x определяется пределами преобразования a, b , ядром $K(x, p)$ и весовой функцией $\rho(x)$. В результате интегрального преобразования получается некоторая новая функция $\bar{U}(y, z, t, p)$, уже не зависящая от x ; она называется изображением, а исходная функция $U(x, y, z, t)$ – оригиналом. Таким образом, в области изображений исчезла дифференциальная операция по x и исходное уравнение упрощается.

Выбор функций $K(x, p)$ и $\rho(x)$ обуславливается не только типом основного дифференциального уравнения, но и характером начальных и краевых условий.

Конечные интегральные преобразования представляют наибольший интерес, поскольку они совместно с преобразованием Лапласа по временной координате дают возможность решать ряд задач аналитических расчетов при конструировании РЭА.

Для практического использования конечных преобразований необходимо знать формулы обращения, которые находятся при помощи разложения искомой функции в ряд по собственным функциям соответствующей краевой задачи, т.е.

$$U(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{U}(y, z, t, p) K(x, p) \rho(x), \quad (2.43)$$

где $K(x, p)$ – система собственных функций краевой задачи (ядро преобразования).

Дифференциальное уравнение поставленной краевой задачи представляют в виде

$$L_x U + L' U = f, \quad (2.44)$$

где $L_x U = a_x \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$ – дифференциальный оператор с коэффициентами, зависящими только от переменной x : L' – дифференциальный оператор с коэффициентами, не зависящими от x и не содержащий операций дифференцирования по x , причем $a_x > 0$.

Если по переменной преобразования x заданы граничные условия, то они должны быть представлены в форме

$$\left[\gamma_{1a} \frac{\partial U}{\partial x} - \gamma_{2a} U \right]_{x=a} = \varphi_a; \quad (2.45)$$

$$\left[\gamma_{1b} \frac{\partial U}{\partial x} + \gamma_{2b} U \right]_{x=b} = \varphi_b, \quad (2.46)$$

где величины γ_{1a} , γ_{2a} , а также γ_{1b} , γ_{2b} неотрицательны и не равны нулю одновременно, а φ_a и φ_b – известные функции переменной x .

Ядро преобразования равно

$$K(x, p) = \frac{1}{C_p} \rho(x) K_p(x), \quad (2.48)$$

где $K_p(x)$ – решение однородного дифференциального уравнения,

$$\frac{\partial^2 K_p}{\partial x^2} + \lambda_p \rho(x) K_p = 0, \quad (2.49)$$

удовлетворяющее:

а) однородным граничным условиям, если по переменной x заданы граничные условия вида (2.45), (2.46):

$$\left[\gamma_{1a} \frac{\partial K_p}{\partial x} - \gamma_{2a} K_p \right]_{x=a} = 0; \quad \left[\gamma_{1b} \frac{\partial K_p}{\partial x} + \gamma_{2b} K_p \right]_{x=b} = 0; \quad (2.50)$$

б) условиям периодичности, если по переменной x заданы эти условия.

Таким образом, уравнение задачи $LXU + L'U = f$ при помощи интегрального преобразования с ядром

$$K(x, p) = \frac{1}{C_p} \rho(x) K_p(x), \quad (2.51)$$

где $C_p = \int_a^b \rho(x) [K_p(x)]^2 dx$ – нормирующий множитель, может быть приведено к виду

$$L' - \bar{U} - \lambda_p \bar{U} = f + N_a - N_b,$$

где \bar{U} и f – интегральные преобразования функций U и f по переменной x ; λ_p – собственные числа с порядковым номером p граничной задачи (2.44) – (2.46).

Величины N_a и N_b определяются из граничных условий основной задачи.

Решение U исходной задачи выражается через решение преобразованной задачи с помощью ряда

$$\bar{U}(x, y, z, t) = \sum_{p=1}^{\infty} \bar{U}(y, z, t, p) K_p(x). \quad (2.52)$$

Аналогичные преобразования проводятся и по остальным пространственным переменным до получения обыкновенного дифференциального уравнения, решение которого находится обычным образом.

2.2.5. Операционный метод

При исследовании нестационарных тепловых режимов РЭА для малых отрезков времени особенно широко пользуются преобразованием Лапласа, составляющим основу операционного исчисления.

Пусть искомая функция $U(x, y, z, t)$ непрерывна всюду, кроме, быть может, конечного числа точек разрыва 1-го рода и, кроме того, существуют постоянные $M > 0$ и $\sigma > 0$ такие, что $|U(x, y, z, t)| < M \exp(\sigma t)$ для всех t , тогда существует интеграл

$$L\{U(x, y, z, t)\} \equiv \bar{U}(x, y, z, p) = \int_0^{\infty} U(x, y, z, t) e^{-pt} dt \quad (2.53)$$

для всех p с действительной частью $\text{Re } p > \sigma$, представляющий собой аналитическую функцию комплексного переменного p в полуплоскости $\text{Re } p > \sigma$.

Определенная по формуле (2.53) функция $\bar{U}(x, y, z, p)$ называется преобразованием Лапласа, изображением функции $U(x, y, z, t)$, а сама $\bar{U}(x, y, z, t)$ – функцией-оригиналом.

Оригинал $U(x, y, z, t)$ находится из изображения $\bar{U}(x, y, z, p)$ по теореме обращения

$$U(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \bar{U}(x, y, z, p) \exp(pt) dp, \quad (2.54)$$

где $c > \sigma$.

Интегрирование ведется по прямой $\operatorname{Re} p = c$ в пределах от $c - i\infty$ до $c + i\infty$, причем корни подынтегрального выражения (p_i, σ_i) лежат левее оси сходимости $\operatorname{Re} p = \sigma$. Вычисление интеграла (2.54) обычно производится методами контурных интегралов или сводится к более простым операциям с применением теоремы вычетов.

В качестве переменной преобразования может быть принято не только время t , но и любая из пространственных координат.

Применение операционного метода возможно лишь для линейных задач с линейными граничными условиями.

2.2.6. Метод функции Грина

Этот метод решения граничных задач существенно отличается от метода разделения переменных и метода интегральных преобразований и позволяет существенно упростить решение задачи. Метод функции Грина состоит в том, что сначала находят некоторое специальное решение (функцию Грина) задачи того же типа и через него в квадратурах выражают решение исходной задачи.

Функция Грина для уравнения параболического типа (задачи теплового режима РЭА). Пусть требуется найти решение однородной краевой задачи в области $B \equiv \{M \in D, t > 0\}$,

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = L[U]; \quad (2.55)$$

$$L \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \quad (2.56)$$

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2 U \right)_S = 0; \quad (2.57)$$

$$U(M, 0) = \varphi(M); \quad M = M(x, y, z). \quad (2.58)$$

Функция Грина – задачи (2.56) – (2.58) есть решение специальной однородной задачи

$$L[G] = \rho \frac{\partial G}{\partial t}, \quad \left(\gamma_1 \frac{\partial G}{\partial n} + \gamma_2 G \right)_S = 0, \quad G|_{t=0} = \delta(M, P), \quad (2.59)$$

непрерывное всюду в области $B = \{M \in D, t \geq 0\}$, кроме точки $(P, 0)$. Здесь $\delta(M, P)$ – функция с особенностью в точке P , $G = G(M, P, t)$ – функция Грина исходной задачи (2.56) – (2.58), решение которой выражается через функцию Грина в квадратурах

$$U(M, t) = \int_D G(M, P, t) \varphi(P) dt_P. \quad (2.60)$$

Функция Грина может быть найдена методом разделения переменных.

Функция Грина для уравнений эллиптического типа (электромагнитные явления в РЭА). Рассмотрим граничную задачу

$$L[U] = -f(M) \text{ в области } D; \quad (2.61)$$

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2 U \right)_S = \varphi(M). \quad (2.62)$$

Метод функций Грина решения таких задач состоит в следующем. Решаем задачу (2.61), (2.62) при специальных значениях $f(M)$ и $\varphi(M)$ в виде

$$L(G) = -\delta(M, P); \quad \left(\gamma_1 \frac{\partial G}{\partial n} + \gamma_2 G \right)_S = 0. \quad (2.63)$$

Это решение есть функция Грина задачи (2.61), (2.62). Определив функцию Грина и применяя известные интегральные формулы Грина, находим решение исходной задачи. Например, для первой краевой задачи ($\gamma_2 \equiv 1, \gamma_1 \equiv 0$)

$$U|_S = \varphi, G|_S = 0. \quad (2.64)$$

Решение исходной задачи (2.61), (2.62) имеет вид

$$U(P) = - \int_S \varphi(M) \frac{\partial G}{\partial n} dS - \int_V G(M, P) f(M) dV, M \in V - S, \quad (2.65)$$

причем $\frac{\partial}{\partial n}$ берется по направлению внешней нормали к S .

2.2.7. Метод конечных разностей

Универсальным методом приближенного решения дифференциальных уравнений для конструкторских задач является метод конечных разностей (или метод сеток). В этом случае область непрерывного изменения аргументов (x, y, z, t) заменяется конечным (дискретным) множеством то-

чек (узлов), называемым сеткой. Производные, входящие в дифференциальное уравнение, заменяются (аппроксимируются) сеточными функциями в нескольких узлах сетки; дифференциальное уравнение при этом заменяется системой алгебраических уравнений (разностным уравнением). Начальные и краевые условия тоже заменяются разностными начальными и краевыми условиями для сеточной функции.

Например, пусть требуется решить уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \quad (2.66)$$

где $U = U(x, t)$ – функция двух аргументов x и t , меняющихся в области $D = (0 \leq x \leq 1, 0 \leq t \leq T)$.

Введем сетку

$$\omega_{h\tau} = \left\{ (x_i = ih, t_j = j\tau), i = 0, 1, \dots, N; j = 0; 1; \dots N_0 \right\} \quad (2.67)$$

с шагами $h = 1/N$, $\tau = T/N_0$.

Произведем замену (аппроксимацию)

$$\frac{\partial U}{\partial t} \sim \frac{U_{j+1,i} - U_{j,i}}{\tau} = U_t; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \sim \frac{U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j}}{h^2} = U_{xx}. \quad (2.68)$$

Подставляя полученные разностные отношения вместо соответствующих производных в дифференциальное уравнение и заменяя значения функции $U(x, t)$ ее значениями в узлах сетки $U(x_i, t_j) = U(ih, j\tau) = U_{ij}$, запишем разностное уравнение, аппроксимирующее заданное дифференциальное и являющееся одним из простейших сеточных уравнений

$$\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\tau} = a^2 \frac{U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j}}{h^2}. \quad (2.69)$$

Тема 3. ТЕПЛО- И МАССОБМЕН В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ

3.1. Основы тепло- и массообмена

3.1.1. Основные понятия и определения

Перенос тепловой энергии внутри РЭС или в окружающую среду (и обратно) называется *теплообменом*. Тепловой режим РЭС – это пространственно-временное распределение в нем температуры.

В общем случае температура t – функция координат x, y, z и времени τ :
$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (3.1)$$

Мощность источников тепловыделения внутри РЭС невелика, поэтому отдача ими своей энергии (т.е. разогрев РЭС) сопровождается снижением температуры самого источника, что усложняет тепловой расчет. Геометрическое место точек с одинаковой температурой образует изотермическую поверхность. Изменение температуры наблюдается лишь в направлениях, пересекающих изотермические поверхности; наиболее резкие изменения происходят в направлении нормали к изотермической поверхности (рис. 3.1).

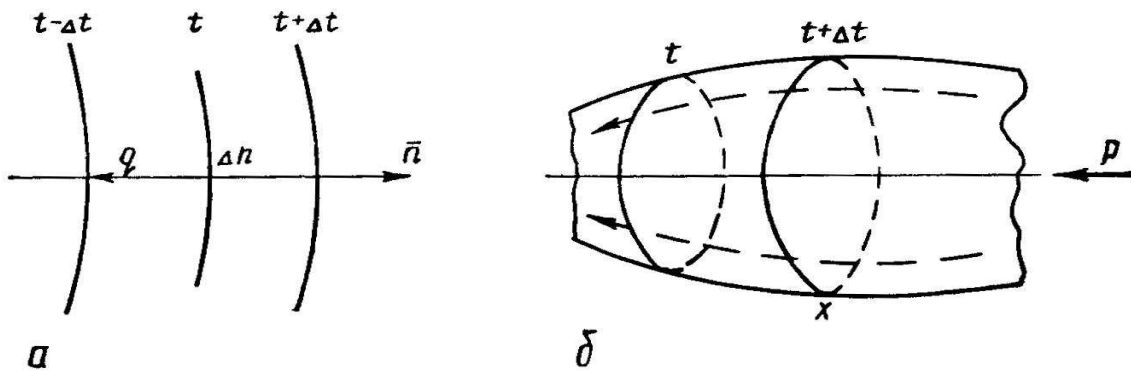


Рис. 3.1. Температурный градиент (а) и температурный поток в теле (б)

Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами называется градиентом температур:

$$\lim\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right)_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad}t = \Delta t. \quad (3.2)$$

Количество теплоты Q , переносимое через поверхность в единицу времени, есть тепловой поток P (Дж/с·Вт). Тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности, есть плотность теплового потока q (Вт/м²).

Направление вектора q совпадает с направлением распространения тепловой энергии и противоположно направлению вектора температурного градиента.

Тепловая энергия распространяется тремя способами – теплопроводностью, конвекцией и излучением (радиацией).

Теплопроводностью называется перенос теплоты между соседними молекулами вещества, колеблющимися с различной скоростью, т.е. через непосредственное соприкосновение тел различной температуры.

Передача теплоты конвекцией связана с перемешиванием вещества в пространстве, т.е. тепловая энергия переносится от одной точки к другой вместе с массой вещества (последняя, собственно, и переносит энергию).

Радиацией (тепловым излучением) называется явление переноса теплоты в виде электромагнитных волн определенного частотного диапазона.

При описании теплопроводности явление теплопереноса рассматривается на микроскопическом уровне (молекулярные явления, электронные потоки). При конвективном теплообмене преобладают макроскопические эффекты, поэтому для его описания используется феноменологический подход; при радиации оперируют волновыми процессами.

Теплообмен как явление может иметь место лишь при наличии неодинаковых температур разных тел или разных частей тела. В реальных условиях все три механизма действуют одновременно и в совокупности определяют тепловой режим РЭС.

Физические закономерности трех видов теплообмена сложны и зависят от большого количества разнообразных (иногда противоречивых) обстоятельств, что затрудняет расчет тепловых режимов. Результаты расчета считают удовлетворительными, если они выполнены с погрешностью до 20 %. Поэтому при тепловых исследованиях РЭС большую роль играют эксперименты, а методики расчета сводятся часто лишь к использованию полученных опытным путем коэффициентов. В связи с этим для обеспечения нормальных тепловых режимов аппаратуры необходимо для искомых детали, узла, устройства, прибора найти наиболее адекватную модель, уже описанную соответствующими тепловыми коэффициентами. Тогда тепловой расчет не представляет сложности, при этом точность получаемых результатов определяется в подавляющем большинстве случаев не погрешностью расчета, а степенью адекватности выбранной модели реальной конструкции РЭС. Это обстоятельство требует глубокого понимания радиоконструктором теплофизических законов, закономерностей, соотношений, описывающих сложный процесс распространения тепловой энергии.

3.1.2. Общая характеристика тепло-и массообмена в РЭА

Источниками теплоты в РЭА являются различные электрические устройства и отдельные радиодетали. Потребляемая радиодетальными электрическая энергия преобразуется в них в электромагнитную, механическую, тепловую и другие виды энергии. Иными словами, часть потребляемой радиодетальными энергии превращается в полезные сигналы, остальная – в теплоту. Известно, что в блоках, собранных из крупных деталей, только 5 – 10 % потребляемой энергии превращается в энергию полезных сигналов; в полупроводниковых устройствах энергетическое соотношение не много лучше.

Проблема отвода тепла в РЭА является одной из важнейших проблем конструирования и разработки радиоэлектронных приборов. С появлением БИС с очень высокой плотностью размещения активных элементов на кристалле и с появлением плат, содержащих сотни ИС, вопросы обеспечения нормального теплового режима встали перед разработчиками электронной аппаратуры так остро, как никогда прежде. Дополнительные аспекты этой проблемы возникают при каждом новом скачке в области электрических характеристик приборов, например, при повышении быстродействия логических ИС или при увеличении выходной мощности аналоговых схем.

Одним из важнейших первичных факторов, влияющих на тепловой режим РЭА, являются изменение температуры окружающей среды и внешние тепловые потоки, например, солнечная радиация. Ко вторичным факторам относят давление внутри корпуса РЭА, наличие невесомости, влажность, запыленность. Так, при повышенной влажности окружающего воздуха, используемого для охлаждения РЭА, часто приходится принимать специальные меры для уменьшения влажности или защиты от нее.

Электрорадиоэлементы и электрорадиоматериалы обладают ограниченной теплостойкостью, т.е. могут нормально работать лишь в заданном диапазоне температур. Причина этого – в различных физических и химических процессах, которые при повышении (понижении) температуры либо развиваются лавинообразно, либо приводят к усиленному старению материалов.

Надежность РЭА зависит от большого числа факторов, в том числе от температуры. В качестве показателя надежности используется понятие интенсивности отказов λ – плотность распределения наработки до первого отказа. Интенсивность отказов для элементов РЭА определяется опытным путем. В состав РЭА вводят элементы многих типов, их надежность по-разному зависит от температуры. Можно, однако, считать, что при увеличе-

нии температуры воздуха внутри блоков на 10К интенсивность отказов в среднем увеличивается на 25 % .

При конструировании необходимо учитывать комплексное воздействие факторов. Анализ статистических данных об отказах показывает, что нестабильность параметров элементов из-за воздействия температуры составляет 60 – 70 %, а из-за совместного воздействия температуры и влажности – 95 – 98 % от общей нестабильности.

При определенном количестве поглощенной влаги свойства изоляционных материалов изменяются, что может явиться причиной отказов элементов РЭА. Для конденсаторов, например, критическая влажность составляет 30 – 50 %, для углеродистых резисторов – 70 – 80 %, для полупроводниковых приборов – 40 %, для пьезоэлектрических преобразователей – 50 %. Наиболее опасным является соприкосновение элементов РЭА с водяными каплями или водой, что происходит при конденсации на элементах водяных паров из атмосферы, смачивании их брызгами, погружении в воду.

Температура нагрева отдельных элементов схемы обусловлена режимом их работы и объясняется следующим образом: токонесущий элемент, обладающий активным сопротивлением, при прохождении по нему тока выделяет в одну секунду количество тепла, определяемое формулой

$$P = I^2 R, \quad (3.3)$$

где P – количество тепла, Вт; I – сила тока, А; R – активное сопротивление, Ом.

3.1.3. Нормальный тепловой и влажностный режимы РЭА и способы их обеспечения

Совокупность температур всех радиодеталей, из которых собран аппарат, т.е. его температурное поле, характеризует *тепловой режим* аппарата. Значения влажности воздуха в различных областях РЭА определяют его *влажностный режим*.

Разработчика РЭА интересует не тепловой режим вообще, а *нормальный* (или заданный) тепловой режим. Тепловой режим *отдельного элемента* считается нормальным, если соблюдаются два условия:

1) температура элемента (или окружающей элемент среды) находится в пределах, определенных паспортом или техническими условиями на него, независимо от изменения окружающей аппаратуру среды;

2) температура элемента должна быть такова, чтобы обеспечивалась его работа с заданной надежностью.

Первое условие является обязательным для каждого элемента. Второе специально оговаривается в ТЗ на аппаратуру.

Тепловой режим *всей аппаратуры* считается нормальным, если обеспечивается нормальный тепловой режим всех его элементов без исключения.

Таким образом, проблемы отвода тепла настолько важны, что ими должны заниматься не только узкие специалисты, но и все разработчики РЭА на разных стадиях, начиная от разработки принципиальной схемы, включая выбор компонентов, материалов, разработку технологии, и кончая сборкой. Очень важно вопросами обеспечения нормального теплового режима заниматься на ранних стадиях проектирования РЭА, не дожидаясь готового изделия.

Для понимания задачи защиты конструкций РЭУ от тепловых воздействий необходимо рассмотреть *баланс энергии*, подводимой и отводимой от изделия. Соотношение полезной и рассеиваемой в виде теплоты энергии определяется коэффициентом полезного действия η :

$$\eta = \frac{E_{пол}}{E_{сум}} = \frac{E_{пол}}{E_{пол} + E_{наг} + E_{рас}}, \quad (3.4)$$

где $E_{пол}$ – полезная энергия; $E_{сум}$ – подводимая к изделию энергия от источника питания; $E_{наг}$ – энергия, затрачиваемая на нагрев элементов; $E_{рас}$ – энергия, рассеиваемая в окружающем пространстве.

Элементы, выделяющие теплоту, называют *источниками*, поглощающие – *стоками*, а сам процесс – *теплообменом*. Конструкции изделий представляются в этом случае в виде системы тел с сосредоточенными многочисленными источниками и стоками теплоты. Поскольку выделение теплоты происходит в определенном объеме, то это теплорассеивающее пространство называют нагретой зоной. Реальная нагретая зона имеет весьма неравномерное расположение источников теплоты и ограничивается стенками корпуса (каркаса, кожуха). Таким образом, конструкцию РЭУ при рассмотрении ее теплового режима можно представить как совокупность определенных нагретых зон различной иерархии, вложенных друг в друга. Например, для стойки ЭВМ можно выделить следующую иерархию нагретых зон: кристалл ИМС (или ЭРЭ) → корпус ИМС → плата с ИМС → блок → рама → стойка.

Температурное состояние изделия, т.е. пространственно-временное изменение его температуры в зависимости от мощности источников и стоков энергии, от физических и геометрических параметров изделия и окружающей среды, называют *тепловым режимом изделия*.

Тепловой режим любого устройства можно охарактеризовать тепловой напряженностью, определяемой объемной или поверхностной плотностью теплового потока.

Объемная плотность теплового потока:

$$q_v = \frac{kP}{V}, \quad (3.5)$$

где $kP = P_{рас}$ – мощность рассеивания в изделии, Вт; k – коэффициент потерь мощности ($k = 0,8 - 0,9$); P – потребляемая мощность, Вт; V – объем изделия (нагретой зоны), $дм^3$.

Поверхностная плотность теплового потока

$$q_s = \frac{kP}{S}, \quad (3.6)$$

где S – площадь поверхности теплоотдачи, $м^2$.

Требования, предъявляемые к габаритам (объемам) конструкций современных РЭУ, таковы, что отношение выделяемой в изделиях тепловой энергии к энергии, рассеиваемой их поверхностью теплоотдачи, постоянно увеличивается. Поэтому в настоящее время допустимый нагрев элементов по сути дела является одним из основных факторов, ограничивающих уменьшение габаритов, и возникает глобальная проблема отвода теплоты.

Все детали в аппарате должны работать в нормальных тепловом и влажностном режимах. Для их обеспечения обычно принимают следующие меры:

- предусматривают специальные средства охлаждения отдельных радиодеталей и аппаратуры в целом и меры для уменьшения влажности;
- термостатируют узлы и блоки, используют устройства для защиты от влаги;
- выбирают в зависимости от ожидаемых температур и влажности определенные типы радиодеталей, а также конструкции РЭА;
- изменяют схему прибора для уменьшения мощности тепловыделения на деталях.

Как правило, эти меры имеют и нежелательные последствия: увеличение размеров РЭА, необходимость установки дополнительного оборудования, повышенный расход энергии, увеличение массы и усложнение конструкции. Принимаемые меры нужно технически обосновать, а для этого необходимо уметь оценить тепловой режим различных вариантов конструкции аппарата еще на стадии его проектирования. Решение последней задачи возможно только в том случае, когда известны методы расчета температурного поля и влажности различных РЭА. В противном случае при-

ходится прибегать к способу проб и ошибок, который после трудоемких и мучительных экспериментальных поисков позволяет остановиться на той или иной конструкции аппарата.

3.1.4. Типовые задачи тепло- и массообмена в РЭА

При проектировании отдельных элементов – резисторов, терморезисторов, полупроводниковых диодов, транзисторов необходимо знать зависимость между габаритами, конструктивным оформлением, условиями эксплуатации этих элементов и их электрическими (статическими и динамическими) характеристиками, определить условия теплового пробоя, надежность работы. Не имея такого рода зависимостей, невозможно всесторонне обосновать конструкцию элемента и условия его эксплуатации.

При создании интегральных схем приходится решать задачу компактного размещения пассивных и активных элементов. Обычно эта задача решается исходя из требований трассировки. Только в последнее время задача размещения элементов стала решаться комплексно – с учетом требований как трассировки, так и теплообмена между элементами.

На конструкцию РЭА существенно влияют способы охлаждения, поэтому их нужно выбирать на ранней стадии проектирования, т.е. на стадии технического предложения или эскизного проекта, когда информация крайне ограничена и сводится обычно к заданию суммарной рассеиваемой мощности, диапазона возможного изменения температуры окружающей среды, влажности, давления, времени непрерывной работы, габаритов помещения, допустимой температуры элементов. По этим данным проектировщик должен обосновать выбор системы охлаждения аппаратуры, суметь оценить вероятность обеспечения заданного теплового режима РЭА.

В дальнейшем расчет ведут по следующей схеме. Пусть, например, оценочные расчеты привели к необходимости остановиться на замкнутой системе принудительного воздушного охлаждения блока РЭА. Затем выбирают тип теплообменника, насоса, прокачивающего воздух через теплообменник и РЭА. Это требует проведения серии тепловых и гидравлических расчетов с учетом промышленной номенклатуры теплообменников, насосов и т.д. На этом этапе проектирования необходимо определить влажность внутри отдельных областей блока и оценить возможность конденсации влаги на поверхностях элементов. Затем требуется обосновать размещение плат внутри блока и элементов на каждой плате, при этом каждая комбинация влечет за собой анализ температурного поля блока. Отметим, что при обосновании оптимальной конструкции параллельно про-

водятся различные электрические, механические, а также функциональные расчеты, связанные с основным назначением РЭА. Соответствующие процессы, как правило, взаимосвязаны, что должно быть отражено в алгоритме общего расчета. Решение подобной задачи может быть осуществлено только на основе системного подхода с применением системы автоматизированного проектирования (САПР).

Для обеспечения теплового режима применяют различные типовые элементы и устройства систем охлаждения – радиаторы, нагнетатели, теплообменники, тепловые трубы, вихревые трубы, микрохолодильники, термостаты, термоэлектрические и криогенные устройства. При этом надо знать физические основы работы устройств, их промышленные типы и основные характеристики, уметь обоснованно выбрать тот или иной элемент или устройство, произвести необходимые тепловые и гидравлические расчеты.

Пока еще не удастся спроектировать РЭА, которую без предварительного испытания на макетах можно сразу запускать в производство. Обычно отдельные испытания и доработки проводятся на макетах, и существенная доля времени идет на изучение теплового и влажностного режимов.

3.2. Перенос тепловой энергии конвекцией

3.2.1. Теплоотдача при свободном движении среды

Конвективный перенос тепла происходит в жидкой или газообразной среде, ибо *конвекция* – перенос тепла посредством макроскопических объемов жидкости или газа при наличии градиента плотности среды, вызванного разностью температур. Условия конвективного переноса тепла:

- а) наличие среды;
- б) «правило кирпича» (более нагретый объект передает тепло менее нагретому), рис. 3.2.



Рис. 3.2. Условия конвективного переноса тепла:

а – передача тепла происходит ($T_2 > T_1$); б – передача тепла отсутствует ($T_2 < T_1$)

Процесс передачи тепла конвекцией называется конвективным теплообменом. Основным законом конвективного теплообмена является закон Ньютона – Рихмана: тепловая мощность, отдаваемая нагретой поверхностью, пропорциональна площади поверхности и разности температур между поверхностью и средой:

$$P = \alpha_k S \Delta t = \alpha_k S \Delta T, \quad (3.7)$$

где α_k – коэффициент пропорциональности конвективного теплообмена, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$, или конвективный коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; Δt – разность температур между поверхностью и средой.

Коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от электрофизических свойств поверхности, свойств окружающей среды, формы, размеров, ориентации конкретных поверхностей конструкций. Числовые значения коэффициента пропорциональности конвективного теплообмена рассчитываются отдельно для каждой поверхности, табличных значений нет.

Различают два вида конвекции:

а) естественная конвекция, которая осуществляется при свободном движении среды, т.е. обусловлена разностью плотностей холодного и нагретого объемов;

б) принудительная, или вынужденная конвекция, которая возникает, если движение вызвано внешним воздействием (насосы, вентиляторы и т.д.).

Конвективный теплообмен может быть описан системой дифференциальных уравнений, выражающих движение импульса, массы, энергии и т.д., но практика расчета конвективного теплообмена выработала свои методы расчета, опираясь на теорию подобия.

3.2.2. Критериальные уравнения

На основе теории подобия математическую связь между множеством физических и геометрических параметров, определяющих α_k , можно записать в виде ряда соотношений, представляющих собой безразмерные комплексы, составленные из этих параметров. Сами безразмерные комплексы из физических и геометрических параметров называются *критериями* или *числами подобия* (различают 14 критериев).

Основными комплексами являются:

1. Критерий Нуссельта:

$$\text{Nu} = \alpha_k \frac{L}{\lambda_m}, \quad (3.8)$$

где λ_m – теплопроводность омывающей среды; L – параметр, определяющий размер конструкции.

Сам критерий характеризует соотношение интенсивности конвективного теплообмена и теплопроводности. Из (3.8) выражают:

$$\alpha_k = \text{Nu} \frac{\lambda_m}{L}. \quad (3.9)$$

2. Критерий Грасгофа:

$$\text{Gr} = \beta g \frac{L^3}{\nu_m^2} (t - t_c), \quad (3.10)$$

где β – коэффициент объемного расширения окружающей среды; g – ускорение силы тяжести; ν_m – коэффициент кинематической вязкости среды.

Данный критерий характеризует эффективность подъемной силы, вызывающей свободно-конвективное движение вязкой жидкости.

3. Критерий Прандтля:

$$\text{Pr} = \frac{\nu_m C_p \rho_m}{\lambda_m}. \quad (3.11)$$

Этот критерий характеризует соотношение молекулярных свойств переноса количества движения и теплоты. Уравнение, связывающее между собой критерии, называется *критериальным уравнением*, оно имеет вид:

$$\text{Nu} = f(\text{Gr}, \text{Pr}). \quad (3.12)$$

3.2.3. Теплоотдача в неограниченном пространстве

Общая зависимость для коэффициента теплоотдачи тел с одним определяющим размером (пример – длинные провода) будет определяться:

$$\text{Nu}_m = C (\text{Gr} \cdot \text{Pr})_m^n, \quad (3.13)$$

где C, n – эмпирические коэффициенты (табл. 3.1); m – указывает, что значение физических параметров газа или жидкости следует выбирать для средней арифметической температуры:

$$t_m = 0,5(t + t_c). \quad (3.14)$$

Значения эмпирических коэффициентов

$(Gr \cdot Pr)_m$	c	n
$< 1 \cdot 10^{-3}$	0,50	0,00
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

Различают четыре закона теплообмена, соответствующие четырем режимам движения (рис. 3.3).

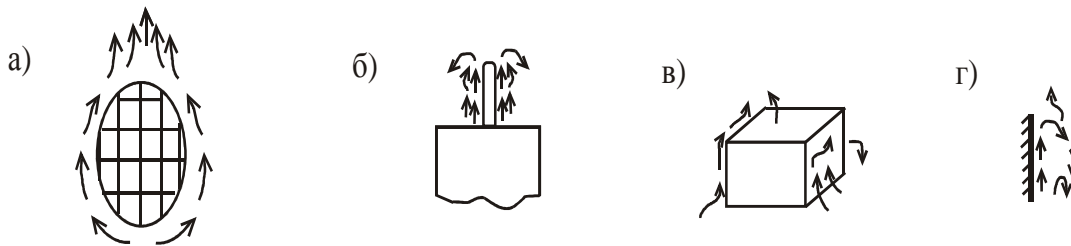


Рис. 3.3. Различный характер движения жидкости около нагретого тела:
 а – пленочный режим; б – закон степени 1/8; в – закон степени 1/4; г – закон степени 1/3

Пленочный режим ($Nu_m = 0,5$) характерен для тел, имеющих плавную форму очертания, у поверхности образуется неподвижная пленка нагретой жидкости.

Закон 1/8 степени соответствует планарному движению жидкости, интенсивность теплообмена незначительна, такой режим характерен для тонких проводников, температурный напор $\Theta = t - t_c$ несколько выше, чем у пленочного режима. Здесь, как и в предыдущем случае, теплообмен обусловлен явлением теплопроводности, но в отличие от пленочного режима, в данном случае присутствует конвективный теплообмен.

Закон 1/4 степени соответствует интенсивному планарному движению жидкости, интенсивность теплообмена повышается – такой режим имеет место у плоских и цилиндрических кожухов аппаратов средних размеров, около плоских ребер радиаторов и т.д.

Закон 1/3 степени соответствует вихревому движению жидкости, при котором теплообмен протекает весьма интенсивно, размер тела не влияет на интенсивность процесса – такой режим характерен для внешних поверхностей кожухов аппарата больших размеров.

Выражение (3.13) применимо для любых тел и сред, которые можно характеризовать одним определяющим размером, однако выражение (3.13) является неудобным для расчета, поэтому, базируясь на нем, целесообразно вывести частные формулы для теплоотдачи.

3.2.4. Теплоотдача различных тел в неограниченном пространстве при естественной конвекции

Теплоотдача неограниченного цилиндра

При анализе теплового режима часто необходимо знать конвективные коэффициенты теплоотдачи различных проводников, при этом такие расчеты можно проводить по формуле для неограниченного цилиндра, при этом произведение

$$(Gr \cdot Pr) = 1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2,$$

тогда

$$\alpha_k = A_1 \left(\frac{t - t_c}{d^5} \right)^{1/8}; \quad (3.15)$$

$$A_1 = 1,37(\beta g Pr)_m^{1/8} \frac{\lambda_m}{\nu_n^{1/4}}, [\text{Вт/м}^{11/8} \cdot \text{град}^{9/8}], \quad (3.16)$$

где A_1 – параметр, характеризующий физические свойства среды, определяемый по (3.16) или по табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения параметра A_1 для воздуха и воды

$t_m, ^\circ\text{C}$		0	20	40	60	80	100	120
A_1	воздух	0,291	0,295	0,3	0,306	0,31	0,315	0,320
	вода	9,35	13,1	15,7	17,6	19	20	–

Теплоотдача плоских и цилиндрических поверхностей

Рассматриваемые ниже выражения будут относиться к плоским или цилиндрическим поверхностям стенок аппаратов, радиаторов и т.д. Анализируя (3.12) и учитывая значения коэффициентов C и n (см. табл. 3.1), можно установить неравенство, позволяющее оценить закон движения около нагретой поверхности. Если определяющий размер – $L, [\text{мм}]$ или температурный нагрев $t - t_c$ удовлетворяет неравенству

$$(t - t_c) \leq \left(\frac{840}{L} \right)^3, \quad (3.17)$$

то движение жидкости подчиняется закону $1/4$ степени, в противном случае имеет место закон $1/3$ степени.

Пусть теплообмен подчиняется закону 1/4 степени, тогда могут быть предложены следующие расчетные формулы для нахождения конвективного коэффициента теплоотдачи:

– для вертикальноориентированной поверхности высотой h или цилиндра диаметром h , [мм]:

$$\alpha_k = A_2 \left(\frac{t - t_c}{h} \right)^{1/4} \quad (3.18)$$

– для горизонтальноориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх,

$$\alpha_k = 1,30 A_2 \left(\frac{t - t_c}{L} \right)^{1/4}, \quad (3.19)$$

где L – наименьшая сторона поверхности, м;

– для горизонтальноориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вниз,

$$\alpha_k = 0,70 A_2 \left(\frac{t - t_c}{L} \right)^{1/4}, \quad (3.20)$$

где

$$A_2 = 0,63 (\beta g \text{Pr})^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}}, \quad (3.21)$$

и может быть также найден из таблиц.

В случае если теплообмен подчиняется закону 1/3 степени:

– для вертикальноориентированной поверхности

$$\alpha_k = A_3 (t - t_c)^{1/3}; \quad (3.22)$$

– для горизонтальноориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх,

$$\alpha_k = 1,3 A_3 (t - t_c)^{1/3}; \quad (3.23)$$

– для горизонтальноориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вниз,

$$\alpha_k = 0,7 A_3 (t - t_c)^{1/3}, \quad (3.24)$$

где

$$A_3 = 0,157 (\beta g \text{Pr})^{1/3} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{2/3}} \quad (3.25)$$

или находится по справочнику.

Задача №1

Рассчитать α_k круглого проводника $d = 1$ мм, $t^\circ = 100$ °С, $t_c = 20$ °С, конвекция естественная, среда: а) воздух; б) вода.

Решение:

$$t_m = 0,5(100 + 20) = 60 \text{ °С};$$

$$\text{а) } A_1 = 0,306 \text{ Вт/м}^{11/8} \cdot \text{град}^{9/8};$$

$$(t - t_c)^{1/8} = 80^{1/8} = 1,75 \text{ град}^{9/8};$$

$$\alpha_k = 40 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

$$\text{б) } A_1 = 17,6 \text{ Вт/м}^{11/8} \cdot \text{град}^{9/8};$$

$$d^{5/8} = (10^{-3})^{5/8} = 1,32 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{5/8};$$

$$\alpha_k = 2330 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

Задача №2

Определить конвективный коэффициент теплоотдачи вертикально-ориентированного диска диаметром $h = 100$ м, средняя температура диска $t = 100$ °С, $t_c = 60$ °С, давление нормальное, конвекция естественная.

Решение

Из (3.17) определяем закон теплообмена:

$$\left(\frac{840}{100}\right)^3 = 540 > (t - t_c) = 40 \text{ град} \Rightarrow \text{закон степени } 1/4.$$

$$t_m = 0,5(100 + 60) = 80 \text{ °С}.$$

Из справочника $A_2 = 1,29$:

$$(t - t_c)^{1/4} = 40^{1/4} = 2,52;$$

$$h^{1/4} = 0,1^{1/4} = 0,562;$$

$$\text{а) } \alpha_k = 1,29 \frac{2,52}{0,562} = 5,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

$$\text{б) } \alpha_k = 205 \frac{2,52}{0,562} \approx 916 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

3.2.5. Теплоотдача в ограниченном пространстве при естественной конвекции

При анализе естественной конвекции в неограниченном пространстве рассматривался лишь нагрев жидкости, а охлаждение жидкости происходит где-то вдали, и оно не влияет на протекание рассмотренного процес-

са; в малом пространстве явления нагревания и охлаждения жидкости протекают вблизи друг друга и разделить их невозможно, поэтому необходимо рассматривать весь процесс в целом.

Процесс теплоотдачи будет определяться как физическими свойствами жидкости, так и значениями температур поверхностей, ограничивающих пространство. На процесс будут влиять форма и размеры ограничивающего пространства.

В вертикальных щелях значительной ширины l нисходящие и восходящие потоки отделены друг от друга (рис. 3.4, а). При малых l вследствие различных помех возникают внутренние циркуляционные контуры, высота которых l' определяется шириной щели, родом жидкости и интенсивностью процесса (см. рис. 3.4, б). В горизонтальных каналах процесс теплообмена определяется взаимным расположением нагретых и холодных поверхностей, расстоянием между ними. При расположении нагретой поверхности снизу (см. рис. 3.4, в) возникают чередующиеся между собой восходящие и нисходящие потоки, если нагретая поверхность расположена сверху, циркуляция вообще отсутствует (см. рис. 3.4, г).

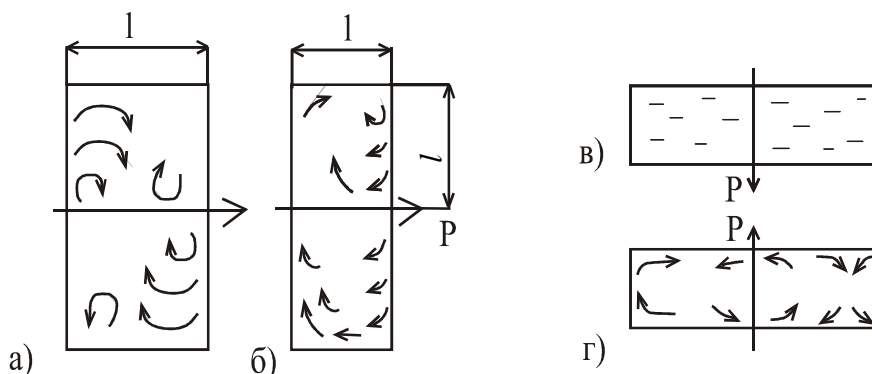
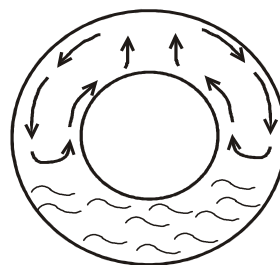


Рис. 3.4. Характер движения жидкости в плоских слоях (стрелкой указано направление теплового потока)

В шаровых и горизонтально-цилиндрических прослойках циркуляция развивается лишь в зоне, лежащей выше нижней кромки нагретой поверхности. Ниже этой кромки жидкость остается в покое (рис. 3.5). Следовательно, геометрические факторы ограниченных пространств существенно влияют на развитие процесса теплообмена.

Рис. 3.5. Характер движения жидкости в шаровой и горизонтально-цилиндрической прослойке



На рис. 3.4 и 3.5 температура одной из стенок всегда больше температуры второй стенки. Влияние геометрических факторов значительно усложняет закономерности теплоотдачи и практически исключает возможность исследования методом подобия, по этой причине сложный процесс теплообмена принято рассматривать как передачу теплоты от одной поверхности к другой за счет некоторой эквивалентной теплопроводности среды $\lambda_{\text{э}}$, находящейся между поверхностями. Если $\lambda_{\text{э}}$ разделить на значения теплопроводности среды λ , то получим безразмерную величину

$$\varepsilon_{\kappa} = \frac{\lambda_{\text{э}}}{\lambda}, \quad (3.26)$$

которая характеризует влияние конвективной составляющей процесса теплоотдачи и называется **коэффициентом конвекции**. Следовательно, тепловой поток, передаваемый через ограниченные прослойки толщиной δ изотермическим поверхностям, можно определить по формуле

$$P = \frac{\lambda_{\text{э}}}{\delta} (t_1 - t_2) S, \quad (3.27)$$

где t_1, t_2 – температуры поверхностей (см. рис. 3.4).

Введем понятие конвективно-кондуктивного коэффициента теплоотдачи:

$$K = \frac{\lambda_{\text{э}}}{\delta}. \quad (3.28)$$

В этом случае выражение (3.27) может быть преобразовано аналогично выражению закона Ньютона – Рихмана:

$$P = K (t_1 - t_2) S. \quad (3.29)$$

В конечном итоге расчет теплового потока через ограниченную прослойку сводится к определению коэффициента:

$$K = \frac{\varepsilon_{\kappa} \lambda}{\delta} \quad (3.30)$$

Так как циркуляция жидкости обусловлена разностью плотностей нагретых и холодных частиц и определяется произведением критериев Грасгофа и Прандтля, то можно утверждать, что ε_{κ} является функцией того же аргумента, т.е.

$$\varepsilon_{\kappa} = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) \quad (3.31)$$

При вычислении чисел подобия за определяющий размер принята прослойка толщиной δ , а за определяющую температуру принята температура

$$t_m = 0,5(t_1 + t_2). \quad (3.32)$$

Для узких прослоек, толщиной много меньше линейных размеров поверхностей (рис. 3.6, а), коэффициент конвекции будет равен

$$\varepsilon_k = 1; \text{Gr} \cdot \text{Pr} \leq 10^3,$$

тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &= 0,18(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/4}; \\ 10^3 &< \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 3 \cdot 10^5. \end{aligned} \quad (3.33)$$

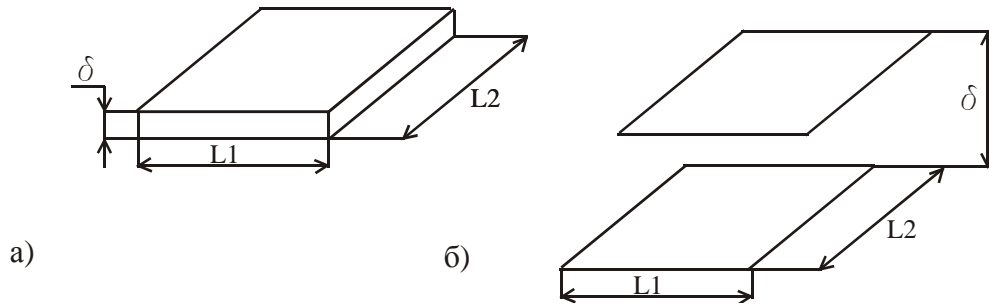


Рис. 3.6. Ограниченные прослойки: а – узкая ($\delta < \{L_1, L_2\}$); б – широкая ($\delta = \{L_1, L_2\}$)

Если в выражении (3.33) раскрыть произведение ($\text{Gr} \cdot \text{Pr}$) и выполнить необходимые преобразования, то

$$\varepsilon_k = A_4 \delta^4 \sqrt{\frac{t_1 - t_2}{\delta}}, \quad (3.34)$$

где A_4 – теплофизические параметры в прослойке при температуре t_m ;

$$A_4 = 0,18(\beta g \text{Pr})^{1/4} \frac{\lambda}{\nu^{1/2}}. \quad (3.35)$$

Подставляя полученное выражение в (3.30), получим:

$$K = A_4 \lambda^4 \sqrt{\frac{t_1 - t_2}{\delta}}. \quad (3.36)$$

Для воздушных прослоек произведение ($A_4 \lambda$) практически остается постоянным, равным 0,45, тогда можно выражение (3.36) записать в виде

$$K = 0,45^4 \sqrt{\frac{t_1 - t_2}{\delta}}. \quad (3.37)$$

Снижение интенсивности теплопередачи при повышении толщины прослойки объясняется как возрастанием ее кондуктивного сопротивления, так и ухудшением конвективной составляющей теплопередачи за счет взаимных помех между поднимающимися и опускающимися слоями жидкости. Когда толщина ограниченной прослойки соизмерима с линейными

размерами ограничивающих ее поверхностей (рис. 3.6, б), процесс переноса теплоты определяется не только произведением $(Gr \cdot Pr)$, но и отношением $\frac{\delta}{l}$, а также ориентацией поверхностей. Экспериментально установлено:

$$\varepsilon_k = 0,24(Gr \cdot Pr)^{1/4} f\left(\frac{\delta}{l}\right); \quad (3.38)$$

$$3 \cdot 10^5 < (Gr \cdot Pr) < 10^8; \quad 0,2 \leq \frac{\delta}{l} \leq 0,8.$$

Здесь в выражении (3.38) $l = \sqrt{l_1 \cdot l_2}$ – усредненный размер плоскости, а график функции $f\left(\frac{\delta}{l}\right)$ представлен на рис. 3.7.

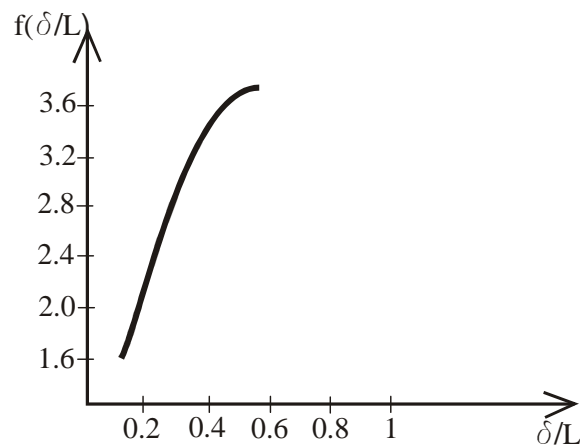


Рис. 3.7. График функции $f(\delta/l)$ для широкой ограниченной прослойки

3.2.6. Вынужденная конвекция

Коэффициент при вынужденной конвекции отличается от коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции. Основной характеристикой охлаждающего потока является скорость, определяющая массовый или объемный расход жидкости:

$$v = \frac{G_m}{S\rho}; \quad v = \frac{G_v}{S}, \quad (3.39)$$

где G_m , G_v – массовый и объемный расходы соответственно.

В зависимости от скорости движения охлаждающей жидкости различают три режима движения – ламинарный, турбулентный, переходной. Характер движения охлаждающей жидкости определяется путем расчета критерия Рейнольдса (Re):

$$\text{Re} = \nu \frac{d}{v_m}, \quad (3.40)$$

где d – определяющий параметр поверхности, им может быть L или H , для некруглых труб он рассчитывается по формуле

$$d_{\text{эф}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (3.41)$$

где S – площадь сечения трубы; Π – смачиваемый периметр.

По величине критерия Рейнольдса (Re) определяют характер течения охлаждающей жидкости:

- ламинарный, если $\text{Re} < 2,2 \cdot 10^3$;
- переходной, если $2200 < \text{Re} \leq 4 \cdot 10^4$;
- турбулентный, если $\text{Re} > 4 \cdot 10^4$.

Для вынужденной конвекции различают неограниченное и ограниченное пространства.

Вынужденная конвекция в неограниченном пространстве

Различают два случая вынужденной конвекции в неограниченном пространстве – продольное и поперечное обтекание тел. Рассмотрим продольное обтекание охлаждающей жидкости. Пусть тело омывается жидкостью с определенной скоростью и возможностью любого типа движения, тогда:

а) при ламинарном течении жидкости коэффициент теплоотдачи выражается из критериального уравнения:

$$\begin{cases} \text{Nu}_L = 0,66 \text{Re}_f^{0,5} \text{Pr}_f^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_\omega} \right)^{0,25} \\ \text{Nu} = \alpha_K \frac{L}{\lambda_m} \quad \text{по (3.8)}, \end{cases} \quad (3.42)$$

где f – температура набегающей жидкости; L – определяющий размер – длина теплоотдающей поверхности в направлении движения среды.

Для воздуха $\text{Nu}_L = 0,57 \sqrt{\text{Re}_f}$;

б) турбулентное течение охлаждающей жидкости:

$$\text{Nu}_L = 0,037 \text{Re}_f^{0,8} \text{Pr}_f^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_\omega} \right)^{0,25}. \quad (3.43)$$

Для воздуха $\text{Nu}_L = 0,032 \text{Re}_f^{0,8}$.

При поперечном течении потока выражение для Nu имеет вид:

$$\begin{cases} \text{Nu}_{\text{Л}} = 0,8 \text{Re}_f; \\ \text{Nu} = \alpha_K \frac{L}{\lambda_m}, \end{cases} \quad (3.44)$$

где L – длина обтекания.

3.2.7. Теплообмен при вынужденном движении жидкости в трубах и каналах

Теплоотдача жидкости в гладких трубах:

а) ламинарное движение охлаждающей жидкости ($\text{Re} < 2000$). Теплоотдача определяется факторами как вынужденного, так и свободного движения:

$$\text{Nu}_{\text{Л}} = 0,15 \sqrt[3]{\text{Re}_f \text{Gr}_f^{0,1} \text{Pr}_f^{0,43}} \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_\omega} \right)^{0,25} \epsilon_L, \quad (3.45)$$

где ϵ_L – поправочный коэффициент, зависящий от отношения l/d .

Для воздуха

$$\text{Nu}_{\text{Л}} = 0,13 \sqrt[3]{\text{Re} \text{Gr}_f^{0,1}} \epsilon_L. \quad (3.46)$$

Некоторые численные значения поправочного коэффициента ϵ_L в зависимости от соотношения l/d приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Численные значения поправочного коэффициента ϵ_L в зависимости от соотношения l/d для воздуха

l/d	1	2	5	50
ϵ_L	1,9	1,7	1,44	1,0

б) переходной режим движения охлаждающей жидкости. Теплопередача зависит от многих обстоятельств и может резко и быстро изменяться. Теплоотдача в этом случае определяется по выражению

$$\text{Nu}_{\text{Л}} = \frac{\alpha_K}{\lambda_f} d = KM, \quad (3.47)$$

где K – безразмерный параметр, зависящий от величины Re , некоторые его численные значения приведены в табл. 3.4.

Численные значения параметра K в зависимости от значения Re

$Re \cdot 10^{-3}$	2,1	2,5	3	6
K	1,9	4,4	6,0	19,5

Параметр M определяется из соотношения

$$M = Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_\omega} \right)^{0,25} \quad \text{при } T_f = 0,5(T_{ex} + T_{блх}); \quad (3.48)$$

в) турбулентный режим движения охлаждающей жидкости ($Re > 4 \cdot 10^4$). Теплоотдача в этом случае определяется как

$$Nu_m = 0,23 Pr_f^{0,4} Re_f^{0,8} \varepsilon_L \varepsilon_R \varepsilon_t, \quad (3.49)$$

где ε_R – поправочный коэффициент, зависящий от искривления трубы; ε_t – поправка на неизотермичность потока.

Теплоотдача в каналах с шероховатыми стенками

Охлаждающая жидкость движется между ТЭЗами (типовыми элементами замены) с большой скоростью. Корпуса ИМС могут располагаться как на обеих сторонах плоского канала, образованного ТЭЗами, так и на одной стороне, являясь препятствием для прогоняемой жидкости (рис. 3.8).

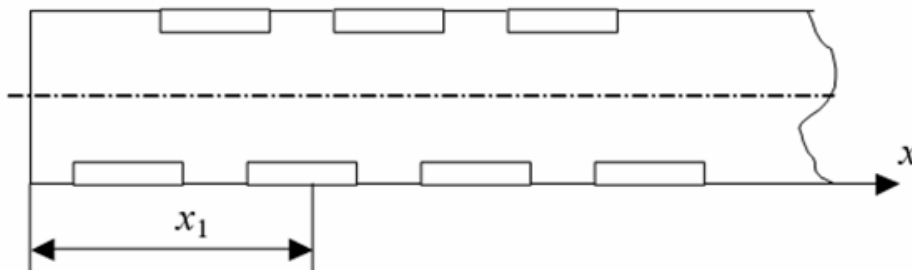


Рис. 3.8

На рис. 3.8 обозначен x_1 – начальный участок $l_{НАЧ}$, на котором происходит формирование профиля скорости прогоняемой жидкости. Для $x \geq l_{НАЧ}$ наступает режим стабилизированного течения жидкости ($Nu = const$).

При вынужденной конвекции для ламинарного течения получим критерий

$$Nu_L = 6,18 \sqrt{\frac{l_H}{L_K}}; \quad L_K \leq l_H; \quad (3.50)$$

$$\text{Nu}_{\text{Л}} = 4,12 \left(1 + \frac{l_{\text{н}}}{L_{\text{К}}} \right); \quad L_{\text{К}} > l_{\text{н}}, \quad (3.51)$$

где $l_{\text{н}} = 0,01b_{\text{эф}} \text{Re}$; $L_{\text{К}}$ – размер канала в направлении движения.

При турбулентном движении

$$\text{Nu}_{\text{T}} = 1,165 \text{Nu}_{\infty} \left(\frac{l_{\text{н}}}{L_{\text{К}}} \right)^{0,167}; \quad L_{\text{К}} \leq l_{\text{н}}, \quad (3.52)$$

$$\text{Nu}_{\text{T}} = \text{Nu}_{\infty} \left(1 + 0,165 \frac{l_{\text{н}}}{L_{\text{К}}} \right); \quad L_{\text{К}} > l_{\text{н}}, \quad (3.53)$$

где $\text{Nu}_{\infty} = 0,019 \text{Re}^{0,8}$, а $l_{\text{н}} = 40b_{\text{эф}}$,

$$\text{Nu} = \alpha_k \frac{L}{\lambda}; \quad \begin{cases} L = b_{\text{эф}} & \text{для ламинарного потока;} \\ L = 2b_{\text{эф}} & \text{для турбулентного потока.} \end{cases}$$

Теплообмен при давлениях, отличных от нормального

Пусть H_0 – нормальное атмосферное давление, тогда ему соответствует α_{k0} , а любому другому H – α_k , тогда

$$\alpha_k = \alpha_{k0} \left(\frac{H}{H_0} \right)^{0,5}. \quad (3.54)$$

3.3. Перенос тепловой энергии теплопроводностью

3.3.1. Теплопроводность: основные понятия и законы

Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц вещества. В газах энергия переносится диффузией молекул и атомов. В жидкостях и твердых веществах – упругими волнами. В металлах тепловая энергия переносится за счет диффузии свободных электронов.

Теплопроводность описывается *законом Фурье*: количество теплоты, проходящей через тело в единицу времени, пропорционально площади поперечного сечения, нормальной к потоку теплоты, и температурному градиенту вдоль потока:

$$\frac{dQ}{d\tau} \sim -F \frac{dt}{dx} \quad (3.55)$$

Знак « \rightarrow » показывает, что поток теплоты может быть направлен только в сторону падения градиента температур; x – координата направления потока.

Если ввести коэффициент пропорциональности и опустить знак «←», то можно получить следующее выражение Фурье:

$$P = \frac{dQ}{d\tau} = \lambda F \frac{dt}{dx}, \quad (3.56)$$

из которого коэффициент пропорциональности λ определяется как константа, характеризующая теплопроводность данного материала:

$$\lambda = \frac{P}{F \Delta t}, \text{ [Вт/м} \cdot \text{град]}. \quad (3.57)$$

Тела с большим значением λ (> 50 Вт / м · град) рассматриваются как теплопроводные материалы, которые способны в общем случае обеспечивать отток тепловой энергии от нагретого элемента, предохраняя его от перегрева, а материалы с низким λ ($< 0,25$) рассматриваются как теплоизоляционные.

Теплопроводность газов

$$\lambda = V l C_v \rho, \quad (3.58)$$

где V – средняя скорость частиц молекул газа; l – их средняя длина пробега; C_v, ρ – теплоемкость газа при постоянном давлении и его плотность.

С увеличением давления газов теплопроводность практически не изменяется, т.к. повышается плотность и понижается длина пробега, а с ростом температуры газа теплопроводность повышается, т.к. возрастает средняя скорость и теплоемкость.

Теплопроводность газов находится в пределах 0,006 – 0,6 Вт / м · град.

Теплопроводность жидкостей – 0,07 – 0,67 Вт / м · град .

Для жидкостей с постоянной молекулярной массой при повышении температуры теплопроводность уменьшается.

У ассоциативных жидкостей (объединение нескольких молекул вместе) с ростом температуры молекулярная масса изменяется (табл. 3.5), например, теплопроводность воды при перепаде температур увеличивается от 0,6 до 0,7.

Поскольку в металлах основным механизмом передачи тепла является движение свободных электронов, то при повышении температуры тепловые неоднородности усиливаются, и как следствие, снижается теплопроводность. Так как в металлах присутствуют примеси, их наличие приводит к такому же эффекту, однако в отличие от чистых металлов теплопроводность сплавов с ростом температуры повышается.

Таблица 3.5

Зависимость $\lambda(T)$

Газы	Жидкости		Твердые тела	
	неассоциированные	ассоциированные	металлы	диэлектрики
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·град				
0,006 – 0,6	0,07 – 0,7		20 – 400	0,023 – 2,9
				

В диэлектриках с повышением температуры теплопроводность обычно возрастает, с ростом плотности диэлектрика и его влажности теплопроводность растет, а с увеличением пористости снижается.

В теории теплопроводности имеет место коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (3.59)$$

где c – удельная теплоемкость материала, [Дж / м · град].

Коэффициент температуропроводности характеризует молекулярный перенос (диффузию) тепловой энергии и пропорционален скорости распространения изотермической поверхности в теле.

Величина $\frac{1}{a}$ оценивает инерционные свойства материалов, значение теплопроводности и удельной теплоемкости имеют разные величины для разных материалов.

В случае независимости от координат и времени основное уравнение теплопроводности для элементарного объема ($dx dy dz$)

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_{вн}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (3.60)$$

где $q_{вн}$ – количество теплоты, выделяемое внутренним источником в единичном объеме в единицу времени.

Выражение (3.60) получено с использованием закона Фурье в соответствии с законом сохранения энергии: разность между притоком теплоты внутрь системы

$$dQ_{\text{вн}} = q_{\text{вн}} dx dy dz d\tau \quad (3.61)$$

и количеством теплоты, вытекающей из указанного объема по всем направлениям

$$dQ_{\text{выт}} = -\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dx dy dz d\tau, \quad (3.62)$$

идет на приращение внутренней энергии элементарного объема

$$dW = C\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz d\tau. \quad (3.63)$$

В случае если система не содержит внутренних источников теплоты, полное уравнение теплопроводности превращается в уравнение Фурье:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2}. \quad (3.64)$$

Если система имеет источники выделения или поглощения теплоты, а ее температура постоянна во времени (установившийся режим), основное уравнение (3.60) преобразуется в уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_{\text{вн}}}{\lambda} = 0. \quad (3.65)$$

Для системы линейных источников выделения или поглощения в установившемся режиме будет справедливо уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (3.66)$$

Уравнение (3.66) можно записать через лапласиан:

$$\nabla^2 t = 0. \quad (3.67)$$

Для решения уравнения теплопроводности необходимо принятие краевых условий, в состав которых входят начальные (временные) и граничные (пространственные) условия.

Пространственные условия определяют начальное распределение температуры в виде функции:

$$T(x, y, z) = t(x, y, z, \tau). \quad (3.68)$$

Граничные условия задают закон теплового воздействия между температурой тела и окружающей средой и могут задаваться по-разному, в зависимости от исходных данных.

При граничных условиях 1 рода задана температура t_F по всей поверхности тела как функция времени:

$$t_F = t(x, y, z, \tau). \quad (3.69)$$

Граничные условия 2 рода задают как функцию плотность теплового потока для всей поверхности:

$$q(x, y, z, \tau) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_F. \quad (3.70)$$

Выражение (3.70) означает, что граничными условиями при этом являются значения производных на поверхности тела:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \varphi_1(t); \quad \frac{\partial t}{\partial y} = \varphi_2(t); \quad \frac{\partial t}{\partial z} = \varphi_3(t). \quad (3.71)$$

Таким образом, известная (заданная) функция $\varphi(t)$ выражается через заданный тепловой поток:

$$\varphi(t) = -\frac{q(x, y, z, \tau)}{\lambda} = \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (3.72)$$

Граничные условия 3 рода применяются, когда задана температура внешней среды как функция времени $t_c(\tau)$ и закон теплообмена между телом и средой. Как и при граничных условиях 2 рода поток, проходящий через поверхность тела,

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_F. \quad (3.73)$$

Поток, отдаваемый в окружающую среду, может быть задан t_c и коэффициентом α . Если приравнять эти потоки, можно получить:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_F = \alpha(t_F - t_c), \quad (3.74)$$

или

$$\frac{dt}{dn} = \frac{\alpha}{\lambda}(t_c - t_F). \quad (3.75)$$

При плотном контакте двух тел не только тепловые потоки через поверхность соприкосновения едины (как при граничных условиях 3 рода), но и температуры двух сочлененных поверхностей одинаковы – это и есть граничные условия 4 рода:

$$\lambda_i \frac{dt}{dn} \Big|_{F_i} = -\lambda_j \frac{dt}{dn} \Big|_{F_j}, \quad (3.76)$$

где i, j – это индексы двух соприкасающихся слоев.

3.3.2. Теплопроводность плоской стенки

Задана плоская однородная стенка с теплопроводностью λ и толщиной δ (рис. 3.9). Имеем однородное стационарное поле:

$$T_1 = \text{const}; \quad T_2 = \text{const}; \quad T_1 > T_2 .$$

Воспользуемся дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 .$$

Его решение: $T(x) = C_1 x + C_2 .$

Используя граничные условия

$$\begin{cases} x_1 = 0; & T = T_1; \\ x_2 = \delta; & T = T_2, \end{cases}$$

находим:

$$C_2 = T_1; \quad C_1 = \frac{T_2 - T_1}{\delta}; \quad (3.77)$$

получаем: $T(x) = T_1 + (T_2 - T_1)x / \delta .$

Следовательно, распределение температуры линейно. Используя уравнение Фурье $P = -\lambda S \frac{dT}{dx}$, получим выражение для потока энергии через плоскую стенку:

$$P = -\frac{\lambda}{d} L_1 L_2 (T_1 - T_2). \quad (3.78)$$

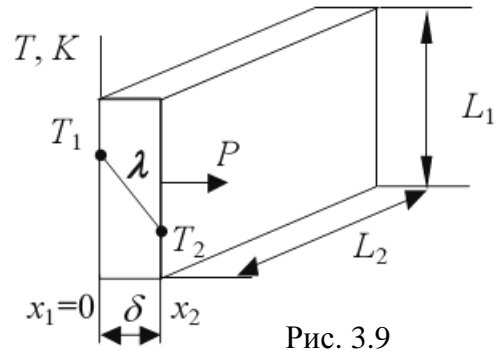


Рис. 3.9

3.3.3. Теплопроводность цилиндрической стенки

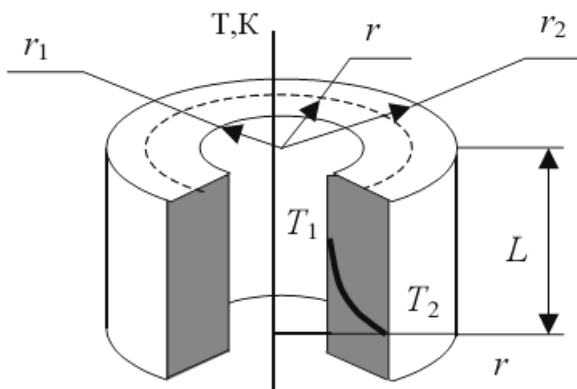


Рис. 3.10

Определим теплопроводность цилиндрической стенки. Найдем распределение температурного поля и теплового потока (рис. 3.10, где r – текущий радиус).

Воспользуемся дифференциальным уравнением, выраженным в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (3.79)$$

Его решение определяют по справочнику:

$$T(r) = C_1 \cdot \ln(r) + C_2 .$$

Из граничных условий

$$\begin{cases} x_1 = r_1; & T = T_1; \\ x_2 = r_2; & T = T_2 \end{cases} \quad \text{находим } C_1 \text{ и } C_2, \text{ и далее получим:}$$

$$T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (3.80)$$

Распределение температуры нелинейно. Из уравнения Фурье находим:

$$P = -\lambda S \frac{dT}{dr},$$

где $S = 2\pi rL$;

$$P = -S \frac{2\pi\lambda L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2). \quad (3.81)$$

3.3.4. Теплопроводность сферической стенки

Определим теплопроводность сферической стенки (рис. 3.11) при $T(\tau) = \text{const}$.

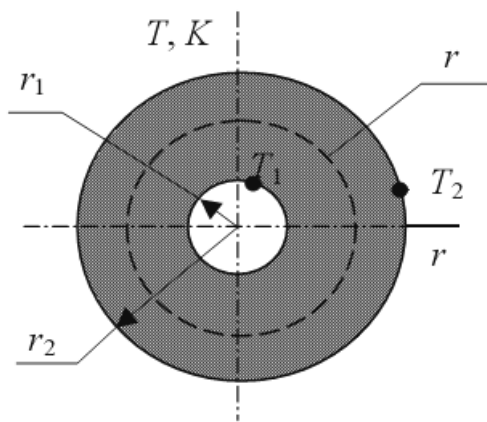


Рис. 3.11

Воспользуемся дифференциальным уравнением, выраженным в сферических координатах:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (3.82)$$

Решение уравнения находим по справочнику: $T(r) = \frac{C_1}{r} + C_2$, граничные

$$\text{условия: } \begin{cases} x_1 = r_1; & T = T_1; \\ x_2 = r_2; & T = T_2, \end{cases} \text{ следовательно,}$$

следовательно,

$$T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right). \quad (3.83)$$

Распределение температуры нелинейно. Используя уравнение Фурье, получим:

$$P = 4\pi\lambda(T_2 - T_1) \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (3.84)$$

3.3.5. Теплопроводность однородной бесконечной стенки

Дана плоская однородная бесконечная стенка с внутренним источником теплоты q (рис. 3.12) и толщиной $\delta = 2l$; $T_c = T_f = \text{const}$.

Найдем закон стационарного поля температуры в пластине $T = T(x)$.

Для решения воспользуемся дифференциальным уравнением, учитывая действие источника:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + q_v = 0. \quad (3.85)$$

Решение уравнения (3.85) находим в общем виде после двойного интегрирования:

$$T(x) = -\frac{q_v}{2\lambda} x^2 + C_1 x + C_2. \quad (3.86)$$

Вводим характеристическую температуру, которая представляет собой перегрев в определенной точке по отношению к среде:

$$\theta = T - T_f.$$

Уравнение (3.85) и его решение примут вид:

$$\lambda \frac{d^2 \theta}{dx^2} = \lambda \frac{d}{dx} \left(\frac{d \theta}{dx} \right) = -q_v; \quad (3.87)$$

$$\theta - \frac{q_v}{2\lambda} x^2 + C_1 x + C_2. \quad (3.88)$$

Граничными условиями являются:

$$1) \quad x_1 = 0; \quad \frac{d \theta}{dx} = 0.$$

В центре пластины, где $x = 0$, следует ожидать максимальное значение температуры и ее симметричное изменение в направлении оси x ;

2) на границе $x = \pm l$ происходит смена способа передачи тепла: внутри – кондукция (что описывается уравнением Фурье), а от поверхности стенки к внешней среде – конвекция (закон Ньютона):

$$-\lambda \frac{d \theta}{dx} \Big|_{x=\pm l} = \alpha_K \theta \Big|_{x=\pm l},$$

где α_K – конвективный коэффициент теплообмена.

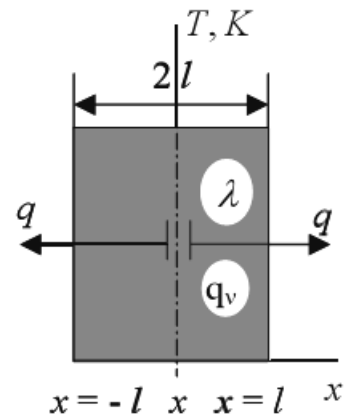


Рис. 3.12

Тогда $C_1 = q_v \frac{l}{\lambda}$; $C_2 = T_f q_v \frac{l}{\lambda}$, следовательно, получим окончательное решение уравнения (3.87):

$$\theta(r) = \frac{q_v l^2}{2\lambda} \left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right) + \frac{q_v l}{\alpha_K}. \quad (3.89)$$

Приведем его к виду

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \left(1 - \frac{x^2}{l^2} \right) + \frac{2\lambda}{\alpha_K l}. \quad (3.90)$$

Таким образом,

$$\frac{\theta}{\theta_0} = f \left(\frac{x}{l}; \text{Bi} \right),$$

где Bi – критерий Био, $\text{Bi} = \alpha_K \frac{l}{\lambda}$; θ_0 – перегрев без источника тепла.

3.3.6. Теплопроводность цилиндрической стенки с сосредоточенным источником тепла

Определим теплопроводность цилиндрической стенки с сосредоточенным источником тепла (рис. 3.13). Внутренняя стенка теплоизолирована.

Используем дифференциальное уравнение в цилиндрических координатах с учетом действия q_v :

$$\frac{d^2\theta}{dr^2}(r) + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} = -\frac{q_v}{\lambda}, \quad (3.91)$$

$$\int \frac{d}{dr} \int \frac{d\theta}{dr} = -\frac{q_v}{\lambda} - \frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2 = 0,$$

граничные условия:

$$1) \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=r_1} = 0, \quad (\theta_{r=r_1} = \max!);$$

$$2) -\lambda \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=r_2} = \alpha_K \theta|_{r=r_2};$$

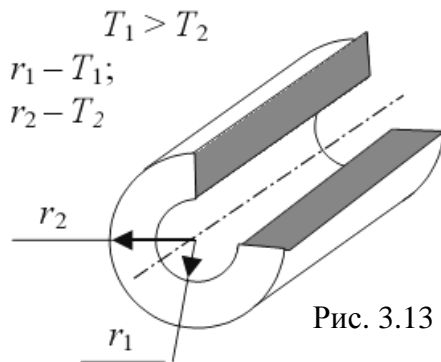


Рис. 3.13

$$\theta = \frac{q_v r_2^2}{4\lambda} \left\{ \frac{2\lambda}{\alpha_K r} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] + \left[1 - \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \right] - 2 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \ln \frac{r_1}{r_2} \right\}. \quad (3.92)$$

Для цилиндрического стержня с $r_{внутр} = r_1$, стремящимся к нулю, получим:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{2}{Bi} + 1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2. \quad (3.93)$$

Для температурного поля с внутренним однородно распределенным источником можно записать:

а) для однородной пластины

$$\theta = \frac{q_v l^2}{2\lambda} \left\{ 1 + \frac{2\lambda}{\alpha l} - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right\}; \quad (3.94)$$

б) для цилиндра

$$\theta = \frac{q_v l^2}{4\lambda} \left\{ 1 + \frac{2\lambda}{\alpha l} - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right\}; \quad (3.95)$$

в) для шара

$$\theta_{ш} = \frac{q_v l^2}{6\lambda} \left\{ 1 + \frac{2\lambda}{\alpha l} - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \right\}. \quad (3.96)$$

3.3.7. Теплопроводность ребра

Определим теплопроводность ребра (рис. 3.14). Ребро характеризуется высотой L , шириной b , толщиной d .

Рассмотрим процесс распространения теплового потока вдоль оси x при условии, что температура окружающей среды $T_c = T_f$.

Коэффициенты:

– теплоотдачи с поверхности пластины $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$;

– теплопроводности – λ .

Будем считать, что температура ребра изменяется только по его высоте. Найдем закон распределения температуры по высоте ребра.

Характерным для стержней, реберных пластин и ребер является то, что в поперечном сечении они представляют изотермические сечения с постоянной температурой в каждом из них (рис. 3.15). При этом через разные термические сечения ребер проходит различный тепловой поток. Об-

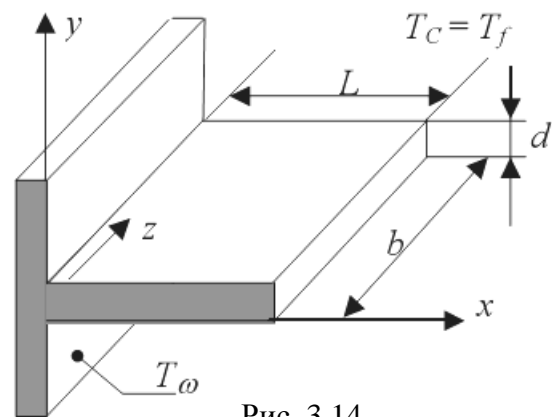


Рис. 3.14

щее количество теплоты, отдаваемое ребром в окружающую среду, равно количеству тепла, подводимого к его основанию.

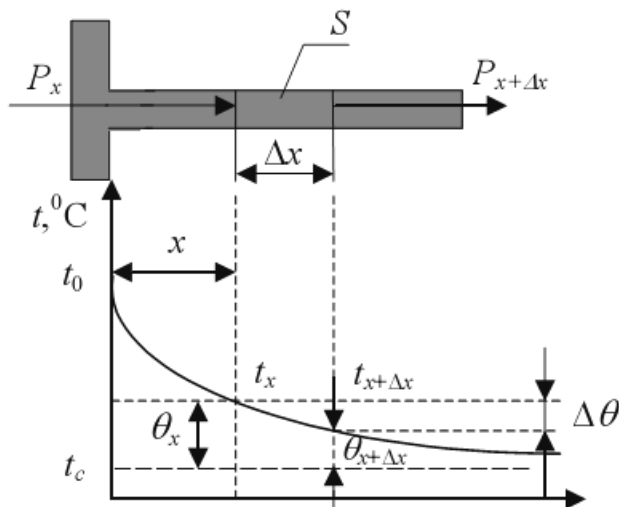


Рис. 3.15

Неравенство потоков через разные температурные сечения объясняется тем, что вдоль высоты ребра происходит непрерывное рассеивание тепловой энергии с его боковой поверхности в окружающую среду конвекцией и излучением.

Выделим в ребре элемент Δx на расстоянии x (на основании выражения $\theta_1 = t - t_C$; $\Delta\theta = \theta_x + \theta_{x+\Delta x}$). Пусть в него втекает P_x , вытекает $P_{x+\Delta x}$, так что поток $\Delta P = P_x - P_{x+\Delta x}$.

Потерю теплового потока

излучением и конвекцией с боковой поверхности в окружающее пространство можно выразить по закону Ньютона:

$$\Delta P = \alpha \Pi \Delta x \theta, \quad (3.97)$$

где $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$; Π – периметр сечения; $\Delta\theta$ – перегрев между сечениями.

Используя закон Фурье, выразим величину тепловых потоков в сечениях x и $x + \Delta x$:

$$P_x = -\lambda \frac{d\theta_x}{dx} S_x;$$

$$P_{x+\Delta x} = -\lambda \frac{d\theta_{x+\Delta x}}{dx} S_{x+\Delta x} = -\lambda \frac{d}{dx} \left(\theta + \frac{d\theta}{dx} d_x \right) S_{x+\Delta x}.$$

Найдем их разность:

$$\Delta P = P_x - P_{x+\Delta x} = \lambda \frac{d^2\theta_x}{dx^2} S; \quad (3.98)$$

Из равенств (3.97) и (3.98) получим дифференциальное уравнение, описывающее температуру вдоль ребра:

$$\frac{d^2\theta_x}{dx^2} - m^2\theta = 0, \quad (3.99)$$

где $m = \sqrt{\frac{\alpha \Pi}{\lambda S}}$, $\frac{1}{m}$ – характеристический параметр ребра.

Общее решение дифференциального уравнения второго порядка может быть представлено в виде:

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}. \quad (3.100)$$

Граничные условия: $\theta|_{x=0} = \theta_0$. – у основания ребра; а $\frac{d\theta}{dx}|_{x=L} = 0$, так как перегрев в данном сечении есть величина постоянная. Решение дифференциального уравнения:

$$\theta = \theta_0 \frac{ch[m(L-x)]}{ch[mL]}.$$

Характер изменения по высоте ребра в безразмерной зависимости от m можно представить графической зависимостью (рис. 3.16).

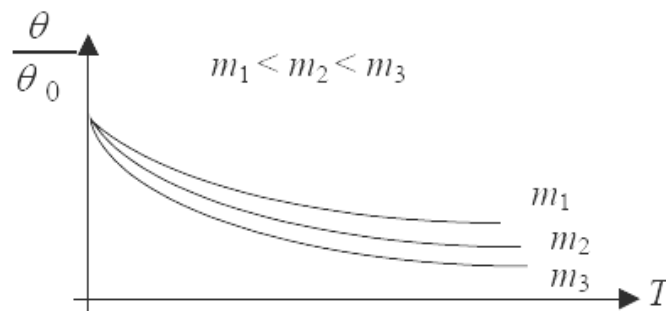


Рис. 3.16.

Из рис. 3.16 видно, что T убывает вдоль высоты ребра тем медленнее, чем более параметр m , который пропорционален $\sqrt{\Pi/S}$ при $\alpha, \lambda = \text{const}$.

Выразим величину переносимого теплового потока:

$$P_x = -\lambda S \left(\frac{d\theta}{dx} \right);$$

$$\theta = -\theta_0 m \frac{sh(mL)}{ch(mL)} = -\theta_0 m \cdot th(mL);$$

$$P_x = \lambda S m \theta th(Lm).$$

Эффективность ребра определяется как отношение теплоты, которое действительно рассеивается с поверхности ребра, к теплоте, которая бы рассеивалась с поверхности ребра при равной температуре всей поверхности:

$$\eta = \frac{th(N)}{N}, \quad (3.101)$$

где $N = \sqrt{\frac{\alpha L}{\lambda d}}$.

3.3.8. Тепловое поле и поток для составных стенок

При анализе составных стенок примем, что соприкасающиеся стенки имеют толщину d_1 и d_2 с теплопроводностями λ_1 и λ_2 , причем $T(\tau) = \text{const}$ и потери тепла отсутствуют (рис. 3.17).

Воспользуемся законом Ньютона для теплопроводности:

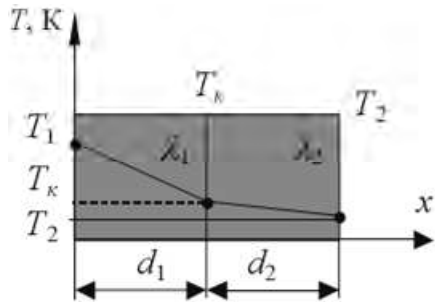


Рис. 3.17

а) при контакте двух плоских слоев запишем:

$$P_x = \frac{\lambda_1}{d_1} S(T_1 - T_k) = \frac{\lambda_2}{d_2} S(T_k - T_2), \quad (3.102)$$

где T_k – температура контакта двух слоев;

$$T_k = \frac{\frac{\lambda_1}{d_1} T_1 + \frac{\lambda_2}{d_2} T_2}{\frac{\lambda_1}{d_1} + \frac{\lambda_2}{d_2}}. \quad (3.103)$$

Поток тепла через составные стенки можно выразить как

$$P = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\lambda_1}{d_1} + \frac{\lambda_2}{d_2}}. \quad (3.104)$$

Обобщив, получим:

$$P = \frac{T_1 - T_2}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{d_i}}; \quad (3.105)$$

б) при контакте двух и более слоев составной цилиндрической стенки запишем:

$$P = \frac{2\pi\lambda_1(t_1 - t_K)}{\ln\left(\frac{r_K}{r_1}\right)} = \frac{2\pi\lambda_2(t_K - t_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_K}\right)},$$

откуда находим

$$t_K = \frac{\frac{\lambda_1 t_1}{\ln\left(\frac{r_K}{r_1}\right)} + \frac{\lambda_2 t_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_K}\right)}}{\frac{\lambda_1}{\ln\left(\frac{r_K}{r_1}\right)} + \frac{\lambda_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_K}\right)}}; \quad (3.106)$$

и окончательно получим:

$$P = \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\frac{\ln\left(\frac{r_K}{r_1}\right)}{\lambda} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_K}\right)}{\lambda_2}}. \quad (3.107)$$

3.3.9. Тепловые коэффициенты и сопротивления

Рассмотрим передачу тепла между двумя изотермическими поверхностями ($t_1 > t_2$) (рис. 3.18).

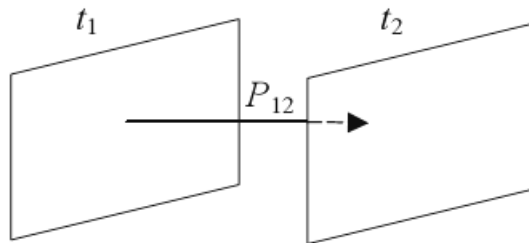


Рис. 3.18

Согласно закону Ньютона тепловой поток $P \sim (t_1 - t_2)$, что можно записать как $P_{12} = C (t_1 - t_2)$, где C – коэффициент пропорциональности между P_{12} и $(t_1 - t_2)$.

Можно составить и обратное соотношение $(t_1 - t_2) = F P_{12}$, где имеет место другой коэффициент пропорциональности – F .

Коэффициент F , связывающий количественные величины Δt и P , называется *термическим* или *тепловым коэффициентом*.

Через F можно выразить P :

$$P = \frac{\Delta t}{F}. \quad (3.108)$$

В таком виде соотношение (3.108) называется *обобщенным законом Ньютона*.

Смысл термического коэффициента F можно установить, если пользоваться электротепловой аналогией – это когда процессы различной физической природы описываются одинаковыми по структуре уравнениями. Например, сравним структурную запись уравнений, описывающих электрические $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, $\frac{\text{Кл}}{\text{с}}$ и тепловые $P = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{с}}$ потоки.

Воспользуемся электротепловой аналогией и сопоставим закон Ома для однородного участка электрической цепи $I = \frac{\Delta\varphi}{R}$ с выражением (3.108).

Если P рассматривать аналогом I , Δt – как аналог $\Delta\varphi$, то F можно рассматривать тождественным по смыслу R – тепловому сопротивлению (R_T).

Уравнение (3.108) можно записать как

$$P = \frac{\Delta t}{R_T}. \quad (3.109)$$

В дальнейшем R_T будем обозначать просто R , введя обратную ему величину $\sigma = \frac{1}{R}$ – *тепловую проводимость*, т.е.

$$P = \sigma \Delta t. \quad (3.110)$$

Из (3.109) выразим R и определим физический смысл величины:

$$R = \frac{\Delta t}{P}, \frac{\text{К}}{\text{Вт}}. \quad (3.111)$$

Из выражения (3.111) следует, что R определяет разность температур на концах участка, создающую единицу тепловой мощности.

Следует отметить, что замена понятия термического коэффициента на тепловое сопротивление справедливо лишь для участков, на которых нет источников (или стоков) тепла. Если условие не выполняется, то проводимость тепла на участке характеризуется тепловым коэффициентом F , который определяют экспериментально, теоретическим путем или с помощью аналоговых методов.

3.3.10. Сложный теплообмен. Тепловые сопротивления при теплообмене

Если передача тепла между изотермическими поверхностями происходит одновременно тремя способами, то такой теплообмен называется сложным, и тогда P_{12} можно выразить как

$$P_{12} = P_{12K} + P_{12T} + P_{12L}. \quad (3.112)$$

Выразим каждое P через (3.110):

$$P_{12} = \sigma_{12K} \Delta t + \sigma_{12T} \Delta t + \sigma_{12L} \Delta t = (\sigma_{12K} + \sigma_{12T} + \sigma_{12L}) \Delta t = \sigma_{12} \Delta t,$$

где $\sigma_{12} = \sigma_{12K} + \sigma_{12T} + \sigma_{12L}$ – полная тепловая проводимость участка, или

$$\sigma_{12} = \frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_{12K}} + \frac{1}{R_{12T}} + \frac{1}{R_{12L}}. \quad (3.113)$$

Определение теплового сопротивления зависит от способа передачи тепла:

а) в вакууме, где отсутствует конвективный теплообмен, $\sigma_{12K} = 0$, тогда $\sigma_{12} = \sigma_{12T} + \sigma_{12Л}$;

б) если $t \rightarrow 0$, $\sigma_{12Л} \rightarrow 0$, тогда $\sigma_{12K} = \sigma_{12K} + \sigma_{12T}$.

Рассмотрим, как выражается тепловое сопротивление и тепловая проводимость в зависимости от механизма передачи тепла.

Кондуктивный теплообмен. Рассмотрим тепловой поток в среде (λ) между двумя изотермическими поверхностями (рис. 3.19).

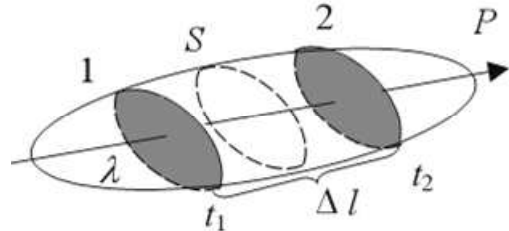


Рис. 3.19

С одной стороны, $q_{12} = \frac{P_{12}}{S}$, с другой стороны, $q_{12} = -\lambda \frac{dt}{dl}$. Из совместного решения уравнений получаем:

$$\int_{t_1}^{t_2} -dt = \int_{l_1}^{l_2} P_{12} \frac{dl}{\lambda S}.$$

Интегрируем:

$$t_1 - t_2 = P_{12} \int_{l_1}^{l_2} \frac{1}{\lambda} \frac{dl}{S};$$

сопоставляем с (3.111) и выражаем:

$$R_{12T} = \frac{1}{\lambda} \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{S}. \quad (3.114)$$

Отметим аналогичность (3.114) с омическим сопротивлением:

$$R_{OM} = \frac{1}{\rho_l} \int \frac{dl}{S}.$$

Определим R_T для однородных стенок: а) плоской; б) цилиндрической; в) сферической (рис. 3.20):

а) $R_{II} = \frac{1}{\lambda} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dl}{S} = \frac{1}{\lambda} L_1 L_2 \Delta x,$

где $\Delta x = \delta$;

$$\text{б) } R_{II} = \frac{1}{\lambda} \frac{1}{2\pi h} \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{l} = \frac{1}{2\pi h \lambda} \ln \frac{l_2}{l_1};$$

$$\text{в) } R_C = \frac{1}{\lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{4\pi r^2} = \frac{1}{4\pi \lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

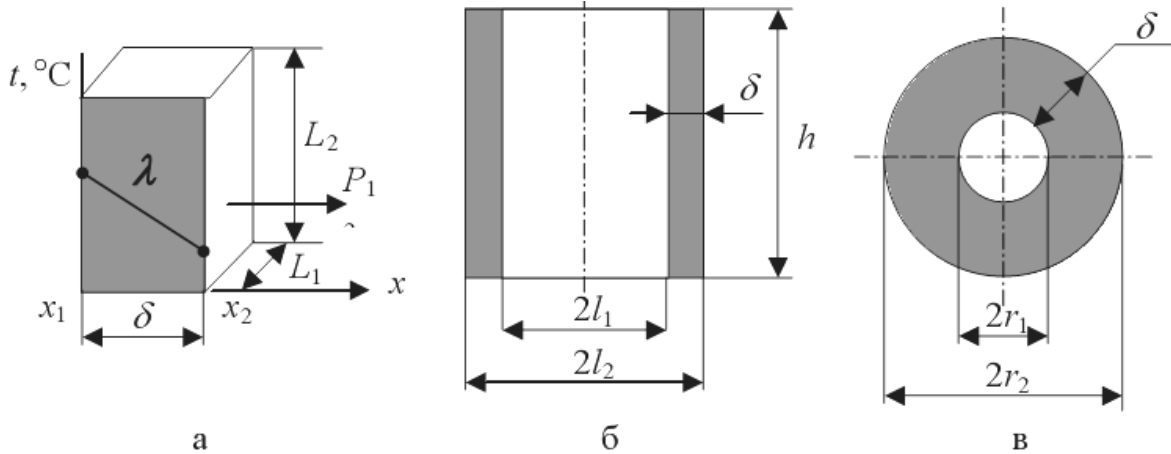


Рис. 3.20

В частности, можно записать:

а) кондуктивный теплообмен:

$$\begin{cases} P_{12T} = \sigma_{12T} \cdot \Delta t, \\ P_{12T} = \alpha_T \cdot S \cdot \Delta t, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_{12T} = \alpha_T \cdot S, \\ R_{12T} = \frac{1}{\sigma_{12T}} = |\alpha_T \cdot S|^{-1}, \end{cases} \quad (3.115)$$

где $\alpha_T = \frac{\lambda}{\delta}$;

б) конвективный теплообмен:

$$\begin{cases} P_{12K} = \sigma_{12K} \cdot \Delta t, \\ P_{12K} = \alpha_K \cdot S \cdot \Delta t, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_{12K} = \alpha_K \cdot S, \\ R_{12K} = (\alpha_K \cdot S)^{-1}, \end{cases} \quad (3.116)$$

где α_K – конвективный коэффициент теплоотдачи;

в) теплообмен излучением

$$\begin{cases} P_{12L} = \sigma_{12L} \cdot \Delta t, \\ P_{12L} = \alpha_L \cdot S \cdot \Delta t, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_{12L} = \alpha_L \cdot S, \\ R_{12L} = (\alpha_L \cdot S)^{-1}, \end{cases} \quad (3.117)$$

где $\alpha_L = \varepsilon_{12} \cdot \Phi_{12} \cdot f(t_1, t_2)$.

3.4. Перенос тепловой энергии излучением

3.4.1. Основные понятия и определения

Тепловое излучение – это процесс распространения тепловой энергии электромагнитными волнами определенного спектрального диапазона $(0.3...800) \cdot 10^6$ м. Возбудителями электромагнитных волн являются заряженные материальные частицы, т.е. электроны и ионы.

Тепловое излучение обладает не только волновыми, но и корпускулярными свойствами: лучистая энергия испускается квантами света или фотонами. Большинство твердых и жидких тел имеют сплошной спектр излучения. К твердым телам, имеющим непрерывный спектр, относятся диэлектрики и полупроводники, металлы с окисленной шероховатой поверхностью. Металлы с эмалированной поверхностью, газы и пары характеризуются селективным спектром излучения. Интенсивность зависит от природы тела, температуры, длины волны, состава поверхности, а для газов – от толщины слоя и давления. Твердые и жидкие тела обладают большой поглощающей и излучающей способностью. Поэтому в лучистом теплообмене участвуют лишь поверхностные слои – для нетеплопроводных материалов они составляют около 1 мм, а для теплопроводных – 1 мк. Именно поэтому тепловое излучение может рассматриваться как поверхностное явление. Полупрозрачные материалы (стекло, оптическая керамика), газы и пары характеризуются объемным характером теплообмена, в котором участвуют все частицы объема вещества. Для тепловых лучей справедливы законы распространения, отражения и преломления, которые характерны для световых лучей. Обычно тело участвует в теплообмене с другими телами, энергия которых, попадая извне на поверхность данного тела, частично поглощается, отражается и проходит сквозь тело. Суммарное излучение тела по всем видам волн тела называется *интегральным* или *полным тепловым потоком излучения*. Интегральный поток, испускаемый с единицы площади поверхности, называется *поверхностной плотностью потока интегрального излучения*:

$$q_n = \frac{dP}{dF}. \quad (3.118)$$

Отношение плотности лучистого потока, испускаемого в бесконечно малом интервале длин волн, к этому интервалу, называется *спектральной плотностью потока излучения*:

$$q_\lambda = \frac{dq}{d\lambda}. \quad (3.119)$$

Обозначим интегральные характеристики – поглощающую способность (A), отражающую способность (R), пропускающую способность (D), тогда уравнение теплового баланса примет вид:

$$P_A + P_R + P_D = P. \quad (3.120)$$

Тела, поглощающие всю падающую энергию, называются *абсолютно черными телами*, $A = 1$. Если поверхность поглощает лучи и имеет высокую поглощающую способность, $A = 0,95 - 0,98$.

Тела, для которых спектральная поглощающая способность не зависит от длины волны, называются *серыми*.

В реальных условиях все тела находятся в лучистом теплообмене. Каждое тело излучает и одновременно поглощает лучистую энергию от окружающих тел. Количество отдаваемой и воспринимаемой теплоты определяется разностью между количеством излучаемой и поглощаемой телом лучистой энергии. Такая разность отлична от 0. При одинаковой температуре тел вся система находится в термодинамическом равновесии.

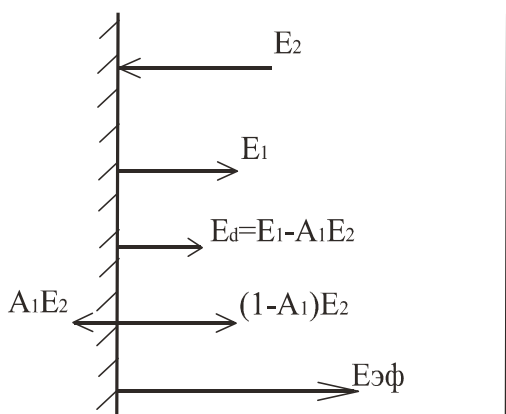


Рис. 3.21

В этом случае все тела системы также излучают и поглощают тепловую энергию, при этом для каждого тела приход энергии равен расходу. Если на тело извне попадает энергия, то с единицы его поверхности отводится лучистый поток энергии

E_1 [Вт/м²] – собственное излучение тела (рис 3.21).

Собственное излучение тела практически полностью определяется его температурой и физическими свойствами, однако обычно со стороны других тел на данное тело попадает лучистая энергия E_2 – падающее излучение. Часть этой энергии, равная A_1E_2 , поглощается телом, а другая часть отражается. Сумма собственного и отраженного излучений называется *эффективным излучением* – это излучение тела, которое, в принципе, измеряется прибором. Оно зависит от физических свойств и температуры не только данного тела, но и других окружающих его тел, а также от взаимного расположения их в пространстве:

$$E_{эф} = E_1 + (1 + A)E_2. \quad (3.121)$$

Результирующее излучение тел представляет собой разность между собственным излучением тела и той частью падающего излучения E_2 , которая поглощается данным телом:

$$E_p = E_1 - A_1 E_2, \quad (3.122)$$

где E_p определяет поток энергии, который данное тело передает к окружающим его телам в процессе лучистого теплообмена.

3.4.2. Основные законы теплообмена излучением

Тепловое излучение характеризуется пятью фундаментальными законами, практически полностью описывающими основные закономерности лучистого теплообмена.

Первый – *закон Планка* (точнее, соотношение), характеризует монохроматическую интенсивность излучения. Этот закон выражает соотношение между монохроматической (спектральной) интенсивностью излучения черного тела $I_{0\lambda}$ и длиной волны λ :

$$I_{0\lambda} = \frac{dP_0}{d\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (3.123)$$

где P_0 – полная плотность интегрального излучения черного тела, Вт/м³; $C_1 = 0,374 \cdot 10^{-15}$ Вт·м² – первая постоянная Планка; $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м К – вторая постоянная Планка.

Закон показывает, что спектральная интенсивность идеального излучателя является функцией длины волны излучения и температуры. Полная интенсивность излучения источника может быть получена интегрированием этого уравнения по λ .

На рис. 3.22 закон Планка изображен графически для температуры 6100 К (температура поверхности Солнца), 1600, 1100 и 550 К. Из графиков видно, что при 555 К (282 °С) тепловое излучение находится в области выше видимой части спектра, при 1100 К заметная часть излучения начинает смещаться в видимую область (тело имеет тусклый красный цвет).

При повышении температуры до 1600 К большая часть излучения приходится на видимую часть (тело светится ярче). При одной и той же температуре максимум излучения энергии достигается при определенном значении длины волны.

Соотношение между длиной волны λ и температурой T для максимального значения интенсивности излучения черного тела может быть получено дифференцированием формулы (3.123) по λ . Приравнявая производную $\frac{dI_{0\lambda}}{d\lambda}$ к нулю, получаем:

$$\lambda_{max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}. \quad (3.124)$$

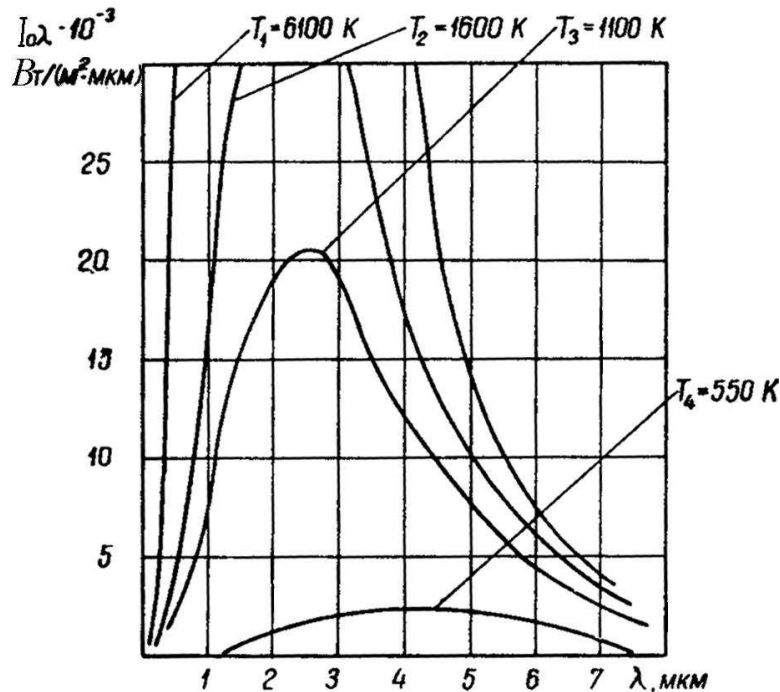


Рис. 3.22. Зависимость спектральной интенсивности излучения черного тела от длины волны λ и температуры T

Уравнение (3.124) является выражением *закона Вина*, на основании которого находится длина волны, соответствующая максимальной интенсивности спектрального излучения для любой температуры.

Закон Стефана – Больцмана связывает полную плотность излучаемого потока с температурой. Значение E_0 может быть получено интегрированием (3.123) во всем диапазоне длин волн:

$$E_0 = \sigma_0 T^4. \quad (3.125)$$

Константа σ_0 называется постоянной Стефана – Больцмана, или коэффициентом излучения черного тела: $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

В технике иногда эта константа обозначается как

$$C_0 = 10^8 \sigma_0 = 5,67 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Полный радиационный поток энергии пропорционален радиационной площади поверхности, поэтому для идеального излучателя с площадью поверхности F

$$P_0 = \sigma_0 F T^4. \quad (3.126)$$

Закон Кирхгофа рассматривает излучательные и поглощательные способности тела. Пусть реальное (серое) тело окружено со всех сторон идеальным излучателем, т.е. таким, который полностью поглощает всю падающую на него лучистую энергию, не отражая и не пропуская ее через

себя (черное тело). Тогда на серое тело черным телом излучается энергия E_0 , часть ее поглощается серым телом A_1E_0 . Но часть энергии E_1 , поглощенная серым телом, будет, в свою очередь, излучаться. Тогда уравнение лучистого теплообмена между этими телами: $E = A_1E_0 - E_1$. Если температура серого тела постоянна и равна температуре черного тела, теплообмен между ними отсутствует и $E = 0$:

$$A_1E_0 - E_1 = 0; \quad E_0 = E_1/A_1.$$

Полученное соотношение можно распространить на любые тела:

$$E_0 = \frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E_n}{A_n}. \quad (3.127)$$

Это уравнение является общим выражением *закона Кирхгофа*, из которого следует:

- отношение излучаемой энергии к энергии, поглощаемой поверхностью, одинаково для всех тел;
- поглощательная способность тела A не может быть больше единицы, поэтому максимальной излучательной способностью при любой температуре обладает черное тело;
- черное тело – наилучший излучатель и поглотитель лучистой энергии.

Излучательная способность (или степень черноты тела) ε есть отношение излучаемой энергии к излучению черного тела при равных температурах: $E = \varepsilon E_0$. Для такой модели энергия, поглощенная серым телом, $E_1 = A_1E_0$, а излучаемая им – $E_1 = \varepsilon_1E_0$. При тепловом балансе $A_1 = \varepsilon_1$, т.е. в случае теплового равновесия тел их поглощательная и излучательная способности равны.

Степень черноты определяется природой тела, состоянием его поверхности и температурой и равна нулю для белого тела. Для большинства материалов ε увеличивается с ростом температуры, для некоторых металлов и покрытий наблюдается обратная зависимость.

Коэффициенты черноты некоторых материалов приведены в табл. 3.6.

Закон Ламберта определяет яркость излучения по отдельным направлениям полусферического пространства. Согласно этому закону количество энергии, излучаемое элементарным участком поверхности dF_1 в направлении элемента dF_2 (рис. 3.23), пропорционально энергии, излучаемой по нормали $E_n dF_1$, умноженной на значение элементарного телесного угла $d\Omega$ и $\cos \varphi$, т.е.

$$dQ\varphi = E_n d\Omega \cos \varphi dF_1. \quad (3.128)$$

Таблица 3.6

Коэффициенты степени черноты

Материал и состояние поверхности	Температура, °С	Коэффициент черноты
Алюминий (тщательно полированная пластина)	200...600	0,04...0,06
Алюминий (сильно окислен)	35...500	0,2...0,31
Силуминовое литье (в печатной форме)	100...500	0,33...0,31
Силуминовое литье (в кокильной форме)	100...500	0,16...0,23
Дюралюминий Д-16	50...350	0,37...0,41
Сталь полированная	100	0,066
Сталь листовая холоднокатаная	93	0,075...0,085
Сталь листовая сильно окисленная	25	0,8...0,82
Сталь различных сортов после окисления	300...800	0,86...0,92
Латунь прокатная	22	0,06
Латунь прокатная и обработанная грубым наждаком	22	0,2
Латунь тусклая	50...350	0,22
Латунь хромированная полированная	100	0,075
Латунь торговая шлифованная	20	0,03
Медь, шабренная до блеска	22	0,072
Медь (пластина после нагрева до 600 °С)	200	0,57
Никель, проволока окисленная	70...200	0,44
Олово, луженое кровельное железо	100	0,07...0,08
Цинк, оцинкованное железо	25	0,23...0,27
Асбестовый картон, бумага, ткань	20...300	0,93
Бумага тонкая, наклеенная на лакированную пластину	20	0,92
Краски эмалевые, лаки различных цветов	20...100	0,92
Краски матовые различных цветов	100	0,92...0,96
Лак матовый черный	40...100	0,96...0,98
Муар серый, черный	20	0,86...0,90
Краска защитно-зеленая	20	0,90
Краска бронзовая	100	0,51
Краска алюминиевая	100	0,28
Краски алюминиевые разной давности с переменным содержанием алюминия	100	0,28...0,67
Алюминиевая фольга без масла	100	0,09
Алюминиевая фольга, покрытая слоем масла	100	0,56
Оксиды металлов	—	0,04...0,8

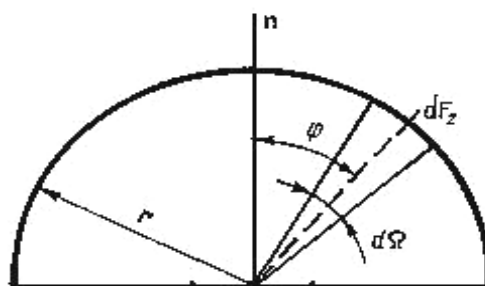


Рис. 3.23. К выводу закона Ламберта

Для определения величины E уравнение (3.128) необходимо проинтегрировать по поверхности полусферы, лежащей над плоскостью dF_1 , и полученное выражение сопоставить с законом Стефана – Больцмана. Выполнив эту процедуру, получим:

$$E_n = \frac{E}{\pi} = \frac{1}{\pi} C \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \frac{\varepsilon}{\pi} C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (3.129)$$

Из этого уравнения следует, что плотность потока излучения в направлении нормали в π раз меньше полной плотности потока излучения тела. После подстановки выражения для E_n в уравнение (3.128) последнее принимает вид:

$$dQ_\Phi = \frac{\varepsilon}{\pi} C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 d\Omega dF_1 \cos \varphi. \quad (3.130)$$

Это уравнение используется для расчета лучистого теплообмена между телами конечных размеров.

3.4.3. Лучистый теплообмен между телами

Введем следующие допущения: поверхности тел изотермичны; тела для тепловых лучей непрозрачны; среда между телами абсолютно прозрачна; вся лучистая энергия, поглощенная телами, переходит в тепловую. Пользуясь понятием эффективного излучения, можно получить следующее выражение для результирующего лучистого потока между плоскими параллельными поверхностями (рис. 3.24, а):

$$\left. \begin{aligned} q &= q_{1\leftrightarrow\Phi} - q_{2\leftrightarrow\Phi}; \\ q_{1\leftrightarrow\Phi} &= q_1 + (1 - A_1)q_{2\leftrightarrow\Phi}; \\ q_{2\leftrightarrow\Phi} &= q_2 + (1 - A_2)q_{1\leftrightarrow\Phi}. \end{aligned} \right\} \quad (3.131)$$

После алгебраических преобразований получаем:

$$q = \frac{q_1 A_2 - q_2 A_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}. \quad (3.132)$$

В силу закона Кирхгофа о равенстве поглощающей способности A и степени черноты ε имеем: $A_1 = \varepsilon_1$; $A_2 = \varepsilon_2$. После подстановки (3.132) в (3.126) получим:

$$q = \varepsilon_{II} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.133)$$

где ε_{II} – приведенная степень черноты системы тел;

$$\varepsilon_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

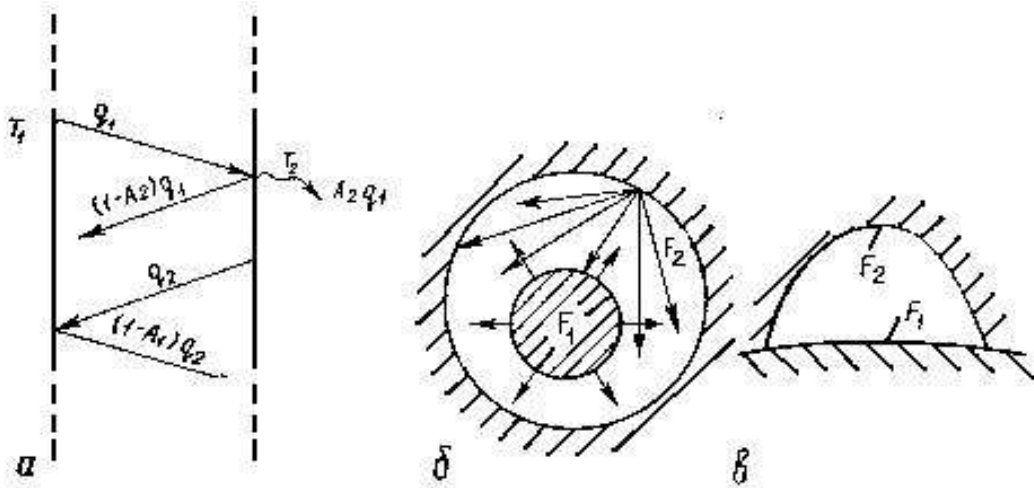


Рис. 3.24. Схема лучистого теплообмена:
а – между плоскостями параллельных неограниченных поверхностей;
б, в – между телами в замкнутом пространстве

Для оценки теплообмена излучением ограниченными поверхностями, когда не весь тепловой поток, излучаемый одним телом, попадает на второе тело, и наоборот (см. рис. 3.24, *б, в*), вводится понятие коэффициентов облученности (угловых коэффициентов) Φ_{12} и Φ_{21} . Они показывают, какая часть лучистого потока, излучаемая одним телом, попадает на другое, находящееся с первым в лучистом теплообмене:

$$\Phi_{12} = \frac{P_{12}}{P_1} = \frac{E_{12}}{E_1}; \quad \Phi_{21} = \frac{P_{21}}{P_2} = \frac{E_{21}}{E_2}.$$

Учитывая коэффициенты облученности, выражения (3.131) можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} q_{\text{эф}1} &= [q_1 + (1 - A_1)]\Phi_{12}; \\ q_{\text{эф}2} &= [q_2 + (1 - A_2)]\Phi_{21}. \end{aligned} \right\} \quad (3.134)$$

Подставив эти значения в (3.126), после преобразования получим выражение, аналогичное (3.133):

$$q_{12} = \varepsilon_{II} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.135)$$

где ε_{II} – приведенная степень черноты, которая учитывает не только степень черноты поверхностей тел, но и их коэффициенты облученности:

$$\varepsilon_{II} = \frac{1}{1 + \varphi_{12} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (3.136)$$

Результирующий тепловой поток от первой поверхности ко второй:

$$P_{12} = \varepsilon_n C_0 F \varphi_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (3.137)$$

3.5. Тепловая чувствительность элементов РЭС

Тепловая чувствительность – важная особенность материалов и элементов РЭС. Ее учет при конструировании является обязательным условием обеспечения качества и надежности РЭС. Достижение заданной долговечности РЭС, обеспечение необходимых функциональных характеристик в сложных климатических условиях, минимизация числа как постепенных, так и внезапных отказов возможны лишь при учете конкретных данных о тепловой чувствительности всех материалов и элементов, составляющих РЭС (табл. 3.7). При этом важно выделить те параметры, тепловые изменения которых в наибольшей степени влияют на работоспособность РЭС. Поэтому уже на ранних стадиях конструирования РЭС необходимо отбирать элементную базу и обеспечивать адекватную тепловую защиту.

Таблица 3.7

Тепловая чувствительность материалов и элементов РЭС

Конструкционные (металлы)	Материалы		Радиоэлементы	
	Радиоматериалы	Магнитные	Пассивные	Активные
Температурный коэффициент (ТК) линейного расширения	ТК линейного расширения	ТК линейного расширения	ТК изменения параметра элемента	Диапазон температур эксплуатации
ТК электрического удельного сопротивления	ТК поверхностного сопротивления ТК объемного сопротивления ТК тангенса угла потерь ТК диэлектрической проницаемости Диапазон температур эксплуатации	ТК магнитной проницаемости	Диапазон температур эксплуатации	Предельные температуры эксплуатации Тепловые сопротивления Тепловые емкости

3.5.1. Конструкционные материалы

Использование при конструировании металлических конструкционных материалов делает необходимым учет, в первую очередь, температурных коэффициентов линейного расширения и удельного электрического сопротивления.

Температурный коэффициент линейного расширения α_l (ТКЛР), K^{-1} – важный тепловой параметр, учитываемый при сопряжениях материалов:

$$TKl = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} = \alpha_l, \quad (3.138)$$

где l, T – линейный размер и температура материала.

Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления ρ металлов, K^{-1} :

$$TK\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (3.139)$$

Здесь коэффициент α_ρ положителен. Ферромагнитные металлы (железо, никель, кобальт) обладают повышенными значениями $TK\rho$.

Температурный коэффициент электрического сопротивления провода

$$TKC = \alpha_C = \alpha_\rho - \alpha_l. \quad (3.140)$$

Для чистых металлов $\alpha_\rho \gg \alpha_l$, поэтому $\alpha_C \sim \alpha_\rho$, однако для сплавов α_ρ имеет малое значение, поэтому необходимо учитывать и α_l . Для металлов α_l с повышением температуры увеличивается (зависимость $l = f(T)$ нелинейная). Легкоплавкие металлы по сравнению с тугоплавкими имеют высокие значения α_l .

В табл. 3.8 приведены значения α_ρ и α_l при $20^\circ C$ для некоторых металлов и их сплавов, используемых в практике конструирования РЭС.

Таблица 3.8

Значения α_ρ и α_l при $20^\circ C$ для некоторых металлов и их сплавов

Металл	$TKl \cdot 10^6, K^{-1}$	$TK\rho \cdot 10^4, K^{-1}$	Металл	$TKl \cdot 10^6, K^{-1}$	$TK\rho \cdot 10^4, K^{-1}$
Индий	25	47	Палладий	12	–
Олово	23	44	Титан	8	33
Кадмий	30	42	Хром	6,5	–
Ртуть	61	9	Молибден	5,1	46
Свинец	29	37	Вольфрам	4,4	46
Цинк	31	41	Припой ПОС-18, ПОС-30, ПОС-90	26	–
Магний	26	42	Припой ПОС-40	25	–
Алюминий	24	42	Сталь коррозионно-стойкая	12	–

Металл	$TKI \cdot 10^6, K^{-1}$	$TKp \cdot 10^4, K^{-1}$	Металл	$TKI \cdot 10^6, K^{-1}$	$TKp \cdot 10^4, K^{-1}$
Алюминий	24	42	Сталь коррозионно-стойкая	12	–
Серебро	19	40	Сталь низколегированная	12	30
Золото	14	38	Алюминиевые сплавы (АЛ, АМц-М)	23	–
Медь	16	43	Латунь	21	–
Бериллий	13	60	Бронза	18	–
Никель	19	65	Цинковый сплав ЦАМ4	27	38
Кобальт	12	60	Манганин	16,4	0,2
Железо	11	60	Сплав 36Н (инвар)	1,5	–

Температурный коэффициент линейного расширения для многих материалов заметно изменяется (увеличивается) с ростом температуры (рис. 3.25).

Температурные коэффициенты удельного сопротивления и линейного расширения сплавов могут заметно отличаться от соответствующих коэффициентов исходных металлов. На рис. 3.26 показана зависимость α_p от состава медно-никелевого сплава, на рис. 3.27 – влияние содержания хрома в железохромистых сплавах на температурный коэффициент линейного расширения.

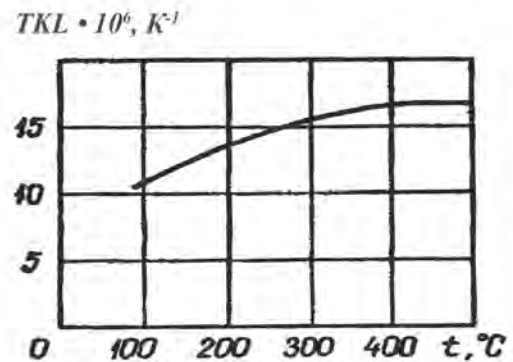


Рис. 3.25. Температурная зависимость ТКЛР для стали IX21H5T

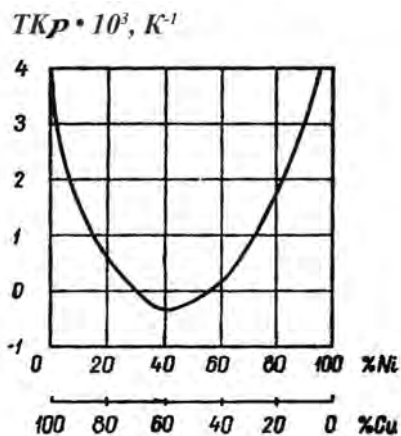


Рис. 3.26. Зависимость температурного коэффициента удельного сопротивления от состава медно-никелевого сплава

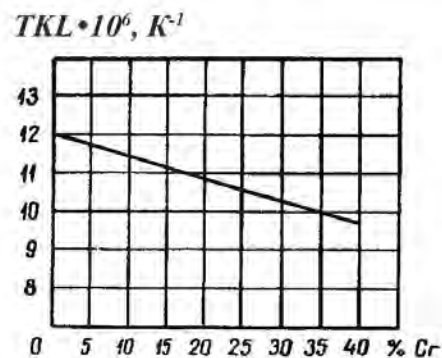


Рис. 3.27. Зависимость коэффициента линейного расширения сплава FeCr от содержания хрома

3.5.2. Пластические материалы

Пластическими называются материалы, представляющие собой композиции полимеров, которые при формовании находятся в вязкотекучем состоянии, при эксплуатации – в стеклообразном или кристаллическом. По поведению при формировании полимерные материалы подразделяются на две группы: термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты). Формование термопластов не сопровождается химическими реакциями. При формовании реактопластов протекают химические реакции отверждения. Полимеры – связующие компоненты пластмасс, в качестве которых чаще всего используются синтетические полимеры, смолы (аминоальдегидные, фенолоальдегидные, кремнийорганические, эпоксидные и другие) и их смеси.

К термопластам относят полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен, поливинилхлорид, полиметилметакрилат, полиамиды; к реактопластам – материалы на основе эпоксидных, карбамидных, кремнийорганических, фенолформальдегидных, полиэфирных смол.

К пластмассам высокой нагревостойкости относятся только термореактивные – кремнийорганические и полиамидные, среди термопластов – политетрафторэтиленовые.

Предельно допустимые для пластмасс температуры могут определяться как с точки зрения их деформации, так и изменения электрических параметров. Например, для условий механических воздействий предельные температуры составляют:

- для пластмасс на основе полистирола и полиметилметакрилата +75 °С;
- для ацетилцеллюлозы +90 °С;
- для карбамида +75 °С, меламинформальдегидов +150 °С;
- для фенопластов с древесными и тканевым наполнителями +120 °С;
- для фенопластов с асбестовым наполнителем +150 °С.

Для изоляционных материалов ГОСТ 8865-70 устанавливает следующие *классы нагревостойкости*: У (с номинальной температурой 90 °С), А(105 °С), Е(120 °С), В(130 °С), F(155 °С), Н(180 °С), С(свыше 180 °С).

К классу У, например, относятся материалы-изоляторы: хлопчатобумажная ткань, натуральный шелк, бумага, ацетилцеллюлозное и полиамидное волокна, пресшпан, фибра, древесина, анилинформальдегидные и карболитные смолы, полихлорвинил, полиэтилен, натуральный каучук.

К классу А – те же материалы, что и к классу У, но обработанные изоляционными веществами – масляно-смоляными лаками, полиэфирными и фенолформальдегидными смолами и др.

Класс Е включает в себя пластмассы с целлюлозным волокном и слоистые материалы на основе хлопчатобумажной ткани со смолами – меламинформальдегидные, фенолформальдегидные; бумажно-слоистые материалы и полиэфирные смолы.

Класс В содержит слюду, стекловолокно, асбест, слоистые материалы на основе стеклоткани, пластмассы с неорганическими наполнителями, термореактивные синтетические компаунды, битумно-масляные и полиуретановые лаки, шеллак.

К классу F относятся стекловолокнистая и асбестовая изоляции проводов, стеклоткани, смолы и лаки (алкидные, эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые, кремнийорганические).

Материалы класса Н – это слюда, фарфор, стекло, кварц, кремнийорганические лаки и смолы.

Класс С включает в себя небольшое количество термостойких материалов – фторопласт, электротехническая керамика.

В табл. 3.9 приведены сравнительные свойства отдельных групп пластмасс, где ориентировочно сопоставлены тепловые свойства термо- и реактопластов для первоначального их подбора на ранних этапах конструирования РЭС.

Таблица 3.9

Сравнительные свойства отдельных групп пластмасс

Материал	Рекомендуемая рабочая температура, °С
Термопласты	
Полиэтилен, поливинилхлорид, полиакрилаты, полистирол, полиамиды	до 100
Поли-4-метилпентан, фторопласты, поликарбонаты	100...150
Полиакрилаты, полиимиды, полифениленсульфид	150...200
Реактопласты (пресс-материалы)	
Меламиноформальдегидные (в том числе стекловолокнистые); премиксы полиэфирные	150...200
Фенолформальдегидные стекловолокнистые, эпоксидные наполненные	150...200
Эпоксидные стекловолокнистые, кремнийорганические стекловолокнистые, полиимидные стекловолокнистые	более 200

Наиболее распространенные тепловые параметры для пластмасс – нагревостойкость, интервал рабочих температур, теплостойкость и термостойкость.

Нагревостойкость – способность материала выдерживать действия повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком эксплуатации, без недопустимого ухудшения его свойств. *Термостойкость* характеризуется предельно допустимой температурой, при которой полимерный материал сохраняет состав и химическую структуру компонентов, *теплостойкость* – предельно допустимой температурой, при которой в условиях действия постоянной механической нагрузки деформация образца не превышает определенного значения.

К *реактопластам* относятся фенопласты, аминопласты, волокниты, стекловолокниты.

К *термопластам* относят полиамиды, полиэтилен, полистирол, полиметилметакрилат, винипласт, фторопласт-4, поликарбонат.

Неполярные полимеры (полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен) отличаются большим удельным объемным электрическим сопротивлением ($\rho_v = 10^{14} - 10^{16}$ Ом·м), малым тангенсом угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \beta < 10^{-4}$) и малой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 2,0 - 2,4$).

Полярные полимеры (полиимиды, полиэферы, поливинилхлорид и др.) имеют более низкие значения ρ_v , большие значения $\text{tg } \delta$, $\epsilon = 4 - 20$ и, как правило, более сильную зависимость этих характеристик от температуры (ϵ у неполярных полимеров, а также ρ_v у полярных резко уменьшаются с ростом температуры). У диэлектриков ионного строения (стекло) ϵ при увеличении температуры возрастает.

При комнатной и более низких температурах полярные полимеры имеют повышенное напряжение пробоя по сравнению с неполярными.

При повышении температуры удельное электрическое сопротивление электроизоляционных материалов, как правило, существенно уменьшается. Связь между тепловыми коэффициентами объемного удельного сопротивления $TK\rho$ и объемного сопротивления TKC имеет вид

$$TK\rho = TKC + TKI. \quad (3.141)$$

Температурные зависимости удельных объемных сопротивлений некоторых электроизоляционных материалов показаны на рис. 3.28.

Чувствительность удельного объемного сопротивления к температуре разных материалов можно оценить, например, по уменьшению ρ_v в интервале температур 20 – 100 °С. По этому показателю наиболее устойчивый среди рассмотренных материалов – поливинилхлорид, для которого этот параметр практически не изменяется в указанном диапазоне темпера-

тур. Для эпоксидного клея ρ_v уменьшается на 6 порядков, для эпоксидных компаундов – на 5, стеклотканей, гетинакса, лаков – на 3, стеклотекстолитов, эпоксидных смол – на 2 порядка. Кроме поливинилхлорида по этому параметру устойчивы также полиэтилен, стекло, лавсан.

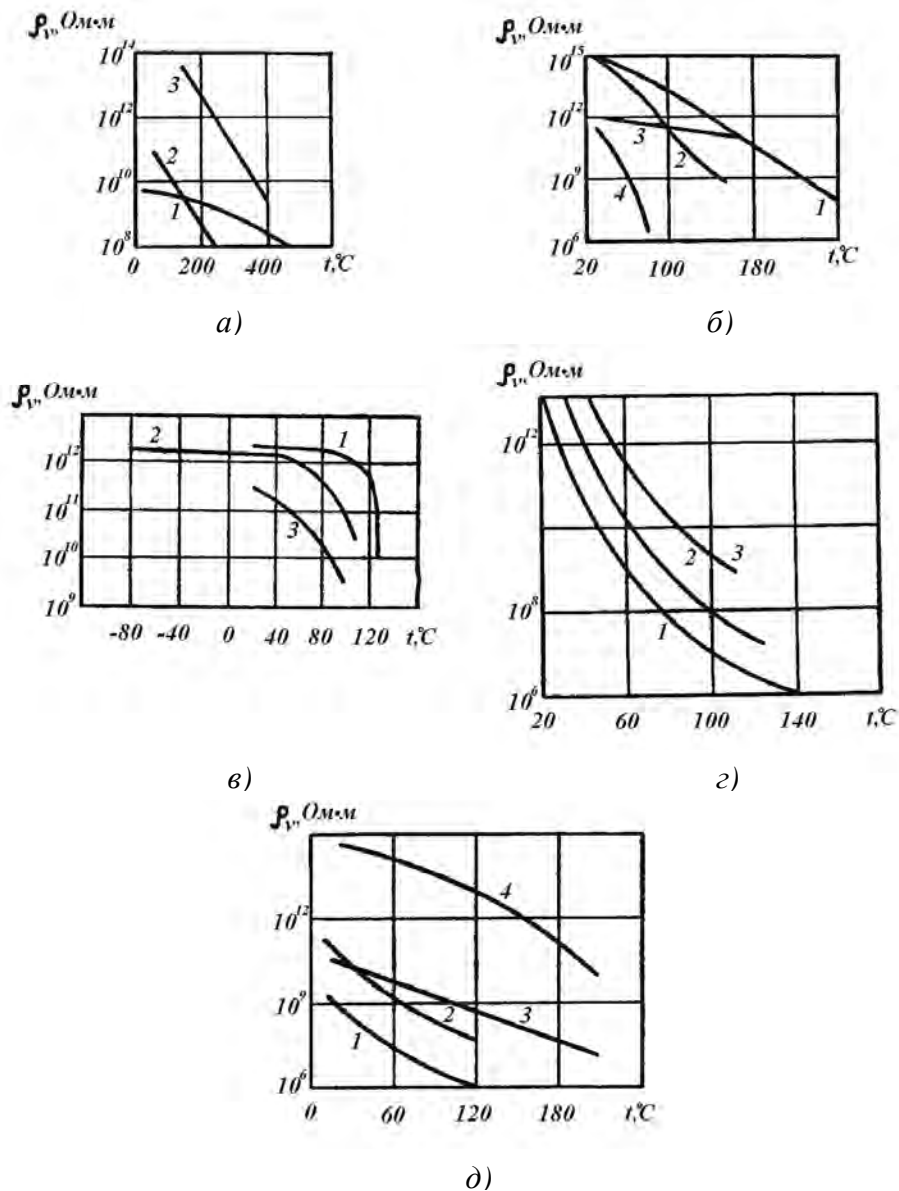


Рис. 3.28. Зависимость ρ_v от температуры: а) (1 – стеклоэмаль; 2 – силикатное стекло Na_2O ; 3 – силикатное стекло SiO_2); б) (1 – полиэтилентерефталат (лавсан); 2 – эпоксидная смола ЭД-20; 3 – кремнийорганическая пленка; 4 – эпоксидный клей); в) (1 – поливинилхлорид; 2 – полиэтилен высокого давления; 3 – бакелит); г) (1 – эпоксидный компаунд ЭП-49Д; 2 – пропиточный лак МЛ-92; 3 – полиэфиросмоляный лак ПЭ 970); д) (1 – хлопчатобумажная лакоткань ЛХМ; 2 – полиэфиросмоляная стеклоткань ЛСП; 3 – стеклотекстолит с эпоксидным связующим СТЭФ; 4 – стеклотекстолит с кремнийорганическим связующим СТК)

Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ электроизоляционных материалов от температуры сложная. У неполярных диэлектриков ϵ слабо зависит от температуры, уменьшаясь с увеличением T вследствие теплового расширения вещества. Для ионных кристаллов с ростом T значение ϵ увеличивается, т.е. показатель $TК\epsilon$ положителен (например, кристаллы каменной соли, корунда имеют, соответственно, $TК\epsilon = +150 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ и $TК\epsilon = +100 \cdot 10^6 K^{-1}$).

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости некоторых изоляционных материалов показаны на рис. 3.29.

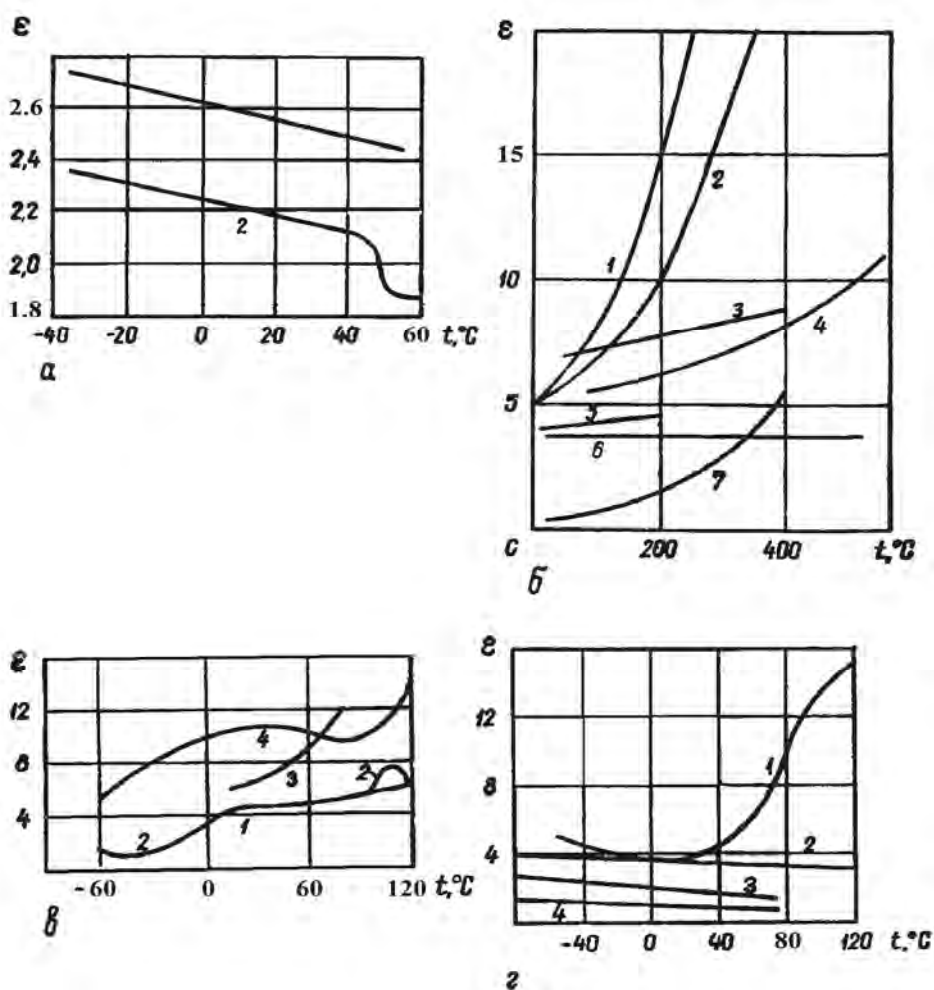


Рис. 3.29. Зависимость ϵ от температуры:

- а* (1 – полистирол; 2 – парафин); *б* (1 – пирекс; 2 – фарфор; 3 – бесщелочное стекло; 4 – новоминалекс; 5 – кристалл KCl_2 ; 6 – кварцевое волокно; 7 – ситалл); *в* (1 – лавсан (кристаллическое состояние); 2 – лавсан(аморфное состояние); 3 – эпоксидный клей; 4 – лавсановая пленка); *г* (1 – поливинилхлорид; 2 – полиимидная пленка; 3 – полипропиленовая пленка; 4 – полиэтилен высокого давления)

Как видно из графиков, у полистирола, полиэтилена, полиимида, полипропилена с увеличением температуры ϵ незначительно снижается; у стекол с повышением T диэлектрическая проницаемость существенно (в несколько раз) возрастает, что связано с улучшением условий ориентации дипольных молекул при высоких температурах. Некоторые материалы (лавсан, поливинилхлорид и др.) обладают сложным характером изменения ϵ : в одном температурном интервале $TK \epsilon$ отрицателен, в другом положителен, что особенно характерно для композиционного диэлектрика, представляющего собой смесь нескольких компонентов, имеющих каждый в отдельности различные зависимости ϵ от температуры. В этом случае, например, для двухкомпонентной композиции

$$TK\epsilon_{см} = \alpha TK\epsilon_1 + \beta TK\epsilon_2, \quad (3.142)$$

где $\epsilon_{см}$, ϵ_1 , ϵ_2 – диэлектрические проницаемости, соответственно, смеси, первого и второго компонентов; α , β – объемные концентрации компонентов.

Угол диэлектрических потерь (обычно указывают не сам угол, а его тангенс) – важный параметр диэлектрического материала. Угол диэлектрических потерь δ дополняет до 90° угол сдвига между током в изоляции и напряжением. Тангенс этого угла равен отношению активного I_a и реактивного I_p токов в изоляции:

$$\operatorname{tg}\delta = I_a/I_p. \quad (3.143)$$

Значения $\operatorname{tg}\delta$ для лучших электроизоляционных материалов, применяемых в технике высоких частот и высоких напряжений, составляют тысячные и десятитысячные доли единицы; для материалов более низкого электроизоляционного качества $\operatorname{tg}\delta$ может быть в десятки и сотни раз больше.

Как правило, $\operatorname{tg}\delta$ электроизоляционных материалов увеличивается с повышением температуры (такой же характер имеет изменение ρ с увеличением T). Для полярных диэлектриков наблюдается характерный максимум в зависимости $\operatorname{tg}\delta(T)$. При увеличении частоты f этот максимум сдвигается в область более высоких температур (аналогично тому, как при повышении T максимум зависимости $\operatorname{tg}\delta(f)$ сдвигается в область более высоких частот). В композиционных диэлектриках в связи с различными для разных компонентов физическими механизмами потерь имеют место усложненные зависимости $\operatorname{tg}\delta(T)$.

Температурные зависимости тангенса угла потерь для некоторых радиоматериалов показаны на рис. 3.30.

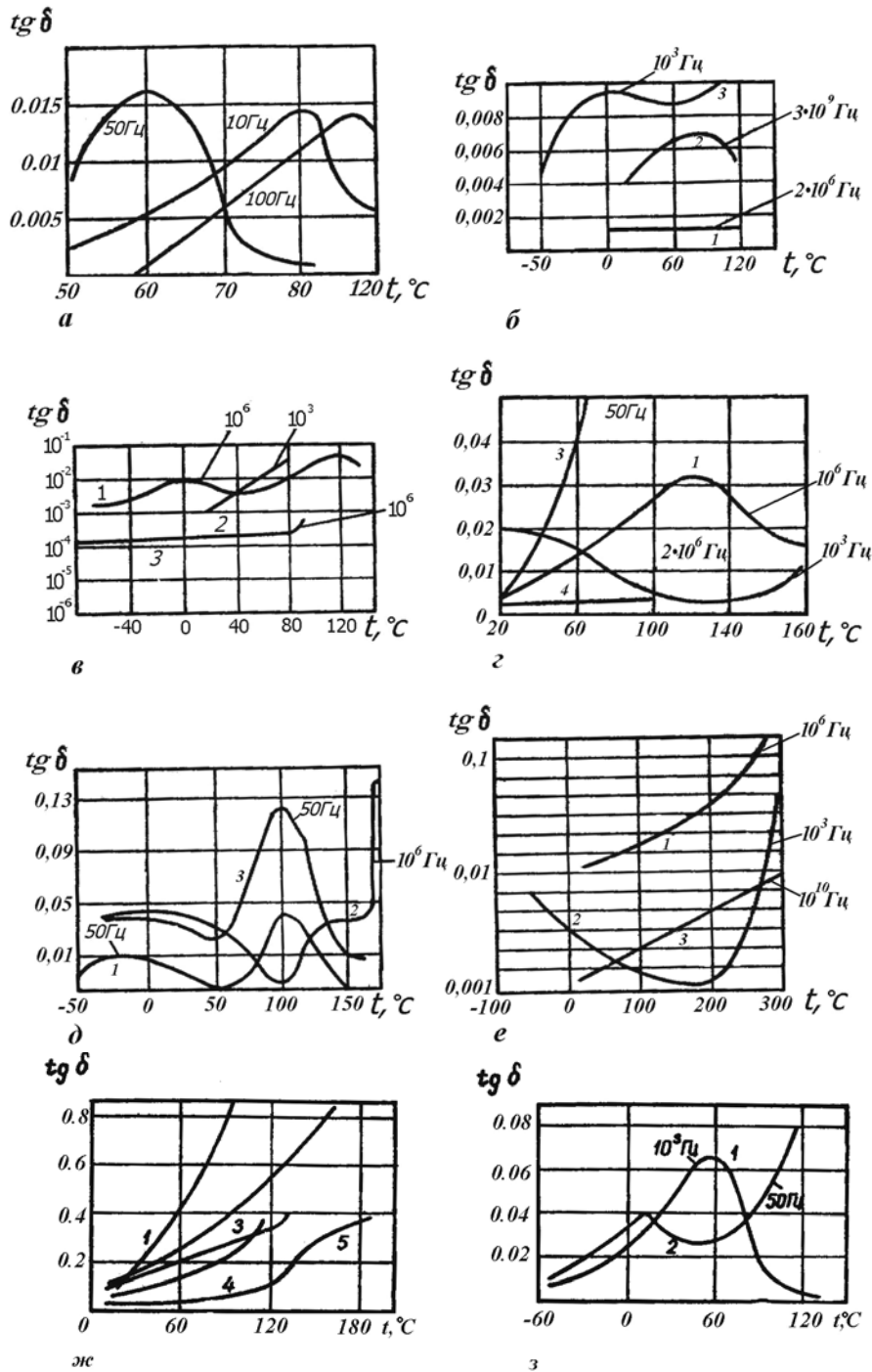


Рис. 3.30. Зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры: *a* – поливинилацетат на разных частотах; *б* (1 – кварцевое волокно; 2 – полиэтилен высокого давления); 3 – пленка полипропилена; *в* (1 – поливинилхлорид; 2 – парафин; 3 – полистирол); *г* (1, 2 – фторопласт-3; 3, 4 – слюда (мусковит)); *д* (1 – лавсан пленочный; 2 – эпоксидная смола ЭД-20; 3 – лавсан аморфный); *е* (1 – алюмоборосиликатное стекло; 2 – полиимитная пленка; 3 – ситалл); *ж* – на частоте 50 Гц (1 – гитинакс с фенольным связующим; 2 – стеклотекстолит СТ; 3 – полиэфирноэпоксидный лак ПЭ-970; 4 – гетенакс с эпоксидным связующим; 5 – стеклотекстолит СТЭФ); *з* (1 – полиэфирный пропиточный компаунд МБК-1; 2 – клей эпоксидный)

Электрическая прочность диэлектрика – напряженность электрического поля, при достижении которой в какой-либо точке диэлектрика происходит пробой:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (3.144)$$

где U_{np} – пробивное напряжение; h – расстояние между электродами.

Воздействие теплоты на диэлектрик приводит к так называемому тепловому пробую (в отличие от собственно «электрического» пробоя), который связан с нагревом изоляции в электрическом поле за счет электрических потерь. При тепловом пробое U_{np} зависит от частоты приложенного напряжения и от температуры окружающей среды (начальной рабочей температуры диэлектрика), существенно уменьшаясь при их возрастании.

Зависимость электрической прочности от температуры для некоторых электроизоляционных материалов показана на рис. 3.31.

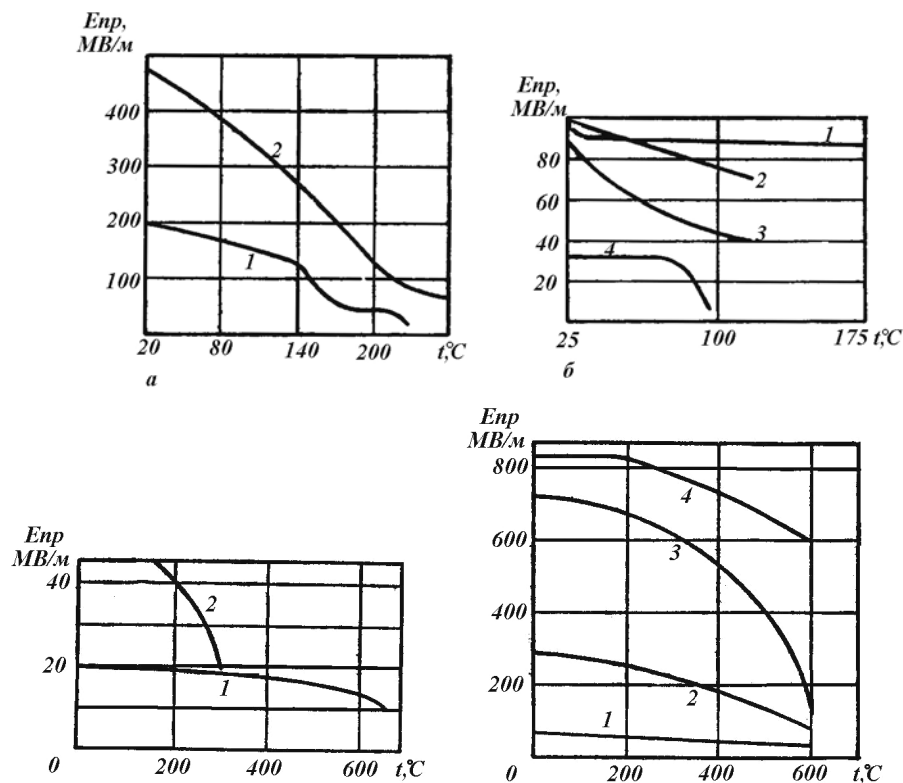


Рис. 3.31. Зависимость пробивного напряжения от температуры:
а (1 – лавсан; 2 – полиимидная пленка (25 мкм); *б* (1 – кремнийорганическая пленка; 2 – полиэфирноэпоксидный лак ПЭ-970; 3 – пропиточный лак МЛ-92; 4-фарфор);
в (1 – новомикалекс; 2 – стеклотекстолит СТ); *г* (1 миканит; 2 – ситалл; 3 – стеклокерамическая изоляция проводов; 4 – стекловолокнистая изоляция проводов)

3.5.3. Радиокерамические материалы

Согласно принятой классификации керамические радиоматериалы изготавливают:

- высокочастотные для конденсаторов (тип А);
- низкочастотные для конденсаторов (тип Б);
- высокочастотные для установочных изделий и других радиотехнических деталей (тип В).

В зависимости от области применения керамические радиоматериалы делятся на *классы*:

I – III – для типа А;

IV, V – для типа Б;

VI – X – для типа В.

Классы керамик, в свою очередь, состоят из *групп* (обозначаются строчными буквами русского алфавита). Группы подразделяются: по значению теплового коэффициента диэлектрической проницаемости $TK\epsilon$ (классы материалов А), по изменению диэлектрической проницаемости (классы материалов Б); по тепловому коэффициенту линейного расширения (классы материалов В).

Кроме того, в зависимости от рабочей температуры радиокерамика подразделяется на шесть *категорий*:

1 категория	(–60 ... +85) °С;
2 категория	(–60 ... +100) °С;
3 категория	(–60 ... +125) °С;
4 категория	(–60 ... +155) °С;
5 категория	(–60 ... +200) °С;
6 категория	(–60 ... +300) °С.

Для высокочастотной радиокерамики I – III классов применяются материалы на основе оксида титана, титанатов, станнатов и цирконатов. Класс I составляют изделия для высоковольтных и низковольтных, высокочастотных и низкочастотных конденсаторов, не определяющих стабильность частоты контуров. Материалы класса II предназначены для контурных, термокомпенсирующих и разделительных конденсаторов низкого и высокого напряжений высокой частоты.

Материалы II и III классов предназначены для высокостабильных конденсаторов при высоких и сверхвысоких частотах. В большинстве случаев эти материалы имеют малые значения $\text{tg } \delta$ и высокие ϵ . Значения $TK\epsilon$ отрицательные и большие по абсолютному значению. При высоких темпе-

ратурах знак $TK\epsilon$ изменяется на положительный – температура перемены знака тем выше, чем больше частота.

Для подложек микросхем применяют высокочастотные керамические материалы с заданным значением ϵ и малым $\text{tg}\delta$ (например, стекло-керамика – ситаллы).

Основные свойства некоторых керамик, используемых на СВЧ (в том числе температурные), приведены в табл. 3.10.

Зависимость электрической прочности от температуры для керамики Т-150 изображена на рис. 3.32, откуда видно, что с ростом частоты точка перегиба, соответствующая началу теплового пробоа, *смещается в сторону более высоких температур*.

Материалы для низкочастотных конденсаторов (классы IV и V) характеризуются повышенными ϵ , $\text{tg}\delta$ и небольшими значениями E_{np} . Для них характерна *нелинейная зависимость ϵ от температуры* (рис. 3.33). Материалы класса IV предназначены для импульсных конденсаторов и конденсаторов, используемых в цепях постоянного тока, материалы класса V – для конденсаторов с повышенной температурной стабильностью емкости. Для получения керамик упомянутых классов используются композиции титанатов стронция и висмута, а также сегнетоэлектрики на основе цирконата бария, стронция, кальция.

Таблица 3.10

Основные свойства некоторых керамик, используемых на СВЧ

ϵ при $f = 10^{10}$ Гц	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ при $f = 10^{10}$ Гц	$TK\epsilon \cdot 10^6, K^{-1}$	Класс, группа
6	6	+60	VI в
9	8	+100	VIII а
9	1	+100	VIII а
9	5	-70	III г
12	1	+30	III к
20	5	-50	III г
25	5	+30	III г
40	8	-70	III а
50	6	-330	III г
60	6	-300	III г
100	8	-500	II а
250	30	-3300	I а

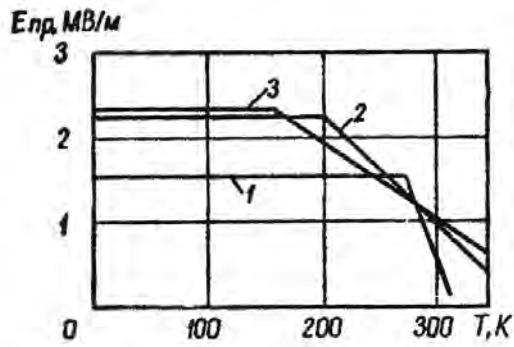


Рис. 3.32. Зависимость $E_{пр}$ от температуры для керамики Т-150 на различных частотах:
1 – 1,5 МГц; 2 – 1,0 МГц; 3 – 0,5 МГц

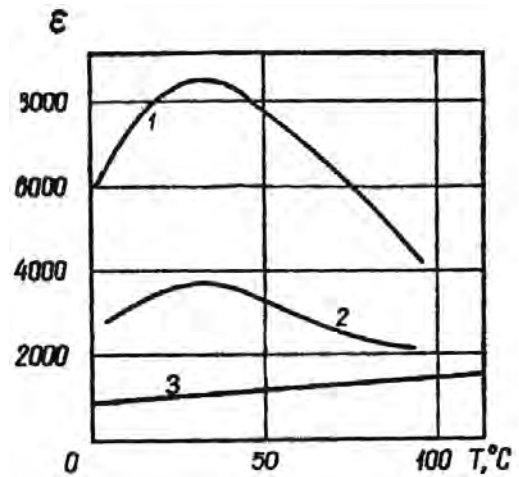


Рис. 3.33. Зависимость $\epsilon = f(T)$ для конденсаторной сегнетокерамики:
1 – Ва, Са(Тi, Sn, Zn)O₃;
2-то же, с примесями; 3 – состав 0,97 ВаСа (Тi, Sn)O₃ + 0,03 Са₂Сb₂O₅

Стеатитовая (на основе силикатов магния) керамика применяется в материалах, составляющих классы типа В, и характеризуется высокими значениями ρ (в том числе и при высокой температуре), малым $\text{tg} \delta$ и иногда – повышенным ТКЛР. На рис 3.34 приведены температурные зависимости $E_{пр}$, ρ , $\text{tg} \delta$ для керамики марки СК-1.

Глиноземистая керамика широко применяется для изготовления корпусов полупроводниковых приборов, высокочастотных, высоковольтных изоляторов, плат, интегральных схем. На рис. 3.35 приведены температурные зависимости характеристик для керамики марки УФ-46.

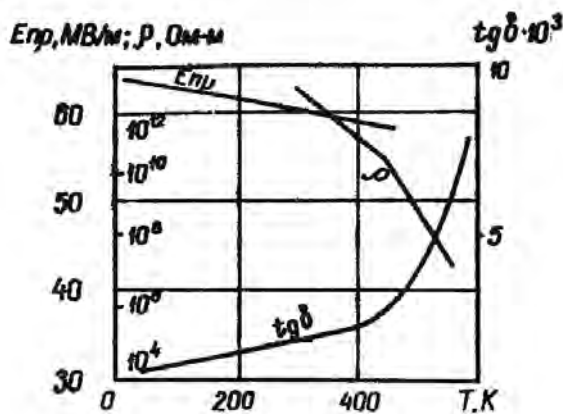


Рис. 3.34. Температурные зависимости $E_{пр}$, ρ , $\text{tg} \delta$ для керамики СК-1

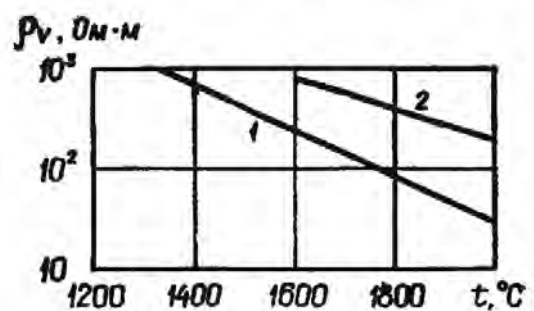


Рис. 3.35. Зависимость ρ_v от температуры: 1 – прозрачная; 2 – непрозрачная корундовая керамика

3.5.4. Магнитные материалы

Магнитные материалы – это ферромагнитные вещества и ферримагнитные химические соединения (ферриты). Для определения температурной зависимости основной характеристики этих материалов (магнитной проницаемости) пользуются температурным коэффициентом магнитной проницаемости, K^{-1} :

$$TK\mu = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT}. \quad (3.145)$$

Магнитная проницаемость магнитных материалов зависит от температуры (рис. 3.36) следующим образом: имеет максимум при температуре, близкой к температуре Кюри, а при дальнейшем ее повышении резко падает (материал перестает быть магнитным).

Температура Кюри (тК) у ферримагнетиков значительно ниже, чем у ферромагнетиков, и находится в пределах 100 – 500 °С (тК существенно ниже температуры плавления материала).

К магнитным элементам относятся железо, никель, кобальт, гадолиний; к магнитным ферроматериалам – их сплавы, а также сплавы этих элементов, содержащие некоторые неферромагнитные компоненты (В, Р, С, S, Mn, Mg, Be, Cr и др.).

Значения температуры Кюри магнитных элементов, их сплавов и ферритов приведены в табл. 3.11.

Повышение температуры магнитных материалов расстраивает ориентацию магнитных моментов атомов внутри домена, в результате чего уменьшается намагниченность насыщения I_S . Условие $I_S = 0$ соответствует температуре Кюри.

Температура оказывает значительное влияние на магнитные материалы, особенно на ферримагнетики (рис. 3.37).

Ферриты имеют низкую температуру Кюри, и поэтому их свойства существенно зависят от температуры: у большинства марок ферритов температура Кюри не превышает 200 – 300 °С. Это ограничивает верхний предел рабочей температуры $T_{раб}$, так как в непосредственной близости от тК магнитные свойства всех ферритов резко ухудшаются. Верхним пределом

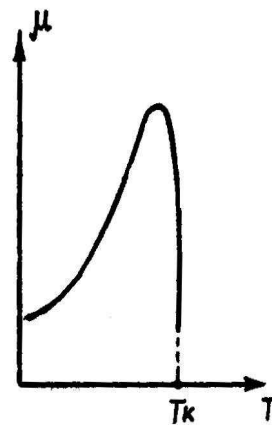


Рис. 3.36. Типичная зависимость μ ферромагнитных материалов от температуры

рабочей температуры ферритов принято считать такое значение, при котором начальная магнитная проницаемость составляет 80 % ее номинального значения.

Таблица 3.11

Значения температуры Кюри

Элементы	тК, °С	Соединения Ni	тК, °С	Соединения Mn, Cr, Ag	тК, °С
Co	1130	Ni ₃ Mn	470		
Fe	770	Ni ₂ Mg	235	Mn ₄ N	470
Ni	358	Соединения Fe		MnSb	320
Gd	16	Fe ₂ B	739	CrO ₂	116
Соединения Co		Fe ₂ O ₃	620	CrFe	100
Co ₂ B	510	Fe ₂ O ₄	575	AgF ₂	110
Co ₄ Zn	490	Fe ₃ Al	500	MnP	25
CoZn	125	Fe ₃ P	420		
Ферриты					
		Fe ₃ N	275	NiOFe ₂ O ₃	590
				MnOFe ₂ O ₃	510
		Fe ₃ C	215	PbOFe ₂ O ₃	435
				AlOFe ₂ O ₃	340
		Fe ₃ Si ₂	90	Nd ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	300
				Er ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	255
				BeOFe ₂ O ₃	190

Для ферритов температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости

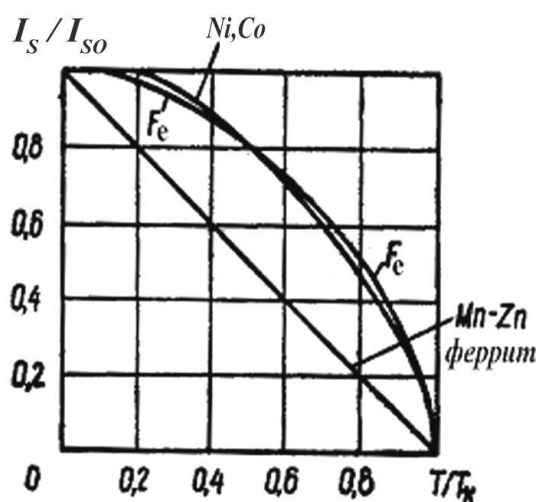


Рис. 3.37. Температурная зависимость намагниченности насыщения для некоторых материалов: I_{s0} – насыщение при 0 Кельвина

$$TK\mu = \frac{\mu_{T_2} - \mu_{T_1}}{\mu_{T_1} (T_2 - T_1)}, \quad (3.146)$$

где T_1, T_2 – соответственно начальная и конечная границы температурного диапазона, в пределах которого $\mu = f(t)$ линейна; μ_{T_1}, μ_{T_2} – проницаемость при температурах T_1 и T_2 , соответственно.

Для ферритов введен также относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости α_μ , представляющий собой отношение температурного коэффициента $TK\mu$ к значению проницаемости μ_{T_1} при начальной температуре T_1 :

$$\alpha_{\mu} = \frac{TK\mu}{\mu_{T_1}} = \frac{\mu_{T_2} - \mu_{T_1}}{\mu_{T_1}^2 (T_2 - T_1)}. \quad (3.147)$$

Магнитотвердые сплавы применяются для постоянных магнитов, электронных приборов и электроакустических устройств. Они характеризуются высокой коэрцитивной силой¹ и малой магнитной проницаемостью, обладают высокой остаточной индукцией и максимальной магнитной энергией. Для их намагничивания и размагничивания требуется также большая магнитная энергия. В их группу входят (не считая железа) сплавы типа альни (Al – Ni), альниси (Al – Ni – Si), альнисит и (Al – Ni – Si – Ti) и альнико (Al – Ni – Co).

Температурный коэффициент линейного расширения TKl в интервале 20 – 300 °С составляет $(11 \dots 13)10^{-6} \text{ K}^{-1}$,

К магнитомягким материалам относятся сплавы с высокой проницаемостью, небольшими потерями энергии на перемагничивание, малыми потерями на вихревые токи. В области низких и повышенных частот преимущественно применяются ферромагнитные сплавы, в области высоких частот и импульсной технике – ферриты.

К магнитомягким материалам относятся: электротехническое железо, листовая электротехническая сталь (например, Э310), специальные сплавы – пермаллой (например, 79НМ), пермендюр, перминвар, альсифер, ферриты и др.

Параметры некоторых магнитомягких сплавов приведены в табл. 3.12.

Тепловой коэффициент магнитной проницаемости $TK\mu$ для рассматриваемых материалов имеет широкий диапазон – приблизительно $(50 \dots 200) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Таблица 3.12

Параметры некоторых магнитомягких сплавов

Марка сплава	$\mu_{нач} \cdot 10^{-3}$, Тл/(А/м)	$\mu_{макс} \cdot 10^{-3}$, Тл/(А/м)	ТКЛР · 10 ⁶ , К ⁻¹ , при температуре, °С					λ , Вт/(м·К)	С, Дж/(кг·К)
			20 – 100	120 – 200	20 – 300	120 – 400	120 – 500		
79НМ	15,4	80	12	13	13,4	14	14,5	32	480
80НХС	17	80	12,3	13,0	13,5	14	14,6	32	–
45Н	1,7	15,4	8,2	8,1	7,5	7,7	9,0	12	480
50Н	1,75	19	8,9	9,2	9,7	9,2	9,4	14	480
Э11	0,19	4,8	12	–	–	–	–	28	420

¹ от лат. *coercitio* – удерживание

Как правило, материалы с большими значениями μ имеют большие $TК_{\mu}$.

Для ферритов, применяемых в импульсных режимах, чувствительность магнитной проницаемости к температуре оценивается отношением $\Delta\mu/\mu$ в определенном интервале температур (табл. 3.13) относительно $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ферромагнитные сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса используются в логических и переключающих элементах, а также в запоминающих устройствах средств вычислительной техники. Марки ферритов: 0,12ВТ; 0,27ВТ; 0,44ВТ; 1,5ВТ; 2ВТ и др. Характеристики ферритов приведены на рис. 3.38 – 3.40.

Таблица 3.13

Чувствительность магнитной проницаемости к температуре

Марка феррита	$\Delta\mu/\mu$, %	Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Импульсная магнитная проницаемость $\mu_{и}$
1500 НМ1	± 20	$-60\dots+85$	1700 ± 300
1000 НМ3	± 15	$-60\dots+85$	1400 ± 200
НМИ2	± 12	$-50\dots+60$	600 ± 50
300 ННИ	± 30 -45	$-60\dots+85$ $-40\dots+20$	300 ± 50
350 ННИ	$+30$	$+20\dots+85$	360 ± 75

Примечание. Данные приведены для марганец-цинковых ферритов

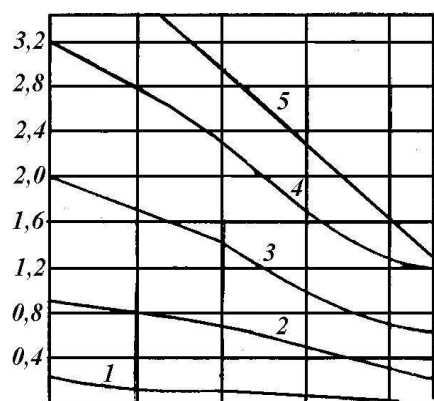


Рис. 3.38. Зависимость коэрцитивной силы от температуры для ферритов: 1 – 0,12ВТ; 2 – 0,7ВТ; 3 – 1,3ВТ; 4 – 2ВТ; 5 – 2,3ВТ

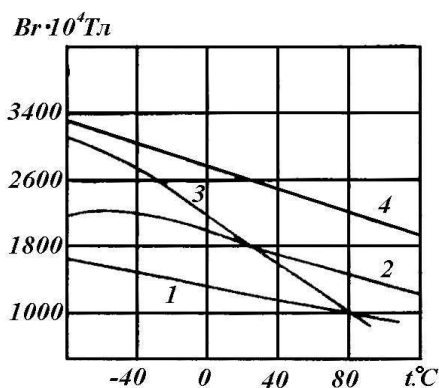


Рис. 3.39. Зависимость остаточной индукции от температуры для ферритов: 1 – 0,37ВТ; 2 – 2ВТ; 3 – 0,12ВТ; 4 – 1,75ВТ

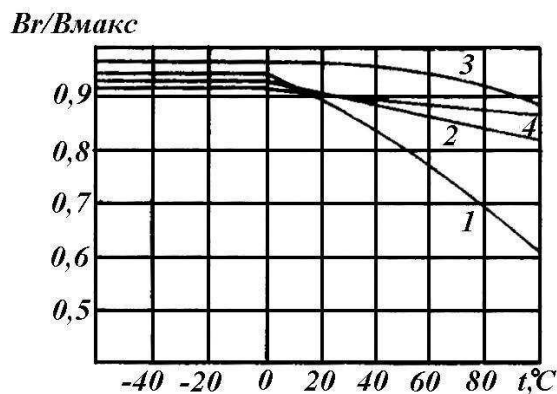


Рис. 3.40. Зависимость коэффициента прямоугольности для ферритов: 1 – 0,12ВТ; 2 – 2ВТ; 3 – 0,44ВТ; 4 – 0,75ВТ

3.5.5. Резисторы

Тепловые характеристики резисторов могут быть оценены температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который показывает относительное изменения сопротивления при изменении температуры на 1°С (К). Значение ТКС резистора зависит в основном от температурного коэффициента материала резистивного элемента, К⁻¹:

$$TKC = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\Delta T}. \quad (3.148)$$

Значения ТКС могут быть отрицательными или (и) положительными в зависимости от интервала рассматриваемых температур и материала элемента. Менее выражена зависимость ТКС от номинального значения сопротивления и мощности резистора. Среднее значение ТКС для постоянных непроволочных резисторов находится в диапазоне $\pm(0,25...25) \cdot 10^{-4} \text{К}^{-1}$, для проволочных постоянных резисторов $TKC = (-5...10) \cdot 10^{-4} \text{К}^{-1}$; для прецизионных проволочных $TKC = \pm(0,15...1,5) \cdot 10^{-4} \text{К}^{-1}$; для непроволочных переменных $TKC = \pm(100...2000) \cdot 10^{-6} \text{К}^{-1}$, для проволочных $TKC = \pm(50...1000) \cdot 10^{-6} \text{К}^{-1}$. Предельные положительные температуры окружающей среды для резисторов (металлопленочных, металлодиэлектрических и др.) 100 – 300 °С.

Тепловые параметры резисторов приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Тепловые параметры резисторов

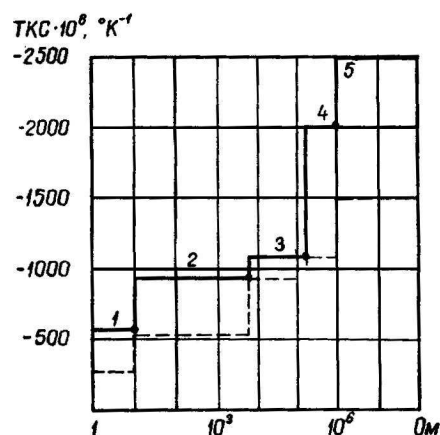
Вид резистора	Тип резистора при различных сопротивлениях, °С	Температурный коэффициент сопротивления ТКС·10 ⁶ , К ⁻¹ , при T, °С		Температура окружающей среды T _{окр} , °С
		-60...+25	+25...T _{np}	
1	2	3	4	5
Металлопленочные	МЛТ, ОМЛТ			-60...+125
	R < 10 ⁴	+1200	±600	
	1,1·10 ⁴ ...10 ⁶	+1200	±700	
	R > 10 ⁶	+1200	±1000	
	МТ			-60...+200
	R < 10 ⁴	+1200	±600	
	1,1·10 ⁴ ...10 ⁶	+1200	±700	
	R > 10 ⁶	+1600	±1000	
	С2-6			-60...+315
	R < 0,51·10 ⁶	+1200	±700	
	R > 0,51·10 ⁶	+1600	±1000	
	С2-24			-40...+85
	2,7...10 ⁶	±500	±500	
R > 10 ⁶	±1800	±1800		

Окончание табл. 3.14

1	2	3	4	5
Углеродистые	BC-0,125			-60...+125
	$R < 0,24 \cdot 10^6$	-1200	-800	
	$R > 0,24 \cdot 10^6$	-2000	-1200	
	BC-1			-60...+125
	$9,1 \cdot 10^5 \dots 0,9 \cdot 10^6$	-1000	-700	
	$> 0,9 \cdot 10^6$	-2000	-1200	
	УЛН-0,25 УЛИ-0,5			-60...+125
	$< 9,7$	-300	-300	
	$10 \dots 0,2 \cdot 10^6$	-500	-500	
$> 0,2 \cdot 10^6$	-1000	-1000		
Объемные композиционные	TBO-0,25...2			-60...+155
	$< 10^5$	-1800	-900	
	C4-1 0,25...2			-60...+350
	< 18	+2000	+1000	
> 18	-2000	-1500		
Металлопленочные прецизионные	БЛП			-60...+100
		-(120...200) при $T = 25 \dots 100$	-200 при $T = -60 \dots 25$	
Металлопленочные высокочастотные	C2-10	± 600	-300...400	-60...+125
Тонкослойные сверх- высокочастотные	C6-4	± 500	± 500	-10...+125
Металлопленочные микромодульные	C2-12	± 1000	± 1000	-60...+125
Пленочные композиционные	C3-2			
	$10 \dots 10^5$	-1200	-1000...+200	-60...+125
	$10^5 \dots 10^6$	-1600	± 1200	
	КЛМ			
	< 10 ГОм	-2000...+1000	± 2000	-60...+100
> 10 ГОм	-2500...+1500	± 2500	-60...+70	
Постоянные проволочные	ПЭВ	± 500	± 500	-60...+155
	МРГч	± 60	± 30	-60...+100
Переменные непроволочные лакопленочные	ВК	2000	2000	-40...+70
	СП I, II, III, IV	$\pm 1000 \dots \pm 2000$	$\pm 1000 \dots \pm 2000$	-60...+125
Керметные	СПЗ-45			-60...+155
	$R < 0,68 \cdot 10^3$	± 100	± 100	-
	$R > 0,68 \cdot 10^3$	± 500	± 500	-
	$R < 10^6$	± 250	± 250	-
	$R > 10^6$	-2000	-2000	-
Объемные композиционные	СПО	-(1500...2000)	-(1500...2000)	-60...+125
Подстроечные (печатный монтаж)	СП5-16В	± 400	± 400	-60...+155
Подстроечные (навесной монтаж)	СП5-1В	± 150	± 150	-60...+125
<i>Примечание.</i> T_{np} – предельная положительная температура окружающей среды.				

Изменения ТКС непроволочных пленочных углеродистых резисторов (типа С1-4) в зависимости от номинальных значений сопротивления показаны на рис. 3.41.

Рис. 3.41. Гистограмма распределения ТКС по номиналам для резисторов типа С1-4 мощностью 0,125 Вт (сплошной линией обозначена температура среды от -60 до +25 °С; пунктирной – (+25...+125) °С



На гистограмме пять значений ТКС соответствуют номинальным значениям сопротивления резисторов: 1 – до 10 Ом включительно; 2 – до 9,1 кОм включительно; 3 – до 240 кОм включительно; 4 – до 1 МОм включительно; 5 – свыше 1 МОм.

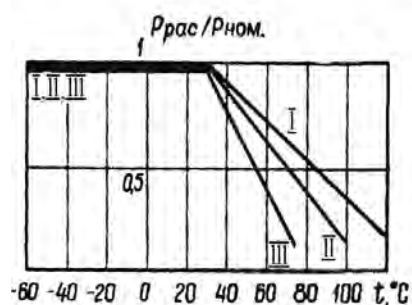
Наиболее устойчивы к воздействию температуры среды непроволочных резисторов тонкослойные – углеродистые, металлодиэлектрические, металлоокисные.

В качестве функционально-геометрического критерия оценки качества резистора используется удельная мощность – отношение номинальной мощности рассеяния $P_{ном}$ к теплоотдающей поверхности резистора S , Вт/см²:

$$P_{уд} = \frac{P_{ном}}{S}. \quad (3.149)$$

Зависимости отношения рассеиваемой мощности $P_{рас}$ к номинальной $P_{ном}$ от температуры для трех групп переменных композиционных резисторов марки СП с разными температурными интервалами эксплуатации показаны на рис. 3.42.

Рис. 3.42. Зависимость эффективности теплового рассеяния резисторов типа СП от температуры: I – группа от -60 до +125 °С; II – группа от +60 до +100°С; III – группа от -40 до +70 °С



Проволочные резисторы менее чувствительны к температуре. Из рис. 3.43 следует, что низкие значения ТКС и малые изменения сопротивления резистора можно получить лишь при недогрузке по мощности на 50 и даже 70 % от номинального значения.

С увеличением окружающей температуры показатели надежности резисторов снижаются (рис. 3.44). Сохранение интенсивности отказов резистора при увеличении его нагрузки на 40 % может быть обеспечено снижением его эксплуатационной температуры, например, от 100 до 60 °С.

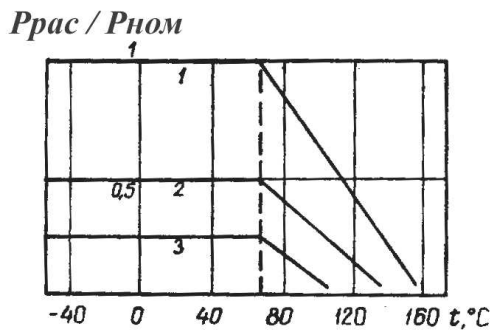


Рис. 3.43. Зависимость эффективности теплового рассеяния резисторов типов С5-5 и С5-5Т от температуры:
 1 – резисторы с допусками $\pm 1\%$, 2% и 5% ; 2 – то же, $\pm 0,2\%$ и $\pm 0,5\%$;
 3 – то же, $\pm 0,05\%$ и $0,1\%$

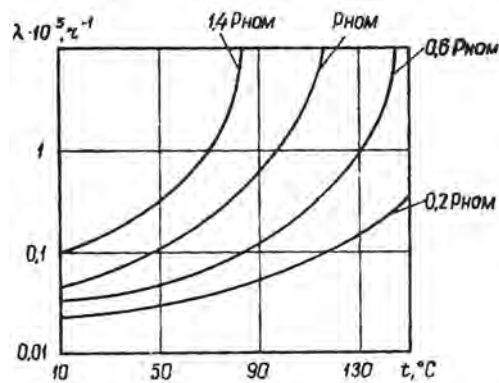


Рис. 3.44. Зависимость интенсивности отказов композиционных резисторов от температуры при различных коэффициентах нагрузки

3.5.6. Конденсаторы

Тепловые свойства конденсаторов могут быть оценены температурным коэффициентом емкости (ТКЕ), допустимым диапазоном температур эксплуатации, зависимостью интенсивности отказов от температуры и др.

Емкость C конденсатора зависит от его температуры T , что обусловлено изменением диэлектрической проницаемости диэлектрика, линейного расширения металла обкладок и линейного расширения диэлектрика. Зависимость емкости от температуры чаще нелинейная.

Температурный коэффициент емкости, K^{-1} :

$$TKE = \frac{\Delta C}{\Delta T} \frac{1}{C} \quad \text{или} \quad TKE = \frac{C_2 - C_1}{(T_2 - T_1)C_1}, \quad (3.150)$$

где C_1 , C_2 – емкость при температуре, соответственно, T_1 и T_2 (обычно предельная температура эксплуатации).

Коэффициент ТКЕ может быть положительным или отрицательным (или близким к нулю). Тепловые параметры конденсаторов приведены в табл. 3.15. Керамические конденсаторы имеют большой диапазон значений ТКЕ при температуре окружающей среды от минус 60 до 300 °С. Стекло-эмалевые конденсаторы имеют температурный диапазон от минус 60 до 155 °С, а стеклокерамические – до 200 °С. Слюдяные конденсаторы эксплуатируются до +70 °С, а бумажные – от минус 60 до 125 °С. Металлобумажные конденсаторы имеют температурный диапазон несколько меньше – предельная температура +100 °С. Полистирольные конденсаторы предназначены для эксплуатации при температурах от минус 60 до +85 °С, а фторопластовые – от минус 60 до +200 °С.

Импульсные конденсаторы имеют малый интервал рабочих температур – от минус 10 до +60 °С.

Таблица 3.15

Тепловые параметры конденсаторов

Диапазон температур	Керамические конденсаторы, ТКЕ·10 ⁻⁶ К ⁻¹								
	П100	П60	П33	МПО	М33	М47	М75	М150	М220
20 – 85 °С	+100	+60	+33	0	-33	-47	-75	-150	-220

Окончание табл. 3.15

Диапазон температур	Керамические конденсаторы, ТКЕ·10 ⁻⁶ К ⁻¹					
	М330	М470	М750	М1500	М2200	М3300
20 – 85 °С	-330	-470	-750	-1500	-2200	-3300

Интервал рабочих температур алюминиевых электролитических конденсаторов значительно меньше и составляет:

- 10 ... +60 °С – группа Н (неморозостойкие);
- 40 ... +60 °С – группа М (морозостойкие);
- 50 ... +60 °С – группа ПМ (повышенная морозостойкость);
- 60 ... +85 °С – группа ОМ (особая морозостойкость).

Среди электролитических конденсаторов лучшие электрические характеристики имеют танталовые и, особенно, оксидно-полупроводниковые конденсаторы (рабочие температуры – от минус 80 до 125 °С).

Зависимость емкости конденсаторов от температуры показана на рис. 3.45.

На рис. 3.45, а изображены зависимости $\frac{\Delta C}{C} = f(T)$ для конденсаторов типа Н, у которых параметр ТКЕ не нормируется. Число, стоящее после буквы Н, означает, что изменение емкости в интервале допустимых температур (от минус 60 до 85 °С) не должно превышать, например, 70 %

относительно емкости, измеренной при +20 °С для конденсаторов типа Н70 (положительные значения ТКЕ не регламентируются).

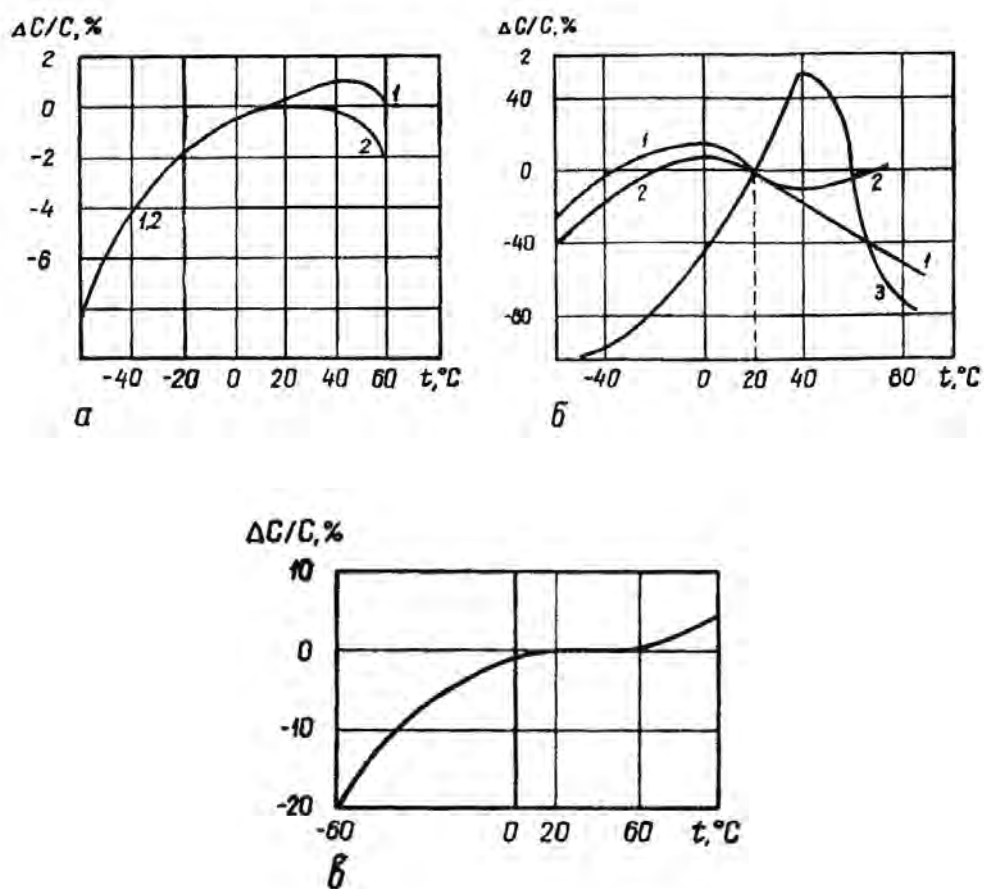


Рис. 3.45. Зависимость емкости конденсаторов от температуры:
 а – герметизированных металлобумажных (1 – однослойные; 2 – многослойные);
 б – керамических низкочастотных (1 – тип Н70; 2 – тип Н30; 3 – тип Н90);
 в – жидкостных танталовых (тип ЭТО)

Для бумажных конденсаторов КБГ допускается изменение емкости до $\pm 10\%$ относительно измеренной при температуре +20 °С при изменении температуры от минус 40 до 70 °С; для электролитических конденсаторов К53-1А изменение емкости при температуре 125 °С не должно превышать +15 %, а при $T = -80$ °С не должно превышать -15 % относительно емкости, измеренной при 20 °С.

Зависимость емкости электролитических конденсаторов от температуры существенная. Как правило, номинальная емкость может возрасти на 20 – 30 % при повышении температуры от номинальной до максимальной, а при снижении температуры до минимальной она может уменьшаться почти в 2 раза.

Тангенс угла потерь конденсаторов имеет характерную температурную зависимость (рис. 3.46). Наибольшие потери имеют алюминиевые электролитические конденсаторы ($\text{tg}\delta = 0,1 - 0,3$), наименьшие – вакуумные конденсаторы ($\text{tg}\delta = 10^{-5}$). Например, у металлобумажных герметизированных конденсаторов МБГЧ-1 при $t = 20^\circ\text{C}$ (см. рис. 3.46) $\text{tg}\delta = 0,01$; при $t_1 = -60^\circ\text{C}$ $\text{tg}\delta = 0,03$, при $t_2 = +70^\circ\text{C}$ $\text{tg}\delta = 0,015$.

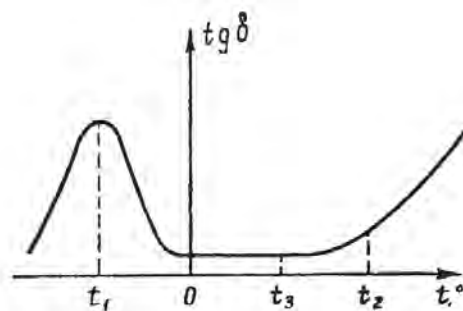


Рис. 3.46. Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры конденсаторов

Температура окружающей среды влияет на надежность и допустимое напряжение. Зависимость допустимого напряжения от срока службы и температуры среды для металлобумажных конденсаторов типа К42-2 отражена в табл. 3.16, где приведены максимально допустимые напряжения на конденсаторах в зависимости от температуры эксплуатации и от фактического срока службы конденсаторов.

Таблица 3.16

Зависимость допустимого напряжения от срока службы и температуры среды для металлобумажных конденсаторов типа К42-2

Номинальное напряжение, В	Срок службы, ч									
	5000		1000			500			50	
	Температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$									
	До 70	70...85	До 70	70...85	85...100	До 70	70...85	85...100	До 85	85...100
160	160		170			200				
250	250	200	300	230	130	350	250	160	300	200
400	400	250	420	350	200	500	400	250	500	400
630	630	500	700	550	350	750	630	400	700	650
1000	1000	800	1100	900	700	1200	1000	750	1200	900
1600	1600	1300	1700	1500	900	1800	1600	1000	1700	1200

Срок службы T_{cl} конденсаторов зависит от температуры внешней среды:

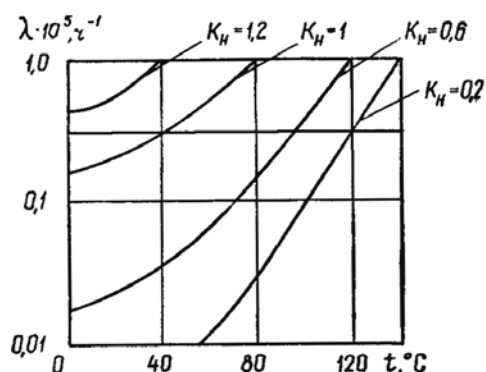
$$T_{cl} = C \cdot 10^{\frac{b}{T+273}}, \quad (3.151)$$

где C, b – константы (например, для бумажных конденсаторов $b \sim 5 \cdot 10^3$).

Из формулы следует, что снижение температуры эксплуатации, например, с 70 до 60 °С увеличивает срок службы почти в 3 раза.

Зависимости интенсивности отказов конденсаторов (слюдяных) от температуры при различных коэффициентах нагрузки по напряжению показаны на рис. 3.47.

Рис. 3.47. Зависимость интенсивности отказов слюдяных конденсаторов от температуры при различных коэффициентах нагрузки по напряжению



Для сохранения низкого уровня интенсивности отказов (например, $\lambda = 0,3 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$) при температуре эксплуатации $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ уровень нагрузки по напряжению необходимо снизить с $K_H = 1$ до $K_H = 0,2$. Чтобы стабилизировать высокое значение $K_H = 1$, следует уменьшить температуру от 110 до 40 °С.

3.5.7. Полупроводниковые приборы

Элементы РЭС с полупроводниковыми структурами – полупроводниковые приборы (ПП) (транзисторы, диоды, тиристоры), микросхемы, микросборки наиболее чувствительны к температурным воздействиям, и чаще всего именно температура этих элементов ограничивает тепловой режим РЭС в целом.

Температурные воздействия проявляются не только в изменении электрических параметров полупроводниковых структур вплоть до лавинообразного возрастания тока через $p - n$ переход (явление теплового пробоя), но и в сильном влиянии на надежность ПП.

Теория теплового пробоя ПП создана Б.М. Вулом в середине 50-х гг.

В настоящее время разработаны несколько приближений (нулевое, первое) теории тепловой устойчивости ПП, учет которых необходим при разработке как самих конструкций ПП, так и схем их включения.

Основная исходная предпосылка теории тепловой устойчивости ПП – наличие такой стационарной температуры перехода T_{cm} , при которой

обеспечивается равенство выделяемой на переходе $P_{\text{выд}}$ и рассеиваемой в окружающую среду $P_{\text{рас}}$ тепловой мощности:

$$P_{\text{выд}}(T_{CT}) = P_{\text{рас}}(T_{CT}). \quad (3.152)$$

В этом случае приращение температуры перехода $dT = 0$ и ПП находится в стационарном режиме. Если режим нестационарный, температура перехода будет возрастать до достижения равенства мощностей $P_{\text{выд}}$ и $P_{\text{рас}}$, при котором устанавливается новое значение температуры T_{cm} . Если в допустимом по техническим условиям интервале температур такой стационарной температуры не существует, элемент выйдет из строя.

Условие стационарности необходимое, однако, с точки зрения надежности, недостаточное для длительной работы ПП при определенных внешних условиях.

Следовательно, при всех допускаемых внешних возмущениях и изменениях параметров самого ПП в допустимых пределах условие стационарности не должно быть необратимо нарушено. Последнее требование называется условием устойчивости. В терминах температуры перехода это условие может быть сформулировано следующим образом: стационарный режим устойчив в интервале температур $(T_{cm} - \Delta T_1) < T < (T_{cm} + \Delta T_2)$, если после прекращения действия возмущения вновь устанавливается температура T_{cm} .

Это условие тепловой устойчивости может быть записано в следующем виде:

$$\left. \frac{d}{dT} P_{\text{выд}} \right|_{T=T_{cm}} < \left. \frac{d}{dT} P_{\text{рас}} \right|_{T=T_{cm}}. \quad (3.153)$$

Статические режимы работы ПП в практике встречаются достаточно редко. В реальных условиях ПП работают, как правило, в квазистатических режимах. Частота периодического процесса в квазистатическом режиме такова, что температура $p - n$ перехода, в котором выделяется практически вся мощность $P_{\text{выд}}$, не успевает следовать за мгновенным ее изменением и колеблется относительно некоторого среднего значения.

Кроме теплового пробоя, связанного с превышением допустимого температурного диапазона ПП и выходом его из строя, температурные воздействия приводят к изменению электрических параметров полупроводниковых элементов, что обусловлено температурной зависимостью концентрации и подвижности носителей зарядов в полупроводниковых материалах с атомной и ионной решетками (рис. 3.48).

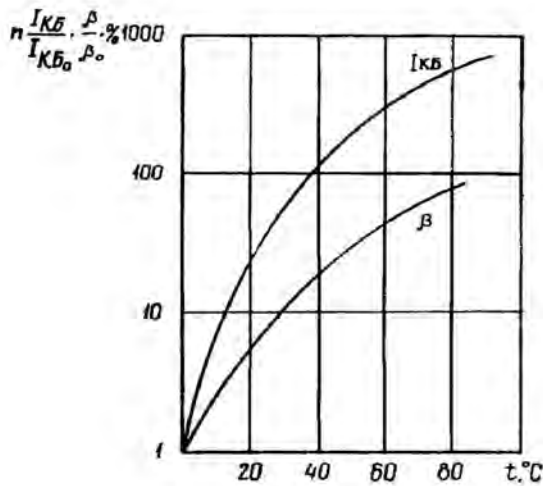


Рис. 3.48. Зависимость относительного изменения I_{KB} и β кремниевого транзистора от температуры

интервале температур становится подобной зависимости удельной проводимости металлов.

У реальных полупроводников эти кривые могут значительно отличаться от указанных как вследствие погрешности теоретической модели, так и в силу существования нескольких видов примесных дефектов с различными энергиями активации.

Эти обстоятельства приводят к тому, что, например, у германиевых транзисторов обратный ток коллектора увеличивается вдвое, а коэффициент усиления – до 15 % на каждые 10 К повышения температуры.

Тепловые параметры ПП. Расчеты тепловых режимов ПП невозможны без знания их тепловых параметров (рис. 3.49), с помощью которых устанавливается взаимосвязь между рассеиваемой элементом мощностью и температурой его различных областей.

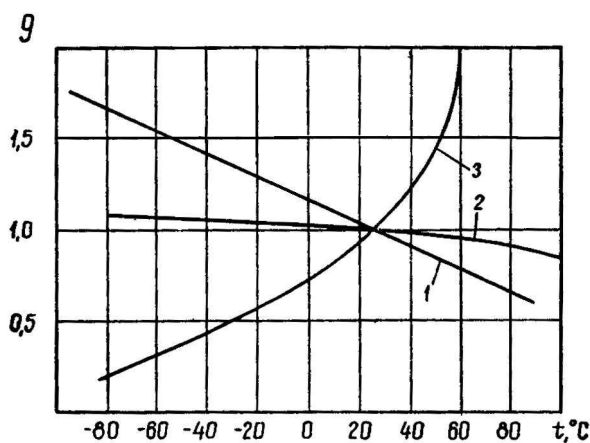


Рис. 3.49. Зависимость относительной крутизны характеристики полевых транзисторов от температуры:

- 1 – для кремниевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом;
- 2 – для кремниевого транзистора с изолированным затвором;
- 3 – для транзистора на сульфиде кадмия с изолированным затвором

Тепловые параметры ПП в основном обусловлены конструкцией прибора и характеристиками применяемых материалов. К ним относятся:

- температура $p - n$ перехода T_n ;
- тепловое сопротивление переход – корпус $R_{n,k}$, К/Вт;
- тепловая постоянная переход – корпус $\tau_{n,k}$, с;
- теплоемкость переход – корпус $c_{n,k}$, Дж/К.

Тепловое сопротивление корпус – среда $R_{k,c}$, теплоемкость корпус – среда $c_{k,c}$, температура корпуса T_k – не основные параметры ПП, так как они непосредственно не зависят от применяемых материалов и в гораздо меньшей степени зависят от конструкции. В основном они определяются внешними условиями работы прибора: конструкцией применяемого теплоотвода, способом установки на него ПП и др.

Температура $p - n$ перехода – определяющий параметр при расчете тепловых режимов ПП. Для транзисторов задается максимальная допустимая температура коллекторного $p - n$ перехода $T_{n,макс}$. Для полупроводниковых диодов и тиристоров, как правило, указывается максимальная допустимая температура корпуса $T_{k,макс}$. При кратковременном превышении предельно допустимой температуры возможны необратимые процессы в ПП и выход его из строя.

При неизменных условиях окружающей среды температура $p - n$ перехода является функцией электрической мощности, теплофизических характеристик материалов ПП, его конструктивного исполнения и параметров теплоотвода. Для германиевых ПП предельно допустимая температура составляет около +90, кремниевых – около +150 °С.

Тепловое сопротивление ПП оценивается изменением температуры между соответствующими его структурами на единицу отводимой мощности. Так, тепловое сопротивление $R_{n,k}$ показывает, на сколько градусов изменится перепад температур между $p - n$ переходом и корпусом при варьировании мощности, рассеиваемой прибором, на 1 Вт. Оно определяется внутренней конструкцией и материалом ПП и является постоянным для статического теплового режима.

В условиях динамического теплового режима работы ПП и в особенности в режиме одиночных импульсов мощности $R_{n,k}$ не остается постоянным, а изменяется в зависимости от времени действия мощности, рассеиваемой на $p - n$ переходе (рис. 3.50, 3.51).

Большие значения тепловых сопротивлений $R_{n,k}$ обеспечивают и большие температурные перепады между $p - n$ переходом и корпусом. Это, в свою очередь, создает дополнительные трудности конструктору РЭС в

связи с необходимостью интенсификации теплоотдачи с корпуса ПП. Поэтому предпочтение необходимо отдавать полупроводниковым приборам с меньшими значениями $R_{n.к}$.

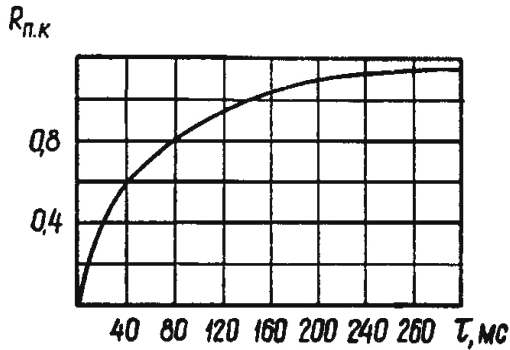


Рис. 3.50. Характеристика зависимости теплового сопротивления $R_{n.к}$ от времени для диода Д215 при мощности $P = 5$ Вт

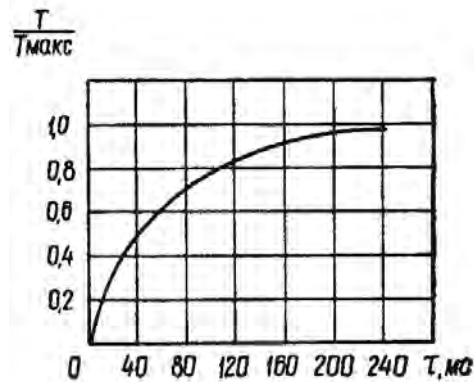


Рис. 3.51. Усредненная временная зависимость относительной температуры перехода транзистора П210 при рассеиваемой мощности 30 Вт

Для маломощных ПП в ТУ нормируется тепловое сопротивление переход – среда $R_{n.с}$, которое представляет собой сумму сопротивлений $R_{n.к}$ и $R_{к.с}$. Последнее характеризует условия теплообмена между корпусом прибора и окружающей средой. В связи с тем, что эти условия зависят от большого числа различных факторов, определяемых способом установки ПП и компоновочными характеристиками РЭС, нормированное представление данного параметра неверно. Тепловое сопротивление $R_{к.с}$ должно рассчитываться в каждом конкретном случае исходя из компоновочных характеристик РЭС.

В стационарном тепловом режиме связь между температурами перехода ПП и окружающей среды $T_{ср}$ определяется соотношением

$$T_n = T_{ср} + P/(R_{n.к} + R_{к.с}), \quad (3.154)$$

где P – мощность, рассеиваемая ПП.

Тепловые постоянные времени характеризуют скорость нарастания температуры на отдельных участках ПП и равняются отрезку времени, в течение которого разность температур перехода и корпуса изменяется в e раз. Тепловые постоянные времени $\tau_{n.к}$ необходимы для аналитического расчета теплового режима ПП, работающего в динамическом режиме, когда длительность импульса мощности соизмерима с $\tau_{n.к}$.

Тепловые постоянные времени – производные теплового сопротивления и теплоемкости соответствующего участка ПП.

Теплоемкость полупроводникового прибора характеризует его аккумулярующую способность:

$$C_{n.n} = \sum C_i \rho_i V_i, \quad (3.155)$$

где C_i – удельная теплоемкость i -го элемента прибора, Дж/(кг·К); ρ_i – плотность i -го элемента прибора, кг/м³; V_i – объем i -го элемента прибора, м³; i – количество характерных элементов.

Знание теплоемкости ПП необходимо для расчета его тепловых режимов при динамическом режиме работы, особенно при кратковременных импульсах мощности. В общем случае теплоемкость является функцией температуры, однако в практических расчетах такой зависимостью обычно пренебрегают.

Для некоторых высокочастотных полупроводниковых приборов область применения в импульсных устройствах ограничена длительностью импульсов τ , которая значительно меньше тепловой постоянной переход – корпус. В этом случае судить о превышении температуры $p - n$ перехода над температурой корпуса прибора ($T_k = \text{const}$) можно, только определив теплоемкость участка переход – корпус $C_{n.k}$.

Тепловые параметры микросхем. Тепловые параметры микросхем (микросборок) подобны рассмотренным. Однако в связи с тем, что микросхемы представляют собой, как правило, многокристальные структуры, при выполнении тепловых расчетов необходимо знать тепловые сопротивления каждого кристалла.

Микросхемы малой мощности обычно используются без теплоотвода (рассеивают теплоту непосредственно в окружающую среду), поэтому определяющий параметр их теплового режима – предельно допустимая температура окружающей среды.

Микросхемы с высокой мощностью тепловыделения нередко охлаждаются с помощью теплоотвода, поэтому определяющий параметр их теплового режима – температура корпуса.

3.6. Математические основы характерных тепловых расчетов

3.6.1. Задачи теплового режима РЭА, приводящиеся к уравнениям параболического и эллиптического типов. Постановка краевых задач

В цикл проектирования интегральных микросхем (ИС) в качестве основного этапа входит разработка топологии. При разработке топологической структуры ИС неизбежно встает вопрос о температурном поле кристалла или подложки в случае гибридных интегральных схем.

В теплофизическом отношении ИС представляет анизотропное неоднородное тело, нестационарное температурное поле которого описывается уравнением теплопроводности (параболического типа), а стационарное температурное поле – уравнениями Лапласа и Пуассона (уравнениями эллиптического типа).

Теплообмен теплопроводностью (кондукцией) происходит согласно закону Фурье

$$P = -\lambda \text{grad} \vartheta = -\lambda \nabla \vartheta = -\lambda n \frac{\partial \vartheta}{\partial n}, \quad (3.156)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; ϑ – температура.

С учетом закона сохранения энергии можно получить уравнение теплопроводности для неоднородного изотропного тела в виде

$$c\rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + P, \quad (3.157)$$

где $\vartheta = \vartheta(M, f)$ – температура в точке $M(x, y, z)$ тела в момент времени t ; c – удельная теплоемкость тела; ρ – плотность; $P(M, f)$ – удельная мощность источников энергии, $\lambda = \lambda(M, t)$ – коэффициент теплопроводности тела.

Если тело однородно, то c , ρ и λ – постоянные и уравнение принимает вид

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{P}{c\rho}, \quad (3.158)$$

где $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$.

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет в общем случае бесконечное множество решений. Для однозначного решения поставленной задачи необходимо, как это следует из физических соображений, знать еще распределение температуры в начальный момент времени (начальные условия) и тепловой режим на границе S тела (граничные или краевые условия).

Поскольку дифференциальное уравнение теплопроводности – уравнение первого порядка по переменной t , достаточно задания в начальный момент времени некоторой функции $\vartheta_0 = f(x, y, z, 0)$.

Граничные условия могут быть заданы различными способами:

1. Граничное условие 1-го рода состоит в задании распределения температуры в каждой точке поверхности S :

$$\vartheta|_S = \varphi(M, t), \quad (3.159)$$

где $\varphi(M, t)$ – известная функция точки поверхности S и времени t .

2. Граничное условие второго рода состоит в задании плотности теплового потока как функции времени:

$$P(M, t) = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n},$$

откуда

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right|_s = \psi(M, t), \quad (3.160)$$

где $\psi(M, t)$ – известная функция, выражающаяся через заданный тепловой поток по формуле

$$\psi(M, t) = -\frac{P(M, t)}{\lambda}.$$

3. Граничное условие третьего рода характеризует закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. По закону Ньютона количество тепла, передаваемое с единицы поверхности тела, равно

$$P = \alpha(\vartheta_\omega - \vartheta_c),$$

где α – коэффициент теплообмена конвекции; ϑ_ω – температура поверхности; ϑ_c – температура среды.

По закону сохранения энергии это тепло должно быть равно теплу, которое передается через единицу площади поверхности за счет теплопроводности, т.е.

$$\alpha(\vartheta_\omega - \vartheta_c) = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n} \right),$$

где n – внешняя нормаль к поверхности S или, положив $h = \frac{\alpha}{\lambda}$, получим:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial n} + h(\vartheta_\omega - \vartheta_c)_s = 0. \quad (3.161)$$

4. Граничное условие четвертого рода соответствует теплообмену соприкасающихся твердых тел, когда температура соприкасающихся поверхностей одинакова, т.е.

$$\vartheta_1(t) = \vartheta_2(t).$$

Помимо равенства температур, имеет место равенство тепловых потоков:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial \vartheta_1}{\partial n} \right|_{s1} = \lambda_2 \left. \frac{\partial \vartheta_2}{\partial n} \right|_{s2}. \quad (3.162)$$

Таким образом, *краевая задача для температурного поля в твердом теле* ставится так: найти функцию $\vartheta(x, y, z, t)$, удовлетворяющую в области $G \equiv (M \in D, t > 0)$ уравнению теплопроводности и дополнительным: а) начальному $\vartheta(M, 0) = \varphi(M)$ и б) одному из краевых условий (3.159), (3.160), (3.157) или (3.162).

К такой краевой задаче для уравнения теплопроводности приходим, если рассматривать интегральные микросхемы в виде n -мерного неоднородного параллелепипеда ($n = 1, 2, 3$) или в виде многослойной пластины.

Аналитическое исследование теплового режима в этом случае заключается в интегрировании параболического (или, в стационарном случае, эллиптического) уравнения с привлечением необходимых начальных и граничных условий.

Для решения поставленной краевой задачи можно применить метод разделения переменных, операционный метод, метод конечных интегральных преобразований и численные методы.

3.6.2. Метод разделения переменных в приложении к тепловым расчетам микросхем

Ряд практических задач теплового режима элементов РЭА в теплофизическом отношении сводится к исследованию температурного поля в однородных прямоугольных пластинках (термоэлектрические устройства, микросхемы и т.д.).

В частном случае для двумерной тепловой модели такая задача формулируется следующим образом.

Найти решение уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) \quad (3.163)$$

$$0 < x < b, \quad 0 < y < d$$

при граничных условиях

$$\vartheta(0, y) = \vartheta(b, y) = 0;$$

$$\vartheta(x, 0) = \vartheta(x, d) = 0 \quad (3.164)$$

и при начальном условии

$$\vartheta(x, y, 0) = \varphi(x, y).$$

Согласно методу Фурье ищем частные решения уравнения (3.163) в виде произведения

$$\vartheta = v(M) T(t) = X(x)Y(y)T(t). \quad (3.165)$$

Подставляя предполагаемую форму решения (3.165) в (3.163) и разделяя переменные, приходим к следующим уравнениям для функций $v(M)$ и $T(t)$:

$$\Delta v + \lambda v = 0; \quad (3.166)$$

$$|v_s = 0; \quad (3.167)$$

$$T' + a^2 \lambda T = 0. \quad (3.168)$$

Для функции $v(M)$ получаем задачу на собственные значения (задачу Штурма – Лиувилля): найти собственные значения λ_i и соответствующие им нетривиальные решения – собственные функции задачи (3.167), (3.168).

Для определения функций $v(M) = X(x)Y(y)$ и $T(t)$ получим следующие уравнения:

$$X''(x) + \eta^2 X(x) = 0;$$

$$Y''(y) + \mu^2 Y(y) = 0;$$

$$T'(t) + a^2 (\eta^2 + \mu^2) T(t) = 0,$$

где $\lambda^2 = \eta^2 + \mu^2$.

Общие решения этих уравнений имеют вид:

$$X(x) = C_1 \cos \eta x + C_2 \sin \eta x;$$

$$Y(y) = C_3 \cos \mu y + C_4 \sin \mu y;$$

$$T(t) = A \exp \left[-a^2 (\eta^2 + \mu^2) t \right].$$

Для выполнения граничных условий (3.164) следует положить:

$$C_1 = 0, \quad C_3 = 0; \quad \eta = m\pi / b; \quad \mu = n\pi / b \quad (m, n = 1, 2, 3, \dots).$$

Частными решениями уравнения (3.163), удовлетворяющими граничным условиям, будут:

$$\vartheta_{m,n} = A_{m,n} \sin \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{n\pi y}{d} \exp \left\{ -a^2 \pi^2 \left(\frac{m^2}{b^2} + \frac{n^2}{d^2} \right) t \right\}.$$

Общее решение исходной задачи может быть представлено в виде:

$$\vartheta(x, y, t) = \sum_{m,n=1}^{\infty} A_{m,n} \exp \left[-a^2 \pi^2 \left(\frac{m^2}{b^2} + \frac{n^2}{d^2} \right) t \right] \sin \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{n\pi y}{d}.$$

Выполняя начальное условие, получаем:

$$\vartheta(x, y) = \sum_{m,n=1}^{\infty} A_{m,n} \sin \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{n\pi y}{d}. \quad (3.169)$$

Ряд (3.169) представляет собой разложение функции $\phi(x, y)$ в двойной ряд Фурье, и коэффициенты A_{mn} определяются по формуле

$$A_{m,n} = \frac{4}{bd} \int_0^b \int_0^d \phi(x, y) \sin \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{n\pi y}{d} dx dy.$$

Внося эти значения коэффициентов $A_{m,n}$ в вышеприведенный ряд, получим решение исходной задачи.

3.6.3. Операционные методы для расчета нестационарных тепловых режимов РЭА

Для многих задач теплового режима РЭА и функциональных узлов использование классических методов оказывается неэффективным, например, применение метода разделения переменных для задач с внутренними источниками тепла. В результате требований специальной (бортовой) РЭА при решении задач нестационарных тепловых режимов широкое применение нашли операционные методы.

Процесс применения интегрального преобразования Лапласа к решению дифференциального уравнения теплопроводности однотипен для различных форм радиоэлементов и микросхем при граничных условиях первого, второго и третьего родов, без введения каких-либо новых допущений или преобразований.

Рассмотрим методику применения операционного метода Лапласа для нестационарного режима.

Пусть тепловой режим РЭА (интегральной микросхемы, например) описывается уравнением теплопроводности вида

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + f(x, y, z, t) \quad (3.170)$$

в области $G \equiv \{D \text{ с границей } S, 0 < t < T\}$.

На границе области заданы условия:

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial \vartheta}{\partial n} + \gamma_2 \vartheta \right)_s = \varphi(x, y, z, t). \quad (3.171)$$

При $t = 0$ задана функция

$$\vartheta(x, y, z, t) = \vartheta_0(x, y, z). \quad (3.172)$$

Следуя операционному методу Лапласа, умножим исходное уравнение на $\exp(-pt)$ и проинтегрируем по t от 0 до ∞ .

Предполагается также, что интегралы существуют и операция $\int_0^\infty \exp(-\rho t) \nabla^2 \vartheta dt = \nabla^2 \int_0^\infty \exp(-\rho t) \vartheta dt$ правомерна; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

Тогда вместо задачи (3.170) – (3.172) будем иметь:

$$\rho \bar{\vartheta} - \vartheta_0 = a^2 \nabla^2 \bar{\vartheta} + \bar{f}, \quad (3.173)$$

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial \bar{\vartheta}}{\partial n} + \gamma_2 \bar{\vartheta} \right)_s = \bar{\varphi}, \quad (3.174)$$

где $\bar{\vartheta}, \bar{f}, \bar{\varphi}$ – изображения функций ϑ, t и φ соответственно, вычисленные по формуле преобразования Лапласа.

Таким образом, получено дифференциальное уравнение относительно пространственных координат, решить которое значительно легче, чем (3.170).

После определения $\bar{\vartheta}$ из уравнений (3.173), (3.174) задача сведется к обратному преобразованию. Для простых случаев обратного преобразования используются весьма подробные таблицы изображений. В более общем случае решение получается из теоремы обращения

$$\vartheta(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \exp(\rho t) \bar{\vartheta}(x, y, z, \rho) d\rho, \quad (3.175)$$

где $c > \sigma$ (σ – некоторое число, такое, что $\text{Re } \rho > \sigma$).

Интегрирование ведется по прямой $\text{Re } \rho = c$ в пределах от $c - i\infty$ до $c + i\infty$, причем корни подынтегрального выражения (ρ_i, σ_i) лежат левее оси сходимости $\text{Re } \rho = \sigma$. Вычисление интеграла (3.175) обычно производится методами контурных интегралов или с применением теоремы вычетов.

Порядок операций при использовании операционного метода следующий:

- 1) исходное уравнение (для оригинала) заменяется преобразованным уравнением, записанным для изображения;
- 2) граничные условия для оригинала заменяются граничными условиями для изображения. Начальные условия войдут в основное уравнение для области изображения;
- 3) находится решение $\bar{\vartheta}$ для преобразованной задачи, при этом может оказаться целесообразным повторное применение интегрального преобразования;

4) совершается обратное преобразование, т.е. определяется искомая функция $\vartheta = (x, y, z, t)$.

Интегральное преобразование Лапласа имеет свои недостатки. В частности, известные трудности возникают при решении задач, когда начальные условия заданы в виде функции пространственных координат, или при решении некоторых многомерных задач. В этой связи был предложен ряд методов интегральных преобразований по пространственным координатам в соответствии с геометрической формой тела.

3.6.4. Метод конечных интегральных преобразований при расчетах температуры элементов интегральных схем

При расчетах температуры элементов гибридных интегральных схем (ИС) требуется определить тепловое сопротивление R между источниками тепла (пленочные резисторы, микротранзисторы и т.д.) и корпусом или же подложкой ИС. В частном случае подложке ИС ставится в соответствие теплофизическая модель в виде параллелепипеда, на верхней грани которого расположен источник энергии размерами l_1 и l_2 , удельный тепловой поток через поверхность которого равен ρ . Теплообмен на верхней грани подчиняется закону Ньютона, суммарный коэффициент теплоотдачи равен α . Так как расчетные формулы для тепловых сопротивлений включают только разности температур, то можно принять температуру поверхностей остальных граней равной нулю.

Для стационарного температурного поля в параллелепипеде без внутренних источников тепла уравнение теплопроводности (3.158) принимает вид

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0, \quad (3.176)$$

$$0 < x < a, \quad 0 < y < b, \quad 0 < z < c.$$

Запишем граничные условия:

$$\vartheta(0, y, z) = \vartheta(a, y, z) = \vartheta(x, 0, z) = \vartheta(x, b, z) = \vartheta(x, y, 0) = 0;$$

$$\lambda \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right|_{z=c} + \alpha \vartheta = \begin{cases} \rho & \text{при } \xi - 0,5l_1 \leq x \leq \xi + 0,5l_1, \\ \eta - 0,5l_2 \leq y \leq \eta + 0,5l_2, \\ 0 & \text{во всей остальной области,} \end{cases} \quad (3.177)$$

где ξ, η – координаты центра источника на грани $z = c$; λ – коэффициент теплопроводности.

Применим метод конечных интегральных преобразований, позволяющий получить решение в виде ряда по собственным функциям задачи Штурма – Лиувилля. Согласно общей теории метода представим искомую функцию в виде разложения в ряд по собственным функциям $\varphi_k(x)$:

$$\vartheta(x, y, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \vartheta_k(y, z) \varphi_k(x). \quad (3.178)$$

Ядро преобразования, позволяющее исключить дифференциальные операции по x , будет $\varphi(x, k) = \frac{1}{C_k} \varphi_k(x)$, где вспомогательная функция $\varphi_k(x)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_k(x)}{\partial x^2} + \mu_k^2 \varphi_k(x) &= 0; \\ \varphi_k(0) = \varphi_k(a) &= 0. \end{aligned} \quad (3.179)$$

Отсюда

$$\varphi_k(x) = \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad \mu_k = \frac{k\pi}{a}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Поскольку дифференциальное уравнение (3.179) самосопряженное, нормирующий делитель C_k равен

$$C_k = \int_0^a [\varphi_k(x)]^2 dx = \frac{a}{2}.$$

Осуществив интегральное преобразование в интервале $[0, a]$ с ядром $\varphi(x, k) = \frac{2}{a} \sin \frac{k\pi x}{a}$, приведем задачу (3.176) – (3.177) к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \vartheta_k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_k}{\partial z^2} - \mu_k^2 \vartheta_k &= 0; \\ \left[\lambda \frac{\partial \vartheta_k}{\partial z} + \alpha \vartheta_k \right]_{z=c} &= \rho_k(y); \\ \vartheta_k(0, z) = \vartheta_k(b, z) = \vartheta_k(y, 0) &= 0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \vartheta_k(y, z) &= \int_0^a \vartheta(x, y, z) \varphi(x, k) dx; \\ \rho_k(y) &= \int_0^a \rho(x, y) \varphi(x, k) dx. \end{aligned}$$

При отыскании преобразования, исключающего дифференциальные операции по y , повторяем вышеописанный прием, причем ядро прямого преобразования будет иметь вид

$$\psi(y, m) = \frac{2}{b} \sin \frac{m\pi y}{b}, \quad v_m = \frac{m\pi}{b}, \quad m = 1, 2, \dots$$

Представив функцию $\vartheta_k(y, z)$ в виде разложения в ряд по собственным функциям $\psi_m(y) = \sin(m\pi y / b)$

$$\vartheta_k(y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \vartheta_{km}(z) \psi_m(y), \quad (3.180)$$

приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению 2-го порядка

$$\frac{d^2 \vartheta_{km}}{dz^2} - \omega_{km}^2 \vartheta_{km} = 0; \quad (3.181)$$

$$\vartheta_{km}(0) = 0; \quad (3.182)$$

$$\lambda \frac{d\vartheta_{km}}{dz} + \alpha \vartheta_{kmz} = \rho_{km}; \quad \omega_{km}^2 = \mu_k^2 + v_m^2;$$

$$\rho_{km} = \int_0^a \int_0^b \rho(x, y) \varphi(k, x) \psi(y, m) dx dy. \quad (3.183)$$

Решение полученной системы уравнений (3.181) – (3.183) имеет вид

$$\vartheta_{km}(z) = \frac{16\rho}{\lambda k m \pi^2} \frac{\sin(\mu_k \varepsilon) \sin(v_m \eta) \sin\left(\mu_k \frac{l_1}{2}\right) \sin\left(v_m \frac{l_2}{2}\right)}{\left[\omega_{km} ch(\omega_{km} c) + \frac{\alpha}{\lambda} sh(\omega_{km} c) \right]} sh \omega_{km} z. \quad (3.184)$$

Итак, соотношения (3.178), (3.180) и (3.184) позволяют получить выражение для температурного поля в подложке микросхемы

$$\begin{aligned} \vartheta(x, y, z) = & \frac{16a\rho}{\lambda \pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{k\pi l_1}{2a} \times \\ & \times \sin \frac{m\pi l_2}{2b} \sin \frac{k\pi \varepsilon}{a} \sin \frac{m\pi \eta}{b} sh \left[\sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \frac{\pi z}{a} \right] \times \\ & \times \sin \frac{m\pi l_2}{2b} \sin \frac{k\pi \varepsilon}{a} \sin \frac{m\pi \eta}{b} sh \left[\sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \frac{\pi z}{a} \right] : \\ & : km \left\{ \pi \sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} ch \left[\sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \pi c / a \right] + \right. \\ & \left. + Bish \left[\sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \pi c / a \right] \right\}. \end{aligned}$$

где $Bi = a\alpha / \lambda$ – критерий Био.

Тепловое сопротивление между источником энергии и наружными поверхностями подложки микросхемы, по определению, равно

$$R = \frac{\bar{\vartheta}}{P_0},$$

где $\bar{\vartheta} = \frac{1}{l_1 l_2} \int_{\varepsilon-0.5l_1}^{\varepsilon+0.5l_1} \int_{\eta-0.5l_2}^{\eta+0.5l_2} \vartheta(x, y, c) dx dy$ – среднеповерхностная температура источника; $P_0 = \rho l_1 l_2$ – тепловой поток источника.

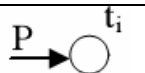

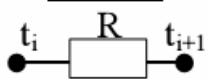

3.7. Моделирование тепловых режимов РЭС

3.7.1. Тепловые цепи. Пассивные, активные элементы тепловых цепей

Пользуясь аналогией аналитических выражений между процессом переноса теплоты и электричества, к описанию теплопередачи можно применить теорию тепловых цепей. Посредством тепловых цепей производят замену реального объекта идеализированной схемой замещения, то есть тепловой цепью. Графическое изображение тепловой цепи – тепловая схема, которая позволяет наглядно представить процесс теплообмена. Тепловая цепь должна состоять из источника, проводника и приемника тепловой энергии. Для изображения теплообмена существуют условные символы (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Условные символы

Элементы тепловой схемы	Символы
Источник тепла	
Тепловая связь	
Тепловое сопротивление	
Сток тепловой энергии	

Пример тепловой схемы приведен на рис. 3.52.

Активные элементы – это элементы с выделением или поглощением теплоты, а остальные – пассивные (термические сопротивления, емкости).

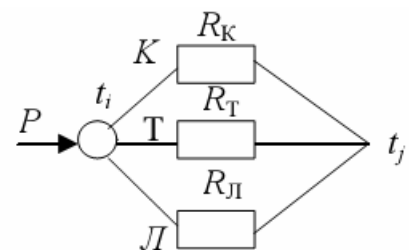


Рис. 3.52

Для тепловой цепи справедливы законы Кирхгофа:

1. Алгебраическая сумма тепловых потоков P_i в узле тепловой цепи равна нулю (рис. 3.53):

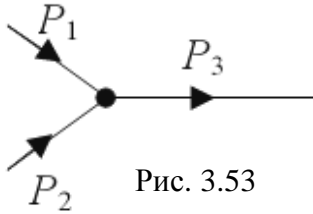


Рис. 3.53

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0. \quad (3.185)$$

2. Алгебраическая сумма разностей температур на ветвях в любом замкнутом контуре тепловой цепи равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n \Delta t = 0. \quad (3.186)$$

Тепловые цепи делятся на цепи с распределенными и с сосредоточенными параметрами. Для расчета тепловые цепи можно преобразовать в более простые.

Приведем пример расчета тепловых цепей.

Найдем связь между P и Δt при прохождении потока через многослойную стенку, разделяющую среды с температурами T_1 и T_2 (рис. 3.54).

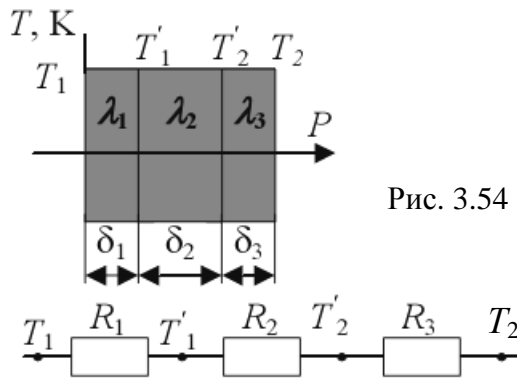


Рис. 3.54

Все слои однородны ($\lambda_i = \text{const}$), поверхности раздела изотермически нагреты $-T'_1$ и T'_2 . Каждому слою стенки можно приписать тепловое сопротивление потоку $-R_1, R_2, R_3$, которые последовательно преодолевают тепловой поток P при прохождении от слоя к слою, что можно представить в виде тепловой схемы кондуктивной теплопередачи (рис. 3.54).

Послойно опишем прохождение потока P :

$$\begin{cases} T_1 - T'_1 = PR_1, \\ T'_1 - T'_2 = PR_2, \\ T'_2 - T_2 = PR_3, \end{cases}$$

СЛОЖИМ:

$$T_1 - T_2 = P(R_1 + R_2 + R_3).$$

Обобщим на произвольное число слоев:

$$T_1 - T_2 = P \sum_{i=1}^n R_i.$$

3.7.2. Некоторые закономерности стационарных тепловых полей

Анализ теплового поля РЭС базируется на понятиях принципа суперпозиции, температурного фона и локального перегрева и принципа местного влияния. Поочередно рассмотрим каждый из них.

1. *Принцип суперпозиции тепловых полей.* Если блок рассматривать как систему с большим количеством источников, то результирующее температурное поле этих систем подчиняется принципу суперпозиции полей.

Если мощность источников теплоты, теплопроводность отдельных частей системы и ее коэффициенты теплоотдачи не зависят от температуры, то в любой точке стационарная температура зависит от мощности всех источников теплоты системы.

Математическим выражением принципа суперпозиции является аналог закона Ома:

$$\Delta t_{ij} = t_j - t_c = P_i F_{ji},$$

откуда:

$$t_j = t_c + \sum_{i=1}^{n-1} P_i F_{ji} \quad (3.187)$$

без учета источника в данной точке j , т.е. учитывается $n - 1$ источников.

2. *Температурный фон и локальная температура* в аппаратуре – t_j рассматривается относительно точки j как температурный фон, т.е. $t_{j\text{фон}}$, а

$\vartheta_j = \Delta t_j = (t_j - t_c)$ – фоновый перегрев, то есть

$$\vartheta_{j\text{фон}} = \sum_{i=1}^{n-1} P_i F_{ji}. \quad (3.188)$$

Фоновый перегрев определяется суммой мощностей всех источников системы, кроме источников в данной точке.

Кроме фонового перегрева существует и собственный перегрев от источника энергии в данной точке: $\vartheta_{j\text{собств}} = t_{j\text{собств}} - t_c$. Тогда суммарная температура в j -й точке представляет локальную температуру j -й точки:

$$t_K = t_{j\text{фонов}} - t_{j\text{собств}} \quad (3.189)$$

или

$$\vartheta_{jK} = t_c + \vartheta_{j\text{фонов}} + \vartheta_{j\text{собств}}.$$

3. *Принцип местного влияния или локальный перегрев.* При анализе тепловых полей от группы источников важно учесть особенности теплообмена на границе тепловых полей. Эту особенность влияния граничных условий на суммарное температурное поле учитывает принцип местного влияния.

Любое местное возмущение теплового поля является локальным, то есть не распространяется на удаленные участки поля (рис. 3.55).

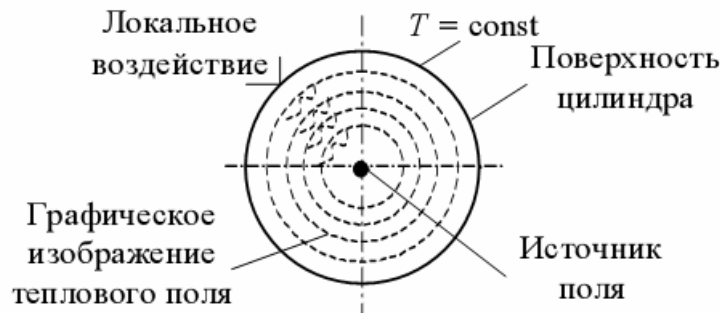


Рис. 3.55

Локальное возмущение вызовет только местное возмущение, при удалении от места воздействия это возмущение уменьшается. Этот принцип позволяет значительно упростить расчеты.

3.7.3. Тепловые модели РЭС

Анализ тепловых полей РЭС путем математического описания – задача очень сложная. Практикой выработаны другие методы, когда анализ и решения задачи выполняются приближенными методами с большим количеством ограничений, условностей, допущений по отношению к реальному объекту. На определенном этапе проектирования это достигается путем замены реального блока его тепловой моделью (рис. 3.56), которая реализуется математически и адекватна изучаемому объекту.

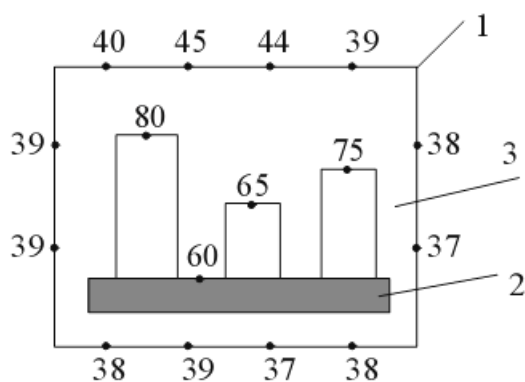


Рис. 3.56

На рис. 3.56 схематично представлена конструкция блока РЭС: корпус 1, шасси 2 с крупными радиоэлементами и среда 3, а также указана температура различных участков блока, что и является тепловой моделью блока. Плату или шасси с элементами в тепловой модели называют *нагретой зоной*.

Недостаток такого схематического изображения нагретой зоны состоит в том, что сложно рассчитать площадь поверхности, охватывающей зону нагрева. Для упрощения расчета площади поверхности нагретой зоны в теп-

ловой модели ее представляют простейшей геометрической фигурой – прямоугольным параллелепипедом с определенными геометрическими параметрами ($l_1 \times l_2 \times h_3$) (рис. 3.57).

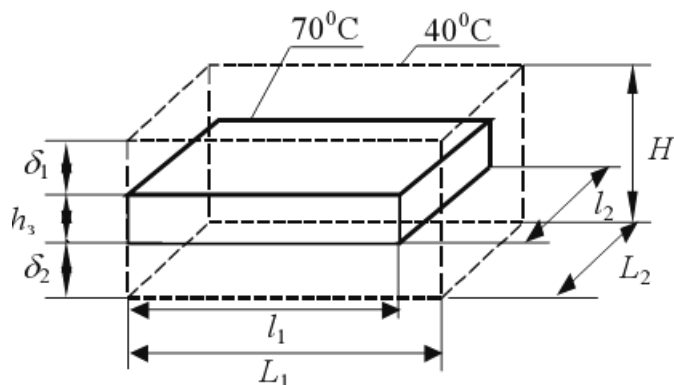


Рис. 3.57

Получаем более грубую, но удобную для расчета тепловую модель в виде системы двух тел: 1 – оболочка кожуха корпуса; 2 – нагретая зона в форме прямоугольного параллелепипеда.

Параметры нагретой зоны можно условно разделить на геометрические и температурно-энергетические. Геометрические

параметры тепловой модели принято соотносить с габаритами блока. Так, горизонтальные параметры соответствуют горизонтальным размерам кожуха корпуса, то есть $l_1 = L_1$; $l_2 = L_2$, а h_3 – высота параллелепипеда (нагретой зоны). Для определения h_3 вводят понятие коэффициента заполнения:

$$k_{зан} = \frac{V_3}{V_{блока}} = \frac{\sum V_{дет} + V_{шасси}}{V_{блока}} = \frac{l_1 l_2 h_3}{L_1 L_2 H}, \text{ тогда } k_{зан} = \frac{h_3}{H}, \quad (3.190)$$

откуда получаем:

$$h_3 = k_{зан} H. \quad (3.191)$$

Следовательно, площадь поверхности нагретой зоны

$$S_3 = 2(l_1 l_2) + 2h_3(l_1 + l_2) = 2[(l_1 l_2) + h_3(l_1 + l_2)]. \quad (3.192)$$

Теплоэнергетическими характеристиками блока являются:

1) мощность тепловыделения

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (3.193)$$

где P_i – мощность элементной базы;

2) среднеповерхностная температура – \bar{t}_3 , т.к. поверхность нагретой зоны считают изотермической, а также \bar{t}_K и \bar{t}_e .

Цель расчета теплового режима на первом этапе – определение интегральных тепловых характеристик: средних поверхностных температур корпуса блока (\bar{t}_K), нагретой зоны (\bar{t}_3) и среднеобъемной температуры среды между ними (воздуха) – \bar{t}_e .

Таким образом, тепловой режим блока характеризует $T = f(t_K, t_3, t_e)$.

При разработке тепловых моделей следует руководствоваться принципом иерархии: начинать тепловое моделирование надо с последнего, более крупного уровня, на котором учитываются мощности всех источников, внешнее и полное внутреннее тепловое воздействие. Следует учесть характеристики общей системы охлаждения приборного корпуса, взаимное влияние модулей и элементов. Только после этого можно рассматривать теплообмен на других, более мелких уровнях блока. Это *модели первой группы*.

В *тепловых моделях второй группы* нагретая зона представляется в виде однородного анизотропного тела. Такой подход обоснован тем, что некоторые РЭУ (например, ТЭЗы) содержат большое количество одинаковых элементов (микросхем, модулей). Так как ИМС стандартны по размерам, способу сборки, монтажа, то их можно рассматривать как элементарную конструктивную ячейку, которая повторяется на плате в трех измерениях, и тогда типовой элемент замены можно рассматривать как квазиоднородное тело. Эта система обладает дальним порядком. В такой модели прослеживается аналогия с твердым кристаллическим телом, свойства которого характеризуются теплопроводностью и теплоемкостью. Основными характеристиками модели являются эффективная теплопроводность и эффективная теплоемкость, которые удобно искать для элементарной ячейки (т.е. микромодулей).

3.7.4. Метод моделирования тепловых процессов в РЭА на базе топологических моделей

Под *топологической моделью* тепловых процессов (МТП) понимается модель, представленная в виде ненаправленного графа. Вершины (узлы) такого графа в МТП моделируют соответствующие конструктивные элементы и узлы конструкции РЭА (представляются в виде условно нагретых зон). Ветви (ребра) графа отражают в МТП тепловые потоки.

Переменными узлов МТП являются расчетные значения температур (T_i°), переменными ветвей будут тепловые потоки (ψ_{ij}), а параметрами ветвей – тепловые проводимости (X_{ij}). В общем случае при рассмотрении нестационарных тепловых процессов в МТП можно выделить два типа параметрических ветвей:

1-й тип – *параметрические диссипативные* ветви – ветви, для которых известны значения X_{ij} или аналитические выражения для расчета X_{ij} ;

2-й тип – *параметрические консервативные ветви* – ветви, для которых известны значения теплоемкостей (C_{ij}) или аналитические выражения для расчета C_{ij} .

В отличие от других видов моделей *топологические* модели тепловых процессов позволяют в простой форме задавать граничные условия различных родов и их комбинаций по объемам и поверхностям конструкции РЭА при помощи соответствующих компонентов графа (ветвей, источников заданной температуры и (или) источников с заданной тепловой мощностью).

К достоинствам топологических моделей следует также отнести:

- возможность довольно простого перехода, в случае необходимости, к другим унифицированным видам математических моделей РЭА;
- возможность применения единых методов формирования и решения математических моделей, включая аппарат теории чувствительности.

Топологическую МТП РЭА можно условно разделить на фрагменты двух типов:

1. Фрагменты МТП отдельных конструктивных узлов и элементов РЭА, отражающие протекание в них тепловых процессов *без учета* условий охлаждения (граничных и начальных условий).

2. Фрагменты МТП, *учитывающие* условия охлаждения (граничные условия).

Фрагменты МТП первого типа отражают тепловые модели конструктивных узлов (печатные узлы, функциональные ячейки, микросборки), которые могут быть легко получены на основе конечно-разностной аппроксимации уравнения теплопроводности. При этом следует отметить, что при таком подходе возможно формирование фрагментов МТП различного уровня детализации, что позволяет применять их на различных этапах проектирования, используя иерархический подход. Применение аналитических моделей для вычисления параметров ветвей МТП позволяет вычислять их через геометрические и теплофизические параметры конструкции блока РЭА, что дает возможность учитывать любые ее особенности как с позиций конструкторско-технологической реализации, так и с позиций охлаждения.

Фрагменты МТП второго типа представляют собой граничные условия 1 – 4 родов и их комбинации и выражаются в явном виде через геометрические и теплофизические параметры конструкции и теплофизические параметры окружающей среды.

Компоненты топологических тепловых моделей

При рассмотрении тепловых процессов, протекающих в блоке РЭА, можно выделить элементарные виды теплообмена, на основе которых могут разрабатываться топологические МТП.

Для наглядности изображения топологических МТП можно ввести графические изображения их ветвей (ребер), присвоив оригинальные обозначения компонентам графа топологической МТП. В табл. 3.18 приведены обозначения основных компонентов топологических тепловых моделей.

Таблица 3.18

Обозначения основных компонентов топологических МТП блока РЭА

Условное обозначение компонента	Вид компонента
	ветвь с заданным тепловым сопротивлением
	кондукция в декартовой системе координат
	кондукция в сферической системе координат
	контактный теплообмен
	тепловое излучение
	естественная конвекция в окружающую среду
	конвективно-кондуктивная передача тепла в воздушных прослойках
	конвективно-кондуктивно-лучистая отдача тепла с развитой (оребреной) поверхностью
	воздушный канал (естественная конвекция)
	обдув неразвитой поверхности
	обдув развитой поверхности
	конвективная теплопередача от стенок канала к вынужденному потоку теплоносителя в канале
	теплоперенос в продуваемом канале
<i>Консервативные компоненты:</i>	
	теплоемкость i -го элемента конструкции
<i>Активные компоненты:</i>	
	источник заданной температуры T ($^{\circ}\text{C}$)
	источник заданной тепловой мощности P (Вт)
	сток тепловой энергии
	базовый узел (имеет нулевой номер) – температурный потенциал узла, 0°C

3.7.5. Методика построения топологических моделей тепловых процессов нетиповых конструкций блоков РЭА

Из определения топологической МТП видно, что тепловая модель есть идеализированная схема путей распространения в конструкции РЭА тепловых потоков.

Под топологической моделью тепловых процессов (МТП) понимается модель, представленная в виде ненаправленного графа. Вершины (узлы) такого графа в МТП моделируют соответствующие конструктивные элементы и узлы конструкции РЭА (представляются в виде условно нагретых зон). Ветви (ребра) графа отражают в МТП тепловые потоки.

В зависимости от степени идеализации процессов теплообмена структура модели может меняться, т.е. может существовать множество вариантов тепловых моделей для одной и той же конструкции. Выбор того или иного варианта модели определяется *степенью идеализации* тепловых процессов в анализируемой конструкции, которая, в свою очередь, зависит от требуемой точности моделирования. На этапе идеализации конструкции закладывается основная погрешность моделирования картины температурного поля блока РЭА (БРЭА).

Процесс разработки модели тепловых процессов можно разделить на несколько этапов:

1-й этап. Идеализация конструкции

На данном этапе конструкцию БРЭА разбивают на условно изотермичные объемы (условно однородные тела с определенной среднеобъемной или среднеповерхностной температурой), а также пренебрегают определенными видами теплообмена (например, исключают из рассмотрения тепловое излучение и конвекцию с торцевых поверхностей печатных плат, пренебрегают передачей тепла через некоторые элементы крепления, например, передачей тепла через пластмассовые направляющие и т.п., исключают из рассмотрения, как малозначащие, некоторые виды теплоотдачи, например, конвективную передачу тепла внутри герметичной микросборки и т.п.). В качестве условно изотермичных объемов в БРЭА можно рассматривать обособленные ЭРИ (трансформаторы питания, дроссели, конденсаторы фильтров и т.п.), конструктивные элементы (панели корпуса, корпус блока, патрубки воздухопроводов, трубки для прокачки воды, термостатирующие плиты, кондуктивные теплостоки, элементы крепления и т.п.), конструктивные узлы (печатные узлы, узлы радиаторов, тепловые трубы, функциональные ячейки, микросборки и т.п.), воздушные потоки и объемы, окружающую среду, микроблоки и блоки и т.д.

Разбиение анализируемой конструкции объекта БРЭА на условно нагретые зоны зависит от конструктивных особенностей, степени теплонагруженности и условий охлаждения БРЭА, а также от требуемой точности моделирования, от принятых допущений и т.п.

2-й этап. Выделенным условно изотермичным объемам ставят в соответствие узлы (вершины графа), используя принципы сквозной нумерации для вершин графа. Чем больше количество изотермичных объемов, тем точнее будут моделироваться истинные значения температур в объекте, но, с другой стороны, будет увеличиваться размерность модели и время ее анализа на ЭВМ.

3-й этап. Узлы (вершины) графа соединяют между собой ветвями (ребрами), моделирующими соответствующие виды теплообмена между выделенными объемами (вершинами графа). Если в выделенном объеме рассеивается тепловая энергия, то в соответствующую вершину графа подключается источник тепловой мощности. Если для выделенного объема известна его температура, то в соответствующую вершину графа подключается источник заданной температуры.

Таким образом, по окончании трех этапов разработчик получает граф топологической МТП анализируемой БРЭА. Рассмотрим примеры построения МТП некоторых конструкций РЭА и БРЭА.

3.7.5.1. Особенности моделирования в различных системах координат

В прямоугольной системе координат (СК) изотермичный объем представляет собой прямоугольный объем, свойства которого сосредоточены в его центре (рис. 3.58, *а*) – узле МТП, его координаты $(x/2, y/2, z/2)$, где x, y, z – размеры дискрета.

В цилиндрической СК изотермичный объем ПП круглого тела будет представлять собой круглый пустотелый цилиндр (кольцо) (см. рис. 3.58, *б*) с размерами D_{max}, D_{min} , толщиной z , свойства которого будут сосредоточены в окружности диаметром

$$D = (D_{min} + D_{max}) / 2, \quad (3.194)$$

т.е. «узел» МТП будет представлять собой окружность данного диаметра.

В сферической СК изотермичный объем ПП круглого тела будет представлять собой круглый пустотелый шар (см. рис. 3.58, *в*). Свойства его будут сосредоточены в сфере с диаметром, определяемым по формуле (3.194).

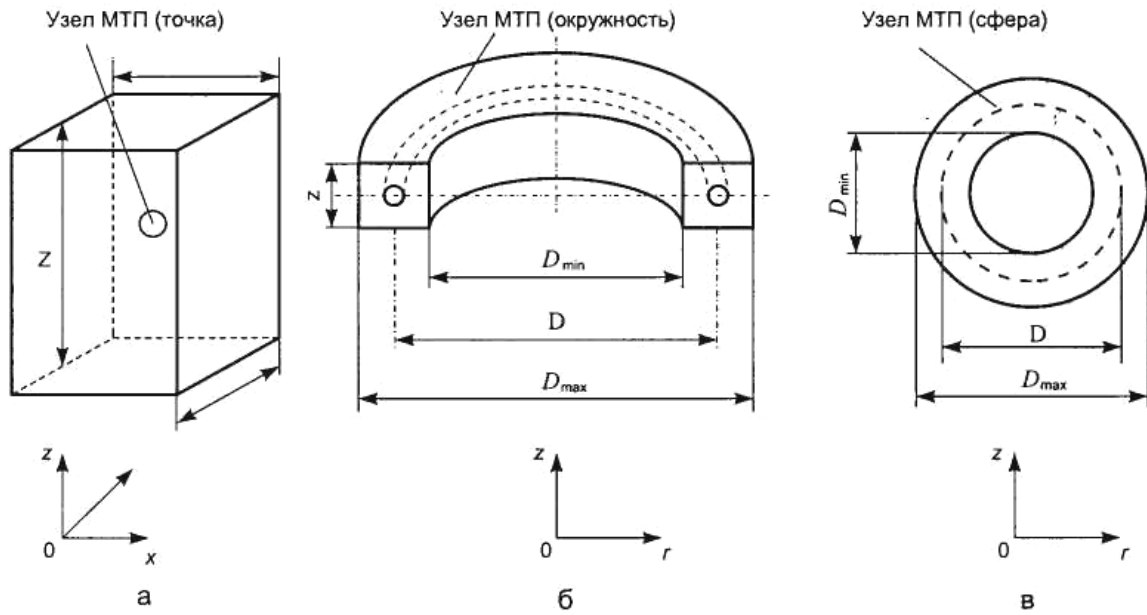


Рис. 3.58. Формы представления изотермичных объемов и узлов МТП: *а* – в прямоугольной СК; *б* – в цилиндрической СК; *в* – в сферической СК

Параметры, задаваемые при вычислении проводимостей, представленных на рис. 3.59 МТП, приведены в табл. 3.19.

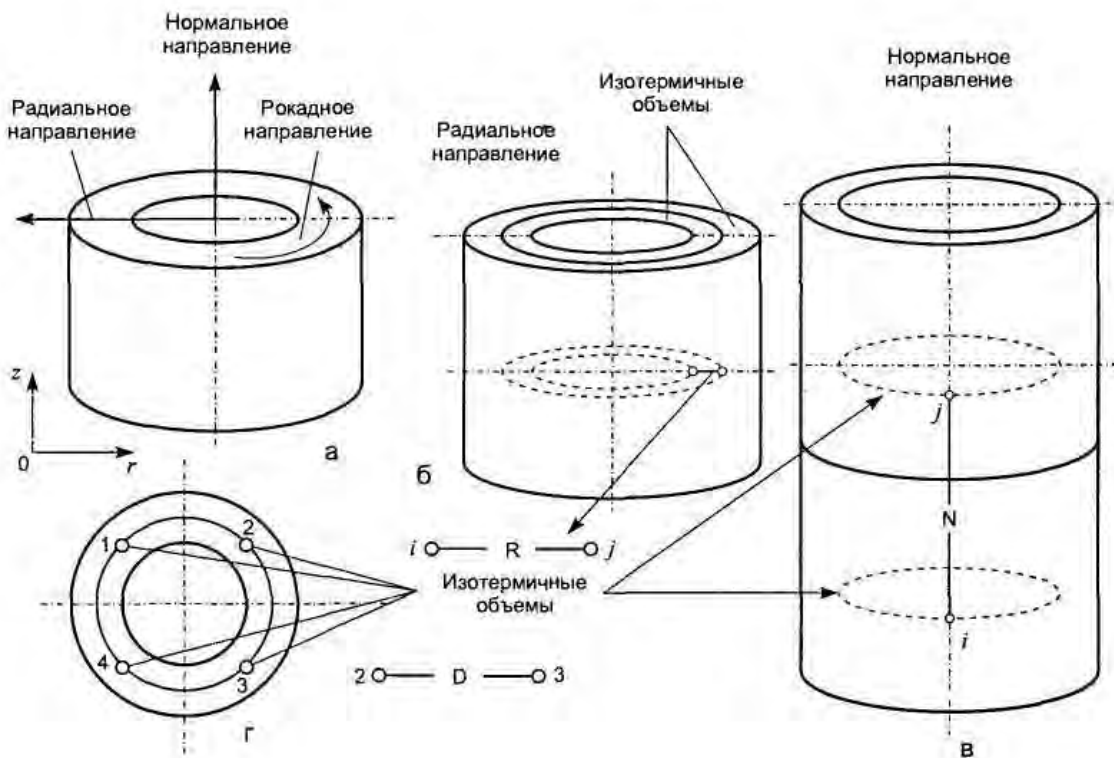


Рис. 3.59. Кондукция в цилиндрической системе координат: *а* – виды направлений; *б* – МТП для радиального направления; *в* – МТП для нормального направления; *г* – МТП для рокадного направления

Формы представления для МТП в различных СК

Объект	Прямоугольная СК	Цилиндрическая СК	Сферическая СК
Форма моделируемых тел	Параллелепипед	Полый цилиндр	Полый шар
Форма изотермического объема	Параллелепипед	Полый цилиндр	Полый шар
Место сосредоточения свойств	Точка	Окружность	Сфера

В качестве примеров ниже будут рассмотрены процессы формирования графов топологических моделей следующих конструкций РЭА и БРЭА:

- печатный узел, установленный в герметичном блоке;
- корпус блока РЭА в газовой среде с заданной температурой;
- нагретая зона внутри корпуса блока;
- воздушный канал, образованный стенкой корпуса блока РЭА и печатным узлом;
- блок этажерочной конструкции, устанавливаемый посредством стоек-панелей к теплоотводящему основанию с заданной температурой;
- гибридно-интегральный модуль, установленный на теплостойки;
- конструкция вторичной системы электропитания в микроэлектронном исполнении, установленная на воздуховод;
- стоечные конструкции с принудительным воздушным и водяным охлаждением.

3.7.5.2. Печатный узел, установленный в герметичном блоке

Рассмотрим печатный узел, установленный в герметичном блоке (рис. 3.60).

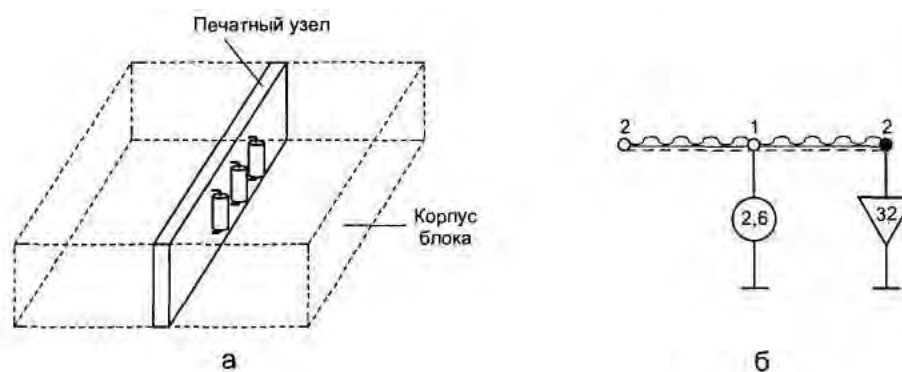


Рис. 3.60. Эскиз конструкции блока с установленным в нем печатным узлом (а) и граф его модели тепловых процессов (б)

Температура корпуса известна и составляет 32 °С. Мощность тепловыделения в печатном узле составляет 2,6 Вт.

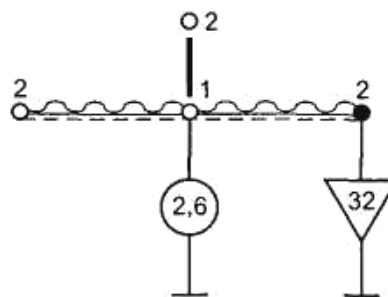
Идеализируем конструкцию: представим печатный узел в виде условно изотермичного объема (узел 1); корпус блока примем также в виде условно изотермического объема с заданной температурой (узел 2).

На следующем этапе *исключаем из рассмотрения* несущественные тепловые связи – тепловое излучение и конвекцию с торцевых поверхностей печатного узла, а также пренебрегаем кондуктивной передачей теплового потока через элементы крепления печатного узла к корпусу блока.

На заключительном этапе между условно нагретыми зонами устанавливаем тепловые связи.

Тепловая энергия, выделяемая в печатном узле (узел 1), передается с каждой поверхности печатной платы корпусу посредством теплового излучения и конвекции в воздушных прослойках (ветви 1-2), как это показано на рис. 3.60, б. В случае учета передачи тепловой энергии *через элементы крепления печатного узла к корпусу блока* (например, через разъем или теплосток) МТП примет вид, показанный на рис. 3.61.

Рис. 3.61. Топологическая тепловая модель системы тел «печатный узел – корпус блока»



3.7.5.3. Корпус блока РЭА в газовой среде с заданной температурой

Для примера построения МТП используем корпус блока РЭА в газовой среде с заданной температурой T_{oc} (рис. 3.62, а). Принимаем допущения: каждую стенку корпуса 1-6 (1 – лицевая; 2 – задняя; 3 – нижняя; 4 – верхняя; 5 – левая боковая; 6 – правая боковая) будем считать изотермичной.

Пренебрегаем перепадом температур по толщине стенок корпуса из-за незначительной толщины стенок корпуса (обычно 1 – 3 мм) и достаточно высокого коэффициента теплопроводности материала корпуса (обычно 130 – 180 Вт/(м·К)).

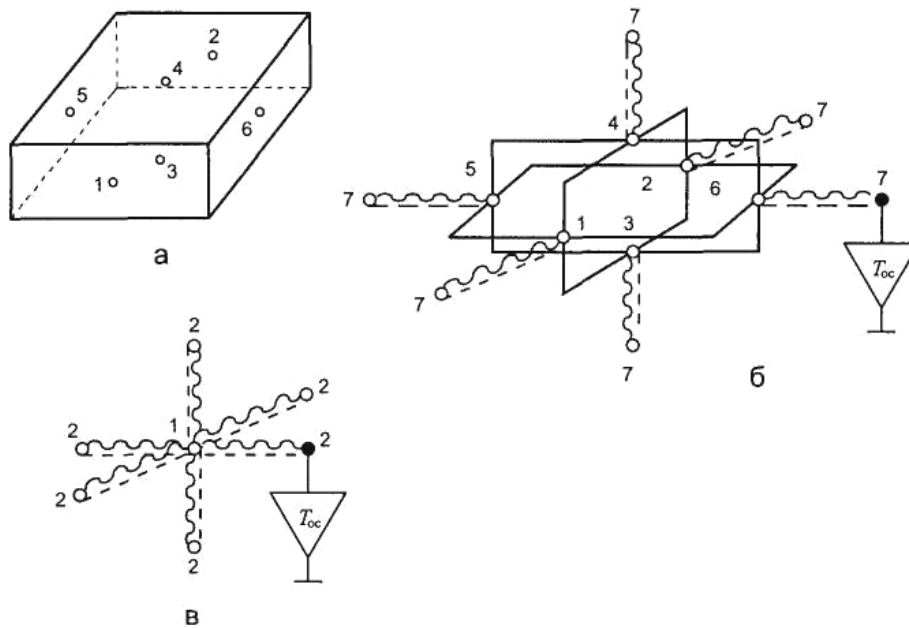


Рис. 3.62. Корпус блока РЭА: *а* – корпус блока РЭА в газовой среде; *б* – тепловая топологическая модель (стенки корпуса блока изотермичны); *в* – упрощенная тепловая топологическая модель (весь корпус блока изотермичный: узел 1 – корпус блока, узел 2 – окружающая среда)

На рис. 3.62, *б* приведена тепловая топологическая модель корпуса блока, в которой отражена кондуктивная передача тепла по стенкам корпуса (ветви: 1-4, 4-2, 2-3, 3-1, 1-5, 5-2, ..., 3-5) и отдача тепловой энергии с поверхностей корпуса в окружающую среду посредством естественной конвекции и излучения (ветви: 3-7, 1-7, ..., 6-7). Представленную модель следует использовать, например, при неравномерных мощностях тепловыделений в конструктивных узлах и элементах, располагающихся внутри корпуса блока. Упрощенная топологическая тепловая модель корпуса блока РЭА приведена на рис. 3.62, *в*. В упрощенной модели исключены ветви, отражающие кондуктивную передачу тепловой энергии по стенкам корпуса, а сам корпус принимается изотермичным (узел № 1).

3.7.5.4. Нагретая зона внутри корпуса блока РЭА

На рис. 3.63, *а* представлен корпус блока, находящийся в газовой среде с температурой T_{oc} . В условно нагретой зоне выделяется тепловая мощность 5,2 Вт.

В ряде случаев необходимо определить в результате моделирования температуру воздуха внутри корпуса блока. Для этого может быть использована тепловая модель, рассматриваемая в данном примере и даю-

шая удовлетворительный, с точки зрения погрешности моделирования, результат (10 – 15 %).

В приводимой на рис. 3.63, б – г МТП выделены следующие условно нагретые зоны: 1 – 6 – стенки корпуса; 7 – окружающая среда; 8 – нагретая зона, в которой выделяется тепловая мощность; 9 – газовый объем внутри корпуса РЭА. В случае необходимости фрагменты тепловой модели, представленные на рис. 3.63, б, в, могут быть заменены на модель, приводимую на рис. 3.63, в.

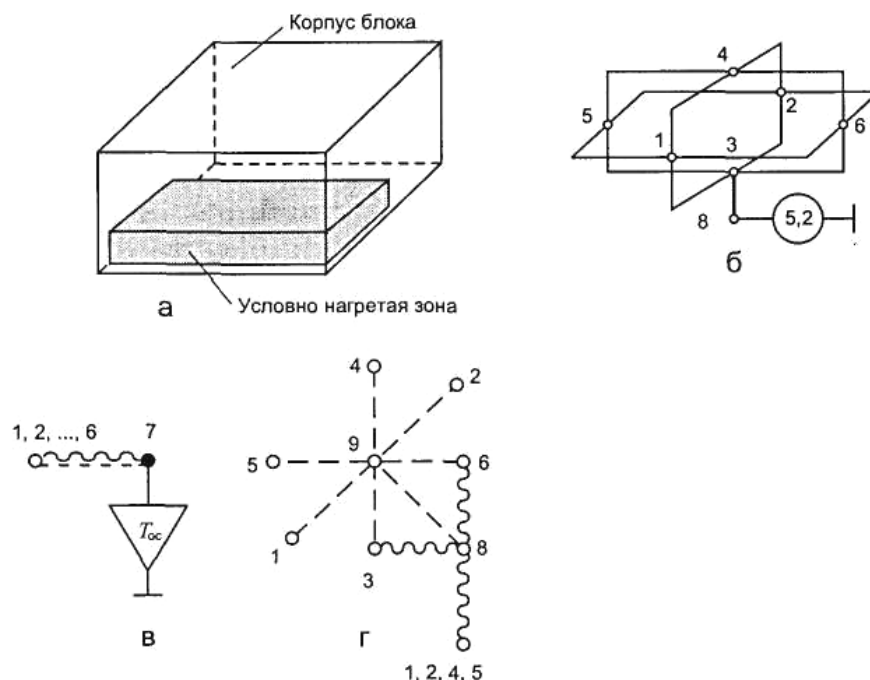


Рис. 3.63. Корпус блока РЭА с нагретой зоной внутри, корпус находится в газовой среде (а) и его тепловая модель: б – кондукция по стенкам корпуса; в – конвекция и излучение в окружающую среду; г – конвекция и излучение внутри корпуса

Рассмотрим кратко тепловые процессы, описываемые представленной на рис. 3.63, б – г моделью. Тепловая энергия, выделяемая в нагретой зоне (узел № 3), передается посредством контактного теплообмена на нижнюю стенку корпуса (ветвь 8-3), а также в газовый объем внутри корпуса путем конвекции (ветвь 8-9). Затем посредством конвективного теплообмена часть тепловой энергии передается на стенки корпуса (ветви 9-1, 9-2, ..., 9-6). Кроме этого, с нагретой зоны часть тепловой энергии передается тепловым излучением стенкам корпуса (ветви 8-1, 8-2, ..., 8-6 на рис. 3.63, г). Поступившая на корпус тепловая энергия распространяется посредством кондукции по его стенкам (ветви 1-8, 1-4, 4-2, 2-3, 3-1, 1-5, ...,

4-6 на рис. 3.63, б), а также передается (с внешних поверхностей) в окружающую среду путем излучения и естественной конвекции (ветви: 1-7, 2-7, ..., 6-7 на рис. 3.63, в).

3.7.5.5. Воздушный канал

На рис. 3.64, а изображен воздушный канал, образованный стенкой корпуса блока РЭА и печатным узлом. Между стенкой и печатным узлом продувается воздух с температурой +30 °С.

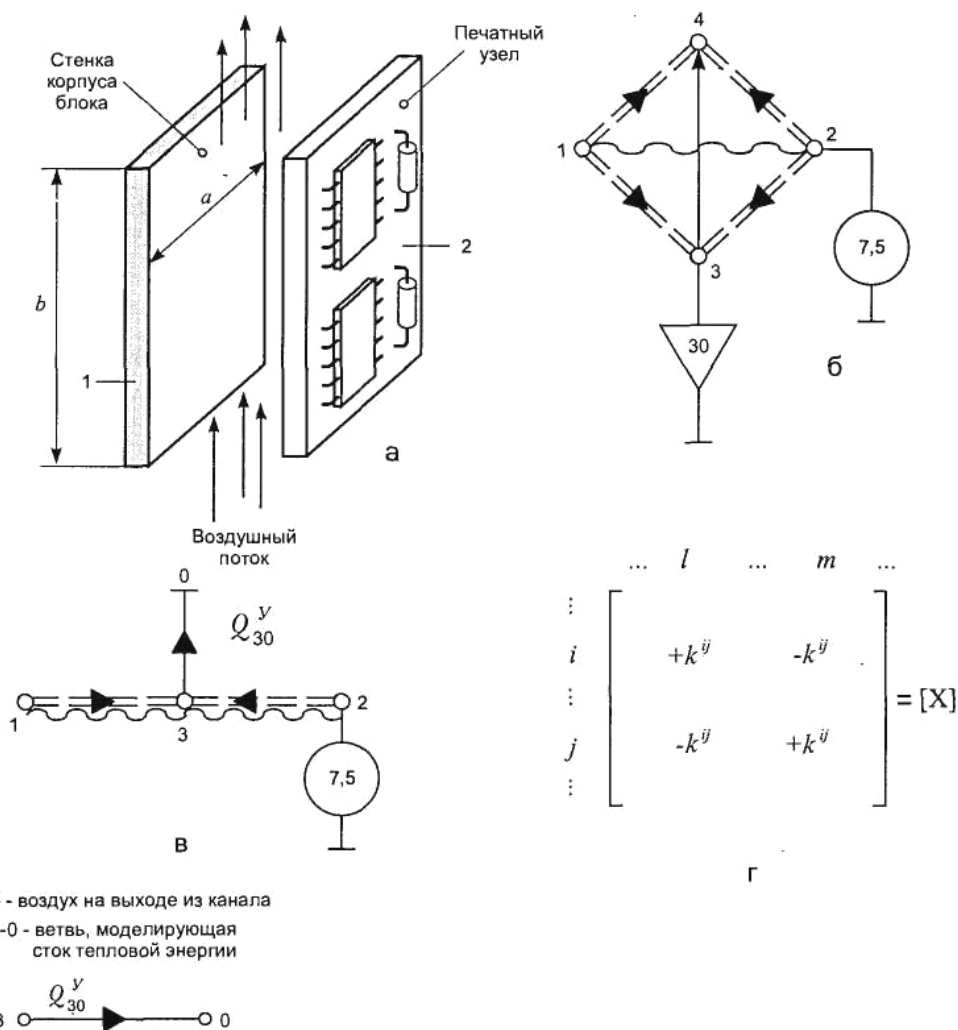


Рис. 3.64. Плоский воздушный канал (а); его тепловая топологическая модель (б) и (в); матрица тепловых проводимостей (z)

На рис. 3.64, б представлена топологическая МТП воздушного канала. На изображенной модели узлы графа моделируют: 1-й узел – стенку корпуса блока; 2-й узел – печатный узел с тепловыделением 7,5 Вт; 3-й узел – воздушный поток на входе в канал с заданной температурой 30 °С;

4-й узел – воздушный поток на выходе из канала. Ветви (ребра) графа на рис. 2.27, б отражают вынужденную конвекцию в воздушный канал (ветви 1-3, 1-4, 2-3, 2-4), теплоперенос (ветвь 3-4), а также излучение между стенками канала (ветвь 1-2).

При этом конвекция осуществляется со стенок канала в воздушный поток на входе в канал (конвектирует поверхность стенки канала площадью $S = (a \cdot b)/2$, например, ветвь 1-3, а также воздушный поток на выходе из канала (конвектирует поверхность стенки канала площадью $S = (a \cdot b)/2$, например, ветвь 1-4).

Представленная модель является фрагментом, так как не учитывает тепловое взаимодействие стенки канала (узел 1) с окружающей средой и с другими элементами корпуса блока, а также тепловое взаимодействие печатного узла с другими возможными конструктивными узлами и элементами блока, в котором он устанавливается.

На рис. 3.64, в приведена другая форма представления модели канала, которая вместо ветви 3-4 отражает сток тепловой энергии зависимым источником (источником потокового воздействия (мощности), управляемого разностью потенциалов (температур) $Q_{ij}^y = K^{ij} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ t_l - t_m \end{pmatrix}$, где K^{ij} – коэффициент пропорциональности, включенный между узлами 3 и 0 графа тепловой модели.

На рис. 3.64, г показана структура матрицы тепловых проводимостей при включении в модель зависимого источника, $Q_{ij}^y = K^{ij} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ t_l - t_m \end{pmatrix}$.

В дальнейшем для большей наглядности будем использовать первую форму представления модели канала (см. рис. 3.64, б).

3.7.5.6. Блок этажерочной конструкции БРЭА

Блок этажерочной конструкции БРЭА, устанавливаемый при помощи винтов к теплоотводящему основанию с заданной температурой (40 °С), представлен на рис. 3.65.

Блок комплектуется функциональными ячейками (ФЯ), которые крепятся при помощи винтов торцевыми поверхностями к двум стойкам-панелям, играющим также роль теплостоков. Блок располагается в отсеке космического аппарата, в котором находится вакуум. Перед построением тепловых связей графа модели разобьем конструкцию на условно нагретые зоны.

Будем считать в качестве условно нагретых зон (рис. 3.66) каждую функциональную ячейку (узлы 1-5), стойки-панели (узлы 6-7), ближайший конструктивный элемент – узел 8 (температура элемента задана равной плюс 50 °С), с которым происходит лучистый теплообмен пятой ФЯ, и теплоотводящее основание (узел 9).

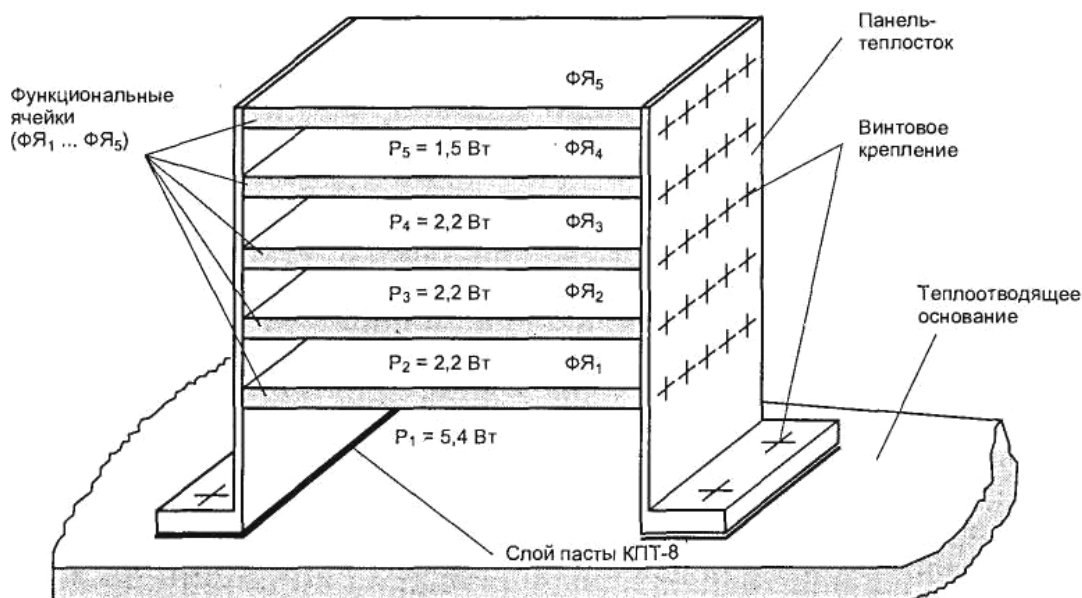


Рис. 3.65. Эскиз блока этажерочной конструкции, установленного на теплоотводящем основании

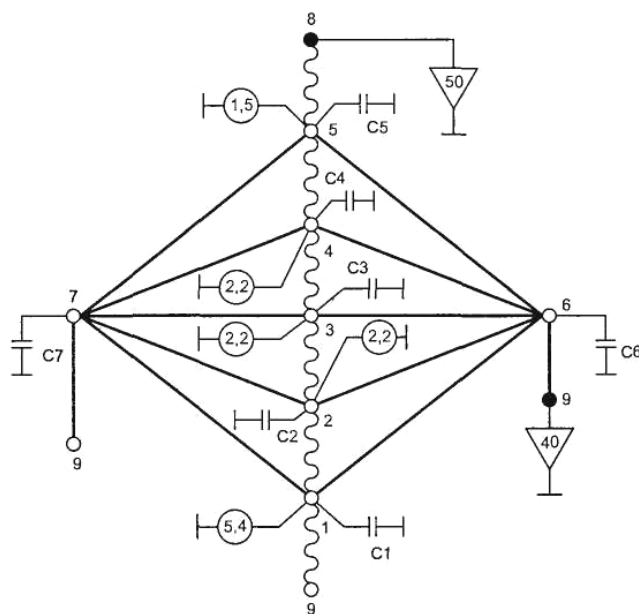


Рис. 3.66. Граф топологической МТП блока этажерочной конструкции

Учитывая, что блок находится в вакуумном пространстве, исключим из рассмотрения конвективную составляющую. Кроме этого, пренебрегаем отдачей тепловой энергии посредством излучения с ФЯ на стойки-панели, так как контактный теплообмен от ФЯ к стойкам-панелям будет играть более значительную роль – роль стока тепловой энергии на теплоотводящее основание. С учетом вышепринятых допущений граф тепловой топологической модели блока этажерочной конструкции будет иметь вид, представленный на рис. 3.66.

Приведенный граф топологической МТП позволяет исследовать тепловые режимы в нестационарной области, что отражено введением в граф модели *консервативных составляющих* – теплоемкостей функциональных ячеек (C_1-C_5) и панелей (C_6, C_7).

3.7.5.7. Гибридно-интегральный модуль, установленный на теплостоки

На рис. 3.67 и 3.68 представлен эскиз конструкции гибридно-интегрального модуля (ГИМ) и способ его установки на теплостоки, а на рис. 3.69 – МТП ГИМ. На дно корпуса ГИМ при помощи клея установлены две бескорпусные микросборки А1 и А2 (выделяют тепловые мощности 1,5 и 2,6 Вт соответственно), а также трансформатор Т1 (мощность тепловыделения 0,8 Вт). Корпус ГИМ выполнен из сплава АМц ($\lambda = 180$ Вт/(м·К).

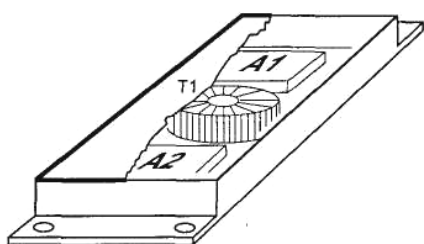


Рис. 3.67. Эскиз конструкции гибридно-интегрального модуля: А1 и А2 – бескорпусные микросборки; Т1 - трансформатор

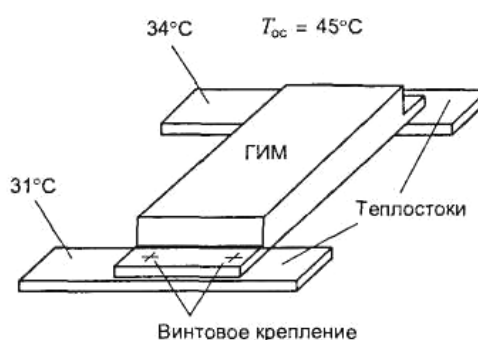


Рис. 3.68. Способ установки гибридно-интегрального модуля в микроэлектронной аппаратуре

ГИМ устанавливается при помощи винтов на два теплостока с заданными температурами (31 и 34 °С). Окружающий ГИМ воздушный объем имеет температуру 45 °С.

Идеализируем рассматриваемую конструкцию.

Примем в качестве условно нагретых зон следующие элементы конструкции: микросборки и трансформатор (узлы 1-3), корпус ГИМ (узел 4), теплостоки (узлы 6 и 7) и воздушный объем – окружающую среду (узел 5). Корпус ГИМ принимаем изотермичным ввиду того, что он выполнен из материала с высоким коэффициентом теплопроводности (сплав Д16).

На рис. 3.69 представлен граф топологической тепловой модели, в которой принято вышеописанное разбиение конструкции на изотермичные объемы. Данная МТП отражает следующий механизм распространения тепловых процессов. Тепловая энергия, выделяемая в элементах А1, А2 и Т1 ГИМ (моделируется включением в узлы 1-3 источников тепловой мощности), передается через клеевой слой на корпус ГИМ (ветви: 1-4, 2-4, 3-4 на рис. 3.69, а). Часть тепловой энергии передается с элементов А1, А2 и Т1 на корпус ГИМ посредством конвекции и излучения (ветви 1-4, 2-4, 3-4 на рис. 3.69, б), затем тепловая энергия с корпуса ГИМ передается контактным теплообменом на теплостоки (ветви 4-6 и 4-7) и отдается в окружающую среду путем естественной конвекции и излучения (ветвь 4-5 на рис. 3.69, а). Известные температуры теплостоков и окружающей среды моделируются путем включения в соответствующие узлы модели (узлы 5 – 7) источников с заданной температурой.

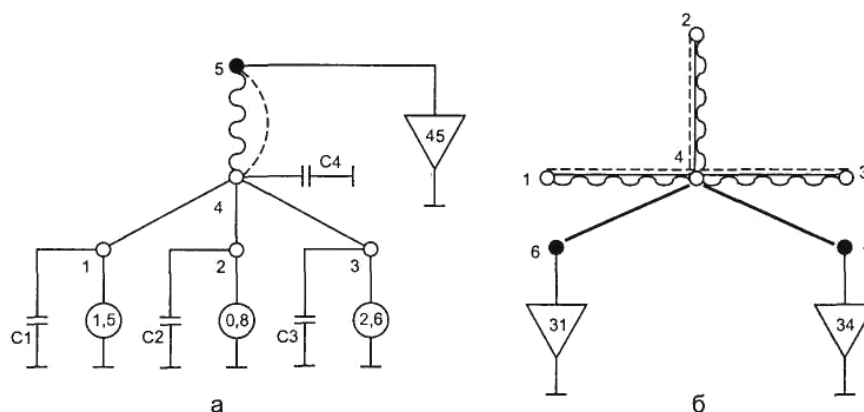


Рис. 3.69. МТП гибридно-интегрального модуля

Для моделирования процесса нагрева конструктивных узлов и элементов ГИМ в соответствующие узлы МТП включены теплоемкости ($C_1 - C_4$).

3.7.5.8. Конструкция системы вторичного электропитания в микроэлектронном исполнении

Эскиз конструкции системы вторичного электропитания представлен на рис. 3.70. На воздуховоде (выполнен из алюминиевого сплава) ус-

тановлены четыре источника вторичного электропитания (ИВЭП), выполненные в виде гибридно-интегральных модулей. Через воздуховод продувается воздух с температурой 30 °С. Вся конструкция находится в окружающей среде с температурой 50 °С.

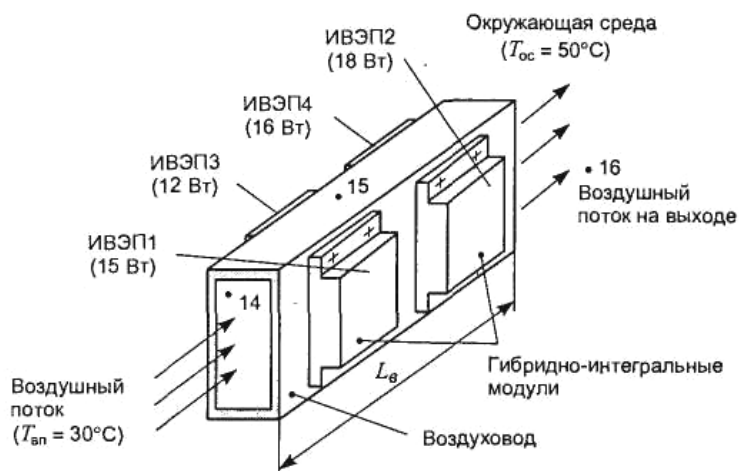


Рис. 3.70. Эскиз конструкции системы вторичного электропитания (в микроэлектронном исполнении), установленной на воздухоотводе

Идеализируем процессы теплопередачи в рассматриваемой конструкции:

1. Условно разделим воздуховод на две части, на которых попарно установлены ИВЭП. Для каждой части примем изотермичными стенки воздуховода. Первая часть воздуховода будет представлена объемами 1-4, а вторая – объемами 5-8. Стенки воздуховода будем считать изотермичными по толщине.

2. Каждый ИВЭП представим в виде условно нагретых объемов (объемы 9 – 12).

3. Примем в качестве окружающей среды изотермичный объем с номером 13.

4. Воздушный поток представим тремя условно изотермичными объемами (см. рис. 3.70): объем 14 – воздух на входе в воздуховод; объем 15 – воздух внутри воздуховода (центр); объем 16 – воздух на выходе воздуховода.

В объемы, моделирующие ИВЭП, подключаем источники тепловыделения (15, 16, 18 и 12 Вт соответственно), а в объемы, моделирующие воздушный поток на входе в воздуховод и окружающую среду, подключаем источники с заданной температурой (30 и 50 °С соответственно).

С учетом принятой идеализации на рис. 3.71 представлена топологическая МТП. Рассмотрим *тепловые процессы*, описываемые представленной МТП.

Тепловая энергия, выделяемая ИВЭП-ИВЭП₄ (узлы 9-12), посредством контактного теплообмена передается на боковые стенки воздуховода (ветви графа 9-14, 10-8, 11-2, 12-6 на рис. 3.71, *а, в*). Часть тепловой энергии отдается в окружающую среду с поверхностей корпусов ИВЭП и стенок воздуховода путем естественной конвекции и излучения (фрагмент МТП на рис. 3.71, *б*). Другая часть тепловой энергии распространяется по стенкам воздуховода путем кондукции (см. рис. 3.71, *а*) и снимается воздушным потоком с внутренних стенок воздуховода (см. рис. 3.71, *г*). В рассматриваемой МТП воздушный канал моделируется двумя участками (ветви 14-15 и 15-16 на рис. 3.71, *г*). Длина одного условного канала составляет $L\epsilon/2$ (см. рис. 3.70).

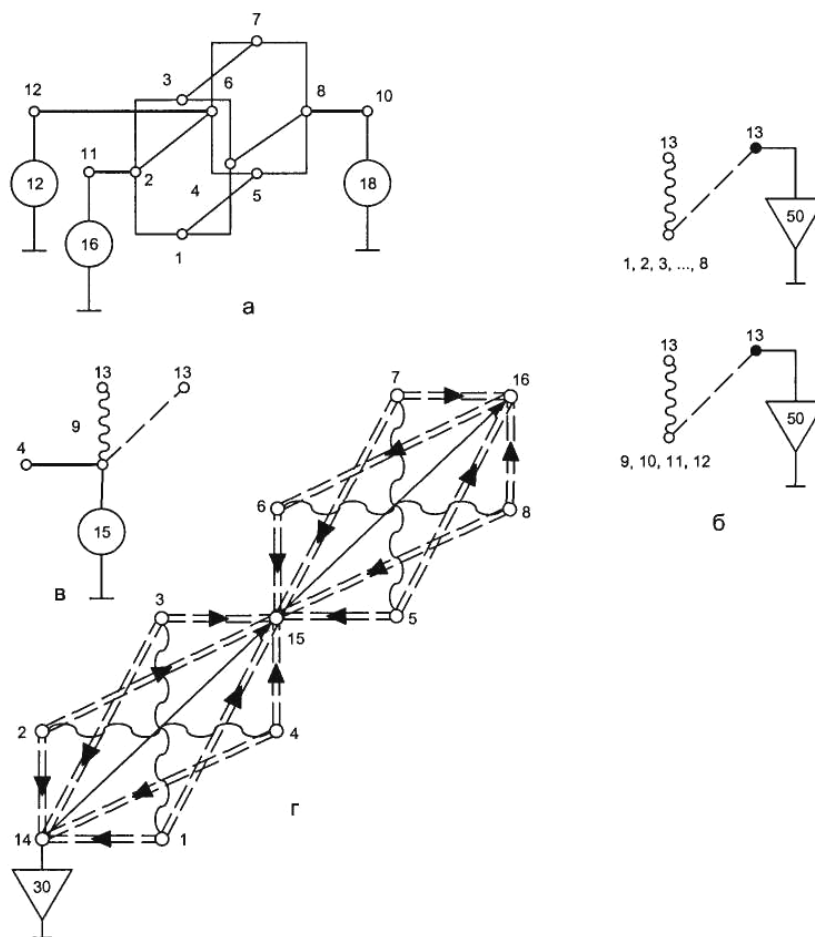


Рис. 3.71. МТП конструкции, представленной на рис. 3.70: *а* – кондукция по стенкам воздуховода и контактный теплообмен ГИМ с воздуховодом; *б* – отдача тепла с внешних поверхностей воздуховода и ГИМ в окружающую среду посредством естественной конвекции и излучения; *в* – макромодель ГИМ; *г* – передача тепловой энергии внутри воздуховода по воздушным каналам и излучением

Таким образом, ветви 1-14, 1-15, 2-14, 2-15, ..., 4-14, 4-15 (см. рис. 3.71, *з*) относятся к первому участку воздуховода (каналу в целом), а ветви 5-15, 5-16, 6-15, 6-16, ..., 8-16 – ко второму участку. Данное обстоятельство следует учитывать при задании параметров ветвей 61-го и 62-го типов.

На рис. 3.72 изображены упрощенные МТП конструкции системы вторичного электропитания (см. рис. 3.70). Приведенные модели идентичны по содержанию, а отличаются лишь представлением в них теплопереноса энергии в канале. Приведенные на рис. 3.72 МТП следует использовать в ориентировочных расчетах, например, для определения необходимого расхода воздуха через воздухопровод МТП. Представленная на рис. 3.71 модель может использоваться при решении задачи по обеспечению необходимых перегревов корпусов ИВЭП. Если в МТП, приведенной на рис. 3.71, использовать МТП ГИМ, представленную на рис. 3.69, то можно вести тепловое проектирование системы электропитания (см. рис. 3.70) на уровне обособленных ЭРИ и микросборок, которыми компонуются ИВЭП, выполняемые в виде ГИМ.

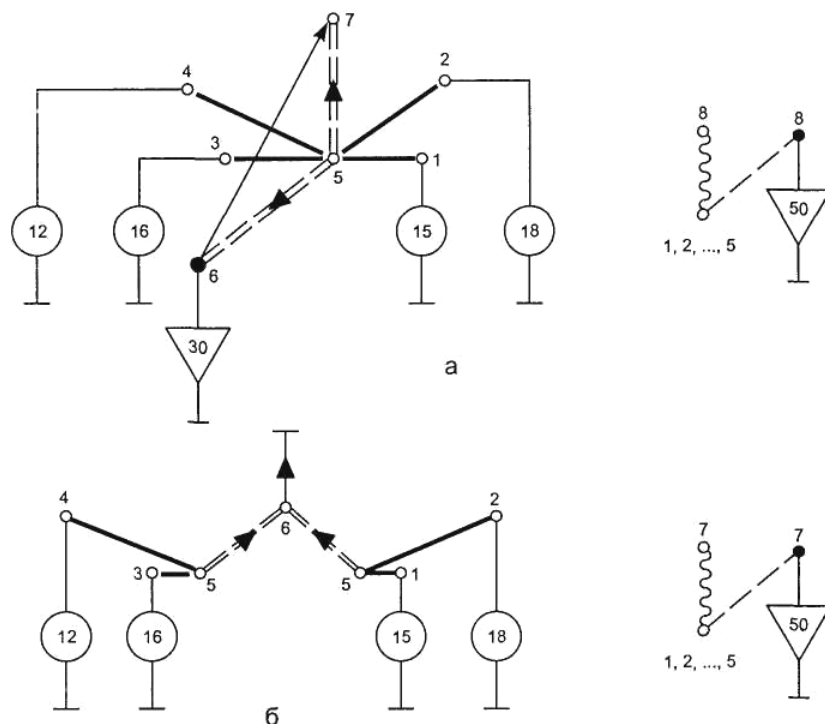


Рис. 3.72. Упрощенная топологическая тепловая модель конструкции системы вторичного электропитания (см. рис. 3.69): *а* – узлы 1 – 4 – ИВЭП₁...ИВЭП₄; узел 5 – воздухопровод; узел 6 – воздух на входе в воздухопровод; узел 7 – воздух на выходе из воздухопровода; узел 8 – окружающая среда; *б* – узлы 1 – 4 – ИВЭП₁...ИВЭП₄; узел 5 – воздухопровод; узел 6 – воздух на выходе из воздухопровода; узел 7 – окружающая среда

3.8. Системы обеспечения тепловых режимов РЭС

3.8.1. Основные определения

Необходимого (нормального) температурного (теплового) режима работы элементов и РЭС можно добиться осуществлением ряда мероприятий. К их числу относятся: разработка термостабильных элементов и схем, соответствующая компоновка узлов и РЭС в целом, применение терморегулирования и т.д.

Одним из основных методов защиты РЭС от тепловых воздействий является использование систем обеспечения теплового режима РЭС (СОТР). СОТР обычно предназначена для поддержания заданного в технических условиях (ТУ) диапазона температур на элементах РЭС, чтобы обеспечить ее надежность при определенных тепловых воздействиях и других специальных требованиях. Кроме основного назначения СОТР может выполнять и другие функции: защищать РЭС от влаги и пыли, химического, биологического и радиационного воздействия внешней среды; создавать санитарные условия для обслуживающего персонала; увеличивать диэлектрическую прочность межэлементных промежутков и пр.

В зависимости от баланса внутренних и внешних тепловых воздействий СОТР может либо отводить тепло от РЭС (охлаждение), либо подводить тепло к РЭС (нагревание). Подогрев РЭС осуществляется обычно достаточно простыми методами (например, омическими электронагревателями). Наибольшие трудности встречаются при охлаждении и, как правило, основной арсенал средств и методов, используемых в СОТР, направлен на регулирование процесса отвода тепла от элементов РЭС. Поэтому при анализе температурного поля РЭС часто пользуются термином «охлаждение РЭС».

В радиоэлектронных комплексах СОТР, как правило, являются сложными системами, состоящими из многих элементов, коммуникаций и несущих конструкций. В некоторых случаях регулирование температуры в РЭС может быть достигнуто за счет простейших конструктивных решений, осуществляющих теплопередачу между элементами РЭС, элементами несущей конструкции и окружающей средой. Тогда нет смысла рассматривать СОТР как отдельное изделие, и мы будем пользоваться терминами «методы (или способы) охлаждения РЭС». Этими же терминами будем пользоваться и при исследовании температурного поля элементов РЭА в результате действия некоторых гипотетических СОТР, когда конкретная конструкции СОТР не рассматривается.

3.8.2. Элементы и устройства систем обеспечения тепловых режимов

Наиболее распространенными элементами СОТР являются вентиляторы, насосы, теплообменники, холодильники, нагреватели. Особое место занимают теплоносители. Под теплоносителем понимаем вещество в жидком, газообразном или двухфазном состоянии, используемое для переноса тепла от РЭС к элементам СОТР и обратно.

Все оборудование радиоэлектронных комплексов располагается в зданиях (стационарных помещениях) либо на подвижных объектах – автомашинах, прицепах, самолетах и вертолетах, спутниках, космических кораблях и ракетах; морских и речных судах. Подвижные объекты обычно называют носителями. Здания и носители могут предназначаться либо для размещения радиоэлектронного комплекса, либо выполнять другие задачи. В последнем случае радиоэлектронные комплексы располагаются в специальных помещениях и отсеках. Конструкции зданий и носителей, а также дополнительное оборудование, установленное в них, часто зависят от условий эксплуатации, технических и прочих задач, решаемых радиоэлектронным комплексом.

Тепловой режим РЭС характеризуется, прежде всего, двумя факторами – электрическим режимом работы и условиями эксплуатации.

Электрический режим работы РЭС в данном случае интересует нас только в связи с изменением внутренних тепловых воздействии во времени и пространстве и задается обычно в виде графиков зависимости рассеиваемой мощности от времени для различных узлов РЭС. Деление РЭС на узлы зависит от класса решаемой задачи. Так, при исследовании теплового режима блока узлами могут быть платы либо отдельные мощные элементы, для стойки – отдельные блоки, для группы стоек – отдельные стойки и т.д. Задание рассеиваемой мощности по отдельным узлам характеризует распределение внутренних тепловых воздействий.

Изменение рассеиваемой мощности во времени может носить различный характер. На практике типичны три режима работы – длительный, кратковременный, периодический. В первом случае РЭС в течение достаточно большого промежутка времени рассеивает постоянную по величине мощность. Понятие «достаточно большой промежуток» соответствует тому времени, в течение которого тепловой режим РЭС полностью устанавливается. Во втором случае РЭС включается на небольшой промежуток времени, в течение которого тепловой режим РЭС не устанавливается. Здесь температура на элементах РЭС будет зависеть не только от величи-

ны рассеиваемой мощности и условий теплообмена, но и от длительности ее включения. В третьем случае различают время включения и время паузы. При определенных значениях скважности, несмотря на периодичность процесса в целом, можно считать режим либо кратковременным, либо длительным. Если время паузы настолько мало, что тепловой режим РЭС за время паузы мало меняется, то такой режим может быть отнесен к длительному. Если за время включения тепловой режим РЭС устанавливается, то независимо от длительности паузы этот режим может рассматриваться как длительный.

С точки зрения обеспечения заданного по техническим условиям (ТУ) теплового режима РЭС длительный режим работы обычно является наиболее тяжелым. Основное влияние на тепловой режим РЭС и конструкцию СОТР с точки зрения условий эксплуатации оказывают внешние тепловые воздействия. Внешние тепловые воздействия по характеру изменения делятся на длительные, медленно и быстро изменяющиеся. Длительные внешние тепловые воздействия характерны для РЭС, размещаемого в зданиях и отсеках, оборудованных собственными централизованными системами кондиционирования и терморегулирования. Например, температура воздуха в отсеке РЭС, размещаемого в крупных самолетах, регулируется общей СОТР самолета. РЭС, размещаемые в залах крупных вычислительных центров, подсоединяются к центральной системе кондиционирования воздуха в помещениях и т.д. Длительные тепловые воздействия учитываются величиной максимально допустимой температуры воздуха по ТУ для этих помещений.

Медленно изменяющиеся тепловые воздействия характерны для радиоэлектронных комплексов, тепловой режим которых в значительной степени зависит от температуры окружающей среды. Медленные изменения внешних тепловых воздействий в этом случае связаны с суточными и сезонными изменениями температуры окружающей среды в определенных климатических зонах нижних слоев атмосферы, с физико-метеорологическими свойствами верхних слоев атмосферы. Медленно изменяющиеся тепловые воздействия задаются в виде верхнего и нижнего предельных значений вероятностного закона распределения температуры окружающей среды.

Наименьший диапазон изменения температуры окружающей среды имеют РЭС, расположенные в стационарных отапливаемых помещениях, в наземных передвижных объектах и на кораблях. Диапазон изменения температуры значительно шире. Особенно большие изменения температуры имеют место в отсеках самолетов и ракетно-космических объектов.

Быстро изменяющиеся тепловые воздействия характерны для РЭС, расположенного в негерметичных отсеках самолетов, ракет и космических кораблей, и вызваны изменением температуры окружающей среды при изменениях скорости и высоты полета. Эти тепловые воздействия задаются в виде графика изменения температуры окружающей среды в отсеке во времени либо в виде профиля полета. В последнем случае по графику профиля полета рассчитывается график изменения температуры в отсеке.

Изменение температуры окружающей среды является основным (первичным) фактором при оценке влияния условий эксплуатации на тепловой режим РЭС и конструкцию СОТР. Однако имеют место вторичные и третичные факторы, которые в той или иной мере необходимо принимать во внимание при оценке влияния условий эксплуатации РЭС и СОТР.

Вторичными факторами являются давление окружающей среды и среды внутри кожуха аппарата, наличие невесомости. Они могут значительно изменить условия теплообмена. Вторичные факторы существенно сказываются на работе РЭС, размещенного в отсеках самолетов, ракет и космических аппаратов. При невесомости теплопередача конвекцией в естественных условиях отсутствует, а при пониженном давлении значительно ухудшается. Это необходимо учитывать при конструировании РЭС и СОТР.

Третичными факторами являются влажность, химический и биологический состав газа в окружающей среде, запыленность газа, воздействие солнечной и искусственной радиации, механические воздействия, изменение физико-химического состава охлаждающих жидкостей.

При повышенной влажности окружающего воздуха, используемого для охлаждения РЭС, часто необходимо принимать специальные меры либо применять специальные устройства для уменьшения влажности. Специальные меры обычно состоят в том, чтобы воспрепятствовать выпадению влаги на отдельных поверхностях РЭС либо ее заносу в РЭС с окружающих поверхностей.

Специальные устройства для уменьшения влажности воздуха часто входят в состав СОТР; как правило, это различные влагоуловители либо осушители воздуха. Применение специальных мер или устройств для уменьшения влажности воздуха усложняет конструкции СОТР и ограничивает их возможные режимы работы.

Если химический и биологический состав окружающего газа и (или) наличие в нем искусственной радиации не позволяют использовать его для охлаждения РЭС, то возникает необходимость в применении специальных фильтрующих установок. Современное РЭС обычно использует большое

количество воздуха. Применение специальных фильтрующих установок на большие производительности может привести к столь значительному увеличению габаритов и массы СОТР, что практически исключает возможность использования газа из окружающей среды для охлаждения РЭС. В этом случае для защиты РЭС от вредного воздействия газа из окружающей среды применяют СОТР с замкнутым контуром, а газ из окружающей среды, предварительно очищенный в специальных фильтрах, используется только для подпитки. В СОТР с замкнутым контуром возникает необходимость в охлаждении теплоносителя, что в значительной степени усложняет ее конструкцию. Для охлаждения теплоносителя обычно применяются теплообменники или холодильные машины.

При защите РЭС и (или) элементов СОТР от пыли используются пылевые фильтры различной конструкции. Габариты фильтров и периодичность их очистки во многом зависят от степени запыленности воздуха. Этим и определяется влияние запыленности окружающего воздуха на конструкцию СОТР.

Изменение физико-химических свойств жидкостей, используемых в качестве теплоносителей в СОТР, выражается главным образом в следующем: в образовании механических примесей, изменении электрической прочности, вязкости. Для исключения возможности попадания механических примесей в систему применяют жидкостные фильтры. Изменение электрической прочности может быть связано как с попаданием в жидкость механических примесей, так и различных солей, воздуха и т.д.

При высоких требованиях к электрической прочности жидкости и сложных условиях эксплуатации для химической и механической очистки жидкости во время ее приготовления и последующей эксплуатации, а также удаления из нее воздуха (деаэрации) применяют сложные и громоздкие установки, которые по габаритам сравнимы с остальной частью СОТР. Изменение вязкости жидкости чаще всего связано с изменением температуры окружающей среды, оно влияет на производительность насоса и условия охлаждения РЭС. Диапазон изменения температуры окружающей среды может быть настолько большим, что жидкости начнут переходить в другие агрегатные состояния (замерзание, кипение). Обычно СОТР необходимо обеспечить тепловой режим РЭС во всем диапазоне изменения вязкости теплоносителя и препятствовать переходу жидкости в другое (нежелательное) агрегатное состояние.

Учитывая влияние первичных, вторичных и третичных факторов на тепловой режим, конструкцию РЭС и СОТР, электрические режимы работы РЭС, а также ряд других факторов, радиоэлектронные комплексы по

условиям их использования можно разбить на пять основных классов – стационарные, наземные передвижные, корабельные, самолетные, ракетно-космические. Внутри каждого класса условия эксплуатации РЭС могут отличаться, поэтому часто рассматривают еще подклассы.

3.8.3. Особенности проектирования РЭС с учетом тепло- и массообмена

Приведем краткую характеристику условий использования РЭС для каждого класса. *Стационарные* радиоэлектронные комплексы размещаются в зданиях и других стационарных помещениях. В тех же помещениях, как правило, размещается обслуживающий персонал. Режим работы РЭС длительный. Внешние тепловые воздействия также длительные, так как помещения для стационарной РЭС снабжены общей централизованной системой кондиционирования воздуха или системами отопления и вентиляции помещений. Диапазон изменения температуры в помещениях, где установлены РЭС, невелик и колеблется в пределах от 278 до 323 К. Давление воздуха в помещениях обычно нормальное, атмосферное, с колебаниями, соответствующими изменению давления на поверхности земли и в высокогорных районах. Воздух, используемый для охлаждения РЭС, имеет невысокую запыленность. Исключением может быть случай, когда строительство зданий осуществляется в несколько очередей и отдельные радиоэлектронные комплексы вынуждены работать в период строительства зданий второй и других очередей. Влажность воздуха зависит от района расположения радиоэлектронного комплекса. Защита РЭС от вредного воздействия (химического, биологического или радиационного) окружающей среды выполняется либо с помощью централизованной системы кондиционирования помещений, либо применением специальной СОТР. Механические воздействия на РЭС малы. Перечисленные условия эксплуатации РЭС стационарных комплексов наиболее легкие. Обычно при размещении радиоэлектронных комплексов в зданиях не предъявляются жесткие требования к габаритам, массе, энергопотреблению РЭС и вспомогательных систем. Необходимо отметить, что стационарная РЭС является наиболее мощной.

Наземные передвижные радиоэлектронные комплексы размещаются в кузовах автомобилей, автоприцепах, на железнодорожных платформах и других подобных носителях. Одинаково распространены конструкции с обслуживающим персоналом и без него. В наземных передвижных объектах РЭС работает либо только во время стоянки, либо во время движения и

стоянки. Режим работы, как правило, длительный. Давление воздуха атмосферное, с небольшими колебаниями. Влажность невысокая, запыленность воздуха может быть очень большой, особенно при работе РЭС во время движения носителя по грунтовым дорогам. Защита РЭС и обслуживающего персонала от вредного воздействия окружающей среды является одной из основных проблем при конструировании СОТР наземных передвижных объектов. Механические воздействия на РЭС достаточно велики. Внешние тепловые воздействия, как правило, медленно меняющиеся и связаны с суточными и сезонными изменениями температуры окружающей среды, интенсивностью солнечных лучей. Диапазон изменения температуры окружающей среды достаточно велик и составляет примерно 213 – 333 К. Требования к габаритам, массе радиоэлектронного комплекса и потребляемой им мощности жесткие из-за ограниченности объемов кабины, грузоподъемности носителя и мощности его двигателя.

Корабельные радиоэлектронные комплексы могут располагаться в закрытых отсеках или палубных надстройках. В первом случае внешние тепловые воздействия примерно такие же, как у стационарной РЭС, во втором – ближе к наземной, передвижной РЭС. Режим работы РЭС, как правило, длительный. Давление воздуха атмосферное. Запыленность практически отсутствует, влажность высокая. В некоторых случаях необходимо принимать меры по защите РЭС от попадания морской воды и вредного влияния морского воздуха, содержащего большое количество солей.

Самолетные радиоэлектронные комплексы располагаются в герметичных либо негерметичных отсеках или в подвесных контейнерах вертолетов и самолетов. Обслуживающий персонал обычно в этих отсеках не находится, хотя могут быть и исключения. Одинаково часто встречаются все три режима работы РЭС – длительный, кратковременный и периодический. Внешние тепловые воздействия на РЭС, размещенную в герметичных отсеках, как правило, длительные в ограниченном диапазоне температур, так как герметичные отсеки самолета подключаются к централизованной системе кондиционирования воздуха самолета. Давление воздуха и внешние тепловые воздействия на РЭС, размещенную в негерметичных отсеках, быстро изменяются при переменном профиле полета. Медленно изменяющиеся внешние тепловые воздействия имеют место на стоянках самолета и при предполетной подготовке РЭС на аэродроме, когда температура воздуха в герметичных и негерметичных отсеках изменяется вслед за температурой окружающей среды. Воздух имеет незначительную запыленность в полете и значительную на аэродромах. Влажность воздуха за-

висит от профиля полета. Механические воздействия на РЭС значительны. Требования к габаритам, массе и потребляемой мощности радиоэлектронного комплекса очень жесткие.

Ракетно-космические радиоэлектронные комплексы размещаются в герметичных и негерметичных отсеках ракет, искусственных спутников земли и космических кораблей. Различные условия при входе в плотные слои атмосферы, при полете по околоземным орбитам и при исследовании дальнего космоса предъявляют к СОТР высокие требования, которые должны быть обеспечены при минимальных габаритах, массе и потребляемой мощности. Особенность космического пространства как физической среды с малой плотностью частиц, наличием глубокого вакуума и невесомости еще более усложняет обеспечение теплового режима РЭС и создание СОТР.

3.8.4. Классификация способов охлаждения

При обеспечении необходимого теплового режима РЭС основные трудности связаны с отводом тепла, т.е. охлаждением.

Для охлаждения РЭС применяется множество способов, поэтому при их классификации учтем только основные, наиболее часто применяемые.

В процессе переноса тепловой энергии в РЭС существуют три способа передачи тепла – теплопроводность, конвекция и излучение. В зависимости от вида конвективного переноса тепловой энергии способы охлаждения РЭС часто разделяют на классы. При конвективном отводе тепла от РЭС используются теплоносители в различных фазовых состояниях, их перемещение осуществляется естественным или принудительным образом. Учитывая тип и состояние теплоносителя, а также причину, вызвавшую его движение, способы охлаждения РЭС можно разделить на следующие основные *классы*: газовое (воздушное), жидкостное, испарительное, а также естественное и принудительное.

Естественное воздушное охлаждение РЭС является наиболее простым, надежным и дешевым способом охлаждения и осуществляется без затраты дополнительной энергии. Однако интенсивность такого охлаждения невелика, поэтому использование этого способа возможно при небольших удельных мощностях рассеивания (мощностях, рассеиваемых единицей поверхности или объема), т.е. в РЭС, работающей в облегченном тепловом режиме. При естественном воздушном охлаждении конвектив-

ный теплообмен осуществляется между элементами РЭС и воздухом, причем воздух перемещается за счет энергии, рассеиваемой элементами РЭС.

Различают две основные схемы естественного воздушного охлаждения блоков и стоек РЭС – с герметичным и перфорированным кожухом. В герметичном кожухе конвективный теплообмен осуществляется от элементов РЭС к воздуху внутри аппарата, от воздуха к кожуху аппарата, от кожуха к окружающей среде (воздуху). При перфорированном кожухе конвективный теплообмен в основном происходит между элементами РЭС и окружающей средой (воздухом), проникающей сквозь перфорации. Естественное воздушное охлаждение РЭС с перфорированным кожухом позволяет обеспечить тепловой режим при более высоких удельных мощностях рассеивания, чем при герметичном кожухе.

Интенсификация теплообмена при естественном воздушном охлаждении возможна за счет рационального конструирования РЭС: оптимального расположения элементов РЭС и перфорации кожуха, применения экранов, оребрения отдельных поверхностей, использования теплопроводных шин, замазок, компаундов, соответствующей окраски излучающих поверхностей и т.п.

Для интенсификации конвективного теплообмена между РЭС и окружающей средой используют принудительное движение воздуха, создаваемое специальными устройствами, главным образом, вентиляторами. Работа устройств приводит к дополнительному расходу энергии.

Принудительное воздушное охлаждение получило наибольшее распространение, так как позволяет при более высоких удельных мощностях рассеивания обеспечить нормальный тепловой режим РЭС при относительной простоте и небольшой стоимости СОТР.

Различают три основные схемы принудительного воздушного охлаждения – внутреннее перемешивание, наружный обдув, продувка. В схеме с принудительным воздушным охлаждением для обмена между элементами РЭС и герметичным кожухом внутри аппарата установлен вентилятор. Теплообмен между кожухом аппарата и окружающей средой происходит так же, как при естественном воздушном охлаждении РЭС с герметичным кожухом. В случае принудительного воздушного охлаждения с наружным обдувом теплообмен между элементами РЭС и воздухом внутри герметичного кожуха осуществляется так же, как при естественном воздушном охлаждении РЭС, а для интенсификации теплообмена между кожухом и воздухом окружающей среды установлен вентилятор. В схеме с продувкой воздух из окружающей аппарат среды или предварительно охлажденный в специальных устройствах (теплообменниках, кондиционерах и т.д.) про-

пускается через специальные каналы и охлаждает элементы РЭС. Эта схема применяется наиболее широко в практике конструирования СОТР РЭС.

Первые две схемы (с внутренним перемешиванием и наружным обдувом) сочетают признаки принудительного и естественного охлаждения. Поэтому их относят либо к принудительному, либо к естественному способу охлаждения.

Естественное жидкостное охлаждение платы с элементами или больших элементов РЭС заключается в погружении их в бак с жидкостью. Интенсификация конвективного теплообмена происходит за счет более высоких коэффициентов теплоотдачи между элементами РЭА и жидкостью, чем между элементами и воздухом. Однако этот метод охлаждения применяется редко, так как конструкция РЭС значительно усложняется и требуются специальные покрытия для элементов.

Принудительное жидкостное охлаждение применяется при высоких удельных мощностях рассеивания. Наибольшее распространение этот способ получил при охлаждении больших элементов, когда однофазная жидкость прокачивается насосом через специальные каналы в охлаждаемых узлах приборов (электроды мощных ламп, трансформаторы и т.д.). При отводе тепла от блоков жидкость прокачивается через каналы, выполненные в платах или кожухе аппарата.

В качестве жидких теплоносителей обычно применяются вода, водоспиртовые смеси (антифризы), кремнийорганические и фторорганические жидкости. Выбор типа теплоносителя является одной из главных проблем при разработке принудительного жидкостного охлаждения, так как к теплоносителям предъявляются разнообразные требования (теплофизические, электрические и др.). Этот способ, как правило, необходим там, где нужно избежать кипения жидкости даже в локальных областях, так как в режиме кипения возможно появление гидродинамической неустойчивости, вибраций (шумов) и ухудшение свойств жидкости. При жидкостном принудительном охлаждении возможны все три режима движения – ламинарный, переходный и турбулентный. Опыт проектирования таких систем показывает, что чаще всего мы встречаемся с переходным либо турбулентным режимом и гораздо реже – с ламинарным. Конструкция РЭС при жидкостном охлаждении, как правило, значительно сложнее, чем при воздушном. Однако при высоких удельных мощностях рассеивания жидкостное охлаждение РЭС является единственно возможным, поэтому в современных радиоэлектронных приборах этот вид охлаждения находит широкое применение.

Естественное испарительное охлаждение обычно позволяет повысить удельную мощность рассеивания РЭС и применяется для теплонагруженных блоков и больших элементов. Охлаждаемая поверхность погружается в жидкость, над которой имеется паровой объем, отвод тепла осуществляется в процессе кипения жидкости на охлаждаемой поверхности. Движение теплоносителя происходит за счет разности плотностей. Разность температур между охлаждаемой поверхностью и кипящей жидкостью обычно мала, поэтому температура кипения выбранного теплоносителя при определенном давлении должна быть чуть ниже заданной в ТЗ допустимой температуры охлаждаемой поверхности.

Рассматриваемый способ охлаждения радиоэлектронной аппаратуры имеет ряд особенностей. При определенных значениях удельных мощностей рассеивания жидкость на охлаждаемой поверхности начинает кипеть, возникают пузырьки, которые отрываются от этой поверхности и движутся к границе раздела жидкость – пар. Движение пузырей вызывает перемешивание жидкости вблизи центров парообразования. По мере роста мощности, рассеиваемой охлаждаемой поверхностью, количество действующих центров парообразования и частота отрыва пузырей возрастают и коэффициент теплоотдачи увеличивается. Этот режим кипения называется пузырьковым и часто применяется при естественном испарительном охлаждении РЭС. При значительном увеличении рассеиваемой охлаждаемой поверхностью мощности возникающие на этой поверхности пузыри сливаются в сплошную пленку, которая оттесняет жидкость от поверхности, и условия теплоотдачи резко ухудшаются. Этот режим кипения называется пленочным и сопровождается резким повышением температуры охлаждаемой поверхности. Значения удельной мощности рассеивания, коэффициента теплоотдачи и других параметров, соответствующих переходу пузырькового режима кипения в пленочной, называют критическими, а само явление – кризисом кипения. Возникновение кризиса кипения зависит от многих факторов, но главным образом – от типа теплоносителя, удельной рассеиваемой мощности и характера охлаждаемой поверхности. Возможен и обратный переход – от пленочного кипения к пузырьковому. Поэтому различают два кризиса кипения, первый – при переходе от пузырькового к пленочному, второй – от пленочного к пузырьковому. При увеличении удельной рассеиваемой мощности коэффициент теплоотдачи увеличивается. При некотором значении удельной рассеиваемой мощности $q_{кр2}$ происходит скачкообразное уменьшение коэффициента теплоотдачи, что соответствует переходу от пузырькового к пленочному режиму кипения – первому кризису кипения. При дальнейшем увеличении рассеиваемой

мощности коэффициент теплоотдачи меняется по кривой. При снижении нагрузки и некотором значении $q_{кр1}$ ($q_{кр1} < q_{кр2}$) происходит переход от пленочного к пузырьковому кипению – второй кризис кипения. На практике обычно $q_{кр1} \approx 0,25 \cdot q_{кр2}$. При конструировании РЭА с естественным испарительным охлаждением необходимо обеспечить пузырьковый режим кипения при всех возможных на практике рабочих и аварийных нагрузках РЭА.

Естественное испарительное охлаждение считается одним из перспективных, поэтому в последнем десятилетии появилось много работ по исследованию этого способа охлаждения. Схемы могут быть весьма разнообразны, однако общим для всех является использование испарения и кипения жидкости для отвода тепла и отсутствие механических устройств для движения жидкости и пара. Широкое применение получают фитильные испарительные системы и так называемые «тепловые трубы». В этих системах для транспортировки жидкости используется капиллярный эффект. Охлаждаемая поверхность не погружается в жидкость, а смачивается жидкостью, которая находится в капиллярах фитиля, обволакивающей поверхность. Отвод тепла от охлаждаемой поверхности осуществляется испарением жидкости из капилляров фитиля. Как и в описанном выше случае, при определенных значениях теплового потока режим испарения переходит в режим пузырькового кипения. При дальнейшем увеличении теплового потока и более интенсивном пузырьковом кипении происходит «запаривание» капиллярной структуры, паровые пузыри сливаются в крупные образования, резко падает коэффициент теплоотдачи. Таким образом, кризис кипения в этих системах может иметь место при тепловых потоках, соответствующих режиму развитого пузырькового кипения теплоносителя.

Принудительное испарительное охлаждение выполняется примерно по такой же схеме, как и принудительное жидкостное охлаждение. Жидкость с помощью насоса прокачивается через специальные каналы в охлаждаемых узлах. Если допустимая температура охлаждаемой поверхности будет выше температуры насыщения теплоносителя при данном давлении, а температура теплоносителя в ядре потока поддерживается равной или меньшей температуры насыщения, то в небольшом поверхностном слое вблизи охлаждаемой поверхности начнется процесс пузырькового кипения. Возникающие в поверхностном слое пузыри будут под действием потока жидкости удаляться с поверхности и конденсироваться в ядре потока. Зарождение, движение и конденсация паровых пузырей вызывают интенсивный теплообмен между поверхностным слоем и ядром потока жидко-

сти (особенно, если оно недогрето). При этом плотность теплового потока может достигать очень больших величин. Предельные мощности рассеивания ограничены переходом пузырькового режима кипения в пленочный. Однако благодаря интенсивному движению холодного ядра жидкости кризис кипения при принудительном испарительном охлаждении наступает при гораздо более высокой мощности рассеивания, чем при естественном испарительном охлаждении.

Принудительное испарительное охлаждение является самым эффективным из всех перечисленных способов охлаждения и позволяет обеспечить нормальный тепловой режим РЭА при максимальных удельных мощностях рассеивания.

Рассмотрим еще ряд способов охлаждения, не получивших широкого распространения, но представляющих определенный интерес. Ранее мы их назвали специальными.

В некоторых исследованиях предлагается использовать для охлаждения РЭА вместо воздуха другие газы (табл. 3.20)

Таблица 3.20

Относительные параметры газовых теплоносителей

Газ	Весовой расход	Объемный расход	Коэффициент теплоотдачи	Потери давления	Мощность вентилятора	Диэлектрическая постоянная
Воздух	1	1	1	1	1	1
Гелий	0,19	1,4	1,52	0,37	0,93	0,13
Азот	0,97	1	1	1,04	0,88	1
Водород	0,07	0,98	1,44	0,1	0,09	0,07
Двуокись углерода	0,4	0,68	1,05	0,65	0,59	–
Аргон	1,94	1,4	0,62	2,47	3,45	

В табл. 3.20 приведены относительные значения основных параметров некоторых газов по сравнению с воздухом при атмосферном давлении и температуре газа 273 К. Сравнение приведено при условии, что все газы снимают одинаковые тепловые нагрузки при одинаковых температурах газов на входе и выходе канала и турбулентном течении. Отметим, что применение специальных газов для охлаждения РЭС связано с большими конструктивными трудностями и может быть оправдано при создании герметичных замкнутых контуров с постоянной подпиткой в условиях, когда любой газ необходимых параметров, в том числе и воздух, одинаково трудно приготовить. Такие условия могут наблюдаться в контейнерах высотных самолетов и космических аппаратов.

Для защиты элементов РЭС от внешних воздействий – вибрации, ускорений, понижения давления, влажности и запыленности атмосферы применяются заливочные компаунды. Для облегчения теплового режима аппарата, залитого компаундом, используются компаунды с высоким коэффициентом теплопроводности (теплопроводные компаунды). Увеличение теплопроводности компаунда достигается применением специальных наполнителей, таких, как медная и алюминиевая пудра, молотая двуокись кремния и пр. Применение наполнителя не должно ухудшать физико-химические параметры компаунда и технологические качества при заливке. Применение лучших теплопроводных компаундов позволяет увеличить коэффициент теплопроводности по сравнению с обычными до 10 раз и, следовательно, значительно снизить перегревы элементов РЭС, залитых компаундом.

При кратковременном режиме работы РЭС применяются как основные, так и специальные способы охлаждения. При использовании основных способов охлаждения следует иметь в виду, что рекомендации по их применению для длительного режима работы не всегда приемлемы для кратковременного режима. Каждый раз необходимо учитывать конкретные условия.

Специальные способы охлаждения при кратковременном режиме работы РЭС заключаются в основном в использовании различного типа тепловых аккумуляторов. Простейшим тепловым аккумулятором является масса металлических конструкций блока РЭС – платы, радиаторы, крепежные детали, кожух и т.д. Конечно, эти конструкции могут быть использованы в качестве аккумулятора тепла только при наличии хорошего теплового контакта с элементами РЭС. Если полная теплоемкость конструкции достаточна, то при кратковременном режиме работы РЭС можно обеспечить нормальный тепловой режим элементов до конца цикла. В противном случае необходимо увеличивать массу и объем конструкции, что не всегда возможно и часто нерационально, поэтому возможности указанного метода аккумуляции тепла ограничены. В качестве теплового аккумулятора могут быть использованы части конструкции, оборудования и материалы, предназначенные для других целей, например, корпус космического корабля, топливо в баках самолета. Сложность компоновки и обеспечения теплового контакта с элементами РЭС ограничивает применение этих устройств.

При использовании оборудования и конструкций носителей в качестве тепловых аккумуляторов иногда применяется их предварительное за-

холаживание. Так, перед запуском ракеты или взлетом самолета с малым временем полета с помощью мощных наземных охлаждающих устройств может быть значительно снижена температура отсеков с электронным оборудованием, что в значительной степени увеличивает аккумулирующую способность. Напомним, что полная теплоемкость системы определяется не только массой и теплоемкостью составляющих ее частей, но и разностью между начальной и конечной температурами системы.

Иногда для аккумуляции тепловой энергии, выделяемой РЭС в кратковременном режиме, применяют специальные вещества, поглощающие тепловую энергию в процессе фазовых превращений или химических реакций. Если температура плавления некоторого вещества лежит в диапазоне допустимых температур РЭС и теплота плавления его достаточно велика, то оно может быть использовано в качестве аккумулятора тепла. Такими веществами могут служить воск, парафин и другие химические соединения. Повысить поглощающую способность можно подбором веществ, температуры плавления и кипения которых лежат в диапазоне допустимых температур для РЭС. При этом будет использоваться не только теплота плавления, но и теплота испарения.

Эндотермические химические реакции между веществами и эндотермическое растворение, происходящие при допустимой для РЭС температуре, также используются для аккумуляции тепла. Исследование веществ, которые успешно могут применяться в качестве тепловых аккумуляторов, продолжается и в настоящее время.

Тепловые аккумуляторы используются в РЭС, работающем в периодическом режиме. В этом случае тепловой аккумулятор в период импульса должен поглощать тепловую энергию от РЭС, а в период паузы отдавать ее в окружающую среду. Применение тепловых аккумуляторов в этом случае позволяет значительно снизить затраты на охлаждение РЭА.

Для охлаждения отдельных элементов РЭС, требующих более низких температур, чем остальные элементы РЭС, применяются микрохолодильники. В качестве микрохолодильников в основном применяются вихревые трубы, термоэлектрические батареи и расширительные газовые машины.

Нормальные режимы работы для некоторых элементов РЭС могут быть обеспечены только при очень низких (криогенных) температурах. Устройства криогенной техники, применяемые для этой цели, являются самостоятельной областью исследования и здесь не рассматриваются.

Способы охлаждения РЭС существенно влияют на ее конструкцию, поэтому их нужно выбирать на ранней стадии конструирования.

Тема 4. ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС ОТ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

4.1. Механизмы влияния влаги на эффективность конструкций РЭС

4.1.1. Источники и пути проникновения влаги в РЭС

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС могут подвергаться воздействию влаги, содержащейся в окружающем пространстве, внутренней среде гермоблоков, материалах конструкции, а также в используемых при изготовлении РЭС материалах (электролитах, травителях, моющих средствах). Максимально возможное содержание влаги в воздухе зависит от температуры и давления. При нормальном давлении (750 мм рт. ст. = 0,1 МПа) зависимость содержания влаги в воздухе от температуры представлена на рис. 4.1. При снижении температуры влажного воздуха ниже уровня, соответствующего максимально возможному содержанию влаги (точке росы), избыток влаги выпадает в виде конденсата (росы).

Наличие влаги во внутренней среде гермокорпуса РЭС обусловлено следующими причинами: 1) проникновением ее через микropopы из внешней среды; 2) невозможностью полной осушки (без влагопоглотителя) среды заполнения (например, точка росы газообразного азота после централизованной осушки составляет $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$); 3) наличием влаги в конструкционных материалах гермокорпуса. Значительно увеличивают содержание влаги *полимерные* материалы, использование которых в конструкции РЭС обусловлено экономическими соображениями (уменьшение трудоемкости сборки, расхода материалов и энергии). Так, применение при сборке клеевых соединений позволяет: уменьшить трудоемкость сборки на 20 – 30 % благодаря исключению таких операций, как сверление, сварка, пайка, нарезание резьбы и т.д.; снизить требования к шероховатости поверхности; увеличить допуски на геометриче-

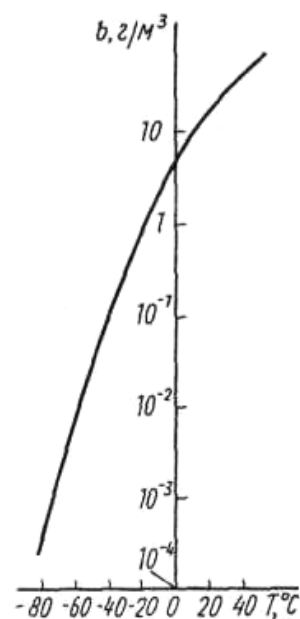


Рис. 4.1. Зависимость содержания влаги в воздухе от температуры

ские размеры; повысить степень механизации и автоматизации технологических процессов. Полимерные материалы применяют для герметизации соединителей, контровки резьбовых соединений, в качестве демпфирующих и виброизолирующих слоев, для маркировки, выполнения неразъемных соединений при сборке узлов из деталей и компонентов, изготовленных из различных материалов (металлов, сплавов, керамики, ферритов, резин, пластмасс и т.д.) и различного конструктивного исполнения (печатные платы и шлейфы, объемные проводники, экраны, влагозащитные и теплоотводящие конструкции и т.д.). Полимеры входят в состав таких конструкционных материалов, как стеклотекстолит, гетинакс, лакоткань.

Все полимерные материалы гигроскопичны (рис. 4.2, табл. 4.1). Материалы анизотропного строения поглощают влагу в разных направлениях с различной скоростью (дерево впитывает быстрее вдоль волокон, слоистые пластики – вдоль слоев). Пористые (волокнистые) материалы более гигроскопичны, чем плотные материалы. В процессе производства и хранения полимерные материалы поглощают влагу из окружающей среды, а при нагреве эта влага выделяется во внутреннюю среду гермокорпуса. Часто в конструкциях полимеры имеют вид тонких пленок, испарение влаги из которых может происходить лишь с торцевых поверхностей. Это обуславливает длительность процесса выделения влаги и накопления ее во внутренней среде до концентрации, при которой могут происходить отказы РЭС.

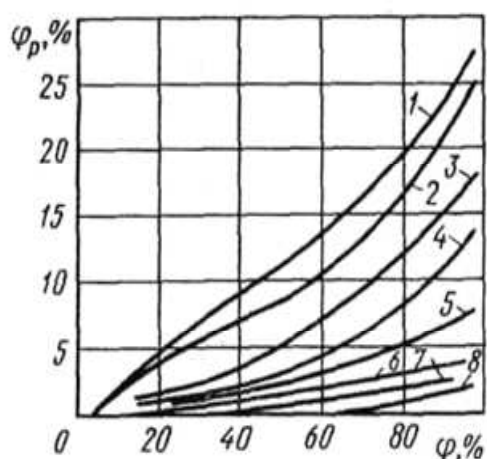


Рис. 4.2. Зависимость равновесной влажности φ_p различных волоконистых материалов от относительной влажности воздуха φ : 1 – вискозный шелк; 2 – натуральный шелк; 3 – хлопчатобумажное полотно; 4 – ацетатный шелк; 5 – капрон; 6 – поливинилхлоридное полотно; 7 – полиэтилентерефталатное волокно; 8 – полиэтиленовое волокно

Таблица 4.1

Влагопоглощение некоторых полимерных материалов и композиций

Материал	Влагопоглощение за 24 ч, %	Материал	Влагопоглощение за 24 ч, %
Фторопласт-4	0,0	Компаунды: КП-34 КП-101 КТ-102 П-68	5,5 19 0,3 3,2
Полиэтилен	0,01		
Полипропилен	0,01		
Эпоксидные компаунды	0,01 ... 0,02		
Лавсан	0,02	Эмали: ЭП-51 КО-918	1,95 0,0
Полистирол	0,05		
Полихлорвиниловая пленка	0,02 ... 0,04	Слоистые пластики: гетинакс стеклотестолит	2,9 1,6 ... 1,85
Пенополиуретан	0,1 ... 0,3		
Полиимиды	0,8		
Лаки: МЛ-92	0,76	Хлопок	5,0
УР-231	1,0	Шелк	15 ... 20
КО-916К	0,0		
Э-4100	0,9		
УР-231	1,0		

Используемые в технологическом процессе жидкие материалы также являются источником влаги и загрязнений, усиливая действие влаги. Так, электролиты, травители, моющие средства и другие материалы (глицерин, флюсы) нарушают структуру, создают полости для накопления влаги и вносят загрязнения. К таким же последствиям приводит *механическая обработка* (фрезерование, сверление) слоистых пластиков. Источниками влаги и загрязнения являются отпечатки пальцев и пыль; отрицательное воздействие может оказать и неполная сушка после промывки компонентов и узлов.

4.1.2. Взаимодействие влаги с материалами конструкций РЭС

Механизм взаимодействия зависит от характера материала (органический, неорганический) и его способности поглощать (сорбировать) влагу или удерживать ее на поверхности (адсорбировать). Поглощение влаги

обусловлено тем, что материалы содержат поры, значительно большие размера молекулы влаги, равного $3 \cdot 10^{-10}$ м (межмолекулярные промежутки в полимерах – 10^{-9} м, капилляры в целлюлозе – 10^{-7} м, поры в керамике – 10^{-5} м). Органические материалы поглощают влагу через капилляры или путем диффузии. Неорганические взаимодействуют с влагой, конденсирующейся или адсорбируемой на поверхности. С металлами влага вступает в химическое взаимодействие, вызывающее коррозию; она также может проникать через поры и капилляры. Действие влаги усиливается при контакте металлов с сильно отличающимися электрохимическими потенциалами, а также в местах сварных швов, содержащих интерметаллические соединения.

Вода (сконденсированная влага) – полярное, химически активное вещество, легко вступающее в соединение с различными металлами и неметаллами (газами, жидкостями, твердыми веществами, инертными газами). При этом образуются гидраты, устойчивые при низких температурах. Еще более активно вода окисляется кислородом; она реагирует с фтором, хлором, соединениями углерода. Щелочные и щелочно-земельные металлы разлагают воду уже при комнатной температуре. Вода является активным катализатором. Она обладает высокими диэлектрической проницаемостью в жидкой фазе ($\epsilon = 79 - 84$) и потерями ($\text{tg}\delta$): при частоте $f = 50$ Гц $\text{tg}\delta$ весьма велик; при $f = 10^5$ Гц $\text{tg}\delta = 1,6$; при $f = 10^7$ Гц $\text{tg}\delta = 0,3$; при $f = 10^9$ Гц $\text{tg}\delta = 0,03$. При наличии примесей ионного типа вода имеет высокую проводимость (удельное сопротивление водопроводной воды составляет $10^6 - 10^7$ Ом·м; дважды дистиллированной на воздухе воды – 10^8 Ом·м; перегнанной в вакууме – 10^{10} Ом·м).

Воздействие влаги на материалы и компоненты может привести к постепенным и внезапным отказам РЭС. Увлажнение органических материалов сопровождается следующими явлениями: увеличением диэлектрической проницаемости (ϵ) и потерь ($\text{tg}\delta$); уменьшением объемного сопротивления, электрической и механической прочности; изменением геометрических размеров и формы (короблением при удалении влаги после набухания); изменением свойств смазок. Это приводит к увеличению емкости (в том числе паразитной), уменьшению добротности контуров, снижению пробивного напряжения и появлению отказов РЭС. Постепенные отказы систем радиолокации и навигации проявляются в ухудшении точности оп-

ределения координат и снижении дальности действия РЛС (радиолокационной станции). У радиовещательных и телевизионных приемников снижается чувствительность и избирательность, сужаются диапазоны рабочих частот (в сторону более низких), появляется неустойчивость работы гетеродина. Внезапные отказы обуславливаются электрическим пробоем и расслоением диэлектриков и т.д. При увлажнении металлов отказы могут произойти из-за коррозии, приводящей к нарушению паяных и сварных герметизирующих швов, обрыву электромонтажных связей, увеличению сопротивления контактных пар (что ведет к увеличению шумов неразъемных и обгоранию разъемных контактов); уменьшению прочности и затруднению разборки крепежа; потускнению отражающих и разрушению защитных покрытий; увеличению износа трущихся поверхностей и т.д.

При температуре ниже точки росы представляет опасность сконденсированная влага. Наличие влаги на поверхности прозрачных окон (например, телевизионных передающих трубок на ПЗС-структурах) приводит к смазыванию изображения.

Попадание влаги на поверхность тонкопленочных резистивных элементов может привести к изменению их сопротивления (уменьшению при шунтировании влагой, увеличению при коррозии); влага в диэлектриках пленочных конденсаторов увеличивает их емкость и приводит к пробоем диэлектрика; влага на поверхности полупроводниковых элементов ИС способствует скоплению на границе Si – SiO₂ положительных ионов (Na⁺ и др.), образованию слоя накопленных зарядов в полупроводнике под влиянием поверхностных ионов и изменению параметров полупроводниковых приборов (дрейфу обратных токов, изменению пробивных напряжений и коэффициента усиления биполярных транзисторов, порогового напряжения и крутизны передаточной характеристики МДП-транзисторов).

При замерзании сконденсировавшейся влаги и электрохимической коррозии может нарушиться механическая прочность паяных и сварных герметизирующих швов, произойти расслоение многослойных печатных плат, обрыв печатных проводников при их отслаивании от подложки, появление трещин в подложках гибридных ИС.

Все это, как правило, приводит к полному отказу РЭС, как негерметичных, так и герметичных, но в первом случае воздействие оказывает внешняя среда, а во втором – и внутренняя.

4.1.3. Способы влагозащиты РЭС

Для обеспечения надежности функционирования РЭС при воздействии влаги требуется применять влагозащитные конструкции, которые (рис. 4.3) разделяют на две группы – монолитные и полые.

Монолитные оболочки составляют неразрывное целое с защищаемым узлом. От конструкции влагозащиты зависят такие параметры РЭС, как масса, габариты, стоимость, надежность; удобство ремонта, обслуживания, изготовления; возможность механизации и автоматизации производства. Сложность создания конструкции влагозащитной оболочки состоит также в том, что на нее часто возлагаются функции несущей конструкции, теплоотвода, защиты от электромагнитных воздействий и ионизирующих излучений, пыли, света, микроорганизмов.

Монолитные пленочные оболочки используются в основном как технологическая защита бескорпусных компонентов, подлежащих герметизации в составе блока, а также компонентов с улучшенными частотными свойствами (за счет уменьшения паразитных параметров внешних выводов). Монолитные оболочки из органических материалов, выполняющие функции несущих конструкций, изготавливают методами опрессовки, пропитки, обволакивания, заливки. Обычно компоненты с такой защитой предназначены для использования в негерметичных наземных РЭС, и в этом случае приходится принимать дополнительные меры для обеспечения влагозащиты электрических соединений (например, лакировать печатные платы).

Полые влагозащитные оболочки позволяют освободить защищаемые компоненты от механического контакта с оболочкой, что обеспечивает работу в более широком диапазоне температур и исключает химическое взаимодействие оболочки и защищаемого компонента. Полые оболочки, особенно из неорганических материалов, обеспечивают более высокую надежность влагозащиты, но имеют значительные габариты, массу, стоимость. Наиболее эффективно использование полых оболочек для групповой герметизации бескорпусных компонентов в составе блока. Это объясняется уменьшением длины герметизирующего шва (по сравнению с индивидуальной герметизацией компонентов), а также возможностью создания внутри гермоблоков при заполнении контролируемой по влажности и химическому составу инертной среды. Однако стоимость таких оболочек высокая, а ремонтпригодность – низкая, поэтому они находят применение в основном для бортовой и СВЧ-аппаратуры.

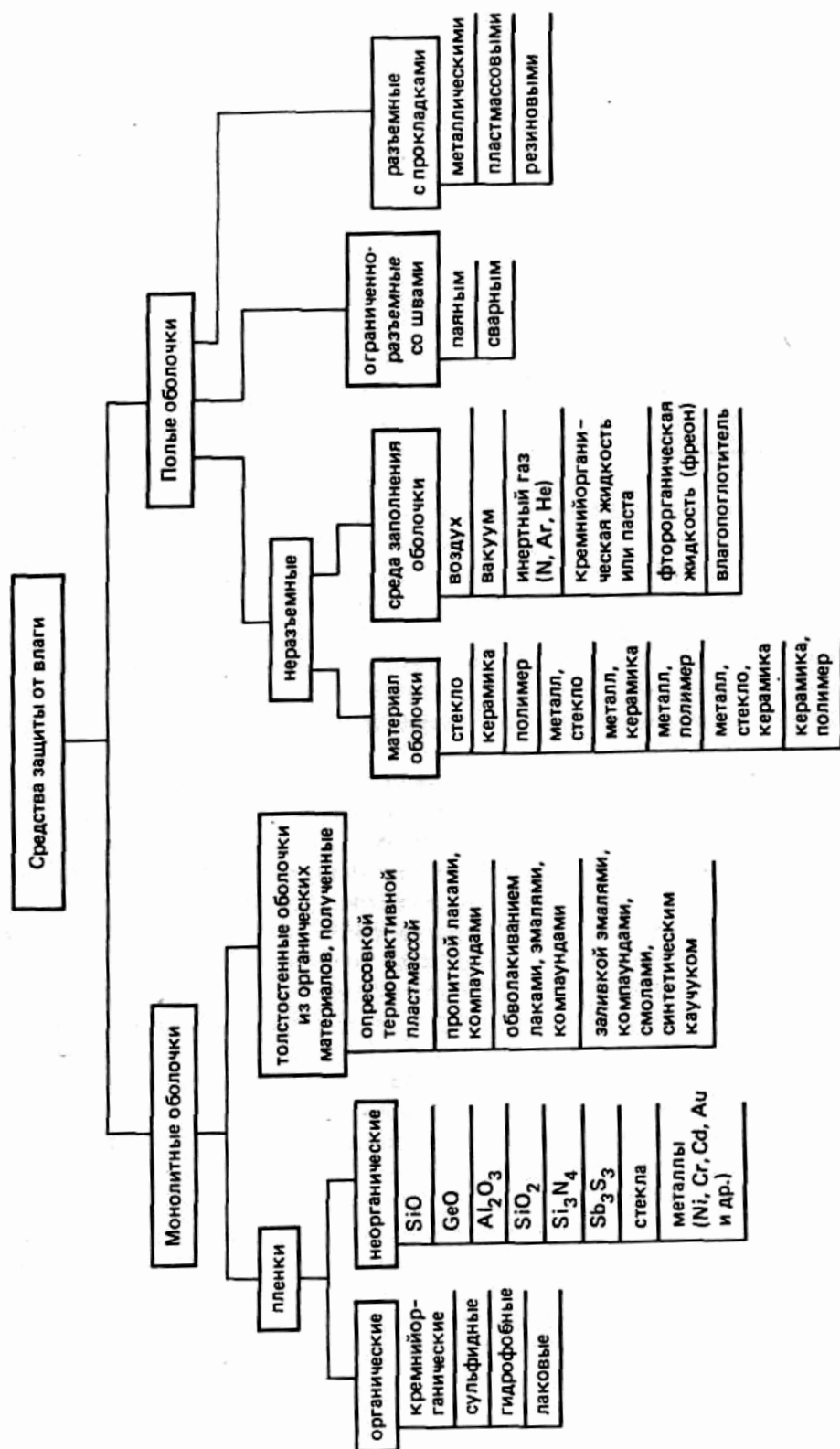


Рис. 4.3. Классификация конструкторско-технологических средств защиты от влаги

4.2. Герметизация РЭС

4.2.1. Виды герметизации

Герметизация – обеспечение практической непроницаемости корпуса РЭА для жидкостей и газов с целью защиты ее элементов и компонентов от воздействия климатических факторов окружающей среды и механических повреждений.

Герметизация может вызываться следующими *причинами*:

- бескорпусная элементная база;
- наличие элементов, не предназначенных для работы при низких барометрических давлениях;
- необходимость предохранения элементов от попадания пыли, влаги, кислот, зараженных частиц.

Герметизация бывает частичной и полной, при этом полная разделяется на неразъемную и разъемную.

При частичной герметизации применяют пропитку, обволакивание, заливку, опрессовку как компонентов, так и отдельных узлов и элементов РЭА.

4.2.2. Защита элементов и узлов РЭС монолитными оболочками

Монолитные оболочки можно использовать для защиты элементов и узлов от влаги на этапе изготовления и сборки (пленочные оболочки) или для защиты их при эксплуатации (толстостенные оболочки). Пленочная защита не может служить конструктивной основой для крепления внешних выводов, а является лишь технологической защитой компонентов до герметизации их в монолитных (полых) оболочках или до сборки в узлы с общей герметизацией. Пленочные оболочки выполняются из органических и неорганических материалов и имеют толщину (для различных способов защиты от влаги) от 0,2 до 20 мкм.

К материалам защитных пленок (см. рис. 4.3) предъявляется ряд требований: хорошие влагозащитные свойства (малая влагопроницаемость, отсутствие пор, пассивирующие свойства), возможность работы в диапазоне температур (близость ТКЛР пленки и материала компонента, эластичность), хорошая адгезия к защищаемому компоненту. Одновременно всем свойствам не отвечает ни один из материалов, поэтому в каждом конкретном случае выбирается тот или иной вариант пленочной защиты. ТКЛР пленок SiO_2 значительно отличается от ТКЛР кремния. Поэтому пленки SiO_2 плохо работают в широком диапазоне температур и при

большой толщине. Для усиления их защитных свойств используется дублирование пленками силанов Si_3N_4 , которые имеют высокую адгезию и термостойкость. Гидрофобные пленки имеют способность к водоотталкиванию, но их температурная стойкость не превышает $250\text{ }^\circ\text{C}$ и они неустойчивы при длительном воздействии влаги. Пленки из эластичных лаков (МК-4У, КО-961п, ПЭ-518 и др.) хорошо защищают от влаги, но трудно контролировать толщину и равномерность пленки. В ряде случаев для защиты полупроводниковых компонентов можно использовать пленки из стекла. При выборе стекла того или иного химического состава необходимо, чтобы ТКЛР стекла и защищаемого компонента были близки, а также учитывать термостойкость стекла (в случае установки кристалла в корпус с использованием эвтектики $\text{Al} - \text{Si}$ нагрев превышает $577\text{ }^\circ\text{C}$).

Для защиты от влаги компонентов и узлов с помощью монолитных оболочек, являющихся одновременно несущей конструкцией для внешних выводов, используются пропитка, заливка, обволакивание и опрессовка.

Пропитка нашла наибольшее применение для защиты от влаги обмоток электродвигателей, катушек трансформаторов и т.д. При пропитке из полостей и пор вытесняется воздух и они заполняются лаком или компаундом. Это приводит к увеличению электрической и механической прочности, улучшению теплопроводности, но одновременно увеличиваются масса, паразитная емкость, интенсифицируются химические и электрохимические процессы в местах пайки или сварки внешних выводов. В конструкциях изделий, предназначенных для пропитки, должна быть предусмотрена возможность свободного выхода воздуха и заполнения пор пропиточным составом (например, в «щечках» катушек трансформаторов делаются вырезы). Выбор пропиточного состава определяется требованиями, которые являются наиболее важными для данного изделия (проникающая способность, химическая нейтральность, цементирующая способность, электрическая прочность изоляции, высокая адгезия, теплопроводность, значения ϵ и $\text{tg}\delta$, холодо- и термостойкость). Характеристики некоторых пропиточных составов приведены в табл. 4.2.

Заливка – это сплошная упаковка компонента или узла в изоляционную массу путем заполнения ею свободного промежутка между изделием и стенками корпуса или между изделием и заливочной формой (рис. 4.4).

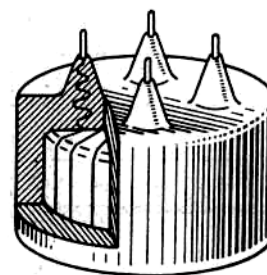


Рис. 4.4. Защита торроидального трансформатора от влаги заливкой

Таблица 4.2

Основные параметры некоторых покровных и пропиточных лаков

Параметр	Покровные лаки						Пропиточные лаки			
	МК-4У	КО-938В	КО-961п	СБ-1С	УР-231	Э-4100	ГФ-95	ПФЛ-86	КО-916	ЭТР-5
Вязкость по ВЗ-4, с	25	18	—	15—35	≥11	11...14	30...50	—	15...17	60...100
Время высыхания, ч (при температуре, °С)	5 (200)	1 (150)	4 (20)	2 (120)	3 (80)	4 (80)	2 (110)	0,5 (120)	0,25 (200)	2 (150)
Водопоглощение за 24 ч, %	—	—	0,1	0,45	1,0	0,9	1,1	0,8	0,1	0,7
Рабочая температура, °С	—40...+180	—60...+260	—60...+150	—60...+120	—60...+80	—60...+120	—60...+120	—60...+120	—60...+120	—40...+155
Электрическая прочность, МВ/м:										
до воздействия влажности (при температуре, °С)	40 (200)	50 (200)	85 (20)	50 (120)	34 (80)	70 (120)	40 (100)	35 (100)	30 (200)	60 (155)
после воздействия 98%-ной влажности (в течение времени, ч)	30 (48)	40 (48)	65 (56)	20 (24)	30 (48)	50 (24)	—	—	—	—
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,009	0,004...0,006	0,02...0,06	0,02...0,08	0,013...0,56	0,07...0,4	—	0,01...0,02	0,005
Диэлектрическая проницаемость	—	4,5...6	3...3,4	3,4...6	4,2...4,3	4,2...6,3	3,6...4,6	—	2,5...3,0	—
Удельное объемное сопротивление, Ом/м:										
до воздействия влаги (при температуре, °С)	10 ⁸ (200)	10 ¹⁰ (200)	10 ¹²	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹⁰ ...10 ¹³	10 ¹¹ ...10 ¹³	10 ⁹ ...10 ¹¹	10 ⁸ ...10 ¹³
после воздействия 98%-ной влажности	10 ⁸	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁷	—	—	—	—

Материал формы в последнем случае выбирают таким (например, фторопласт), чтобы он обеспечивал минимальную адгезию заливочного материала; иногда стенки формы покрывают смазкой.

Заливка *пенопластом* позволяет значительно увеличить механическую прочность узла при минимальном увеличении массы, но теплоотвод (без теплоотводящих шин) резко ухудшается. Толщина стенок влагозащитной конструкции выбирается из соображений получения требуемого времени влагозащиты. Для улучшения теплопроводности в заливочный компаунд иногда добавляют кварцевую пудру или прокаленный порошок оксида алюминия, а для улучшения влагозащитных свойств можно добавлять порошок цеолита, поглощающего влагу.

Расчетное время (τ) защиты оболочки (без цеолита) можно определить по формуле

$$\tau = -\frac{4d^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{p_{кр}}{p_0} \right) \right], \quad (4.1)$$

где d – толщина оболочки, м; D – коэффициент диффузии, м²/с; p_0 – давление паров окружающей среды; $p_{кр}$ – давление паров влаги, соответствующее ее критической концентрации, после достижения которой появляются отказы.

Расчетное время влагозащиты не является определяющим при выборе материала, так как надо оценить внутренние напряжения после полимеризации и в диапазоне температур, адгезию оболочки к компоненту, ϵ и $\text{tg}\delta$, электрическую и механическую прочность, теплопроводность, токсичность и т.д.

При выборе заливочного материала особое внимание следует обращать на близость ТКЛР материала заливки и защищаемого компонента или узла (это влияет на внутренние напряжения в компаунде), а также ТКЛР материала заливки и внешних выводов (это влияет на образование каналов проникновения влаги при изменении температуры). Для защиты заливаемых элементов от механических нагрузок, возникающих в результате внутренних напряжений в компаунде, принимают следующие меры: ограничивают толщину заливки; наиболее чувствительные компоненты располагают ближе к центру (рис. 4.5); отдельные компоненты, например магнитные, помещают в защитные кардасы.

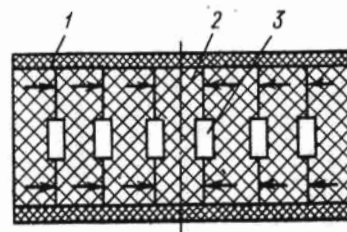


Рис. 4.5. Тангенциальные силы в герметизированном блоке с навесными компонентами:
1 – плата; 2 – компаунд;
3 – компонент

Перед заливкой защищаемые компоненты покрывают тонким слоем эластичного компаунда (например, СКТН), вазелина (КВ-3, КВ-Н и др.), смазки (ВНИИНП, ЦИАТИМ-201 и др.) (рис. 4.6). Смазка толщиной 0,025; 0,062; 0,087 мм снижает контактное давление на 30, 70 и 80 % соответственно. Увеличивать толщину слоя смазки для изделий, работающих в широком диапазоне температур, нецелесообразно из-за высокого значения ТКЛР силиконовых материалов (около $200 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и возникающего вследствие этого большого гидростатического давления в замкнутом объеме.

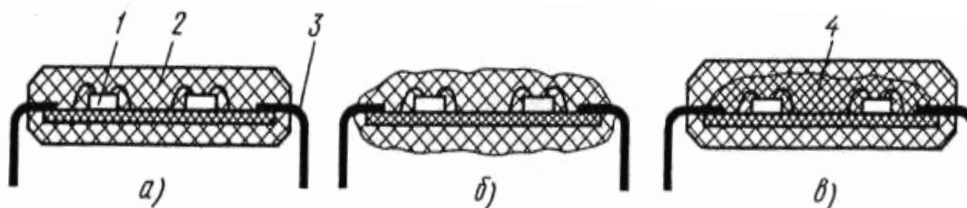


Рис. 4.6. Монолитные влагозащитные конструкции узлов РЭС: *а* – заливка в форму без подслоя; *б* – обволакивание; *в* – двухслойная заливка с подслоем из эластичного материала; 1 – элементы; 2 – герметизирующий полимерный материал; 3 – выводы; 4 – подслой из эластичного материала

Применяют различные компаунды: эпоксидные (ЭЗК, ЭК-16Б, Э-242 и др.), эластичные полиуретановые для заливки ферритовых элементов (типа 10-10, 10-20 и др.), кремнийорганические (Виксинт, Сиэл и др.), полиэфирные (МБК) и др. Особое место занимают пенокомпаунды, имеющие малые плотность ($10 - 300 \text{ кг/м}^3$), диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 1,05 - 2,1$) и потери ($\text{tg}\delta = 0,002 - 0,03$). Они выполняются на основе фенол-формальдегидной смолы (ФК-20), полиуретанов (ПУ-101 и др.), эпоксидной смолы (ПЭ-1, ПЭ-5 и др.), кремнийорганических материалов (ВПГ, СИЛПЕН, К-40 и др.). Пенокомпаунды последней группы обладают демпфирующими свойствами, работают в диапазоне температур $-60 - +250 \text{ } ^\circ\text{C}$. Жесткие пенокомпаунды обладают высокой удельной механической прочностью, что позволяет использовать их в качестве конструкционных материалов. Чтобы уменьшить механические нагрузки на залитые жестким компаундом компоненты, в качестве демпфера часто используют слой эластичного пенокомпаунда толщиной от 1 до 3 мм (ВГО-1, СИЛПЕН, У-1-18 и др.).

После заливки пенокомпаундами повышается вибропрочность узла вследствие смещения резонансных частот. При использовании жестких пенокомпаундов (ПУ-101 и др.) допускается эксплуатация изделий при температурах от $-25...+60$ до $+40...+150 \text{ } ^\circ\text{C}$, эластичных (например, ВПГ) – в диапазоне температур от -60 до $+250 \text{ } ^\circ\text{C}$, пеностекла – до $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Обволакивание применяют для защиты от влаги печатных плат, дискретных ЭРЭ, бескорпусных полупроводниковых приборов, микросборок. Основным преимуществом обволакивания является высокая экономичность, недостатками – довольно толстый и неконтролируемый слой покрытия, возможность использования только для нежестких условий эксплуатации (как и для всех видов полимерной защиты от влаги), сложность удаления попавшей под защитный слой влаги. Обволакивание печатных плат лаками и компаундами позволяет повысить пробивное напряжение работающей в наземных условиях аппаратуры. Для обволакивания применяют лаки (УР-231, Э-4100 и др.), компаунды (ЭКМ, ЭК-42 и др.), эмали.

К обволакиванию можно отнести также герметизацию компаундами паяных и сварных швов и мест контактирования металлов с различными электрохимическими потенциалами, которые весьма чувствительны к воздействию влаги. Но даже при наличии герметизирующих компаундов следует избегать контакта металлов с сильно различающимися электрохимическими потенциалами, например, алюминия (-667 мВ) и меди ($+10$ мВ), находящихся в морской воде (рН7,5).

Опрессовка – это защита изделия от влаги толстым слоем полимерного материала (термореактивная или термопластичная пластмасса) методом литьевого или трансферного прессования в специальных формах. Этот вид влагозащиты используют в основном для малогабаритных компонентов (ИС, ЭРЭ, микросборок – рис. 4.7), что позволяет надежно укрепить внешние выводы и создать несущую конструкцию, которая способна выдерживать механические перегрузки и пригодна для автоматизации установки компонентов на плату. Используется для нежестких условий эксплуатации (отапливаемые помещения), имеет низкую стоимость (в 2 – 3 раза ниже стоимости полых корпусов).

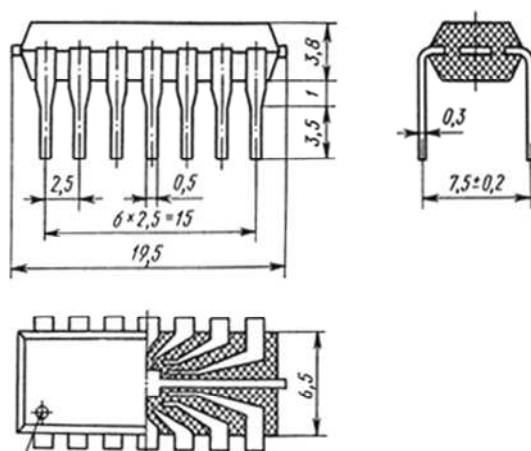


Рис. 4.7. Монолитный полимерный корпус ИС типа 201.14-1

При разработке конструкции учитывается необходимость использования материалов корпуса и выводов с близкими значениями ТКЛР (табл. 4.3). Толщина опрессовки выбирается с учетом надежности влагозащиты, технологических требований (при толщине стенки менее 2 мм возможно повреждение защищаемого компонента в пресс-форме), внутренних напряжений (при больших толщине и изменении температуры могут возникнуть большие внутренние напряжения). При выборе материала для опрессовки необходимо учитывать его параметры ϵ , $\text{tg}\delta$, электрическую прочность.

Таблица 4.3

Температурный коэффициент линейного расширения некоторых материалов

Материал	ТКЛР, $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Материал	ТКЛР, $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Прессматериалы:		Проводники:	
К-124-18	19 – 36	алюминий	22 – 26
К-124-38	20 – 30	латунь	18 – 19
АГ-4В	10 – 15	медь	16 – 23
К-21-22	43 – 53	серебро	22
ВЧ-70	37	золото	13,9
ЭФП-60АК	48	никель	13,3
		Конструкционные материалы:	
		сталь углеродистая	12
		нержавеющая сталь	10,5
		ковар	6

Время влагозащиты рассчитывается по той же формуле, что и для заливки. Для компонентов СВЧ этот вид влагозащиты не используется. Защита полимерными материалами от влаги экономична, но используется только для нежестких условий эксплуатации (отапливаемые помещения). Применяя гермокорпус, можно создать более надежную влагозащиту компонентов, при этом в ряде случаев целесообразно переходить на бескорпусную элементную базу.

Для защиты от коррозии несущих корпусных конструктивных узлов из металлов и сплавов широко применяют **монолитные пленочные металлические покрытия**, нанесенные горячим способом, гальванически, путем диффузии. Толщина таких покрытий – единицы – десятки микрометров. Из приведенных в табл. 4.4 металлических покрытий наибольшей температурной стабильностью обладает хромовое (тускнеет при $+500 \text{ }^\circ\text{C}$). Золотое покрытие не взаимодействует с кислотными, щелочными и сернистыми соединениями, но оно мягкое и легко поддается истиранию.

Таблица 4.4

Характеристики некоторых металлических антикоррозионных покрытий

Покрытие	Назначение и область применения покрытия	Материал защищаемых деталей	Толщина покрытия, мкм
Цинковое	Защита от коррозии корпусов крышек, панелей, шасси, каркасов резьбовых крепежных деталей, получение светопоглощающих поверхностей	Сталь, медь, медные сплавы	6 – 30
Кадмиевое	Защита от коррозии в морских условиях корпусов, крышек, каркасов, панелей, шасси, экранов и т.д.	То же	12 – 30
Никелевое	Защита от коррозии экранов, сердечников, корпусов, резьбовых крепежных деталей; придание деталям повышенной отражательной способности; увеличение твердости деталей, работающих на трение	"_"	3 – 18
Хромовое (с подслоем)	Защита от коррозии и декоративная отделка корпусов, ручек, петель и т.п., увеличение твердости деталей, работающих на трение	"_"	9 – 48, для листа 6 – 12
Сплав олово свинец	Улучшение условий пайки контактов, лепестков, проводов	"_"	6 – 24
Серебряное (с подслоем)	Улучшение электропроводности и защита от коррозии контактов, пружин, лепестков, резьбовых крепежных деталей, улучшение пайки	Сталь, медь, медные сплавы, алюминий и его сплавы, ковар	6 – 60, для листа 3 – 6
Золотое (с подслоем)	Уменьшение переходных сопротивлений контактов, пружин, лепестков, создание покрытия, не имеющего оксидной пленки	Медь, медные сплавы, ковар	9 – 12 (серебро 6 – 9, золото 3)

В ряде случаев защитное покрытие делают многослойным, например, слой меди толщиной 6 – 10 мкм (высокая адгезия к стали), слой никеля толщиной 3 – 6 мкм (высокая твердость), слой хрома толщиной 0,5 мкм (антифрикционность, гидрофобность). Для защиты корпусов из алюминиевых сплавов используют многослойные покрытия, например, Cu-Ni-(Sn-Bi). Добавка висмута позволяет избежать оловянной чумы при низких температурах и препятствует росту дендритов при нанесении покрытия.

В зависимости от поляризуемости пленки металла различают два вида покрытий – катодные и анодные. Если электродный потенциал металла покрытий в данной среде (табл. 4.5) более положительный, чем электродный потенциал основного металла, то покрытие называется катодным, а если он более отрицательный, то покрытие называется анодным. Катодные покрытия защищают основной металл лишь механически, изолируя его от внешней среды. Анодные покрытия защищают его не только механически, но и электрохимически. Продукты разрушения заполняют поры, и процесс разрушения замедляется.

Таблица 4.5

Электрохимические потенциалы металлов

Металл	Электрохимический потенциал, мВ	Металл	Электрохимический потенциал, мВ
Пресная вода, pH 6		Морская вода, pH 7,5	
Серебро	+194	Серебро	+149
Медь	+140	Никель	+46
Никель	+118	Медь	+10
Алюминий	-169	Свинец	-259
Олово	-175	Цинк	-284
Свинец	-283	Сталь	-335
Сталь	-350	Кадмий	-519
Кадмий	-574	Алюминий	-667
Цинк	-823	Олово	-809

В конструкторской документации на изделие указывается материал покрытия, его толщина, последовательность нанесения слоев. Например, медно-никелево-хромовое покрытие, служащее защитой от коррозии и одновременно являющееся декоративной отделкой, обозначается М24Н12Х (толщина меди 24 мкм, никеля 12 мкм, хрома – до 1 мкм). В ряде случаев несущие конструкции защищают от влаги с помощью лакокрасочных покрытий. Такие покрытия вследствие химической инертности обладают лучшими антикоррозионными свойствами, чем металлические, но механическая прочность и влагостойкость их меньше. Перед нанесением лакокрасочных покрытий металл для улучшения адгезии грунтуют.

4.2.3. Защита элементов и узлов РЭС полыми оболочками

Практически полная защита РЭА от проникновения воды, водяных паров и газов достигается при использовании металлов, стекла и керамики с достаточной степенью непроницаемости. Обычно при такой герметиза-

ции применяются металлические корпуса с воздушным и газовым заполнением, а ввод и вывод электрических цепей производится через стеклянные или керамические изоляторы и гермопроходники.

Блоки с полной герметизацией после проверки на герметичность обычно заполняют сухим воздухом или инертным газом при нормальном или повышенном давлении.

Сухой воздух уменьшает относительную влажность в гермообъеме, а инертный газ – окисляемость компонентов (особенно бескорпусных ИС), материалов и покрытий, понижает вероятность образования дуги между контактами реле и переключателей.

Способы выполнения герметичных корпусов.

Герметичность блоков обеспечивается герметизацией их корпусов и внешних электрических соединителей, которые устанавливаются на лицевой или задней панелях корпуса.

Герметизация корпусов (блоков) может осуществляться следующими способами:

- сваркой основания и корпуса блока;
- паяным демонтируемым соединением корпуса (основания) с крышкой (кожухом) блока;
- уплотнительной прокладкой.

Выбор способа герметизации определяется требованиями, предъявляемыми к блокам в зависимости от условий эксплуатации, габарита (объема) блока, а также материалов, используемых в корпусе и в основании блока (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Рекомендации по выбору способа герметизации

Объем герметичного блока, дм ³	До 0,5	0,5 – 5		Более 3
Вид герметизации	Неразъемная	Демонтируемая		Разъемная
Способ выполнения уплотняющего стыка	Сварка	Демонтируемая сварка	Демонтируемая пайка	Применение уплотнительных прокладок
Скорость натекания газа V_H , дм ³ ·Па/с		$1,33 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-7}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$

Кожуха герметичных корпусов изготавливаются методами сварки и пайки. Рассмотрим подробнее особенности их проектирования.

Герметизация корпусов с помощью сварки

При конструировании сварных герметичных корпусов необходимо правильно выбрать материалы и вид сварки.

Для выполнения герметичных корпусов применяются виды сварки:

- плавлением;
- электронно-лучевая;
- плазменная;
- лазерная.

Для НК, получаемых методом сварки, используют материалы:

- углеродистые стали;
- нержавеющие стали;
- алюминиевые сплавы;
- магниевые сплавы;
- титановые сплавы.

Герметизацию с помощью сварки применяют для блоков, не подлежащих ремонту, объем которых не превышает $0,5 \text{ дм}^3$. Вскрытие таких блоков возможно только с помощью механического снятия сварного шва, что влечет за собой обязательное попадание металлической пыли на бескорпусные элементы и, соответственно, их отказ. Этот способ герметизации широко используется для герметизации корпусов ИС и МСБ и обеспечивает степень натекания $B_H = 10^{-9} \text{ л} \cdot \text{мкм/с}$.

На рис. 4.8 приведены виды неразъемной сварки.

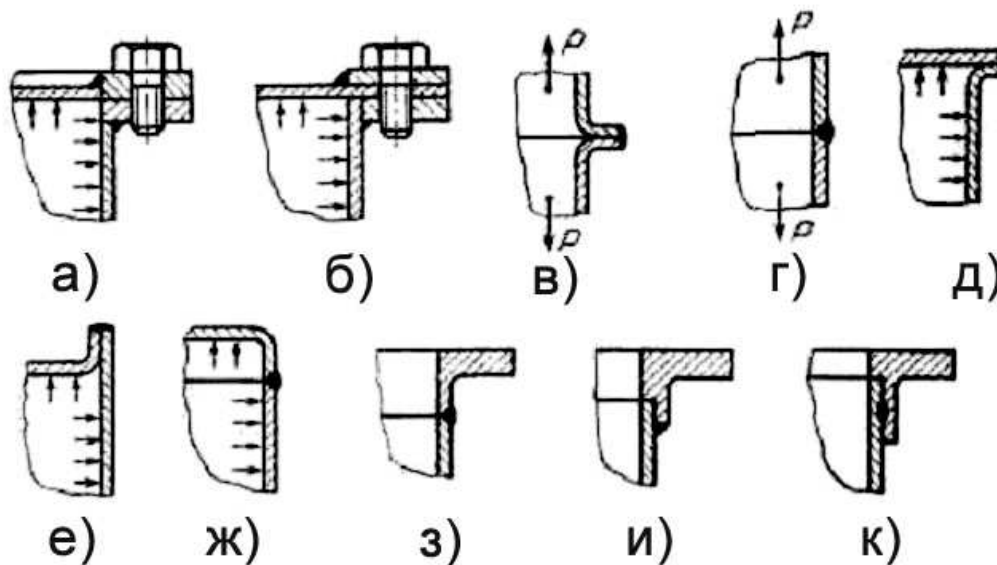


Рис. 4.8. Конструкции сварных корпусов

Демонтируемая сварка между корпусом 1 и крышкой 2 (рис. 4.9, а, б) производится оплавлением плазменным или лазерным способом. Поскольку глубина сварки, выполняемой указанными способами, лежит в пределах $t_{св} = 0,2 - 0,4$ мм, то при реальной ширине бортика, равной $b_{б} = 1,5 - 2$ мм (см. рис. 4.9, а), $b_{б} = 3 - 4$ (см. рис. 4.9, б), можно демонтировать данное соединение механическим способом (фрезерованием) 3 – 4 или 6 – 8 раз.

Демонтируемая сварка имеет недостаток: демонтаж необходимо производить аккуратно, чтобы металлическая стружка при фрезеровании не попала внутрь блока и не замкнула элементы схемы.

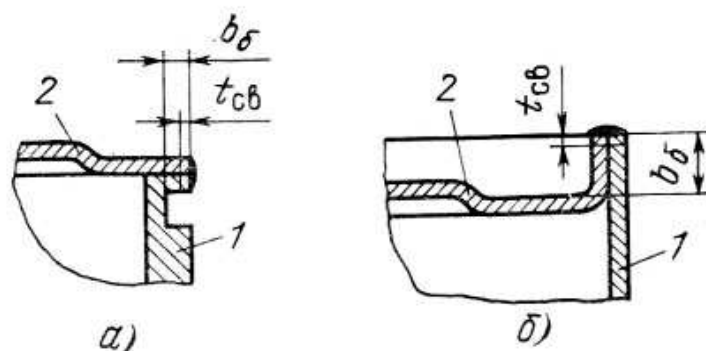


Рис. 4.9. Демонтируемая сварка

Герметизация блоков паяным соединением

Герметизация с помощью паяного демонтируемого соединения применяется для блоков, объем которых лежит в пределах $0,5 - 5$ дм³. Этот способ обеспечивает степень натекания $V_H = 10^{-6}$ л·мкм/с, что гарантирует работоспособность блока.

Пайкой можно достигнуть хорошего внешнего вида шва – герметичного, обладающего малым переходным электрическим сопротивлением. Различают пайку *мягкими* (температура плавления $t_{пл} < 673$ К) и *твердыми* ($t_{пл} > 673$ К) припоями. При пайке мягкими припоями необходимо разгружать швы от больших нагрузок, скрепляя детали точечной сваркой, заклепками, винтами и т.п. Паяный шов в этом случае используется только для обеспечения герметизации. Для получения более качественного шва спаиваемые детали заранее облуживаются (лучше гальваническим путем), а затем в сомкнутом виде нагреваются до температуры плавления припоя.

Пайка твердыми припоями дает более прочные соединения, иногда не уступающие по прочности основному материалу. Для прочности соединения большое значение имеет качество подготовки спаиваемых поверхно-

стей, шероховатость обработки которых должна быть не ниже $R_z = 20$ мкм. При любых соединениях необходимо предусматривать возможность надежной фиксации деталей относительно друг друга в процессе выполнения пайки.

В НК с помощью пайки можно получать неразъемные соединения деталей, выполняемых из углеродистых и нержавеющей сталей, ковара, меди и ее сплавов, алюминиевых и магниевых сплавов, молибдена и ковара, металлизированной керамики и других материалов.

Основные виды паяных соединений приведены на рис. 4.10, *a – z*. При пайке деталей из материалов с различными ТКЛР наружная деталь должна иметь большой ТКЛР, чтобы обеспечить сжатие припоя при остывании. Растекание пропоя в зазоре определяется конструкцией и размерами последнего. Прямые углы обеспечивают хорошее протекание припоя через все соединения (см. рис. 4.10, *д*). Расширения в зазорах (фаски, скругления) останавливают течение припоя (см. рис. 4.10, *e*).

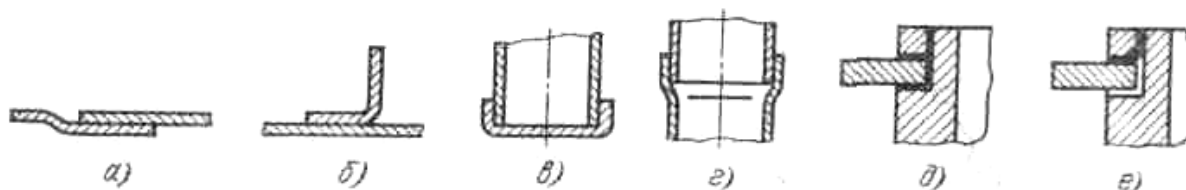


Рис. 4.10 Паяные соединения

Рекомендуемые зазоры в паяных соединениях приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Рекомендуемые зазоры в паяных соединениях

Спаиваемые материалы	Припой	Рекомендуемый зазор, мм
Алюминиевые сплавы	Твердые	0,1 – 0,25
Стали	Твердые	0,01 – 0,05
	Мягкие	0,2 – 0,75
Медь и медные сплавы	Латунные	0,075 – 0,4
	Медно-фосфористые	0,02 – 0,125

Конструктивные элементы герметизации блоков паяным соединением приведены на рис. 4.11, *a – z*.

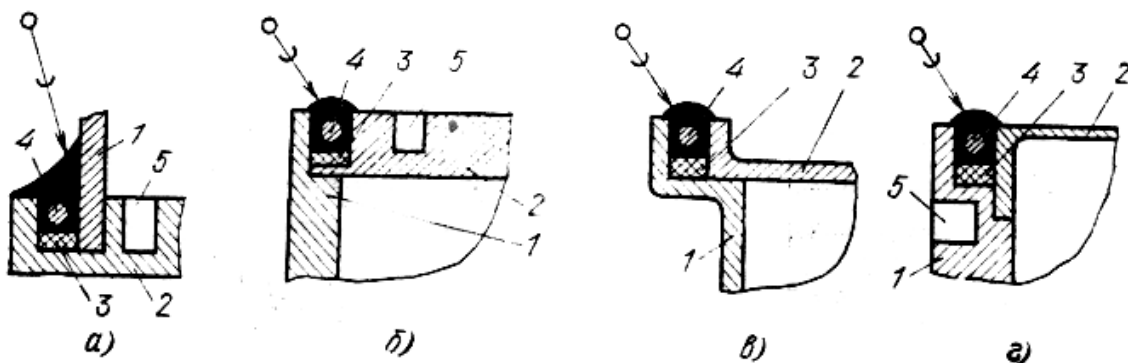


Рис. 4.11. Рекомендуемые варианты паяных демонстрируемых соединений: 1 – корпус блока; 2 – крышка; 3 – прокладка уплотнительная; 4 – проволока; 5 – теплоотвод

К элементам паяного соединения конструкции блока предъявляются следующие требования:

- для устранения перегрева блока в момент пайки в элементах конструкции корпуса крышки вблизи паяного соединения необходимо предусмотреть тепловую канавку;
- прокладку следует выполнять прямоугольного сечения из термостойкой резины;
- диаметр проволоки должен быть меньше ширины зазора между крышкой и корпусом на 0,1 – 0,2 мм.

В паяном соединении проволока над прокладкой укладывается по всему периметру соединения. Один из концов проволоки выводится через паз в крышке из зоны соединения и обычно укладывается в тепловую канавку. Пространство по всему периметру соединения заполняется легкоплавким припоем, как правило, ПОС-61. Данное паяное соединение позволяет демонтировать (вскрывать корпус) блока до трех раз.

В целях предотвращения нарушения герметичности блока наружная поверхность паяного соединения не должна быть установочной поверхностью блока и все элементы крепления блоков должны располагаться на максимально возможном расстоянии от паяного соединения.

Особое внимание при проектировании герметичных блоков следует уделять выбору материалов составных частей корпуса блока. В табл. 4.8 приведены рекомендуемые материалы и покрытия элементов конструкций корпусов блоков, герметизируемых паяным демонтируемым соединением.

Качество паяных швов зависит от материала корпусов и технологии пайки. Корпуса изготавливают из холоднокатаной стали (0,3 – 0,5 мм), латуни (0,25 – 0,8 мм) и алюминия (0,3 – 0,8 мм). В отдельных случаях корпуса могут быть керамическими, для этого места пайки покрываются серебром путем нанесения пасты из углекислого серебра и скипидара с последующим обжигом при температуре 800 °С. Пайка с серебряными слоями на керамике должна производиться припоем ПОС-61 с 3 %-й добавкой серебра.

Таблица 4.8

Материалы и покрытия для элементов конструкций

Материал	Покрытие	Условия эксплуатации
Алюминиевый сплав АМц	Н12.0-Ви(99,7)6	Легкие
Алюминиевый сплав АМг	Н24.0-Ви(99,7)12	Средние
Алюминиевый сплав Д16	Н24.0-Ви(99,7)12	Жесткие
Алюминиевый сплав В95	Н24.0-Ви(99,7)12	Жесткие
Латунь Л63	Срб.НЗ.О-Ви (99,7)3	Средние
Латунь ЛС59-1	НЗ.0-Ви(99,7)6	Жесткие
Сталь 10КП	МЗ.О-Ви (99,7)3	Средние
Сталь 20	МЗ.О-Ви (99,7)3	Средние
Титановый сплав ВТ1	Н6.МЗ.Срб	Жесткие

Герметизация корпусов с помощью уплотнительных прокладок

Разъемная герметизация осуществляется с применением металлических и эластичных уплотнительных прокладок.

Различные схемы конструкций уплотняющего стыка между корпусом 1 и крышкой 2 с применением прокладок 3 показаны на рис. 4.12.

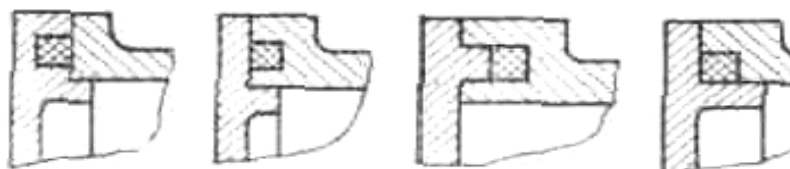


Рис. 4.12. Конструкции уплотняющего стыка

При применении прокладок большое значение имеют чистота соединяемых поверхностей и отклонение их от плоскостности.

Металлические уплотнительные прокладки делаются из мягкого материала, допускающего пластическую деформацию при небольших усилиях – свинец, алюминий, отожженная красная медь. Такие прокладки бывают различного сечения – плоские (рис 4.13, а), с одним выступом (см. рис. 4.13, б) и с двумя выступами (см. рис. 4.13, в).

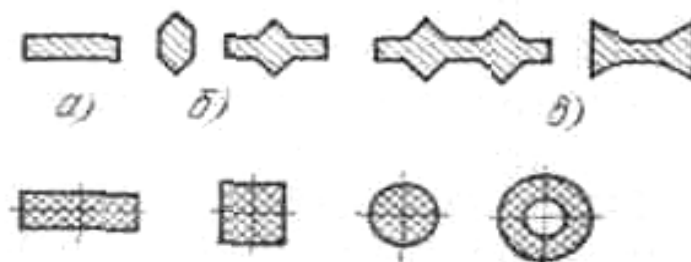


Рис. 4.13. Конструкции металлических уплотнительных прокладок

Недостатком разъемной герметизации с применением металлических уплотнительных прокладок является то, что при многократных температурных циклах уплотнение нарушается в результате усадки (наклепа) из-за различных ТКЛР материалов прокладки и корпуса.

В качестве эластичного материала для прокладок в разъемной герметизации применяется резина различных марок, специальные пластики. Резиновые прокладки следует применять цельными, преимущественно круглого сечения, полученными вулканизацией в пресс-форме. Для уменьшения влажности в разъемных конструкциях применяют осушители (например, силикагель). Резиновая прокладка, помещенная в гнездо корпуса, сжимается, т.е. имеет натяг. В процессе эксплуатации на эту прокладку действует давление

$$p = P_n + P_{o.c}, \quad (4.2)$$

где P_n – начальное давление за счет натяга, $P_{o.c}$ – давление окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В.М. Кулаков [и др.]; под ред. Е.А. Ладыгина. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
2. Гелль, П.П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: учебник для вузов / П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд. – 1984. – 536 с.
3. Дульнев, Г.Н. Методы расчета тепловых режимов прибора / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
4. Жаднов, В.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств / В.В. Жаднов, А.В. Сарафанов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 464 с.
5. Ненашев, А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: учебник для радиотехн. специальностей вузов / А.П. Ненашев. – М.: Высш. школа, 1990. – 432 с.
6. Джонс, Дж.К. Методы проектирования: пер. с англ. / Дж.К. Джонс. – 2-е изд., доп. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
7. Дульнев, Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учебник для вузов / Г.Н. Дульнев. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
8. Каленкович, Н.И. Проектирование РЭС с учетом механических воздействий: учеб. пособие по курсу «Конструирование радиоэлектронных средств» для студентов специальности «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» / Н.И. Каленкович. – Минск: БГУИР, 1999.
9. Каленкович, Н.И. Механические воздействия и защита РЭА: учеб. пособие для вузов / Н.И. Каленкович, Е.П. Фастовец, Ю.В. Шамгин. – Минск: Выш. шк., 1989.
10. Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.
11. Роткоп, Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Л.Л. Роткоп, Ю.Е. Спокойный. – М.: Сов. радио, 1976.
12. Справочник конструктора РЭА: общие принципы конструирования / под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Сов. радио, 1980.
13. Шимкович, А.А. Конструирование несущих конструкций РЭС и защита их от дестабилизирующих факторов: учеб. пособие по курсу «Конструирование радиоэлектронных устройств» для студентов специальности «Проектирование и производство радиоэлектронных средств». В 2 ч. / А.А. Шимкович. – Минск: БГУИР, 1999.
14. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер; пер. с нем. И.П. Кужекина; под ред. Б.К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.: ил.

15. Барнс, Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами: пер. с англ. / Дж. Барнс. – М.: Мир, 1990. – 238 с.: ил.
16. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко [и др.]. – М.: Радио и связь, 198. – 256 с.: ил.
17. Волин, М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре / М.Л. Волин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.: ил.
18. Образцов, Н.С. Теплообмен в РЭА. Конспект лекций по курсу «Конструирование радиоэлектронных устройств» для студентов специальности «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» дневной формы обучения / Н.С. Образцов, А.М. Ткачук, Э.П. Куракина. – Минск: БГУИР, 2003. – 55с.: ил.
19. Конструирование РЭС. Оценка и обеспечение тепловых режимов: учеб. пособие / В.И. Домнич, Ю.Ф. Зиньковский. – К.: УМК ВО, 1990. – 240 с.
20. Седельников, Ю.Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Ю.Е. Седельников. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2006. – 304 с.
21. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Изд-во стандартов, 1989.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование тепловых характеристик РЭС методами математического моделирования: монография / В.В. Гольдин [и др.]; под ред. А.В. Сарфанова. – М.: Радио и связь, 2003. – 456 с.
2. Касьян, Н.Н. Комплексное математическое моделирование электрических и тепловых процессов радиоэлектронных средств / Н.Н. Касьян [и др.]. – Запорожье: ЗГТУ, 1995. – 118 с.
3. Кечиев, Л.Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 352 с.
4. Кофанов, Ю.Н. Комплексное моделирование взаимосвязанных физических процессов радиоэлектронных конструкций: учеб. пособие / Ю.Н. Кофанов, С.В. Засыпкин. – М.: МГИЭМ, 1996. – 56 с.
5. Кофанов, Ю.Н. Моделирование тепловых процессов при проектировании, испытаниях и контроле качества радиоэлектронных средств / Ю.Н. Кофанов, А.И. Манохин, С.У. Увайсов. – М., 1998. – 139 с.
6. Кузьмин, В.И. Электростатический разряд и электронное оборудование: учеб. пособие / В.И. Кузьмин, Л.Н. Кечиев. – М.: МГИЭМ, 1997. – 88 с.
7. Маквецов, Е.Н. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: учеб. для вузов / Е.Н. Маквецов, А.М. Тартаковский. – М.: Радио и связь, 1993. – 200 с.
8. Малоземов, В.В. Системы терморегулирования космических аппаратов / В.В. Малоземов, Н.С. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1995. – 107 с.

9. Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях / Ю.Н. Кофанов [и др.]. – М.: Радио и связь, 2000. – 226 с.
10. Соколов, С.С. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учеб. пособие / С.С. Соколов, В.Ю. Суходольский. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 80 с.
11. Тартаковский, А.М. Краевые задачи в конструировании радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие / А.М.Тартаковский. – Саратов: СГУ, 1984. – 132 с.
12. Глудкин, О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС: учебник / О.П. Глудкин. – М.: Высш. шк., 1991.
13. Конструирование радиоэлектронных средств: учеб. пособие. / Н.С. Образцов [и др.]; под ред. Н.С. Образцова. – Минск: МРТИ, 1984. – 201 с.
14. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учебник для вузов / К.И. Билибин [и др.]; под общ. ред. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
15. Куземин, А.Я. Конструирование и микроминиатюризация электронно-вычислительной аппаратуры: учеб. пособие для вузов. / А.Я. Куземин. – М.: Радио и связь, 1985. – 230 с.
16. Маквецов, Е.Н. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: учебник для вузов / Е.Н. Маквецов, А.М. Тартаковский. М.: Радио и связь, 1993. – 200 с.
17. Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях / Ю.Н. Кофанов [и др.]. – М.: Радио и связь, 2000. – 226 с.
18. Рикетс, Л.У. Электромагнитный импульс и методы защиты: пер. с англ. / Л.У. Рикетс, Дж.Э. Бриджес, Дж. Майлетт; под ред. Н.А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
19. Соколов, С.С. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств. Защита от внешних воздействий: учеб. пособие / С.С. Соколов, В.Ю. Суходольский. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 88 с.
20. Справочник конструктора-приборостроителя / В.Л. Соломахо [и др.]. – Минск: Выш. шк., 1983. – 272 с.
21. Справочник конструктора РЭА: компоненты, механизмы, надежность / Н.А. Барканов [и др.]; под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Радио и связь, 1985.– 384 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Рабочая программа	4
Тема 1. ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ РЭС	8
1.1. Факторы, определяющие конструкцию РЭС	8
1.1.1. Классификация РЭС.....	8
1.1.2. Особенности проектирования наземных РЭС.....	10
1.1.3. Особенности проектирования морских РЭС	11
1.1.4. Особенности проектирования бортовых РЭС	13
1.2. Окружающая среда и ее воздействие на радиоэлектронные средства.....	16
1.2.1. Основные определения.....	16
1.2.2. Влияние различных факторов на работоспособность РЭС.....	18
1.2.3. Условия использования и климатическое исполнение РЭС.....	23
1.2.4. Категории размещения изделий РЭС	24
1.2.5. Особенности проектирование радиоэлектронных средств с учетом климатического исполнения и категории изделий	25
Тема 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭС	27
2.1. Обобщающие физические модели конструкций РЭС.....	27
2.1.1. Общие положения	27
2.1.2. Методы теории подобия и моделирования.....	29
2.1.3. Преобразование – определяющий физический эффект работы и конструкции РЭА	31
2.1.4. Обобщающая физическая модель РЭА.....	34
2.1.5. Принципы описания конструкций в обобщенных параметрах	36
2.1.6. Методика обобщенного исследования преобразования потоков энергии в РЭА	37
2.2. Математические методы анализа физических полей РЭА	37
2.2.1. Общие положения	37
2.2.2. Постановка краевых задач.....	40
2.2.3. Метод разделения переменных.....	41
2.2.4. Метод интегральных преобразований	43
2.2.5. Операционный метод.....	47
2.2.6. Метод функции Грина	48
2.2.7. Метод конечных разностей	49
Тема 3. ТЕПЛО- И МАССОБМЕН В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВАХ .	51
3.1. Основы тепло- и массообмена.....	51
3.1.1. Основные понятия и определения	51
3.1.2. Общая характеристика тепло-и массообмена в РЭА.....	53

3.1.3. Нормальный тепловой и влажностный режимы РЭА и способы их обеспечения	54
3.1.4. Типовые задачи тепло- и массообмена в РЭА.....	57
3.2. Перенос тепловой энергии конвекцией.....	58
3.2.1. Теплоотдача при свободном движении среды	58
3.2.2. Критериальные уравнения.....	59
3.2.3. Теплоотдача в неограниченном пространстве	60
3.2.4. Теплоотдача различных тел в неограниченном пространстве при естественной конвекции.....	62
3.2.5. Теплоотдача в ограниченном пространстве при естественной конвекции.....	64
3.2.6. Вынужденная конвекция	68
3.2.7. Теплообмен при вынужденном движении жидкости в трубах и каналах	70
3.3. Перенос тепловой энергии теплопроводностью.....	72
3.3.1. Теплопроводность: основные понятия и законы	72
3.3.2. Теплопроводность плоской стенки	76
3.3.3. Теплопроводность цилиндрической стенки	77
3.3.4. Теплопроводность сферической стенки	78
3.3.5. Теплопроводность однородной бесконечной стенки	79
3.3.6. Теплопроводность цилиндрической стенки с сосредоточенным источником тепла	80
3.3.7. Теплопроводность ребра	81
3.3.8. Тепловое поле и поток для составных стенок.....	84
3.3.9. Тепловые коэффициенты и сопротивления.....	85
3.3.10. Сложный теплообмен. Тепловые сопротивления при теплообмене...	86
3.4. Перенос тепловой энергии излучением.....	89
3.4.1. Основные понятия и определения	89
3.4.2. Основные законы теплообмена излучением	91
3.4.3. Лучистый теплообмен между телами	95
3.5. Тепловая чувствительность элементов РЭС	97
3.5.1. Конструкционные материалы	98
3.5.2. Пластические материалы.....	100
3.5.3. Радиокерамические материалы.....	108
3.5.4. Магнитные материалы.....	111
3.5.5. Резисторы	115
3.5.6. Конденсаторы	118
3.5.7. Полупроводниковые приборы	122
3.6. Математические основы характерных тепловых расчетов	127
3.6.1. Задачи теплового режима РЭА, приводящиеся к уравнениям параболического и эллиптического типов. Постановка краевых задач	127

3.6.2. Метод разделения переменных в приложении к тепловым расчетам микросхем	130
3.6.3. Операционные методы для расчета нестационарных тепловых режимов РЭА	132
3.6.4. Метод конечных интегральных преобразований при расчетах температуры элементов интегральных схем	134
3.7. Моделирование тепловых режимов РЭС	137
3.7.1. Тепловые цепи. Пассивные, активные элементы тепловых цепей	137
3.7.2. Некоторые закономерности стационарных тепловых полей	139
3.7.3. Тепловые модели РЭС	140
3.7.4. Метод моделирования тепловых процессов в РЭА на базе топологических моделей	142
3.7.5. Методика построения топологических моделей тепловых процессов нетиповых конструкций блоков РЭА	145
3.7.5.1. Особенности моделирования в различных системах координат	146
3.7.5.2. Печатный узел, установленный в герметичном блоке	148
3.7.5.3. Корпус блока РЭА в газовой среде с заданной температурой	149
3.7.5.4. Нагретая зона внутри корпуса блока РЭА	150
3.7.5.5. Воздушный канал	152
3.7.5.6. Блок этажерочной конструкции БРЭА	153
3.7.5.7. Гибридно-интегральный модуль, установленный на теплостоки	155
3.7.5.8. Конструкция системы вторичного электропитания в микроэлектронном исполнении	156
3.8. Системы обеспечения тепловых режимов РЭС	160
3.8.1. Основные определения	160
3.8.2. Элементы и устройства систем обеспечения тепловых режимов	161
3.8.3. Особенности проектирования РЭС с учетом тепло- и массообмена ..	165
3.8.4. Классификация способов охлаждения	167
Тема 4. ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС ОТ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	175
4.1. Механизмы влияния влаги на эффективность конструкций РЭС	176
4.1.1. Источники и пути проникновения влаги в РЭС	175
4.1.2. Взаимодействие влаги с материалами конструкций РЭС	177
4.1.3. Способы влагозащиты РЭС	180
4.2. Герметизация РЭС	182
4.2.1. Виды герметизации	182
4.2.2. Защита элементов и узлов РЭС монолитными оболочками	182
4.2.3. Защита элементов и узлов РЭС полыми оболочками	190

Учебное издание

Молодечкина Татьяна Викторовна
Алексеев Виктор Федорович
Молодечкин Максим Олегович

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-39 02 01
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»

В 2 частях

Часть 1

Редактор *Т. В. Булах*

Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

Подписано в печать 20.03.2013. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 11,83. Уч.-изд. л. 10,5 Тираж 30 экз. Заказ 398.

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.