

Надежность и эффективность В ТЕХНИКЕ

Справочник в десяти томах

Надежность и эффективность в технике

Справочник в десяти томах

Редакционный совет:

*В.С. АВДУЕВСКИЙ, акад. АН СССР
(председатель);*

*Н.А. СЕВЕРЦЕВ, д-р техн. наук
(зам. председателя)*

В.И. КУЗНЕЦОВ, акад. АН СССР;

Н.Д. КУЗНЕЦОВ, акад. АН СССР;

В.А. МЕЛЬНИКОВ, акад. АН СССР;

В.П. МИШИН, акад. АН СССР;

В.Ф. УТКИН, акад. АН СССР;

К.В. ФРОЛОВ, акад. АН СССР;

Б.В. ГНЕДЕНКО, акад. АН УССР;

И.Н. КОВАЛЕНКО, акад. АН УССР;

Б.Ф. ЛОМОВ, чл.-корр. АН СССР

**Том
10**

*Справочные данные
по условиям
эксплуатации
и характеристикам
надежности*

Под общей редакцией
д-ра техн. наук
В.А. КУЗНЕЦОВА



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1990

ББК 30.14
Н17
УДК 621.192 (035)

Авторы тома: Ю. З. Веденеев, А. С. Груничев, В. А. Кузнецов,
М. А. Куренков, А. З. Чепиженко

Рецензенты: д-р техн. наук А. П. Гусенков, д-р техн. наук В. И. Зю-
зин, канд. техн. наук Т. Г. Смирнова, д-р техн. наук О. Б. Балакшин,
канд. техн. наук М. Д. Перминов, д-р техн. наук В. Г. Лютцау,
д-р физ.-мат. наук В. И. Шевченко, д-р техн. наук И. А. Биргер

Надежность и эффективность в технике: Справочник.
Н17 В 10 т./Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. — М.:
Машиностроение, 1990. — (В пер.).

Т. 10: Справочные данные по условиям эксплуатации и
характеристикам надежности/Под ред. В. А. Кузнецова. —
336 с.: ил. — 1 р. 80 к.

Приведены данные по воздействию климатических и механических
факторов, ионизирующих излучений, факторов космического простран-
ства, коррозии материалов, а также характеристики надежности.

Предназначен для инженерно-технических работников, занятых про-
ектированием, изготовлением, испытаниями и эксплуатацией техники.
Будет полезен студентам и преподавателям высших технических учебных
заведений.

Н $\frac{2701000000-625}{038 (01)-90}$ Подписное

ББК 30.14

© Ю. З. Веденеев, А. С. Груничев,
В. А. Кузнецов и др., 1990

Оглавление

Предисловие	7	6. Комплексное воздействие механических нагрузок и климатических факторов .	122
Глава 1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ	10	Список литературы .	131
1. Окружающая среда	10	Глава 3. ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	132
2. Характеристика климатических факторов	11	1. Поля ионизирующих излучений ядерных силовых и энергетических установок .	132
Классификация внешних факторов	11	2. Поля ионизирующих излучений ядерного взрыва . . .	136
Характеристика макроклиматических районов . . .	11	3. Поля ионизирующих излучений моделирующих установок	140
3. Справочные данные по климатическим факторам . . .	18	4. Краткая характеристика методов измерений полей гамма- и нейтронного излучений	144
4. Комплексное воздействие климатических факторов . .	30	Список литературы .	158
5. Характеристика влияния климатических факторов на изделия	33	Глава 4. ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА	160
6. Требования по стойкости изделий к климатическим факторам	53	1. Глубокий вакуум и его воздействие на материалы, агрегаты и системы КА . . .	160
7. Защита изделий от климатических воздействий	61	2. Тепловые условия и воздействия в космическом полете	165
Приложение. Математическая модель определения климатической обстановки в различных климатических районах	73	3. Собственная атмосфера космического аппарата . . .	171
Список литературы .	78	4. Метеорные потоки в космическом пространстве . . .	172
Глава 2. УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ .	79	5. Источники и состав космических ионизирующих излучений	173
1. Классификация и характеристики ударно-вибрационных факторов	79	6. Радиационные пояса Земли	178
2. Справочные данные по ударно-вибрационным факторам	84	7. Искусственные радиационные пояса Земли	184
3. Оценка последствий воздействия механических нагрузок	95		
4. Защита изделий от воздействия механических нагрузок	107		
5. Основные характеристики виброизоляторов	114		

8. Оценка радиационных условий на борту космических аппаратов	186	2. Влияние коррозионной среды	233
9. Электризация космических аппаратов	189	3. Методы исследования коррозии	240
Список литературы	193	4. Методы защиты металлов от коррозии	245
Глава 5. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА	195	Список литературы	251
1. Виды радиационных эффектов в электрорадиоизделиях и материалах	195	Глава 7. ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ	253
2. Воздействие ионизирующих излучений на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы (ИМС)	199	1. Основные положения	253
3. Воздействие ионизирующих излучений на радиокомпоненты	207	2. Физико-химические модели для оценки надежности изделий	254
4. Эффекты в типовых схемах и возможные виды отказов в аппаратуре при воздействии ионизирующих излучений	210	Модель параметр — поле допуска	257
5. Показатели стойкости ЭРИ и аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений и методы их определения	214	Модель нагрузка — прочность	269
6. Общие принципы проектирования схем, обладающих минимальной чувствительностью к радиационным изменениям параметров ЭРИ	221	Модель нагрузка — несущая способность	271
Список литературы	228	Экспериментальные модели надежности изделий	274
Глава 6. КОРРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ	230	Коэффициентные модели надежности	293
1. Классификация коррозионных процессов	230	3. Распределение отказов изделий по причинам их появления	293
		4. Количественная характеристика надежности комплектующих изделий	305
		Список литературы	322
		Предметный указатель	324

Предисловие

Общепризнано, что высокое качество любой технической продукции, повышение эффективности ее применения невозможно достигнуть без обеспечения соответствующего уровня надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации продукции. При этом научно-технический прогресс определил необходимость и предоставляет возможность создания все более сложных технических систем, таких, например, как ракетно-космическая система «Буран». Вместе со сложностью подобных систем еще быстрее растут требования к их надежности, точности функционирования.

Мы находимся на таком уровне развития техники, когда ее дальнейшая автоматизация, способность решать многие интеллектуальные задачи становятся бессмысленными без обеспечения высокой надежности. Но и для сравнительно простой продукции, такой, например, как трактор или автомобиль, надежность выступает как принципиальный фактор экономии гигантских ресурсов человеческого труда и материалов, безопасности эксплуатации. Если обеспечить повышение показателей безотказности и долговечности тракторов в 3 раза, то этим самым в 3 раза можно сократить их производство, в 3 раза уменьшить число заводов, количество материалов, освободить для других работ людей, занятых производством тракторов. При этом значительно сократится и объем ремонтно-профилактических работ, а значит, и производство и использование дефицитных запасных частей. Данный конкретный пример показывает и конкретный путь перехода от экстенсивного к интенсивному, значительно более эффективному развитию такой под-

отрасли народного хозяйства, как тракторостроение.

Реально ли достижение этого результата? Несомненно. Но для этого требуется обеспечить реализацию многих требований. Для производства более надежной техники необходимо иметь соответствующие долговечные металлы, электронные и электротехнические изделия, резинотехнические изделия, которые обеспечат длительную эксплуатацию тракторов во всех условиях климатических и механических воздействий, т. е. как в жарком климате, так и в условиях сильных морозов, как в условиях пониженной влажности степей, так и при высокой влажности приморских районов, как в условиях хороших дорог с твердым покрытием, так и в условиях бездорожья, вызывающего сильные механические нагрузки (удары и вибрации) на узлы и механизмы трактора. Учитываются ли разработчиками тракторов возможные условия их применения? В общем, учитываются. Но разработчики часто не в состоянии знать все возможные условия эксплуатации их техники, так как соответствующих пособий практически нет. Можно привести всего несколько публикаций, относящихся к 50-м годам, или нормативных документов, отражающих некоторые усредненные данные по климатическим условиям эксплуатации технических устройств.

Широко развивается не только «наземная» техника. За последние десятилетия быстро развивалась, например, космическая техника, условия эксплуатации которой несравненно более тяжелые, чем условия эксплуатации наземной техники. Во-первых, прежде чем космический аппарат будет выведен на орбиту, он подвергнется многим

из тех воздействий, которые испытывает наземная техника. Во-вторых, при выводе в космическое пространство он вынужден испытывать тяжелые ударно-вибрационные нагрузки ракеты-носителя. В-третьих, в космическом пространстве он подвергается комплексу воздействий, которым не подвержена наземная техника: глубокий вакуум, невесомость, микрометеорные потоки, космические ионизирующие излучения (главным образом потоки электронов и протонов) и др.

Таким образом, при обеспечении безотказности, долговечности различных технических устройств нельзя ориентироваться на какие-то средние условия, а следует ориентироваться на достоверное значение реальных условий их эксплуатации (применения). Необходимо хорошо представлять и последствия воздействия различных условий эксплуатации на безотказность и долговечность. Только в этом случае могут быть достигнуты высокие показатели надежности технических устройств.

В 10-м томе справочника «Надежность и эффективность в технике» содержатся сведения и справочные данные по основным видам естественных и искусственных воздействий, которым подвергаются технические устройства и системы в процессе эксплуатации (применения). К ним, прежде всего, относят климатические факторы, зависящие от географического района, времени года, времени суток и др. Иногда не удается создать техническое устройство, которое удовлетворяло бы условиям его применения в любых географических районах земного шара. В этом случае ограничиваются тем или иным диапазоном воздействий или же принимают меры по защите всего устройства или наиболее чувствительных к данным воздействиям узлов (элементов).

Авторы, как правило, излагали как характеристики воздействий (например, колебания температуры, влажности в различных географических районах), так и характер изменений свойств материалов (элементов) при длительных сроках эксплуатации устройств в условиях данных воздействий. Таким же образом проводилось описание

ударно-вибрационных воздействий, которым подвергаются технические устройства, устанавливаемые на различных носителях (автомобиль, корабль, самолет, ракета и т. д.).

В справочнике учтена необходимость ознакомить разработчиков технических устройств с характеристиками полей ионизирующих излучений, особенно ядерных силовых и энергетических установок, видами последствий, вызываемых ионизирующими излучениями в чувствительных к ним узлах технических устройств, некоторыми способами защиты чувствительных элементов от радиационных воздействий. Опыт эксплуатации атомных электрических станций показывает, что разработчики аппаратуры, подверженной воздействию ионизирующих излучений, должны досконально знать возможные их уровни и способы защиты изделий от излучений. Это же относится к аппаратуре, функционирующей в космическом пространстве.

Даны также рекомендации по использованию статистических данных по безотказности комплектующих изделий при расчете показателей надежности технических устройств. Авторы были ограничены выбором значений так называемых лямбда-характеристик, рекомендуемых к использованию. Этот выбор в существенной мере ограничивается тем, что значения этих характеристик становятся обычно известными (с определенной достоверностью) только после длительного срока эксплуатации комплектующих изделий в составе определенных видов аппаратуры. Поскольку один и тот же вид аппаратуры может эксплуатироваться в различных климатических, ударно-вибрационных и других условиях, то значения лямбда-характеристик оказываются достаточно усредненными или же приводятся их максимальные и минимальные значения. Но разработчики новых видов аппаратуры, как правило, не осведомлены, при каких условиях (уровнях воздействующих факторов) были получены значения лямбда-характеристик интересующих их комплектующих изделий (например, микросхем того или иного типа, реле, резисторов и т. д.). Более того, иногда по новым типам комплектующих изделий еще

не имеется достоверных данных по характеристикам их безотказности при различных воздействующих факторах. Поэтому приходится ориентироваться на характеристики изделий-аналогов, далеко не всегда обладающих адекватными характеристиками безотказности. Авторы не стремились к публикации всех известных данных по лямбда-характеристикам. Они убеждены, что основным при разработке новых высоконадежных технических устройств является учет воздействующих факторов, защита от воздействий технического устройства или некоторых чувствительных к ним узлов. Расчет показателей надежности технических устройств играет важную, но все-таки вспомогательную роль, позволяя обнаружить слабые звенья и принять меры к их «упрочению» путем резервирования, дополнительной защиты от превалирующих воздействующих факторов и т. д. При этом расчет надежности будет тем точнее, чем «ближе» к моменту разработки нового технического устройства получены данные по лямбда-характеристикам комплектующих изделий. Такие данные всегда «ближе», если они получены соответствующей отраслью

техники, а не усреднены по многим отраслям. Поэтому и стремятся пользоваться отраслевыми данными по лямбда-характеристикам.

Применяемые физические величины в некоторых случаях не приведены к единицам Международной системы (СИ). Это, в основном, относится к единицам, применяемым для оценки воздействий ионизирующих измерений. Вызвано это тем, что иногда на практике (при градуировке приборов) применяется та или иная внесистемная единица измерения или для нее получены соответствующие опубликованные таблицы и формулы. В таких случаях авторы не стремились к пересчету табличных значений, а иногда и коэффициентов, входящих в расчетные формулы. При этом давались соотношения между применяемой внесистемной единицей и единицей СИ. В тех же случаях, когда и расчетные и табличные значения широко внедрены с применением единиц системы СИ, а соответствующие средства измерений проградуированы в них, авторы применяли исключительно эти единицы.

В. А. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук

Глава 1 КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

1. ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Для обеспечения надежной работы сложных систем необходимо обеспечить надежную работу входящих в них простых элементов (в дальнейшем — комплектующих изделий). Успех проектирования надежных технических изделий зависит от умения оценивать ожидаемое воздействие внешней среды, окружающей изделие.

Под окружающей средой понимают совокупность всех природных условий, в которых протекают производство, эксплуатация и хранение изделий. По результатам наблюдения за состоянием изделий при эксплуатации установлены закономерные связи между изменениями свойств среды и изделий. В зависимости от характера воздействий на изделия внешние воздействующие факторы (ВВФ) делят на семь классов: механические, климатические и другие природные ВВФ, биологические, радиационные, ВВФ электромагнитных полей, ВВФ специальных сред, термические. Каждый класс в зависимости от физической, биологической или химической сущности явлений, лежащих в основе ВВФ, делят на группы, а каждую группу — на виды с соответствующими каждому виду характеристиками.

Для технических изделий, расположенных на земной поверхности, определяющими дестабилизирующими внешними факторами являются климатические: тепло и холод, характеризующиеся температурой в °С или К; относительная влажность воздуха; роса и обледенение (гололед); морской туман (соляной); пыль и песок; солнечная радиация (инсоляция); плесневые грибы.

Под действием этих факторов проис-

ходит изменение как физических, так и химических свойств материалов. Проникновение влаги в диэлектрики приводит к падению сопротивления изоляции и к увеличению диэлектрических потерь. Влажность и загрязнение воздуха являются решающими факторами атмосферной коррозии.

При эксплуатации изделий на некоторой высоте над уровнем моря необходимо учитывать повышенный износ трущихся частей и механизмов, интенсивное воздействие ультрафиолетового излучения и снижение электрической прочности воздуха.

Заметное влияние на надежность изделий оказывают пыль, песок, соляной (морской) туман и другие воздействия, характерные для различных мест эксплуатации изделий.

Необходимо учитывать, что изменения одного или нескольких климатических факторов могут происходить на относительно небольших территориях и в течение сравнительно небольших промежутков времени (в течение суток). Поэтому при создании надежных действующих изделий необходимо располагать информацией о ВВФ, при воздействии которых будут использоваться конкретные изделия. Наличие достоверных и полных сведений о внешних условиях, в которых будут применяться изделия, является тем базисом, на основе которого разрабатываются технические условия на изделия и методы испытаний.

При характеристике внешних условий различных районов, в которых используются изделия, необходимо учитывать, что типичные изменения климатических условий (наиболее вероятные значения) определены по результатам обработки многолетних наблюдений (20 и более лет).

Характер и степень защиты от климатических воздействий изделий, предназначенных для длительной эксплуатации в различных климатических условиях, существенно различны. По этому классификация климата имеет большое техническое и экономическое значение для промышленности, выпускающей изделия для различных районов Земного шара.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

КЛАССИФИКАЦИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Класс климатических факторов подразделяют на группы и виды факторов (табл. 1).

Для конкретных типов или групп технических изделий виды воздействующих климатических факторов и их значения устанавливают в зависимости от макроклиматических районов, для эксплуатации в которых изготавливают изделия.

В соответствии с экономической и технической целесообразностью изделия могут быть изготовлены пригодными для эксплуатации либо в одном, либо в нескольких районах и местах размещения.

ХАРАКТЕРИСТИКА МАКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ

Климатическое районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей приведены в ГОСТ 15150—69, ГОСТ 24482—80 и ГОСТ 16350—80.

Макроклиматический район с умеренным климатом (У). В этом районе средняя из ежегодных абсолютных максимумов температура воздуха равна или ниже плюс 40 °С, а средняя из ежегодных абсолютных минимумов температура воздуха равна или выше минус 45 °С. Относительная влажность воздуха 80% и выше при температуре более плюс 20 °С встречается в виде исключения. Различают: умеренно-жаркий сухой климат в районах с высокой температурой воздуха в сочетании с высокими уровнями солнечной радиации и относительно низкой влаж-

ностью; умеренно влажный теплый климат в районах, которые характеризуются высокими температурами воздуха, высокой относительной влажностью в приземном слое и высоким уровнем солнечной радиации. Эти условия наблюдаются в жарких районах, находящихся вблизи водоемов; умеренно холодный климат в районах с умеренно низкими температурами воздуха.

Макроклиматический район с холодным климатом (ХЛ). В этом районе средняя из ежегодных абсолютных минимумов температура воздуха ниже минус 45 °С. Характерны образования инея, обледенение и холодный ветер. Различают: сильно холодный климат; экстремально холодный климат; холодный климат.

Районы с холодным климатом СССР образуют зону, ограниченную линиями северо-востока и северо-запада — побережье Северного Ледовитого океана от мыса Дежнева до границы Ненецкого национального округа — Восточная граница Ненецкого национального округа до границы Коми АССР — Северная граница Коми АССР до реки Адзъва.

Макроклиматический район с жарким сухим климатом (ЖС). В этом районе при очень сильной инсоляции продолжительное время наблюдается высокая температура воздуха и высокие уровни солнечной радиации. Относительная влажность понижается до очень низкой величины. Ежедневно наблюдаются большие колебания температуры воздуха и часто происходят песчаные вихри.

Макроклиматический район с тропическим климатом. В этом климатическом районе рассматриваются районы с тропическим влажным климатом (ТВ), тропическим сухим (ТС) и тропическим морским (ТМ) климатом.

Климатический район с тропическим влажным климатом охватывает территории, в которых от двух до двенадцати месяцев в году ежедневно и длительно температура воздуха превышает 20 °С, при этом относительная влажность воздуха выше 80% наблюдается не менее 12 ч в сутки. В этом климате бывают сильные ливни с выпадением осадков до 100 мм за 10 мин.

1. Класс климатических и других природных ВВФ

Номенклатура ВВФ		Характеристика ВВФ
Группа	Вид	Наименование и единицы измерения
Наименование	Наименование	
Атмосферное давление	Атмосферное повышенное давление	Повышенное рабочее давление, Па Продолжительность воздействия повышенного рабочего давления, ч, сут
	Атмосферное пониженное давление	Повышенное предельное давление, Па Пониженное рабочее давление, Па Пониженное предельное давление, Па Продолжительность воздействия пониженного давления, ч, сут
	Изменение атмосферного давления	Скорость изменения давления, Па·м ⁻¹ Диапазон изменения давления, Па Число циклов изменения давления за данное время
Температура среды	Повышенная температура среды	Повышенная рабочая температура, °С Повышенная предельная температура, °С Продолжительность воздействия температуры, ч, сут
	Пониженная температура среды	Пониженная рабочая температура, °С Пониженная предельная температура, °С Продолжительность воздействия температуры, ч, сут
	Изменение температуры среды	Скорость изменения температуры, °С, с ⁻¹ Диапазон изменения температуры, °С Число циклов изменения температуры за данное время
Влажность воздуха или других газов	Повышенная влажность	Относительная влажность при данной температуре, %
	Пониженная влажность	Абсолютная влажность, г·м ⁻³ Точка росы, °С Число циклов изменения повышенной (пониженной) влажности за данное время Продолжительность воздействия повышенной (пониженной) влажности, ч, сут

Атмосферные осадки	Атмосферные выпадаемые осадки (дождь, снег, град, снежная крупа, морось) Атмосферные конденсированные осадки (роса, иней, изморозь, гололед)	Интенсивность осадков, $\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$ Угол падения осадков, градусы Продолжительность воздействия выпадаемых осадков, ч, сут Толщина отложения осадков, мм Плотность осадков, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ Скорость обледенения, $\text{мм} \cdot \text{с}^{-1}$ Число циклов обледенения Продолжительность воздействия конденсированных осадков, ч, сут Соляной (морской) туман Водность тумана, мкм Средний размер капель, мкм Продолжительность воздействия соляного тумана, ч, сут
Пыль, песок	Статическая пыль (песок) Динамическая пыль (песок)	Массовая концентрация пыли (песка), $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$ Массовая доля пылевой смеси, % Размер частиц пыли, мкм Продолжительность осаждения (воздействия) пыли (песка), ч, сут Массовая концентрация пыли, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$ Массовая доля пылевой смеси, % Скорость циркуляции частиц, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ Размер частиц пыли, мкм
Солнечное излучение	Интегральное излучение Ультрафиолетовое излучение	Длина волны интегрального излучения, мкм Плотность потока интегрального излучения, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ Число циклов облучения Продолжительность воздействия интегрального излучения, ч, сут То же Эффективная суммарная солнечная ультрафиолетовая радиация, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$

Номенклатура ВВФ		Характеристика ВВФ
Группа	Вид	Наименование и единицы измерения
Наименование	Наименование	
Поток воздуха и других газов	Ветер	Среднее значение скорости ветра, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ Максимальное значение скорости ветра, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ Скоростной напор ветра, Па Продолжительность воздействия ветра, ч, сут
Среда с коррозионно-активными агентами	Атмосфера с коррозионно-активными агентами Водная среда с коррозионно-активными агентами Почва с коррозионно-активными агентами	Массовая концентрация хлоридов и газов (сернистого, азота, аммиака, озона) в воздухе, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ Продолжительность воздействия атмосферы с коррозионно-активными агентами, сут Соленость морской воды (льда), % Хлорность воды, % Массовая концентрация сероводорода, кислорода, катионов кальция и др., $\text{ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$ Агрегатный состав почвы, % Массовая доля хлора, карбонатов и др., %
Ледово-грунтовая среда	Лед Снежный покров	Толщина льда, м Продолжительность воздействия, ч, сут Толщина снежного покрова, см, м Продолжительность воздействия, ч, сут

2. Основные характеристики климатических районов

Климатический район	Средняя месячная температура воздуха, °С		Средняя месячная относительная влажность воздуха в июле в 13 ч, %	Число дней в году с минимальной температурой воздуха ниже минус 45 °С
	Январь	Июль		
Очень холодный	От —50 до —30	От 2 до 18	—	От 10 до 100
Холодный	От —30 до —15	От 2 до 25	—	От 1,0 до 10,0
Арктический приполюсный	От —33 до —28	От —1 до 0	Более 90	От 0 до 2
Арктический восточный	От —28 до —18	От 0 до 8	Более 80	От 0 до 0,1
Арктический западный	От —30 до —2	От —1 до 12	Более 80	От 0 до 3
Умеренно холодный	От —30 до —15	От 6 до 25	—	От 0,1 до 1,0
Умеренный	От —15 до —8	От 8 до 25	Менее 80	—
Умеренно влажный	От —15 до —10	От 10 до 20	80 и более	—
Умеренно теплый	От —8 до —4	От 16 до 25	Менее 70	—
Умеренно теплый влажный	От —8 до —4	От 16 до 25	70 и более	—
Умеренно теплый с мягкой зимой	От —4 до 0	От 16 до 25	Менее 70	—
Теплый влажный	От 0 до 4	От 20 до 25	Более 70	—
Жаркий сухой	От —15 до 4	От 25 до 30	Менее 40	—
Очень жаркий сухой	От —4 до 4	От 30 и выше	Менее 20	—

3. Обозначение климатических районов (см. рис. 1)

Макроклиматический район	Климатический район	Обозначение
Холодный	Очень холодный Холодный	I_1 I_2
Умеренный	Арктический приполюсный Арктический восточный Арктический западный Умеренно холодный Умеренный Умеренно влажный Умеренно теплый Умеренно теплый влажный Умеренно теплый с мягкой зимой Теплый влажный Жаркий сухой Очень жаркий сухой	II_1 II_2 II_3 II_4 II_5 II_6 II_7 II_8 II_9 II_{10} II_{11} II_{12}
Горы выше 2000 м	Средняя Азия Кавказ	$(I + II)_A$ III_K

4. Представительные и экстремальные пункты * климатических районов

Климатический район	Пункт	
	представительный	экстремальный
Очень холодный, холодный Арктический восточный Арктический западный Умеренно холодный Умеренный	Якутск Тикси, м. Шмидта Диксон Тюмень Москва	Оймякон — — Улан-Удэ Волгоград, Мурманск
Умеренно влажный Умеренно теплый Умеренно теплый влажный Умеренно теплый с влажной зимой Теплый влажный Жаркий сухой Очень жаркий сухой	Владивосток Киев Минск Одесса Батуми Ташкент Ашхабад	Курильск Ростов-на-Дону Рига, Таллинн Новороссийск Астара — Термез

* Данные по представительным и экстремальным пунктам характеризуют климатический район соответственно по средним и предельным значениям.

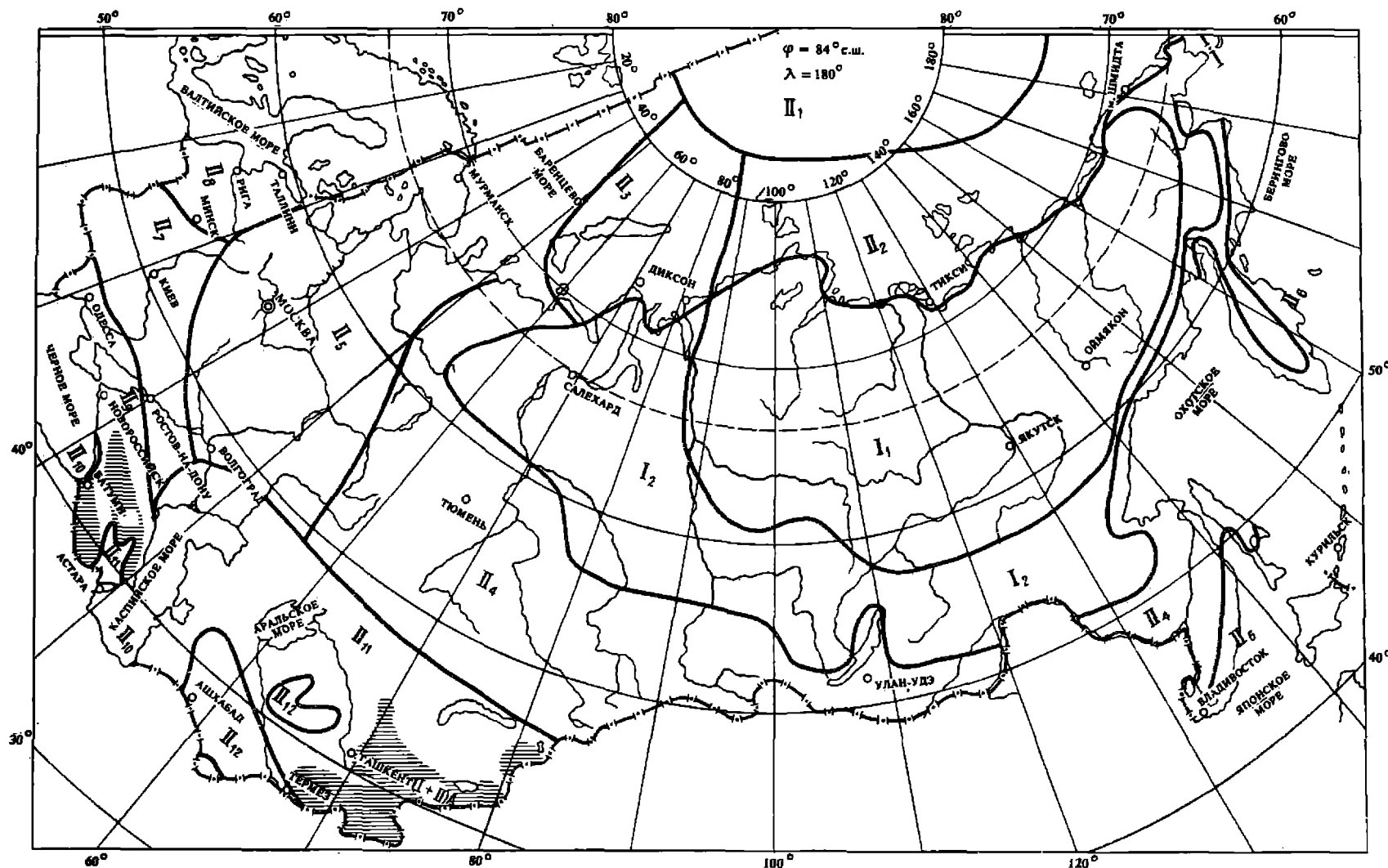


Рис. 1. Районирование территории СССР по воздействию климата на технические изделия и материалы (см. табл. 3 и 4)

5. Длительность воздействия (ч) непрерывных положительных температур в очень жарком сухом климатическом районе

$T, ^\circ\text{C}$	Ашхабад			Термез		
	$t_{\text{ср}}$	S_t	t_{max}	$t_{\text{ср}}$	S_t	t_{max}
16	325,1	777,4	2752,7	1100,7	908,9	2009,6
20	86,8	269	1624,0	271,1	459,8	1466,9
23	45,9	166,2	1317,2	39,3	50,0	257,3
25	33,1	88,3	670,1	22,3	15,6	89,4
27	21,8	45,8	429,2	15,7	7,9	47,8
30	13,2	16,1	112,1	10,8	3,0	17,6
32	9,7	7,6	50,0	8,7	3,2	15,1
35	6,4	4,1	15,8	5,2	3,2	12,3
37	7,8	3,4	11,3	3,8	2,6	10,5
40	2,7	1,9	5,6	2,4	2,0	7,7
41	2,6	1,2	4,0	2,1	1,9	5,9
42	1,6	0,7	2,5	1,7	1,4	3,7
43	0,5	0,3	0,9	1,5	—	1,5

Обозначения: $T, ^\circ\text{C}$ — температура; $t_{\text{ср}}$ — средняя длительность существования указанных температур, ч; S_t — среднее квадратическое отклонение длительности существования температур; t_{max} — максимальная длительность существования температуры.

Территорию СССР разделяют на климатические районы, перечень и основные характеристики которых приведены в табл. 2—4 и на рис. 1.

3. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО КЛИМАТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ

Температура воздуха. В табл. 5, 6 приведены температуры воздуха в представительных пунктах.

При анализе климатической обстановки в конкретных районах эксплуатации важное значение имеют сведения о предельных значениях климатических факторов. В табл. 6 приведены предельные значения годовых минимумов и максимумов температуры по представительным пунктам с экстремальными параметрами. В этих таблицах приведены значения абсолютных минимальных и максимальных температур, зафиксированные за весь период наблюдения (70—90 лет).

При вероятности 0,05 и 0,1 значения годовых максимумов (равных и выше) и минимумов (равных и ниже) возможны в среднем один раз соответственно в 20 и 10 лет.

Для решения большого числа прикладных задач, связанных с различными отраслями народного хозяйства, необходимо знание продолжительности действия как высоких, так и низких температур воздуха. Учет экстремальных температур и их продолжительности дает возможность правильного выбора времени, режима хранения и эксплуатации техники, проведения испытаний и других работ. Представляет особый интерес распределение числа дней с температурой ≤ -30 и ≥ 30 $^\circ\text{C}$ за отдельные месяцы на территории СССР [9].

О температурах ниже -30 $^\circ\text{C}$. Максимальное число дней с указанными отрицательными температурами наблюдается в январе. В декабре—январе на всей территории СССР, за исключением районов Кавказа и Средней Азии,

6. Предельные значения температуры воздуха, °C

Климатический район	Абсолютный минимум	Годовой минимум при вероятности				Абсолютный максимум	Годовой максимум при вероятности				Абсолютный максимум температуры поверхности почвы, °C
		0,05	0,1	0,25	0,5		0,05	0,1	0,25	0,5	
По зонам											
Очень холодный	-64	-61	-60	-59	-57	+38	+37	+36	+35	+34	+58
Холодный	-52	-48	-47	-45	-43	+40	+39	+38	+37	+35	+60
Умеренно холодный	-44	-40	-38	-35	-32	+37	+36	+35	+34	+32	+57
Умеренно холодный влажный	-31	-29	-28	-27	-25	+37	+35	+34	+33	+31	+56
Умеренно теплый	-30	-26	-24	-21	-18	+38	+37	+36	+35	+34	+69
Умеренно теплый влажный	-35	-31	-28	-24	-21	+36	+33	+32	+31	+30	+56
Теплый влажный	-15	-11	-10	-8	-5	+39	+37	+37	+35	+34	+64
Жаркий сухой	-30	-28	-25	-23	-19	+45	+44	+43	+42	+41	+72
Жаркий умеренно влажный	-13	-10	-8	-6	-5	+36	+34	+33	+32	+31	+70
Очень жаркий сухой	-26	-22	-20	-17	-14	+47	+46	+46	+45	+44	+78
По представительным пунктам											
Оймякон	-71	-68	-67	-66	-64	+33	+33	+33	+32	+31	+50
Диксон	-54	-48	-46	-44	-42	+27	+25	+24	+22	+19	+34
Байран Али	-26	-24	-22	-19	-16	+46	+45	+45	+44	+43	+76
Термез	-25	-22	-21	-17	-13	+50	+50	+49	+47	+43	+79
Батуми	-8	-6	-5	-5	-4	+40	+35	+33	+33	+32	+64

отмечаются указанные температуры. В Восточной Сибири и в районах Верхоянска, Якутска и Шелагонцы число таких дней достигает 30.

На рис. 2 приведены статистические данные о ежемесячных минимумах и максимумах температуры по климатическим районам.

Температура воздуха выше 30 °C. Полученное при годовом ходе распределение положительной температуры воздуха 30 °C на территории СССР показывает, что вначале температура 30 °C отмечается в апреле в Туркмении (5 дней). В мае—июне область указанных положительных температур захватывает юг Европейской территории Союза (ЕТС) и даже Арктическую территорию Союза (АТС), достигнув в июне Северной Якутии. Температура 30 °C отмечается в значительной части СССР. Хотя и не ежегодно, такие температуры наблюдаются в Мурман-

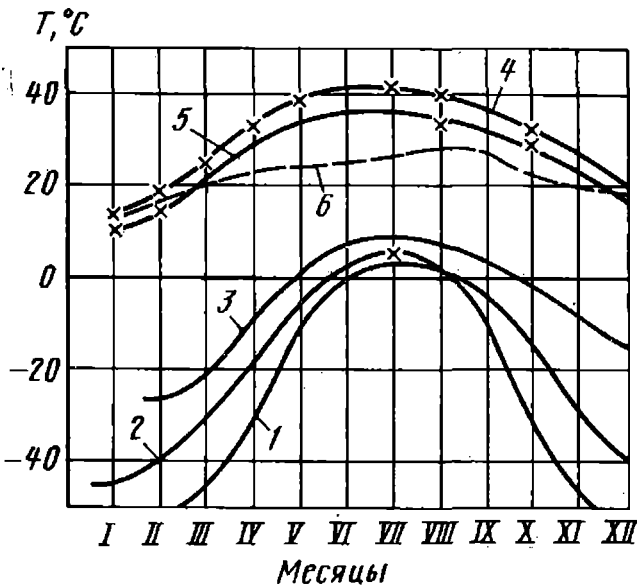


Рис. 2. Распределение ежемесячных минимумов и максимумов температур по климатическим районам:

1 — очень холодный; 2 — холодный; 3 — умеренный; 4 — очень жаркий; 5 — жаркий сухой; 6 — теплый влажный

7. Статистические характеристики распределения температуры воздуха

Пункт	Средняя годовая температура, °C	Стандартные отклонения, °C	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Якутск	—10,6	23,2	—0,23	—1,29
Оймякон	—16,6	24,4	—0,07	—1,68
Салехард	—5,7	—	—	—
Тикси	—14,4	16,0	—0,57	—0,98
Диксон	—11,5	13,5	—0,44	—0,91
Тюмень	1,7	14,0	—0,39	—0,75
Улан-Удэ	—0,6	16,0	—0,26	—1,05
Москва	4,6	11,6	—0,32	—0,52
Мурманск	0,4	9,6	—0,24	—0,13
Владивосток	4,5	12,1	—0,36	—0,91
Киев	7,7	10,8	—0,15	—0,63
Минск	5,5	10,4	—0,23	—0,42
Рига	6,1	9,2	—0,37	—0,26
Таллинн	5,5	6,77	—0,30	—0,46
Одесса	10,3	10,2	—0,24	—0,72
Новороссийск	13,0	9,0	—0,28	—0,48
Батуми	14,6	7,2	—0,13	—0,90
Ташкент	13,5	11,2	—0,09	—0,72
Ашхабад	16,8	11,4	—0,19	—1,08
Термез	16,6	10,4	—0,16	—1,04

ске, Салехарде, Хатанге. Практически весь месяц (30 и 25 дней) температура 30 °C отмечается в Средней Азии и на Прикаспийской низменности. В Средней Азии в период июль—август обычно устанавливается очень жаркая погода с максимальными температурами до 45—50 °C. Весь месяц наблюдается температура 35—40 °C. Так, например, в Ашхабаде 21 день наблюдается температура 35—40 °C. В августе—сентябре число дней с такими температурами уменьшается.

При разработке требований к техническим устройствам и при создании изделий возникает необходимость в определении продолжительности пребывания создаваемых изделий в условиях с различной температурой окружающей среды и статистических характеристик распределения температуры воздуха за год (табл. 7 и 8).

При анализе состояния технических изделий необходимо учитывать число дней с высокой температурой в течение месяца и в сумме за год (см. рис. 2 и 3).

Число дней с $T \geq 40$ °C рассчитывают по методике, предполагающей нормальное распределение максимальных температур. При нормальном распределении для расчета достаточно знать два параметра: среднее значение и показатель варьирования.

В качестве последнего можно использовать разность между абсолютным и средним максимумом. Указанная разность ΔT в большей части районов с температурой выше 40 °C колеблется около плюс 8 °C в среднем за месяцы, когда наблюдается такая (высокая) температура.

При оценке показателей надежности технических изделий необходимы данные об изменениях температуры окружающего воздуха во времени.

Характер изменения температуры во времени описывается случайным процессом:

$$T(t) = \bar{T}(t) + \psi(t),$$

где $\bar{T}$ — средняя температура, соответствующая времени t , °C; t — время

8. Число дней в году со средней суточной температурой воздуха, сут [4]

Пункт	Средняя суточная температура воздуха, °С									
	Ниже —60	От —59,9 до —50,0	От —49,9 до —40,0	От —39,9 до —30,0	От —29,9 до —20,0	От —19,9 до —10,0	От —9,9 до 0,0	От 0,1 до 10,0	От 10,1 до 20,0	От 20,0 до 30,0
Якутск	1,4	9,2	44,0	49,2	36,0	31,4	41,4	54,6	78,1	23,1
Оймякон		34,1	49,5	45,1	32,2	29,0	39,7	64,2	66,9	2,9
Салехард			2,5	20,3	53,9	73,4	71,0	87,4	52,0	4,5
Тикси			10,5	62,2	74,4	51,6	56,9	92,4	16,1	0,9
Диксон			1,4	31,3	71,5	76,9	81,8	94,8	7,3	—
Тюмень			0,2	4,6	23,4	60	75,8	77,3	94,2	29,4
Улан-Удэ			0,5	12,5	53,3	59,3	52,0	74,9	85,5	27,0
Москва				0,6	6,9	37,6	91,8	96,3	108,4	23,5
Мурманск				0,3	6,2	43,2	121,7	135,0	55	3,6
Волгоград					5,6	33,8	74,1	79,4	82,8	85,7
Владивосток					3,5	52,2	70,8	87,3	115,9	35,3
Курильск					—	10,8	115,7	130,9	99,8	7,8
Киев					1,0	18,3	80,1	113,4	119,4	32,3
Ростов-на-Дону					1,6	16,5	69,3	96,0	100,3	80,7
Минск					2,4	22,4	87,6	112,1	121,3	19,2
Рига					1,3	15,5	74,7	129,1	125,1	19,6
Таллинн					1,1	18,3	89,1	131,1	118,2	7,2
Одесса					0,3	4,4	50,9	119,9	115,9	73,6
Новороссийск						1,9	27,3	113,2	129,4	92,4
Батуми						—	1,6	109,2	155,6	98,6
Ташкент						5	38,9	98,4	98,5	118,5
Ашхабад						1,4	27,7	95,5	86,9	110,3

от 0 ч 1 января до 24 ч 31 декабря; ψ — случайная составляющая температуры, соответствующая времени t , °C.

Среднее значение $\bar{T}(t)$ рассчитывают по формуле

$$\bar{T}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t,$$

где A_0 — коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой температуры, °C; A_i , B_i — амплитуды колебаний математического ожидания температуры, соответствующие частоте ω_i .

Нормативная модель определения требований к создаваемым техническим изделиям для использования их в различных районах приведена в приложении. В этом приложении применительно к различным районам приведены значения коэффициентов A_0 , A_i , B_i и частоты ω_i .

Солнечная радиация. При эксплуатации изделий на открытом воздухе поверхность их подвергается действию прямых солнечных лучей. Солнечная радиация является главным источником тепловой энергии. Приход солнечной радиации определяется прежде всего астрономическими факторами: продолжительностью дня и высотой солнца.

Солнечная радиация, поступающая на земную поверхность, является одним из основных климатических факторов. В свою очередь, она в значительной степени зависит от циркуляции атмосферы и особенностей подстилающей поверхности. Например, в самых солнечных районах Ашхабада и Ак-Молла среднемесячные интегральные плотности потока прямого S и суммарного Q солнечного излучения в 12 ч 30 мин местного времени вне зависимости от облачности в июне месяце достигают: $S = 718,9$ Вт/м²; $Q = 900,4$ Вт/м²; в сентябре $S = 823,6$ Вт/м²; $Q = 809,7$ Вт/м². В эти же месяцы в районе Оймякона указанные показатели составляют: в июне $S = 356,0$ Вт/м²; $Q = 537,5$ Вт/м²; в сентябре $S = 376,9$ Вт/м²; $Q =$

$= 349,0$ Вт/м². Возникновение максимальных положительных температур непосредственно связано с уровнем солнечной радиации.

Исследования показывают, что температура ≥ 40 °C наблюдается от тропических до умеренных широт.

Распределение высоких температур на континентах хорошо согласуется с распределением солнечной радиации.

Воздействие солнечной радиации на технические изделия определяется диапазоном электромагнитных волн, достигающих их поверхности.

Режим солнечной радиации характеризуется распределением радиационного баланса, учитывающего приход — расход энергии солнечной радиации.

Спектр излучаемой Солнцем энергии состоит из следующих составляющих: ультрафиолетовая часть — длина волны менее $3900 \cdot 10^{-10}$ м, видимая часть спектра — длина волны $3900 \cdot 10^{-10}$ — $7600 \cdot 10^{-10}$ м, инфракрасная часть спектра — длина волны $7600 \cdot 10^{-10}$ — $1\,000\,000 \cdot 10^{-10}$ м. На волны ультрафиолетовой части спектра приходится около 9% энергии солнечного излучения, на волны видимой части спектра — около 41% и на инфракрасные волны — около 50%.

Атмосфера, окружающая Землю, поглощает около 19% солнечной энергии (водяным паром, озоном, углекислым газом, пылью и другими составляющими атмосферы). Около 35% солнечной энергии поглощается в космическом пространстве. В результате земную поверхность достигает только 46% солнечной энергии. Наличие облаков уменьшает количество солнечной энергии, достигающей Земли примерно на 75% по сравнению с ясными днями. Интенсивность солнечного излучения, измеренная у поверхности Земли, существенно зависит от плотности облачного покрова.

В табл. 9 приведены результаты измерений поверхностной плотности теплового потока суммарной радиации для различного состояния облачности, проведенных в летние месяцы в Подмосковье.

В табл. 10 приведены данные об изменении интегральной плотности теп-

9. Поток суммарной радиации $\times 10^{-8}$, Вт·см⁻²

Высота солнца, градусы	Безоблачно	Солнце и облака	Солнце просвечивает через облака		Солнце за облаками		Сплошная облачность
			перистые	слоистые	высокими	низкими	
6	11,2	9,8	4,9	3,5	5,6	6,3	10,5
9	12,6	18,2	14,0	3,5	7,7	7,7	4,2
13	16,1	17,5	15,4	7,7	9,8	11,2	5,6
20	24,5	28,7	24,5	12,6	13,3	12,6	10,5
30	42,0	39,9	36,4	28,7	30,8	20,3	9,8
40	67,9	61,6	54,6	38,5	49,7	24,5	19,6
44,9	78,4	80,5	64,4	28,7	44,1	27,3	25,9

10. Изменение плотности теплового потока солнечной радиации для различных высот

Высота	Интегральная плотность теплового потока солнечной радиации
До 15 000 м (вкл.)	1125 Вт/м ² , в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра (длина волны 280—400 мкм) — 42 Вт/м ²
Свыше 15 000 м	1380 Вт/м ² , в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра — 10,0 Вт/м ²

лового потока солнечной радиации в зависимости от высоты.

Установлено, что максимальные значения суммарной плотности теплового потока солнечного излучения, зарегистрированные на поверхности Земли в точках с различной широтой, существенно не различаются между собой (табл. 11).

Изменение плотности теплового потока солнечной радиации оценивается отношением ее максимального значения к минимальному, выраженному в процентах. Наименьшие суточные изменения наблюдаются в пустынных районах, для которых характерна безоблачность.

Наличие паров воды и пыли в воздухе существенно уменьшает плотность

теплового потока солнечной радиации. Наиболее сильное действие на материалы и изделия оказывают солнечные лучи, перпендикулярно падающие на поверхность (в районах умеренного климата это наблюдается с марта по сентябрь).

Земля является плохим проводником тепла. Поэтому в некоторых случаях весьма редко проявляется влияние солнечной радиации на температуру приземного слоя.

Например, в утренние часы температура воздуха у поверхности, покрытой асфальтом, на различной высоте и в стороне от асфальта составляет плюс 30 °С, а в 15 ч температура у поверхности асфальта возросла до плюс 52 °С, а на высоте 30 и 120 см — рав-

11. Плотность теплового потока суммарной солнечной радиации, измеренная в различных районах поверхности Земли

Район измерения	Плотность теплового потока $\times 10^{-8}$, Вт·см ⁻²	Район измерения	Плотность теплового потока $\times 10^{-8}$, Вт·см ⁻²
Бухта Тихая	91	Курск	106
Барендбург	95	Евпатория	101
Маточкин Шар	91	Тбилиси	106
Уэллен	97	Ташкент	106
Якутск	105	В океане по экватору	88
Москва	103	В Индийском океане	100
Нерчинск	101	В пустыне по экватору	110

12. Средняя относительная влажность

Станция наблюдения	Месяц												В среднем за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Киев	87	86	85	75	74	76	81	80	80	85	90	88	82
Полтава	87	87	87	78	69	76	78	77	78	87	90	89	81
Москва	80	80	82	81	75	83	88	89	87	84	86	83	83
Бугры	79	79	81	79	73	80	86	85	84	80	82	82	81
Новосибирск	80	80	82	81	75	83	88	89	87	84	86	83	83

нялась соответственно плюс 43 °С и плюс 40 °С, а в стороне от асфальта — плюс 34 °С.

В летний период в Средней Азии температура внутри железнодорожных вагонов, салонов и кабин автомобилей часто превышает температуру наружного воздуха на 20—30 °С. Действие солнечной радиации в этих районах усиливается как вследствие ее высокой интенсивности, так и вследствие смещения максимума интенсивности в сторону коротких волн.

Отмеченные положения должны учитываться при оценке показателей надежности технических изделий.

Относительная влажность воздуха. При анализе климатической обстановки важное место занимают данные об относительной влажности воздуха. Хорошим показателем влажности с точки зрения возникновения конденсации яв-

ляется относительная влажность. В центральных районах относительная влажность очень высока. Данные о среднемесячной относительной влажности воздуха в 13 ч по результатам 15-летних наблюдений приведены в табл. 12.

Особенно неблагоприятно складываются условия, когда в дневные часы относительная влажность высока.

Выявлены сезоны и территории с различным суточным минимумом относительной влажности воздуха по следующим градациям: ≥ 80 , 70—79%.

Наибольшая повторяемость высокой влажности $\geq 80\%$ отмечается с марта по май.

С марта относительная влажность начинает уменьшаться, достигая минимума в мае—июне. Число дней с влажностью $< 70\%$ увеличивается от зимы к лету (июль—август).

На Черноморском побережье Кавказа (Батуми) относительная влажность не имеет четко выраженного годового хода, в дневные часы в течение всего года преобладает относительная влажность, близкая к 70%. В летние месяцы (июнь—август) увеличивается повторяемость влажности (в пределах 70—79%) до 12—13 дней. Наибольшая повторяемость влажности $\geq 80\%$ отмечается с марта по май.

В приморской части Дальнего Востока характерно преобладание зимой дней с небольшой влажностью ($< 70\%$), а летом — с высокими значениями влажности (80—100%).

Наиболее неблагоприятными районами с точки зрения возможностей конденсации влаги являются районы Черноморского побережья Кавказа (Батуми).

На рис. 3 приведены данные об изменении числа дней с относительной влажностью $< 70\%$, 70—79%, $\geq 80\%$ для различных районов.

При оценке показателей надежности технических изделий необходимы данные об изменении относительной влажности воздуха во времени. Характер изменения относительной влажности описывается случайным процессом с математическим ожиданием

$$\bar{\varphi}(t) = C_0 + \sum_{i=1}^n (C_j \cos \omega_j t + D_j \sin \omega_j t),$$

где C_0 — коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой относительной влажности, %; C_j , D_j — амплитуды колебаний математического ожидания влажности, соответствующие частоте ω_j .

Математическая модель определения климатической обстановки в различных климатических районах приведена в приложении. В этом приложении приведены значения коэффициентов C_s , C_j , D_j и частоты ω_j .

Атмосферное давление. Изделия наземной техники должны сохранять надежность и заданные эксплуатационные характеристики в пределах изменения атмосферного давления от 505

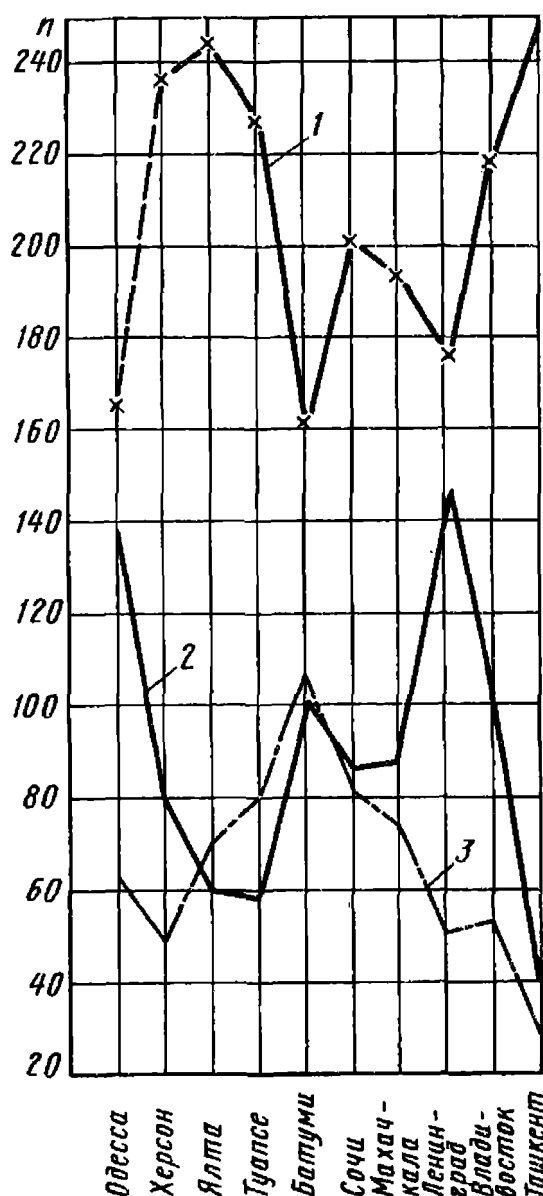


Рис. 3. Число дней n с различной относительной влажностью отдельных пунктов территории СССР:

1 — 70%; 2 — 80%; 3 — 70—79%

до 1080 гПа. Верхний предел соответствует давлению, наблюдаемому на уровне моря, нижний — давлению, рассчитанному для максимальной высоты (4,6 км), на которой возможны эксплуатация, хранение, перевозка изделий. Нижние и средние значения атмосферного давления, которые должны выдерживать летательные аппараты, характеризуются данными, приведенными в табл. 13.

С ростом высоты снижается электрическая прочность воздуха (табл. 14), вследствие этого приходится снижать

13. Изменение атмосферного давления с высотой

Высота над уровнем моря, тыс. м	Атмосферное давление, гПа	
	Среднее значение	Верхнее значение
1	860	900
2	730	795
3	636	700
4	556	618
5	438	540
6	418	472
7	366	424
8	314	354
9	288	309
10	242	266
12	180	193
14	128	142
15	106	121
16	86	104
18	65	76
20	44	55
26	20	21
31	10	10

14. Изменение электрической прочности воздуха с высотой

Высота над уровнем моря, тыс. м	Коэффициент относительной электрической прочности воздушных промежутков	Высота над уровнем моря, тыс. м	Коэффициент относительной электрической прочности воздушных промежутков
1,0	1,00	9,0	0,39
1,2	0,98	10,0	0,35
1,5	0,95	12,0	0,30
1,8	0,92	14,0	0,25
2,0	0,90	15,0	0,22
2,5	0,85	16,0	0,19
3,0	0,75	18,0	0,14
4,0	0,72	20,0	0,10
4,5	0,67	22,0	0,08
5,0	0,62	24,0	0,07
7,0	0,51	25,0	0,06
8,0	0,45	26,0	0,05

15. Международная шкала силы ветра. [5]

Сила ветра по шкале	Скорость ветра, м·с ⁻¹	Сила ветра по шкале	Скорость ветра, м·с ⁻¹
0	0—0,2	10	24,5—28,4
1	0,3—1,5	11	28,5—32,6
2	1,6—3,3	12	32,7—36,9
3	3,4—5,5	13	37—41,4
4	5,6—7,9	14	41,5—46,1
5	8,0—10,7	15	46,2—50,9
6	10,8—13,8	16	51,0—56,0
7	13,9—17,1	17	56,1—61,2
8	17,2—20,1		
9	20,2—24,4		

допустимые значения пробивных напряжений электрической изоляции изделий.

Ветер — это преимущественно горизонтальное движение воздуха с определенной скоростью; вертикальное его движение называют восходящим ветровым потоком. Сила ветра зависит от перепада давлений воздуха, т. е. от расстояния между изобарами. В качестве физической единицы и базовой системы отсчета для других единиц силы ветра служит его скорость, км/ч, м/с (табл. 15).

Силы восходящих ветровых потоков довольно различны. Восхождение воздуха в теплых фронтах происходит с малыми скоростями порядка нескольких долей м·с⁻¹. Ветровые потоки от гор имеют силу ветра 2—3 м·с⁻¹. Максимальные скорости устойчивого ветра и порывов ветра на высоте 3 м с учетом размеров устройства характеризуются данными, приведенными в табл. 16.

Скорости устойчивого ветра и порывов ветра для других высот рассчитываются с учетом коэффициентов (табл. 17).

Максимальная зарегистрированная скорость ветра составляет 95 м·с⁻¹, порывов ветра — 105 м·с⁻¹. Самые сильные ветры наблюдаются в периоды прохождения торнадо и ураганов и могут превышать 170 м·с⁻¹.

16. Скорости ветра на высоте 3 м, действующие на технические устройства (оборудование)

Характеристика ветра	Минимальный размер технических устройств по горизонтали, м					
	0,7	1,5	3,0	8,0	15,0	25,0
Устойчивая скорость ветра в течение 1 мин, м·с ⁻¹	22	22	22	22	22	22
Порывы ветра, м·с ⁻¹	34	30	29	28	26	25

Примеси воздуха. Воздух, как известно, представляет собой смесь составных частей (табл. 18).

Воздух содержит также некоторое количество различных примесей. Эти примеси образуются из морской воды (при распылении во время волнений и штормов), от песчаных бурь, от сжигания топлива в быту и промышленности. В воздухе имеются также бактерии, грибковые споры, космические частицы, неорганические соли и т. д.

Как следствие песчаных бурь, в воздухе периодически содержится значительное количество песка, в особенности в пустынях и степях (табл. 19).

Переносимые ветром пыль и песок — это частицы твердых веществ (как правило, минералов) диаметром 0,1—2000 мкм, находящихся на поверхности земли или в воздухе.

Частицы диаметром до 75 мкм классифицируются как пыль, они могут находиться в воздухе в естественных условиях в течение нескольких дней, недель и даже лет. Частицы диаметром свыше 150 мкм классифицируются как песок, они попадают в атмосферу в результате сильного ветра или образования мощных искусственных потоков воздуха, например, взлетающими самолетами, вертолетами, а также при движении колонн наземного транспорта. В тех случаях, когда речь идет о частицах диаметром 75—150 мкм, они могут рассматриваться как пыль или песок.

Для характеристики условий эксплуатации технических изделий определены три различных уровня концентрации пыли — 0,18; 1,0; 2,0 г·м⁻³. Принято считать, что концентрация

17. Значения коэффициентов для определения скорости ветра в зависимости от высоты

Высота над поверхностью земли, м	Устойчивый ветер	Порывы ветра
0,5	0,8	0,87
1,0	0,87	0,94
3,0	1,00	1,00
5,0	1,07	1,04
7,0	1,11	1,07
10,0	1,16	1,10
15,0	1,22	1,14
20,0	1,27	1,16
25,0	1,30	1,18
30,0	1,33	1,20

пыли, равная 1 г·м⁻³, является наиболее характерной в различных районах мира.

Основными особенностями песчинок (с точки зрения воздействия на изделия) является их твердость и угол скоса. Кварц является основным компонентом песка. Песок в слое воздуха под воздействием ветра перемещается в пределах метра над поверхностью земли. Около половины всех песчинок переносится над поверхностью земли на высоте около 10 мм, а большая часть из оставшихся — на высоте до 10 м.

Рабочие значения параметров пыли при испытаниях изделий на пылеустойчивость приведены в табл. 20.

Среднее содержание пыли в различных местах атмосферы и в промышлен-

18. Составные части воздуха

Составная часть	Содержание, %	Составная часть	Содержание, %
Азот	78	Неон	0,001
Кислород	21	Гелий	0,0004
Аргон	0,95	Криптон	0,00005
Углекислый газ	0,3	Ксенон	0,0000006

19. Характеристика песчаных бурь

Бури в пустынях и степях	С января по октябрь	С мая по сентябрь	С июня по июль
Число бурь в месяц	1	3	6—7
Скорость ветра, м·с ⁻¹	10	13	17
Плотность песка, г·м ⁻³ , на высоте 2 м	1,7	4,8	10,4

20. Параметры пыли при испытаниях на пылеустойчивость

Параметры	Нормы при воздействии пыли		
	динамическом	статическом	на проникаемость
Размер частиц, мкм	Не более 200	—	Не более 50
Состав частиц пылевой смеси	Кварцевый песок не более 7%	Устанавливается в стандартах	Не нормируется
Концентрация, г·м ⁻³	Устанавливается в стандартах	—	То же
Скорость, м·с ⁻¹	15	—	—

ных помещениях характеризуется данными табл. 21.

Атмосферные осадки. Перечень различных видов осадков приведен в табл. 22.

В отношении стойкости к воздействию осадков технические изделия подразделяют на две категории: первая — для всех районов земного шара, вторая — для Европы.

Изделия первой категории должны сохранять эксплуатационные характеристики и иметь высокую надежность при интенсивности дождевых осадков, превышающих на 0,8 мм/мин значения

самого дождливого месяца в году; изделия второй категории — на 0,58 мм/мин.

Налепь и снежный покров. Нагрузка, создаваемая этими метеорологическими факторами, учитывается для изделий, эксплуатация которых осуществляется в холодных районах. Технические изделия должны рассчитываться на следующие предельно допустимые величины нагрузок, создаваемых снежным покровом (табл. 23).

Полустационарный тип — объекты, которые не очищаются после снегопада. Нагрузка на них определяется

21. Характеристика запыленности атмосферы и рабочих помещений [5]

Место	Запыленность, мг/м³
Свободная атмосфера	0,02
Над океаном	0,5—10 (соль)
Улицы городов	1—3
Торговое помещение	5
Универсальный магазин	8
Мраморная мастерская	10—20
Метрополитен	2—8
Бумажная фабрика	25
Цементный завод	100—400
Помещение при упаковке мешков	685

количеством снега, выпавшего за все время эксплуатации в зимнее время. К временному типу отнесены объекты, очищаемые от снега в промежутках между осадками. К переносному типу — в основном предметы снаряжения, которые переносятся или перевозятся ежедневно. Количество накопившегося на них снега не будет превышать величину осадков за одни сутки.

Коррозионные агенты. Существенное влияние на качество работы изделий оказывают содержащиеся в атмосфере коррозионные агенты (табл. 24).

Сернистый газ образуется в основном в результате сгорания низкосортных топлив. После сгорания образуется сернистый ангидрид SO_2 , который окисляется в воздухе и превращается в серный ангидрид SO_3 , соединяясь с водой он образует сернистую кислоту H_2SO_3 и серную кислоту H_2SO_4 . Перечислен-

22. Характер осадков в зависимости от высоты

Высота, м	Жидкие осадки	Твердые осадки
4000—6000	Ливень	Град
2000—4000	Моросьящий дождь	Снег, крупа
0—100	Моросьящий дождь	Иней
	Туман	Отдельные небольшие снежинки
На почве и на всех твердых предметах	Роса	Иней, сильный иней, сильная изморозь

23. Предельно допустимые величины снежных нагрузок

Объект	Период накопления снега	Давление, Па	
		предельно допустимое	максимально зарегистрированное
Полустационарный	Весь сезон (период)	2400	5860
Временный	Один снегопад	1000	1910
Переносной (передвижной)	Одни сутки	500	1130

24. Характеристика коррозионных объектов в атмосфере [5]

Содержание коррозионных агентов	Тип атмосферы
Сернистый газ — не более 4 мг·м ⁻² ·сутки (не более 0,02 мг·м ⁻³)	Сельская местность
Хлористые соли — не более 0,3 мг·м ⁻² ·сутки Сернистый газ — 4—200 мг·м ⁻² ·сутки (не более 0,02—2 мг·м ⁻³) Хлористые соли — 0,3—2 мг·м ⁻² ·сутки	Промышленные районы
Сернистый газ 4—20 мг·м ⁻² ·сутки (0,02—0,22 кг·м ⁻³) Хлористые соли — 2—2000 мг·м ⁻² ·сутки	Морская атмосфера

ные в табл. 24 газообразные отходы обладают разрушающим действием. Это особенно нужно учитывать при организации хранения технических изделий.

4. КОМПЛЕКСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

При эксплуатации технические устройства подвергаются воздействию комплекса факторов. Наиболее характерным является следующий: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра, солнечная радиация.

Степень зависимости между составляющими этого комплекса оценивается с помощью коэффициента корреляции

$$r_{x,y}(t_i) = \frac{M \{[x_i - m(x_i)][y_i - m(y_i)]\}}{\sigma_x \sigma_y},$$

где x, y — характеристики воздействующих факторов (например, температура, относительная влажность).

Результаты расчета коэффициентов корреляции для комплекса воздействий показывают, что нет прямой зависимости между воздействиями климатических факторов. Данные о продолжительности сочетания различных значений температуры и

влажности по климатическим районам и пунктам приведены в ГОСТ 16350—80.

В табл. 25 и 26 в качестве примера приведена продолжительность пребывания изделий, эксплуатируемых в различных климатических районах СССР, при воздействии температуры и относительной влажности воздуха.

Значительный интерес представляют уровни внешних факторов, установленные в стандартах Международной электротехнической комиссии (МЭК), исходя из которых должны разрабатываться технические изделия различного назначения.

В табл. 27 приведена характеристика климатических условий, которые условно разделены на шесть классов.

5К1. Включает изделия, устанавливаемые в подвижных объектах, используемых в защищенных от погоды, проветриваемых, обогреваемых помещениях или в обогреваемых, проветриваемых отсеках подвижного объекта (изделия используются только после прогрева).

5К2. В дополнение к тому, что охватывает класс 5К1, класс 5К2 включает изделия, устанавливаемые в полностью закрытых или частично закрытых, обогреваемых или необогреваемых, не проветриваемых отсеках. Изделие может подвергаться нагреванию от греющихся частей подвижного объекта и от солнечного излучения, проника-

25. Продолжительность воздействия рабочих и предельных значений температуры и относительной влажности воздуха за год, ч

Климатический район, пункт	Температура воздуха, °C	Относительная влажность воздуха, %						Сумма
		26—30	41—45	61—65	81—85	91—95	96—100	
Очень холодный, Оймякон	От —64,9 до —60,0	—	—	—	—	—	—	—
	» —49,9 » —45,0	—	—	8	16	—	—	24
	» —19,9 » —15,0	—	1	20	45	21	11	98
	» —9,9 » —5,0	—	8	38	36	51	43	176
	» 5,0 » 9,9	—	49	47	66	83	71	316
Умеренно холодный, Улан-Удэ	От —19,9 до —15,0	—	1	66	131	25	11	234
	» —9,9 » —5,0	—	18	64	54	36	10	182
	» 5,0 » 9,9	—	47	54	55	31	18	205
Умеренно теплый влажный, Рига	От —19,9 до —15,0	—	1	4	32	3	1	41
	» 5,0 » 9,9	2	14	66	154	264	220	720
	» 15,0 » 19,9	4	34	124	137	98	50	447
	» 25,0 » 29,9	—	13	3	—	—	—	16
	» 30,0 » 34,9	—	1	—	—	—	—	1
Теплый влажный, Батуми	От —9,9 до —5,0	—	—	—	1	1	—	2
	» 5,0 » 9,9	—	19	75	273	383	128	878
	» 15,0 » 19,9	15	18	79	361	380	84	837
	» 30,0 » 34,9	—	—	3	—	—	—	3
Очень жаркий сухой, Ашхабад	От —19,9 до —15,0	—	—	—	1	—	—	1
	» 5,0 » 9,9	3	40	89	151	120	33	436
	» 15,0 » 19,9	36	98	66	17	9	1	227
	» 25,0 » 29,9	136	138	5	—	—	—	279
	» 40,0 » 44,9	1	—	—	—	—	—	1

ющего через окна или другие проемы, включая подвижные объекты, используемые на открытом воздухе.

Данный класс также включает изделия, устанавливаемые в моторных отсеках подвижных объектов, приводимых в движение электродвигателем. Объект используется на открытом воздухе. На изделия может попадать вода и снег.

5К3. Кроме условий, охватываемых классом 5К2, класс 5К3 включает подвижные объекты, используемые в умеренно холодном климате. Изделия, устанавливаемые в непрветриваемых отсеках и устанавливаемые в отсеках с сырой поверхностью, подвергаемых нагреванию солнечным излучением. Изделие может подвергаться действию

прямых солнечных лучей и дождя; устанавливаться в моторном отсеке подвижного объекта, приводимого в движение электродвигателем.

5К4. Кроме условий, охватываемых классом 5К3, класс 5К4 включает подвижные объекты, используемые в условиях климата всего земного шара. Изделие может подвергаться прямому действию струй и всплесков воды (например, при мойке из брандспойта).

Класс 5К4 теплостойкий подобен классу 5К4, но пониженная температура воздуха такая же, как и для класса 5К2.

Класс 5К4 холодостойкий подобен классу 5К4, но повышенная температура воздуха такая же, как для класса 5К2.

26. Продолжительность воздействия температуры и относительной влажности воздуха на изделие за год (ч)
в умеренно холодном районе (Москва)

Интервал температуры, °C	Относительная влажность воздуха, %																	
	100—96	95—91	90—86	85—81	80—76	75—71	70—66	65—61	60—56	55—51	50—46	45—41	40—36	35—31	30—26	25—21	20—16	Сумма
От —44,9 до —40	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
» —39,9 » —35	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
» —34,5 » —30	—	—	—	—	1	7	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11
» —29,5 » —25	—	—	1	5	13	17	2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	39
» —24,9 » —20	—	2	14	45	38	25	8	3	1	—	—	—	—	—	—	—	—	136
» —19,9 » —15	2	14	47	79	54	33	15	8	8	4	2	—	—	—	—	—	—	226
» —14,9 » —10	9	44	116	132	89	61	36	24	14	9	7	4	3	2	—	—	—	550
» —9,9 » —5	44	113	193	171	107	78	37	30	28	15	11	7	4	3	1	—	—	842
» —4,9 » 0	122	259	242	187	132	93	72	43	32	23	20	14	8	4	3	—	—	1256
» 0,1 » 5	208	309	247	171	127	95	67	54	36	28	22	15	8	5	3	1	—	1396
» 5,1 » 10	96	179	176	128	106	82	72	56	50	37	29	22	14	8	4	—	—	1059
» 10,1 » 15	65	206	208	155	126	101	90	72	60	55	48	38	29	17	8	1	—	1279
» 15,1 » 20	23	95	107	107	124	113	111	97	90	73	66	60	44	26	14	3	—	1153
» 20,1 » 25	—	—	7	14	22	35	50	63	77	79	79	63	58	29	13	4	1	594
» 25,1 » 30	—	—	—	—	2	—	1	2	5	12	23	35	33	26	14	5	2	160
» 30,1 » 35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	4	6	4	4	1	21
Сумма	569	1221	1358	1194	941	740	567	456	401	335	307	260	205	126	64	18	4	8766

В табл. 28 приведена классификация групп внешних факторов и их уровней, которые могут воздействовать на изделия при транспортировании. Для всего широкого разнообразия условий транспортирования установлены семь классов климатических условий.

2К1. Включает в общепринятых понятиях перевозку изделий в защищенных от погоды, подогреваемых и проветриваемых замкнутых объемах.

2К2. Кроме условий 2К1, включает защищенные от действия погоды неогреваемые помещения в общеклиматических типах климата открытого воздуха, исключая холодные и умеренно холодные районы. Изделие может перевозиться в герметизированных обогреваемых отсеках самолета.

2К3. Кроме условий 2К2, включает перевозку в непрветриваемых замкнутых объемах и в незащищенных от погоды условиях общеклиматической зоны, исключая районы с холодным и умеренно холодным климатом. Авиатранспортирование возможно только в герметизированных обогреваемых отсеках. На открытом воздухе изделие не должно подвергаться действию морских волн. Изделие может находиться вблизи источников тепла.

2К4. Кроме условий 2К3, включает перевозку изделий в незащищенных от погоды условиях умеренно холодного климата.

2К5. Кроме условий 2К4, включает перевозку в замкнутых непрветриваемых объемах и в незащищенных от действия погоды условиях по всему земному шару, включая транспортирование в негерметизированных отсеках самолета.

2К5 теплостойкий. Отличается от 2К5 ограничением по пониженной температуре открытого воздуха, соответствующей классу 2К3.

2К5 холодостойкий. Отличается от 2К5 ограничением по повышенной температуре воздуха, соответствующей классу 2К4.

Указанные в табл. 27, 28 уровни следует рассматривать в качестве максимальных или предельных, т. е. вероятность превышения этих уровней при эксплуатации мала. Это означает, что они могут иметь место при эксплуата-

ции, но не могут действовать постоянно.

В стандартах МЭК отмечается, что совместное воздействие нескольких внешних факторов может усиливать их влияние на изделие. Это особенно относится к случаю действия высокой относительной влажности совместно с биологическими и химическими факторами.

Б. ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ИЗДЕЛИЯ

Воздействие тепла и холода. Действие этих факторов на изделия определяется местами установки на объектах техники (на самолете, корабле, автомашине) и расстоянием от внешних источников тепловых воздействий.

Различают три вида тепловых воздействий:

непрерывное. Рассматривают при анализе надежности изделий, работающих в стационарных условиях (в помещениях);

периодическое. Рассматривают при анализе надежности большинства типов изделий наземной, корабельной и самолетной техники. Периодическое тепловое воздействие возникает при повторно-кратковременном включении аппаратуры и изделий под нагрузку и при резких колебаниях условий эксплуатации (взлет, полет, посадка), а также при суточном изменении внешней температуры. Перепады температуры в блоках наземных изделий могут составлять до 60 °С, в самолетных изделиях — достигают 80 °С;

апериодическое. Оценивают при работе изделий ракетной техники (в моменты запуска и вхождения ракеты в плотные слои атмосферы). Возникает тепловой удар, следствием чего являются внезапные отказы.

Повреждение изделий, вызванное стационарным тепловым воздействием, обусловлено в основном превышением при эксплуатации предельно допустимых значений температуры.

Многократные деформации изделий, возникающие при периодических тепловых воздействиях, приводят к воз-

27. Классификация групп климатических условий и их уровней, воздействующих на изделия, размещаемые на подвижных наземных объектах (по СТ МЭК 721-3-5)

Внешний воздействующий фактор	Класс					
	5К1	5К2	5К3	5К4	5К4 тепло-стойкий	5К4 холо-достойкий
Пониженная температура воздуха, °С	+5	—25	—40	—65	—25	—65
Повышенная температура воздуха в проветриваемых отсеках подвижного объекта (исключая моторные отсеки) или условия открытого воздуха *1, °С	+40	+40	+40	+55	+55	+40
Повышенная температура воздуха в непроветриваемых отсеках, исключая моторные отсеки *1, °С	Нет	+70	+70	+85	+85	+70
Повышенная температура воздуха в моторных отсеках, °С	+60	+70	+70	+85	+85	+70
Изменение температуры воздуха *2, °С	Нет	—25/+30	—40/+30	—65/+30	—25/+30	—65/+30
Постепенное изменение температуры воздуха, °С, исключая моторные отсеки, со скоростью 5 °С/мин	»	—25/+30	—40/+30	—65/+30	—25/+30	—65/+30
Изменение температуры при переходе из воздуха в воду, исключая моторные отсеки, °С *2, *2	»	Нет	+40/+15	+15/+5	+55/+5	+40/+5
Изменение температуры при переходе из воздуха в воду в моторных отсеках, °С	»	+60/+5	+70/+5	+85/+5	+85/+5	+70/+5
Изменение температуры при переходе из воздуха в снег только в моторных отсеках, °С	»	+60/—5	+70/—5	+70/—5	+70/—5	+70/—5
Повышенная относительная влажность, %, не связанная с быстрым изменением температуры (при указанных температурах, °С): исключая отсек двигателя внутреннего сгорания транспортного средства, приводимого в движение встроенным двигателем	75 (+30)	95 (+40)	95 (+45)	95 (+50)	95 (+50)	95 (+45)

в моторном отсеке подвижного объекта с двигателем внутреннего сгорания	Нет	Нет	95 (+70)	95 (+85)	95 (+85)	95 (+70)
Повышенная относительная влажность воздуха, %, связанная с быстрым изменением температуры, °С:						
в непосредственной близости к холодильным установкам кондиционирующих систем	»	95 (-25/+30)	95 (-40/+30)	95 (-65/+30)	95 (-25/+30)	95 (-65/+30)
в непосредственной близости от холодильников кондиционирующих установок	»	95 (+10/+70)	95 (+10/+70)	95 (+10/+85)	95 (+10/+85)	95 (+10/+70)
Повышенная абсолютная влажность, г·м ⁻³ , связанная с быстрым изменением температуры воздуха, °С *4	»	60 (+70/+15)	60 (+85/+15)	80 (+85/+15)	80 (+85/+15)	60 (+70/+15)
Пониженная относительная влажность, %, при температуре, °С	10 (+30)	10 (+30)	10 (+30)	10 (+30)	10 (+30)	10 (+30)
Пониженное давление воздуха, кПа	70	70	70	70	70	70
Движение окружающего воздуха, м·с ⁻¹	Нет	20	20	30	30	30
Осадки, дождь, мм·мин ⁻¹	»	Нет	6	15	15	6
Поток солнечного излучения, 10 ⁻⁴ , Вт·см ⁻²	»	700	1120	1120	1120	1120
Поток теплового облучения не в моторных отсеках, 10 ⁻⁴ , Вт·см ⁻²	»	600	600	600	600	600
Поток теплового облучения в моторных отсеках, 10 ⁻⁴ , Вт·см ⁻²	600	1200	1200	1200	1200	1200
Поток воды из источников, отличных от дождя *5, м·с ⁻¹	Нет	0,3	1	3	3	3
Сырость	»		Условия сырой поверхности			

*1 Повышенная температура поверхности изделия определяется температурой окружающего воздуха, указанной в данной строке, и величиной солнечного излучения, указанной в таблице.

*2 Предполагается, что изделие непосредственно переносится из одной указанной температуры в другую.

*3 Нижняя температура эквивалентна температуре падающей воды.

*4 Предполагается, что изделие подвергается действию только быстрого снижения температуры. Указанное количество содержащейся в воздухе влаги имеет место только до температуры точки росы. При более низких значениях температуры относительная влажность примерно равна 100%.

*5 Приведена скорость движения воды, а не высота столба накопившейся воды.

28. Классификация групп внешних воздействующих факторов и их уровней, которые могут действовать на изделия при его транспортировании всеми видами транспорта (по СТ МЭК 721-3-5)

Внешний воздействующий фактор	Класс						
	2К1	2К2	2К3	2К4	2К5	2К5 тепло-стойкий	2К5 холодо-стойкий
Пониженная температура воздуха, °С	+5	—25	—25	—40	—65	—25	—65
Повышенная температура воздуха в непроветриваемых помещениях *1, °С	Нет	+60	+70	+85	+85	+85	+70
Повышенная температура воздуха в проветриваемых помещениях и на открытом воздухе *1, °С	+40	+40	+40	+40	+55	+55	+40
Изменение температуры воздуха *2, °С	Нет	—25/+25	—25/+30	—40/+30	—65/+30	—25/+30	—65/+30
Изменение температуры при перемещении из воздуха в воду *2, °С	»	Нет	+40/+5	+40/+5	+55/+5	+55/+5	+40/+5
Повышенная относительная влажность, %, при указанных температурах, °С:							
не связанная с быстрым изменением температуры воздуха	75 (+30)	75 (+30)	95 (+40)	95 (+45)	95 (+50)	95 (+50)	95 (+45)

связанный с быстрым изменением температуры воздуха *2	Да	Нет	95 (-25/+30)	95 (-40/+30)	95 (-65/+30)	95 (-25/+30)	95 (-65/+30)
Повышенная абсолютная влажность, г/м ³ , с быстрым изменением температуры воздуха, °С *2	»	»	60 (+75/+15)	60 (+70/+15)	80 (+85/+15)	80 (+85/+15)	80 (+70/+15)
Пониженное атмосферное давление, кПа	70	70	70	70	30	30	30
Изменение атмосферного давления, кПа·мин ⁻¹	Нет	Нет	Нет	Нет	6	6	6
Движение окружающего воздуха, МС ⁻¹	»	»	20	20	30	30	30
Осадки, дождь, мм·мин *1	»	»	6	6	15	15	6
Поток солнечного излучения, Вт·см ⁻²	700	700	1120	1120	1120	1120	1120
Тепловое облучение, Вт·см ⁻²	Нет	Нет	600	600	600	600	600
Вода из источников, отличных от дождя *4, МС ⁻¹	»	»	1	1	3	3	3
Сырость	»	»	Условия влажной поверхности				

*1 Повышенная температура в помещениях-хранилищах определяется температурой окружающего воздуха и нагревом за счет солнечного излучения.

*2 Предполагается возможность непосредственного перемещения изделия из одной среды в другую.

*3 Количество влаги в объеме воздуха соответствует точке росы.

*4 Определена скорость движения воды.

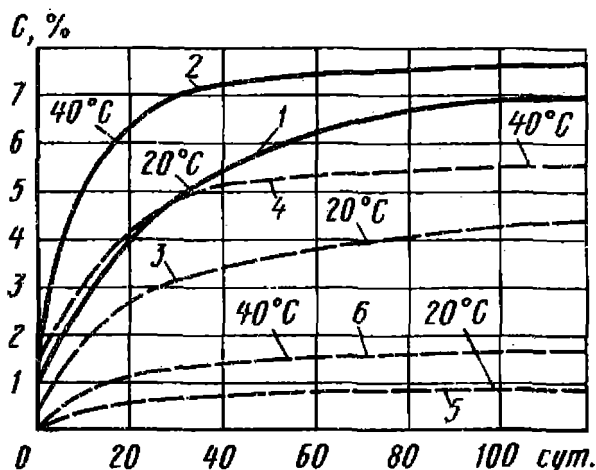


Рис. 4. Влагопоглощение C , %, деталями из различных пластмасс:

1, 2 — пластмасса К-18-2; 3, 4 — К-21-2; 5, 6 — ФКЛИ

выявлению повреждений. На изделия авиационной техники одновременно с периодическим нагревом и охлаждением действуют и резкие изменения давления. Переход нагретого аппарата при подъеме в атмосферу с малым давлением является одним из факторов, способствующих возникновению повреждений.

Высокая скорость изменения температуры (тепловой удар), имеющая место при аperiodических воздействиях тепла, приводит к быстрому изменению размеров материалов, что может привести к возникновению повреждений. Этот фактор значительно чаще проявляется при недостаточном учете коэффициентов линейного расширения сопрягаемых материалов. В частности, при повышенных температурах заливочные материалы размягчаются, происходит расширение сопрягаемых с ними материалов, а при переходе к отрицательным температурам происходит сжатие заливочных материалов и растрескивание их в местах соприкосновения с металлами. При отрицательных температурах возможна значительная усадка заливочных материалов и, как следствие, образование у выводов электроизделий объемов, не заполненных заливочными материалами, в результате повышается возможность электрического перекрытия. Некоторые материалы под действием низкой темпера-

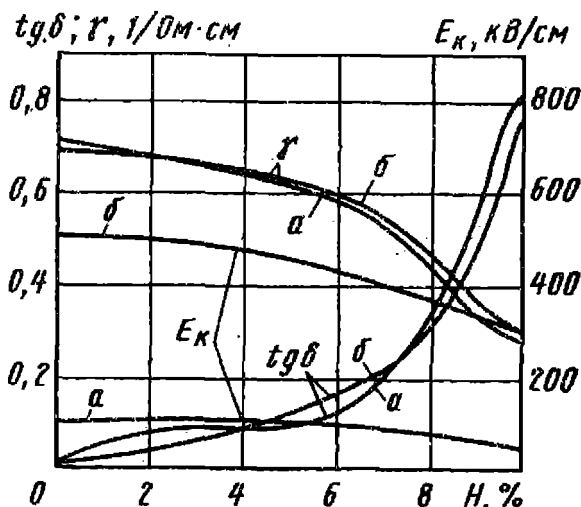


Рис. 5. Зависимость тангенса угла электрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ проводимости γ и пробивного напряжения E_k электрокартона от содержания в нем влаги H :

a — без пропитки; $б$ — с пропиткой парафином

туры становятся хрупкими. Особенно опасным является воздействие холода, периодически чередующегося с воздействием тепла (зона пустынь, где дневная жара сменяется ночными заморозками).

Электроизоляционные свойства полимерных пластических масс существенно зависят от температуры. У поливиниловых соединений, содержащих гидроксильную группу, угол потерь возрастает с повышением температуры и влажности.

Действие влаги. Влага, попадая на поверхность или проникая в объем электротехнических изделий и материалов, может вызвать:

снижение поверхностного или объемного сопротивления изоляции, снижение электрической прочности материалов, а также накапливание и миграцию объемных зарядов в биполярных полупроводниковых интегральных схемах и МОП-структурах;

изменение физических свойств материалов, их плотности, температуры плавления, изменение размеров и коробление отдельных деталей;

ускоренное старение, окисление и коррозию материалов, снижение грибоустойчивости, повышение интенсивности износа деталей, покрытий, изоляции, смазочных материалов и пр.;

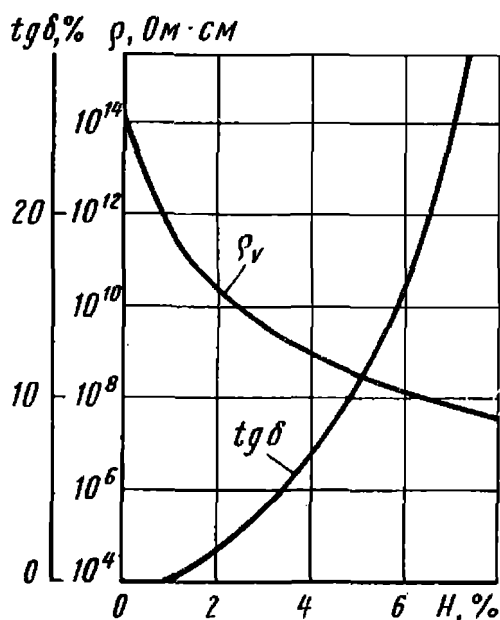


Рис. 6. Зависимость электрических характеристик кабельной бумаги ρ , $\operatorname{tg} \delta$ от поглощенной влаги H

увеличение уровня удельных электрических потерь в материалах и изделиях.

Возможность возникновения этих явлений и их интенсивность зависят от свойств материалов, характеристик воды и ее паров, контактирующих с материалами (рис. 4—7).

Более 50% отказов интегральных схем и полупроводниковых приборов в пластмассовых корпусах связано с дефектами, вызываемыми проникновением влаги в недостаточно герметичный корпус. Влага проникает в изоляционный материал и ухудшает его свойства. Если в материале не имеется микроскопических пор, трещин или других дефектов, то влага проникает через капилляры. В радиоэлектронике применяют материалы, в которых практически такие дефекты отсутствуют. Поэтому основное внимание при анализе качества этих материалов уделяется диффузионным процессам увлажнения. Например, скорость проникновения влаги в электроизоляционные материалы является функцией поглощенной влаги Q , дефицита влаги d и коэффициента влагопроницаемости k_v и может быть представлена в виде

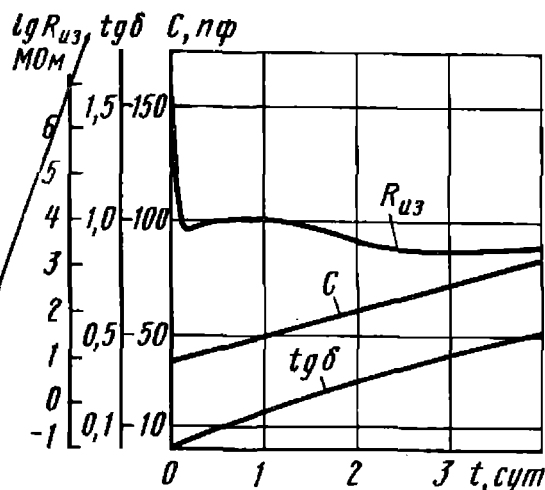


Рис. 7. Зависимость параметров печатных тест-плат (сопротивление изоляции $\lg R_{из}$, емкость C и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$) из материала ГФ-1-15 с покрытием ЭП-9114 от времени выдержки (относительная влажность 98%, температура 40 °C)

$$\frac{dQ}{dt} = k_v(T) \varphi(e) \varphi_2(C_v) f_1(Q),$$

где $k_v(T) = k_{v0} \exp \{-E/RT\}$; E — энергия активации процесса; e — максимально возможное содержание влаги в воздухе при данной температуре; C_v — относительная влажность воздуха; R — универсальная газовая постоянная.

Увлажнение материалов повышает скорость протекания коррозионных процессов

$$\frac{dy}{dt} = C_p^n k_p \exp \{-E_k/RT\},$$

где y — толщина окисной пленки; C_p^n — концентрация реагента (кислорода, влаги, агрессивной среды); k_p — коэффициент, характеризующий скорость протекания коррозии; E_k — энергия активации коррозионного процесса.

Анализ показывает, что при расчетах поглощения влаги изоляционными материалами можно базироваться на законах Фика для диффузии водяных паров в изоляционный материал.

Первый закон Фика имеет вид

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -D_1 F \frac{\partial C}{\partial x},$$

где m — диффундирующая масса за время t ; D_1 — постоянная диффузии; F — пронизываемая плоскость, перпендикулярная направлению диффузии; C — концентрация диффундирующей массы в растворителе; x — текущий путь диффузии.

Решение приведенного уравнения для различных растворов имеет вид: экспоненциальная форма

$$m = C_1 \{1 - C_2 \exp[-f(x)]\};$$

$$m = C_3 \{1 - \exp[-\varphi(t)]\};$$

радикальная форма

$$m = C_4 \sqrt{\psi(t)},$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 — постоянные величины.

Форму в виде радикала можно применять как приближение для малых промежутков времени, т. е. для первого этапа диффузии. Для больших промежутков времени, т. е. для второго этапа диффузии, следует применять экспоненциальную форму.

При анализе надежности изоляционных материалов следует пользоваться экспоненциальной формой. Это объясняется тем, что проникшая в изоляционный материал на первом этапе диффузии влага не успевает удалиться из него в моменты включения и выключения изделий. При последующей работе происходит дальнейшее накопление влаги, что в конечном итоге снижает стойкость изоляционных материалов, и происходит отказ изделий.

При длительных процессах диффузии одновременно с возрастанием количества диффундируемой влаги в единицу времени возрастает тормозящее действие пути, по которому протекает диффузия. Тормозящее действие характеризуется влагосопротивлением W_F . Зависимость между давлением водяных паров P_a , сорбционной емкостью C_F и влагосопротивлением W_F имеет вид

$$P_a C_F - m = \exp\{-t/W_F C_F\}.$$

Влагопоглощение в зависимости от времени

$$m = P_a C_F (1 - e^{-t/(W_F C_F)}) + m_0 e^{-t/(W_F C_F)}.$$

Из приведенного уравнения следует, что срок службы изоляционного материала можно определить из соотношения

$$t = -W_F C_F \ln \frac{m_{\text{доп}} - P_a C_F}{m_0 - P_a C_F}.$$

Скорость протекания коррозионных процессов, а также развития трещин и ряда других процессов существенно зависит как от внешних условий, так и от качества примененных материалов, конструкции изделий, технологии их изготовления и средств противокоррозионной защиты. Поэтому зависимость времени наступления предельного состояния материалов (изменения физических, геометрических, химических и других параметров) от воздействия указанных факторов можно представить в виде

$$t = \frac{1}{k_0} \rho(C_0, C_{\text{кр}}, \kappa^2, r) \times \exp\{-E/RT\},$$

где k_0 — постоянный коэффициент; $\rho(C_0, C_{\text{кр}}, \kappa^2, r)$ — функция, зависящая от внутренних параметров материала изделий.

Воздействие тепла и влаги на различные группы материалов. Воздействие тепла и влаги приводит прежде всего к коррозии и разрушению металлов.

Существуют различные формы проявления коррозии: равномерная коррозия — процесс постепенного распространения корродирующих мест по всей поверхности (ржавление стальных изделий); неравномерная коррозия — процесс повреждения отдельных мест внутри металла вследствие повреждения защитного покрытия; коррозия напряжения — межкристаллический разрыв металла при одновременном воздействии коррозии и статического напряжения.

Алюминий очень стоек к коррозии благодаря образующейся оксидной пленке толщиной 0,01—0,02 мкм. Хорошей коррозионной стойкостью обладают сплавы алюминия с примесями магния, кремния, марганца, цинка. В табл. 29 приведены данные об изменении прочности на разрыв образцов

29. Изменение прочности на разрыв при коррозии у различных образцов алюминиевых сплавов

Легвирующий элемент, %					Снижение прочности на разрыв, %								При коррозии в грунте в течение 5 лет
					При нахождении в свободной атмосфере								
					В пункте А после лет				В пункте Б после лет				
Mn	Mg	Cu	Si	Cr	1	2	4	10	1	2	4		
—	—	1	1	—	—1	—2	—2	—7	—5	—2	—9	—1	
1,2	—	—	—	—	—2	—1	—1	—4	—2	—4	—5	—	
0,5	0,5	4	—	—	—9	—11	—13	—12	—13	—12	—21	—20	
0,6	1,5	4,5	—	—	—7	—10	—12	—	—12	—14	—20	0	
—	2,5	—	—	0,25	—1	—1	—	—	—2	—1	—3	+1	
—	—1,3	—	0,7	0,25	—2	—6	—5	—	—3	—4	—9	0	

Примечание. Пункт А — 41° 15' северной широты, 71° 25' западной долготы. Пункт Б — 39° 40' северной широты, 75° 40' западной долготы.

сплавов алюминия вследствие коррозии в зависимости от важнейших составных частей сплава [5].

Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов, как видно из табл. 29, значительно ухудшается при наличии в сплаве меди и стали. Отрицательное воздействие этих составляющих в сплаве особенно сказывается в условиях морского климата или атмосферы промышленного района. В этих условиях наблюдается контактная коррозия.

Комбинация кадмий—алюминий недопустима. В комбинации цинк—алюминий цинк действует как металл, облегчающий катодную защиту алюминия.

Отрицательно влияют на коррозионную стойкость алюминия механические включения (благородные посторонние металлы), а также неравномерности в структуре поверхности, такие, как следы обработки (риски, бороздки), а также поры и усадочные раковины, возникающие при литье сплавов.

Из органических веществ, которые могут вызвать коррозию алюминия, помимо фунгицидов на основе соединения фенил—ртуть следует назвать фенол. Фенол может вызвать повреждение при запрессовке алюминиевых деталей в материал на основе фенольных смол.

Медь — один из важнейших материалов электротехники. Этот металл имеет хорошую защиту от коррозии. Под воздействием кислорода, углекислоты и влаги воздуха на меди образуется прочный защитный слой из карбоната и меди. Защитные слои могут быть на основе сульфата меди, хлорида меди (на морском побережье). Эти защитные слои называют иногда патиной.

Часто наблюдаемые разрывы тонких медных проводов — результат воздействия коррозии. Известно, что для намотки катушек индуктивности обычно используют эмалированную медную проволоку. В некачественных лаках часто возникают трещины. В этих трещинах электролит (вода) может соприкоснуться с медью, которая вследствие протекания тока является электродом с выраженной полярностью, и в случае анодной нагрузки ускоренно идет в раствор. Экспериментальные данные показывают, что срок службы таких катушек при 75%-ной относительной влажности составляет 3 года, а при относительной влажности 100% — всего лишь 5 дней (в обоих случаях температура плюс 45°С).

В промышленности широко применяют различные сплавы меди: медь—никель — имеет хорошую противокор-

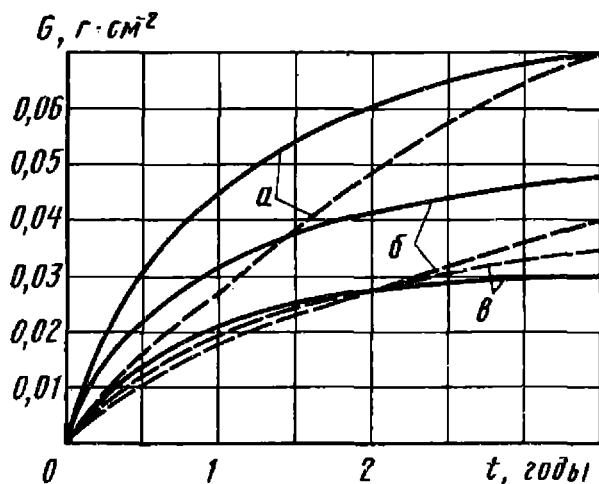


Рис. 8. Коррозионная стойкость различных легированных сталей в промышленной атмосфере (—) и климате морского побережья (---) в зависимости от времени испытаний и содержания легирующих компонентов: a — меди; b — 3,5% никеля; v — 14% никеля; $0,7\%$ — меди; $0,6\%$ — кремния; G — потеря массы вследствие коррозии

розионную защиту; медь—кремний (кремнистые бронзы) — обладает большей по сравнению с медью способностью к защите от коррозии; медь—олово с присадками фосфора — весьма стойки к коррозии; медь—цинк (латунь) — с увеличением доли цинка понижается коррозионная стойкость сплава, особенно опасны сплавы при 60—65 % цинка.

При сильном воздействии влаги незащищенные латунные детали, соприкасающиеся с термоактивными пластмассами, подвергаются межкристаллитной коррозии, вследствие которой ломаются латунные штифты, к которым припаивается проволока.

При образовании конденсата, воздействии морского климата или промышленной атмосферы латунь нестойка к коррозии.

Н и к е л ь обладает высокой коррозионной стойкостью к межкристаллитной коррозии (сплав из 65 % никеля и 35 % меди). Применяемые в радиоэлектронике и электротехнике никелевые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью.

Ц и н к в виде технического металла содержит свинец, сталь и кадмий. При

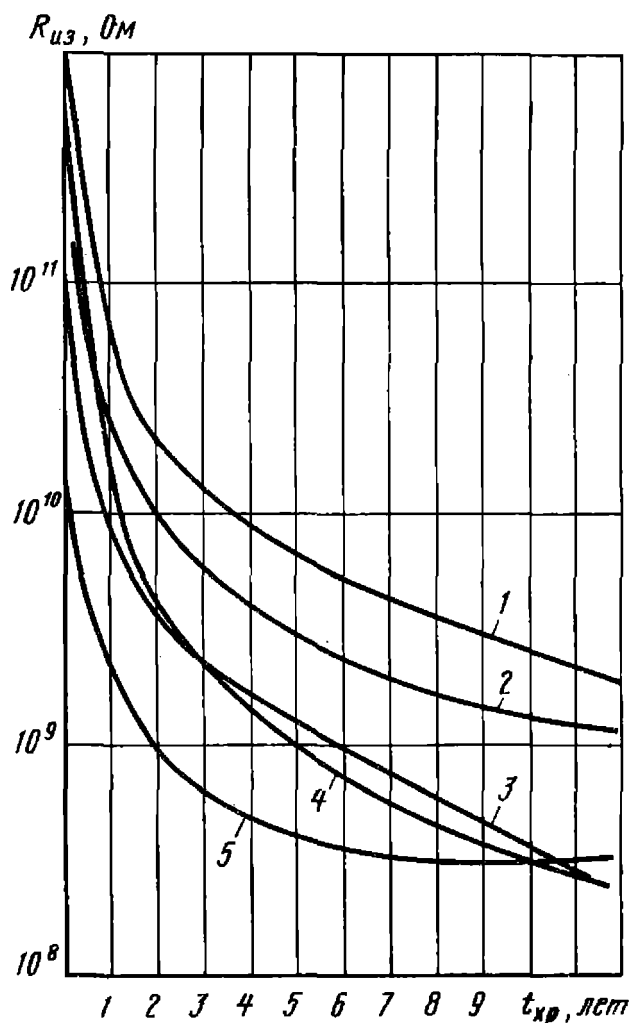


Рис. 9. Сопротивление изоляции $R_{из}$ в зависимости от времени хранения $t_{хр}$ для различных изоляционных материалов:

1—5 при постоянной влажности в теплой среде

образовании конденсата, который может возникнуть при высокой относительной влажности и в условиях промышленной атмосферы, цинк корродирует довольно быстро.

О л о в о как припой используют в электротехнике в виде сплава со свинцом. При воздействии высоких значений влажности и температуры сплавы с содержанием олова менее 60% корродируют. Распад чистого олова или его сплавов с алюминием или цинком при низких температурах вызывают превращение олова в аморфную модификацию. Содержание свинца более 50% препятствует возникновению этого явления, называемого оловянной чумой.

С т а л ь. Скорость коррозии у стали в значительной степени зависит от рода и концентрации составных частей воздуха, вызывающих коррозию, например, таких, как влага воздуха, SO_2 , CO_2 и содержание хлоридов.

На рис. 8 показана коррозионная стойкость различных легированных сталей в промышленной атмосфере и в климате морского побережья. Стали с содержанием хрома более 12 % называют коррозионно-стойкими.

Воздействие влажности на изоляционные материалы приводит к их набуханию и снижению электрического сопротивления. На рис. 9, 10 приведена количественная характеристика изменений электрического сопротивления изоляции различных видов материалов при воздействии влажности.

Набухание изоляционных материалов возможно только в том случае, если нет ограничений на объем. Набухание недопустимо в материалах конструкции, несущей определенную нагрузку. Отказы деталей вследствие набухания наступают внезапно (при определенном увеличении объема).

Воздействие сухого тепла и холода. При оценке стойкости металла к воздействию сухого тепла и холода нужно учитывать, что металлы конструктивных узлов, входящих в изделия общего назначения (в радиоэлектронную аппаратуру, двигатели различных типов и др.), работающие на воде, на суше и в воздухе, следует испытывать в диапазоне температур от минус 60 до плюс 200°C. Применяемые в электронике металлы, за исключением латуни, хорошо выдерживают эти температуры (у ряда сортов латуни при температурах ниже минус 20°C проявляется хрупкость).

Изоляционные материалы разделяют на термореактивные (отверждаемые) пластмассы и термопласты (неотверждаемые пластмассы).

Термореактивные пластмассы сохраняют свою форму до момента разрушения, которое наступает внезапно вследствие химического разрушения.

Термопласты при температурной перегрузке становятся эластичными и текучими.

Термореактивные пластмассы стойки к воздействию тепла в более широком

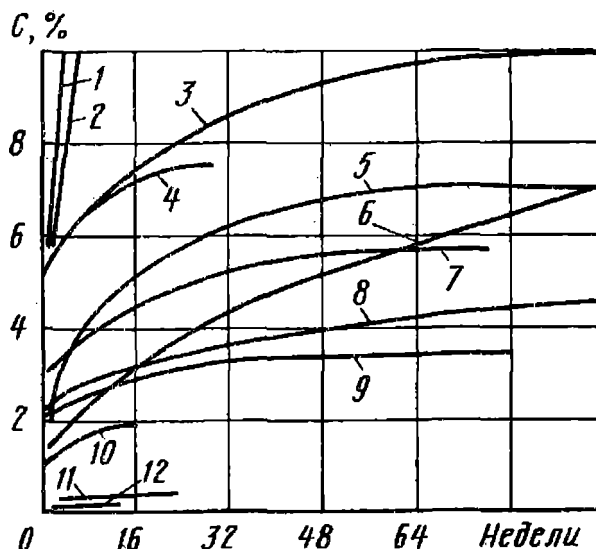


Рис. 10. Поглощение влаги C в зависимости от времени:

1 — резина; 2 — казеин; 3 — виниловая смола; 4 — бакелизированная бумага; 5 — фенопласт; 6 — литьевая феноловая смола; 7 — битум; 8 — этилцеллюлоза; 9 — феноловая смола; 10 — плексиглас; 11 — поливинил; 12 — полистирол

диапазоне температур по сравнению с термопластами. Термореактивные пластмассы лишь незначительно поглощают влагу и являются влагостойкими.

Смазочные материалы в виде твердых жиров и масел весьма чувствительны к воздействию высоких (становятся жидкими) и низких температур (застывают).

Одно из последствий воздействия климатических факторов на материалы — механические повреждения.

Каждый материал имеет коэффициент линейного расширения, при помощи которого можно вычислить удлинение стержня при воздействии температур $x = x_0 (1 + \alpha \Delta T)$, где x_0 — длина стержня при исходной температуре T_0 ; α — температурный коэффициент линейного расширения; ΔT — разность температур.

В случае объемных изменений $V = V_0 (1 + 3\alpha \Delta T)$, где V — объем при температуре T ; V_0 — объем при исходной температуре T_0 .

Если эти соотношения не учитывать, то при изменении температуры может произойти поломка деталей.

В реальных конструкциях изделий не всегда в достаточной степени учиты-

вают различие в коэффициентах расширения, вследствие чего при эксплуатации возникают перенапряжения и поломка элементов конструкции.

В сложных технических устройствах и системах возможны все упомянутые выше явления. В этих системах, например в радиоэлектронной аппаратуре, применяют разнообразные элементы точной механики и электромеханических узлов. В них насчитываются сотни тысяч (иногда миллионы) контактов, надежность которых существенно снижается вследствие коррозии. До сих пор неизвестны материалы для изготовления контактов, удовлетворяющие всем требованиям защиты.

Увеличение числа промышленных предприятий привело к росту содержания сероводорода в атмосфере и к образованию слоя сернистого серебра на контактах. Переход к наиболее стойким материалам (палладий, золото) также не в полной мере удовлетворяет высоким требованиям защиты от коррозии, так как в радиоэлектронной аппаратуре и других изделиях стали применять пластмассы, которые при высоких температурах выделяют летучие вещества. На золотых и палладиевых поверхностях контактов образуется налет, нарушающий работу контактов. Между контактами попадают продукты коррозии других металлов, которые также нарушают работу контактов.

Значительное число нарушений в работе устройств связано с диффузией водяных паров в изоляционные материалы и изделия на основе этих материалов (катушки индуктивности, трансформаторы и др.). Кроме того, вследствие поглощения влаги снижается электрическая прочность изделий электротехники, которыми насыщены практически все современные сложные технические системы и объекты.

Внутри изоляционных материалов возникают химические реакции, в том числе и старение. Оно протекает быстрее при воздействии высоких температур.

Диффундированные водяные пары влияют на емкость обмоток трансформаторов.

Изменение сопротивления изоляции снижает добротность колебательных контуров.

Воздействие песка и пыли. Действие песка и пыли, увлекаемых ветром, отражается на ухудшении внешней поверхности изделий (в особенности автомобилей, самолетов на грунтовых аэродромах и др.). Особенно опасны пылевые бури. Частицы пыли и песка попадают в смазочные материалы и прилипают к слоям защиты поверхности. В результате наблюдается заедание или увеличение «мертвого хода» в подшипниках.

Тонкий слой копоти поглощает газы, например сернистый SO_2 , которые разрушающе действуют на изделия.

Прочно спекшаяся пыль (особенно в районах с развитой промышленностью) благоприятствует накоплению электропроводной влаги и снижает сопротивление изоляции. Осаждение пыли облегчает появление токов утечки у твердых изоляционных материалов. Характерные повреждения, вызываемые пылью, — плохая работа контактов. Около 40% всех повреждений происходит вследствие недостаточно хорошей работы контактов. В районах повышенной запыленности условия эксплуатации еще хуже. На АТС в районах пустынь после установки оборудования для очистки воздуха число повреждений снижается на 80%. Работа контактов нарушается, когда частицы достигают более 50 мкм.

Эффективным средством борьбы с пылью является повышение влажности воздуха. Наилучшими условиями эксплуатации, обеспечивающими высокую надежность оборудования, являются такие, когда воздух в рабочем пространстве свободен от пыли и относительная влажность его постоянна и находится в пределах 60—80 %.

Разность давлений в помещении и внутри объектов (вследствие разности температур) приводит к движению воздуха и пыли, в результате чего также происходит запыление элементов изделия.

В конструктивных элементах, которые работают при малых контактных давлениях, запыленность особенно опасна при нахождении их в потоках охлаждающего воздуха.

Воздействие биологических факторов. Наиболее опасными являются плесневые грибы. Воздействию плесневых

грибов подвергаются изоляционные материалы органической основы (гетинакс, пресс-шпан, вулканизированная фибра, текстолит и др.). Под действием плесневых грибов ухудшается механическая прочность материалов и изделий.

Текстолит и гетинакс при низком содержании смолы сильнее подвергаются воздействию грибов, чем при высоком, так же, как края обреза этих материалов по сравнению с гладкой прессованной поверхностью.

Плесневые грибы часто появляются в приборах, хранящихся в запечатанных помещениях. В электронных приборах, где контакты или голые монтажные провода лежат плотно друг к другу, например в печатных схемах, возможны нарушения электрических соединений. Вследствие выделения органических кислот ускоряется коррозия контактов. Поражение плесенью часто начинается на хлопчатобумажной оплетке шнура кабельной разделки и распространяется затем на провода с лакошелковой изоляцией.

Воздействие солнечных лучей. Повреждения от солнечных лучей можно разделить на две группы: фотолитические процессы и фотоокислительные процессы. При повреждении металлических поверхностей существенную роль играет фотоокислительное расщепление. Одновременное воздействие кислорода и влаги создает посредством окислительных процессов дополнительные количества энергии. Поверхность металлов при ультрафиолетовом облучении активируется и поэтому подвергается опасности коррозии. Для расщепления молекулярной структуры необходима определенная частота излучения, так как энергия фотона соответствует произведению постоянной Планка на частоту.

Фотолитические процессы возникают на частоте облучения, при которых энергия фотонов сама по себе достаточна для этого. При воздействии фотонов происходит обрыв фотоэлектронов и разрыв молекулярных связей.

Энергия ультрафиолетового света достаточна для того, чтобы расщепить сильные химические связи органических молекул между углеродом и водородом. Как следствие этого, поли-

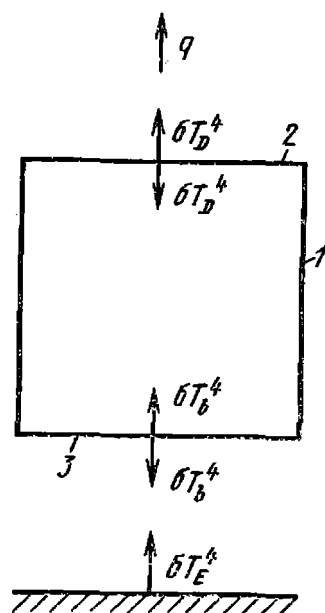


Рис. 11. Тепловой баланс элементов кожуха:

q — интенсивность солнечного излучения; 1 — корпус; 2 — крышка кожуха; 3 — нижняя поверхность кожуха

винилхлориды, например, окрашиваются в коричневый цвет, сложный полиэфир и полистирол — в желтый. Полиэтилен и этилцеллюлоза становятся хрупкими и теряют прочность. Краски и лаки, состоящие преимущественно из органических веществ, испытывают аналогичные повреждения. Для исключения такого характера повреждений применяют поглотители ультрафиолетовых лучей.

Основным воздействием солнечного излучения является нагрев поверхности изделий и, как следствие, повышение температуры внутри устройства (рис. 11). Если применять крайние значения, типичные для климата пустынь (температура воздуха плюс 55°C и лучистая экспозиция солнечного излучения $0,112 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$), можно оценить температуру нагрева элементов кожуха открытого прибора.

Пренебрегая толщиной стенок, температуру внутренней и наружной поверхностей можно принять одинаковой. Тепло, поглощаемое верхней крышкой кожуха, излучается внутрь устройства и достигает наружной поверхности кожуха, которая отдает тепло почве. После достижения температурного равновесия соотношения между температурами крышки кожуха T_D , дна ко-

30. Нагрев (°C) черного кожуха солнечными лучами в пунктах различных географических широт

Место нагрева	Широта, градусы				
	0	30	40	50	60
Крышка, °C	86	—	81	76	64
Дно, °C	69	—	64	58	52

жука T_b и температурой почвы T_E можно представить в виде [5]

$$\sigma T_b^4 = \frac{\sigma}{2} (T_D^4 - T_E^4);$$

$$\sigma T_D^4 = \frac{1}{2} (1,6 + \sigma T_b^4),$$

где σ — постоянная излучения (для черной поверхности $\sigma = 5,73 \cdot 10^{-12}$ Вт $\times$ см⁻²).

После вычисления получим $T_b = 72^\circ\text{C}$; $T_D = 87^\circ\text{C}$.

Практические измерения показали, что температура внутри кожуха равна примерно 75 °C. Возможные максимальные температуры приведены в табл. 30.

Приведенные соотношения, рассчитанные в соответствии с уравнением Стефана—Больцмана, справедливы только для абсолютных черных поверхностей. В табл. 31 приведены данные о превышении температуры поверхностей при отвесном поглощении солнечных лучей.

Перегрев изделий, находящихся в крытых помещениях (внутри специальных автомобилей, внутри железнодорожных вагонов), освещаемых солнцем при незначительной циркуляции воздуха, может достигать 25—30 °C.

Энергия, потребляемая техническими изделиями многих видов, превращается в тепло, вызывая внутренний нагрев.

Теплоотдача определяется главным образом конвекцией, лучеиспусканием и теплопроводностью. Для изделий большинства видов лучеиспускание и конвекция — основные способы теплопередачи. У приборов с закрытыми кожухами, у которых нет больших отверстий для вентиляции, выделяющееся тепло переносится на кожух главным образом путем лучеиспускания и конвекции. Выравнивание температур со средой, окружающей прибор, происходит в этом случае посредством лучеиспускания.

Превышение температуры в приборе возникает преимущественно вследствие плохих лучеиспускающих свойств кожуха, вследствие малой излучающей поверхности его. Поэтому весьма важным показателем является поглощение мощности единицей поверхности (Вт $\times$ м⁻²).

Необходимо выбирать материалы с малым поглощением мощности. Температуру перегрева воздуха внутри прибора приближенно допускают равной двукратной температуре перегрева стенок кожуха.

Например, теплоотдача радиоэлектронной аппаратуры происходит в

31. Повышение температуры поверхностей за счет поглощения солнечных лучей

Поверхность	Повышение температуры, °C	Поверхность	Повышение температуры, °C
Металл:		Древесина:	
без покрытия	24	без окраски	17,8
окрашенный в белый цвет	13	окрашенная в белый цвет	12,0
окрашенный в серый цвет	21	окрашенная в серый цвет	22
окрашенный в черный цвет	26,5	окрашенная в черный цвет	26,5

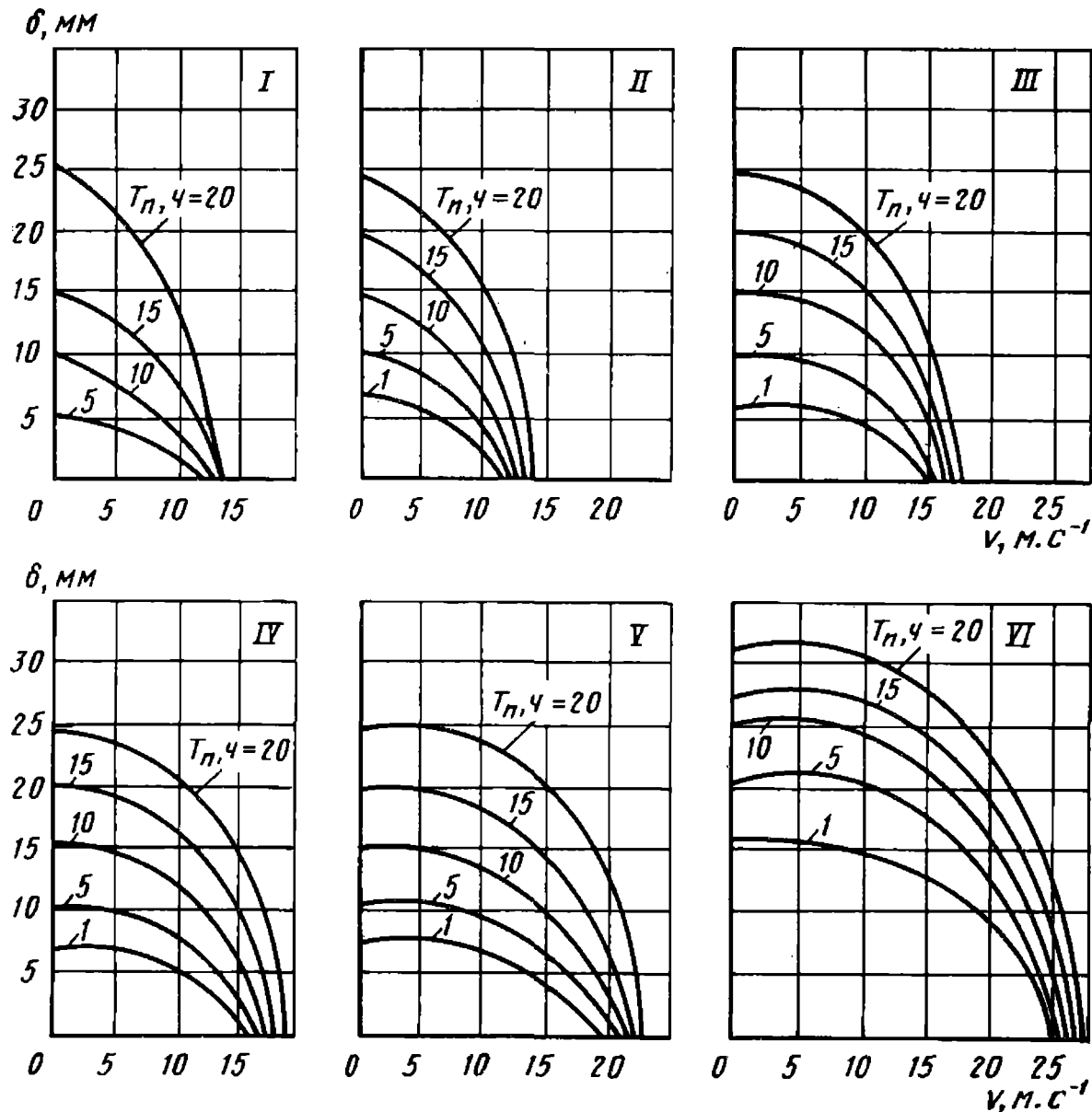


Рис. 12. Нормативные изолинии сочетаний толщины стенки гололеда δ и скорости v для гололедно-ветровых районов ГВР I—VI

среднем на 40% посредством конвекции, если температура устройства лежит в пределах 20—150 °С. С ростом высоты над уровнем моря доля конвекции значительно снижается. Это имеет весьма важное значение для изделий, устанавливаемых на самолетах.

Воздействие ветра и гололеда. На технические изделия, расположенные вне помещений, действуют ветер и гололед. При обледенении увеличиваются размеры и масса изделий, что приводит к возрастанию действующих на них аэродинамических и механических нагрузок. Оценка влияния гололедно-ветрового режима (ГВР), форми-

руемого случайными метеорологическими факторами (МФ), проводится вероятностно-статистическими методами [2, 3, 15].

Для расчета интенсивности x параметров гололедно-ветрового режима используют распределение Гудрича:

$$F(x) = \exp \{ -K_{x\Gamma} x^{n_{x\Gamma}} \},$$

где $K_{x\Gamma}$, $n_{x\Gamma}$ — параметры уравнения Гудрича, аппроксимирующие распределение вероятностей интенсивности x (определяются по экспериментальным результатам обработки климатологических воздействий).

32. Скорость ветра v (м/с) в гололедный период года при отсутствии ГИО [15]

ГВР территории СССР	$T_{\Pi}^{\text{мф}}$, лет					Основные районы территории СССР
	1	5	10	15	20	
I	20,5	24,0	25,5	26,0	26,5	Районы умеренного климата Арктический приполюсный и восточный
II	18,0	21,0	22,0	23,0	23,5	
III	20,5	24,0	25,5	26,0	26,5	Умеренный западный и центральный Средняя Азия
IV	26,5	30,0	32,0	32,5	33,0	
V	28,5	33,5	36,0	36,5	37,0	Ограниченные районы Западной Сибири Горная местность территории СССР
VI	35,5	40,0	43,0	44,0	45,0	

Исследования статистических связей между толщиной стенки δ эквивалентного гололеда (ЭГ) и максимальными скоростями ветра v при гололедно-изморозиевых образованиях (ГИО), выполненные по большому числу метеостанций, показывают, что связь между этими переменными незначительна, а коэффициенты корреляции близки к нулю. В этом случае уравнение двумерного распределения накопленных относительных частот сочетаний δ и v имеет вид

$$Q(\delta, v) = 1 - F(\delta, v) = \\ = K_{\delta\Gamma} n_{\delta\Gamma} K_{v\Gamma} n_{v\Gamma} \int_0^{\delta} \int_0^v \{ (\delta/\delta_{\text{ср}})^{n_{\delta\Gamma}-1} \times \\ \times (v/v_{\text{ср}})^{n_{v\Gamma}-1} \exp[-K_{\delta\Gamma} (\delta/\delta_{\text{ср}})^{n_{\delta\Gamma}} - \\ - K_{v\Gamma} (v/v_{\text{ср}})^{n_{v\Gamma}}] \} d\delta dv,$$

где $K_{\delta\Gamma}$, $n_{\delta\Gamma}$, $K_{v\Gamma}$, $n_{v\Gamma}$ — параметры уравнения Гудрича, характеризующие режимы ЭГ и ГИО соответственно; $\delta_{\text{ср}}$, $v_{\text{ср}}$ — средние значения толщины стенки ЭГ и скорости ветра при ГИО соответственно.

В пересечении поверхности $F(\delta, v)$ с плоскостями δ , v получают изолинии равной обеспеченности сочетаний δ и v , характеризующие гололедно-ветровой режим (ГВР) метеостанции при соответствующем периоде повторения $T_{\Pi}^{\text{мф}}$

интервалов интенсивности ФМ (рис. 12).

Скорости ветра, действующие в различных гололедно-ветровых районах на территории СССР (ГВР I—VI), приведены в табл. 32.

При оценке работоспособности конструкций, эксплуатируемых в условиях гололедно-ветровых воздействий, необходимы сведения об интенсивности и непрерывной продолжительности их действия $t_{\Sigma}^{\text{мф}}$. Зависимость средней непрерывной продолжительности действия ветра и ЭГ в гололедный период года от их интенсивностей представлена на рис. 13.

При расчете прочности изделий используют метод эквивалентных нагрузок, основанный на обработке графиков загрузки изделий во времени. Для построения этих графиков необходимы сведения о суммарной продолжительности ветра и эквивалентного гололеда (ЭГ) $t_{\Sigma}^{\text{мф}}$ (суммарная продолжительность действий интервала интенсивности МФ). В табл. 33 приведены значения суммарных продолжительностей скоростей ветра за гололедный и теплый периоды одного года. На рис. 14 показаны огибающие кривые суммарных продолжительностей ЭГ за год. Продолжительность гололедного периода принимается равной 5110 ч.

Нормативная ветровая и гололедная нагрузка. Гололедно-ветровая нагрузка

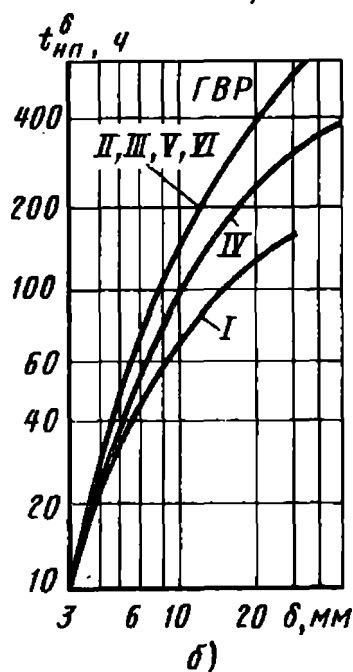
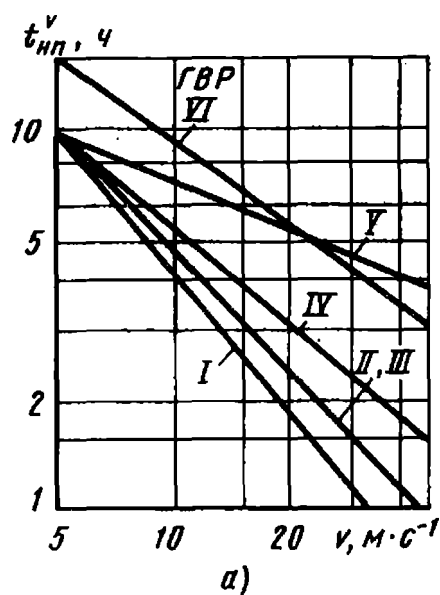


Рис. 13. Зависимость непрерывной продолжительности ветров t_{np} в гололедный период в ГВР I—VI:

а — от их скорости v ; б — от толщины стенки ЭГ δ

определяется как геометрическая сумма ветровой (горизонтальной) и гололедной (вертикальной) нагрузок.

Нормативно-ветровой напор P_v , действующий на наветренную поверхность конструкции в рассматриваемой зоне ее протяженности по высоте, рассчитывают по формуле

$$P_v = 10 P_v K_h^p (1 + K_{пр}^p K_{дин}^p),$$

где $10 P_v = 0,612 v^2$ — скоростной напор

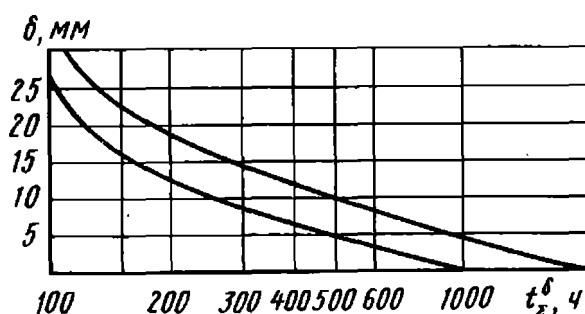


Рис. 14. Зависимость толщины стенки ЭГ δ от суммарной продолжительности гололеда t_{Σ}^{δ}

ветра (СНВ) на высоте до 10 м над поверхностью земли, Па; K_h^p — поправочный коэффициент скоростного напора ветра в зависимости от высоты над поверхностью земли; $K_{пр}^p$ — коэффициент порывистости СНВ; $K_{дин}$ — коэффициент динамичности, учитывающий динамическое воздействие, вызываемое порывистостью СНВ.

Для элементов конструкции нормативная распределенная по площади гололедная нагрузка

$$P_{\delta} = 6\delta K_h^p P_{\delta} 10^{-3} \text{ [Па]}.$$

При расчете степени заполнения проницаемых конструкций (решеток, сеток, ферм и т. п.) при гололедно-изморозиевых образованиях (ГИО) действительная толщина стенки отложения льда $\delta_d = K_d^{г\text{ио}} \delta$, где $K_d^{г\text{ио}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий действительную величину ГИО.

Пример. Определить нормативные ветровые и гололедные нагрузки, действующие на сплошной отражатель, установленный на высоте 50 м над поверхностью земли в VI ГВР при периоде повторения воздействий $T_{п}^{\text{мф}} = 20$ лет и периоде собственных колебаний системы отражатель—опора $T_c \approx 1$ с.

Решение. По изолинии $\delta - v$ (см. рис. 12) при $T_{п}^{\text{мф}} = 20$ лет определяем сочетания δ и v (табл. 34).

По кривым (рис. 15, а) при $h = 50$ м и $T_c = 1$ с определяем $K_h^p =$

33. Суммарная продолжительность (в ч) скоростей ветра v в ГВР за год

Скорость ветра, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Гололедный период для ГВР				Теплый период для ГВР			
	I—III	IV	V	VI	I—III	IV	V	VI
5—10	3000	3000	2785	2400	2750	2750	2050	1700
10—15	500	1000	1350	1450	900	1000	1200	1100
15—20	100	200	650	650	—	80	365	600
20—25	—	50	280	370	—	—	35	175
25—30	—	—	95	160	—	—	—	50
Св. 30	—	—	—	80	—	—	—	25

$= 1,85$ и $K_{\text{дин}}^P = 2,0$. При найденных значениях формула для P_v преобразуется к виду $P_v = 1,13 v^2 (1 + 2K_{\text{пр}}^P)$. По кривым рис. 15, б получают значение $K_{\text{пр}}^P$, соответствующее скоростям v , м/с , приведенным в табл. 33. Используя пары значений v и $K_{\text{пр}}^P$, по преобразованной формуле определяем значения P_v (приведены в табл. 34). В случае, когда $\delta = 0$, скорость ветра при $T_{\text{п}}^{\text{мф}} = 20$ лет принимаем равной 45 м/с и по табл. 34 находим $K_{\text{пр}}^P = 0,29$, тогда ветровой напор $P_v = 1,13 \cdot 45^2 \times (1 + 2 \cdot 0,29) = 3610 \text{ Па}$. По кривым рис. 15, а при $h = 50 \text{ м}$ получаем $K_h^\delta = 1,6$. По формуле для P_δ находим $P_\delta = 8,65\delta$. Результаты расчета P_δ для различных значений δ приведены в табл. 34.

34. Сводные данные к расчету нормативных нагрузок

v , м/с	δ , мм	$K_{\text{пр}}^P$	P_v , Па	P_δ , Па
5	31	0,37	49	268
10	30	0,37	147	259
15	29	0,34	439	251
20	26	0,34	761	225
25	17	0,31	1145	147
27	5	0,31	1345	43

В табл. 35 приведены основные зависимости изменения свойств материалов от воздействия климатических факторов [15].

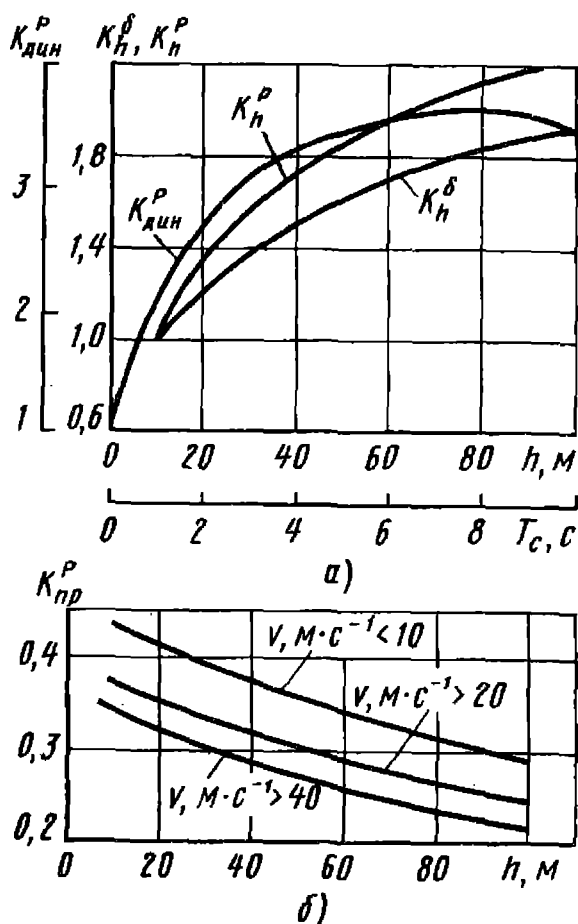


Рис. 15. Зависимость поправочных коэффициентов K_h^P , K_h^δ , $K_{\text{пр}}^P$, $K_{\text{дин}}^P$ от высоты h конструкции над поверхностью земли, порывистости и динамичности скоростного напора ветра v , от периода собственных колебаний конструкции T_c

35. Изменение свойств материалов от воздействия внешних факторов

Основные зависимости	Обозначения
Механические свойства Суммарная деформация $\Delta = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\sigma}{\eta_3} t;$ $\eta_2 = A e^{\frac{\Delta H}{RT}};$ $\eta_3 = B e^{\frac{\Delta H}{RT}}$	σ — действующие механические напряжения; E_1 — модуль упругости; E_2 — модуль упругости при запаздывающей упругой деформации; η_2 — вязкость при запаздывающей упругой деформации; η_3 — вязкость при течении материала; $\tau = \eta_2/E$ — постоянная времени (время запаздывания) при упругой деформации; A; B — постоянные для данного материала; ΔH — энергия активации вязкого трения
Относительное удлинение материалов, вызванное нагревом: $\Delta \theta = \alpha_0 (\theta_2 - \theta_1)$	α_0 — коэффициент линейного расширения; θ_1 — температура в первом слое; $\theta_2 = \theta_1 + \frac{\partial \theta}{\partial l} \Delta l$ — температура во втором слое
Электрические свойства Удельная электропроводность материала $\sigma_\theta \cong \sigma_0 (1 - \alpha_\theta \theta)$	σ_0 — удельная электропроводность при $\theta = 0$; α_θ — температурный коэффициент
Напряженность электрического поля при тепловом пробое $E_{кр} = E_{кpo} e^{-\alpha_{E_0} \theta}$	$E_{кpo}$ — напряженность электрического поля при пробое для $\theta = 0$
Коэффициент электрических потерь для диэлектриков $\lg (\operatorname{tg} \delta) = a + b \theta \lg f$	a и b — коэффициенты, зависящие от материала; θ — температура, °C; f — частота переменного тока
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon_H [1 + \alpha_\epsilon \theta + \dots]$	ϵ_H — начальная диэлектрическая проницаемость при $\theta = 0$; α_ϵ — температурный коэффициент

Продолжение табл. 35

Основные зависимости	Обозначения
$\rho = f(P_M)$ — удельное сопротивление проводников и полупроводников; $\frac{\Delta \rho}{\rho} = f_1(P_M) \cong k_0 P_M$	P_M — действующие механические напряжения; k_0 — коэффициент, зависящий от материала
$\rho = f_2(P_M) \cong \frac{a_0}{P_M^k}$	a_0 и k — коэффициенты, зависящие от материала
Диэлектрическая постоянная определяется как $\epsilon = f(P_M)$: $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \cong k_1 P_M$	k_1 — коэффициент, зависящий от материала
Электрическая прочность $E_{пр} = E_{про} - a P_M^b$	$E_{про}$ — напряженность электрического поля при пробое (при $P_M = 0$); a и b — коэффициенты, зависящие от материала, обычно $b \cong 1,0$
Удельная электропроводность диэлектрика $\sigma_E = \sigma_{E0} e^{bE} \cong \sigma_{E0} [1 + bE]$	σ_{E0} — удельная электропроводность диэлектрика при $E \cong 0$; E — напряженность электрического поля в диэлектрике; b — коэффициент, зависящий от материала
Удельная проводимость диэлектрика $\sigma_z = \sigma_{z0} e^{\chi(z-z_0)}$	z — влажность материала (абсолютная); χ — коэффициент, зависящий от материала
Магнитные свойства $H_c = H_{c0} (1 - \alpha_{Hc} \theta);$ $B_r = B_{r0} (1 - \alpha_{Br} \theta)$ при $\theta < 0,5\theta$ кюри	H_c и B_r — соответственно коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция; θ — температура, °C; α_{Hc} и α_{Br} — коэффициенты, зависящие от материала

Продолжение табл. 35

Основные зависимости	Обозначения
Критическое поле $E_{\theta} \cong E_0 [1 - \alpha_{E_0} \theta + \dots]$ Остаточная поляризация $P_r \cong P_{r0} [1 - \alpha_{P_r} \theta + \dots]$	E_0 — критическое поле при $\theta = 0$; α_{E_0} — температурный коэффициент изменения поля; P_{r0} — остаточная поляризация; α_{P_r} — температурный коэффициент
Магнитная проницаемость $\mu = \mu_H \left[1 + 4\pi \frac{c}{T - T_{\text{Кюри}}} \right]$	μ_H и $T_{\text{Кюри}}$ зависят от материала
Изменение магнитной проницаемости при воздействии механических напряжений $\mu = \mu_H (1 + k_{\mu} P_M)$	P_M — действующее механическое напряжение; k_{μ} и μ_H зависят от материала
Коэрцитивная сила $H_c = H_{c0} (1 - \alpha_{1M} P_M)$ Остаточная магнитная индукция $B_r = B_{r0} (1 - \alpha_{2M} P_M)$	H_{c0} ; α_{1M} ; B_{r0} ; α_{2M} зависят от материала
Изменения магнитной проницаемости $\frac{\Delta \mu}{\mu} = k_{\mu E} E$	$k_{\mu E}$ — коэффициент, зависящий от материала

6. ТРЕБОВАНИЯ
ПО СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ
К КЛИМАТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ

При определении требований по стойкости изделий к внешним воздействующим факторам необходимо учитывать климатические исполнения и категории размещения изделий. В ГОСТ 15150—69 определены пять укрупненных категорий размещения изделий.

1. Для эксплуатации на открытом воздухе.

2. Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха существенно отличаются от колебаний

на открытом воздухе. Отсутствует прямое воздействие солнечного излучения и атмосферных осадков.

3. Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебание температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, например, в металлических с теплоизоляцией, каменных, бетонных, деревянных помещениях.

4. Для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями.

Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом.

Для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях.

5. Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (шахтах, подвалах в почве, в судовых помещениях, в которых возможно длительное наличие воды, в некоторых цехах текстильных и гидрометаллургических производств).

Требования к изделиям в части воздействующих факторов внешней среды формируются в виде ряда следующих положений.

Требования по стойкости изделий к воздействию температуры внешней среды, сменам температуры, влажности, давления воздуха предъявляются к изделиям всех климатических исполнений и категорий размещения. Требования по предельным значениям температуры предъявляются только к высоконадежным изделиям (вероятность безотказной работы выше 0,99). Требования по устойчивости к воздействию солнечной радиации и дождя предъявляются только к изделиям, предназначенным для работы на открытом воздухе.

Требования по работоспособности или пыленепроницаемости при статическом или динамическом воздействии пыли предъявляются к изделиям, имеющим подвижные части, предназначенные для работы на открытом воздухе всех макроклиматических районов. Этих требований не предъявляют к деталям и узлам, предназначенным для размещения в комплектных устройствах с пыленепроницаемыми оболочками.

К изделиям, исполненным для применения в районах как с сухим, так и влажным тропическим климатом, а также общеклиматического исполнения, предъявляются требования по стойкости к плесневым грибам. Изделия, предназначенные для эксплуатации на морских судах и морских побережьях, должны выдерживать воздействие соляного тумана.

Существенным моментом, связанным с требованиями к стойкости технических изделий к воздействию окружающей среды, является учет изменений свойств изделия с высотой. С ростом высоты вследствие уменьшения плот-

ности воздуха увеличиваются фактические превышения температуры изделий всех видов, выделяющих при работе тепло. В технической документации на такие изделия должны быть указаны поправки на величину уменьшения номинальной нагрузки изделия или на величину уменьшения предельно допустимых превышений температуры на каждые 100 или 1000 м высоты, превышающей нормальную.

Важным фактором при оценке влияния влажности на аппаратуру является количество влаги в окружающей атмосфере. В приземной зоне уровень абсолютной влажности определяется температурой, а также соотношением между интенсивностью поступления влаги в атмосферу вследствие осадков и испарения с поверхности суши и водоемов и интенсивного переноса водяных паров в верхние слои атмосферы.

В приземном слое минимальные значения абсолютной влажности наблюдаются в районах с минимальной температурой воздуха, например в полярных (абсолютная влажность порядка $0,1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$). Максимальное значение абсолютной влажности наблюдается в сырых тропических районах при максимальной температуре воздуха ($50\text{--}60 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$). Уровень абсолютной влажности, как правило, увеличивается в летние месяцы и уменьшается в зимние.

Отмеченные особенности воздействия климатических факторов следует учитывать при моделировании условий эксплуатации в испытательных камерах.

Для оценки степени приближения условий испытаний к условиям реальной эксплуатации необходимо располагать данными о распределении максимальных длительностей, в течение которых в том географическом пункте, где осуществляется эксплуатация, могут сохраняться различные уровни относительной влажности при определенных значениях температур.

В ГОСТ 15150—69 приведены сочетания влажности воздуха и температуры, которые принимают для различных категорий исполнений изделий при их проектировании и при разработке методов испытаний на влагостойкость.

Для изделий, предназначенных для работы в районах с умеренным и с холодным климатом и не в помещениях с повышенной влажностью, среднемесячное значение влажности в наиболее влажный и теплый период рекомендуют принимать 80 % при 20 °С. Если конструкторское оформление приборов исключает возможность конденсации влаги на внутренних узлах и деталях, то устанавливают верхние рабочие значения влажности $95 \pm 3\%$.

Технические изделия, предназначенные для наружного монтажа подвижных и переносных объектов техники, должны выдерживать воздействие выпадающего на них инея.

Если изделия предназначены для эксплуатации в особых условиях внешней среды (атмосфера агрессивных газов химического производства или инертных газов, жидкая среда, облучение, насыщенность атмосферным электричеством), это должно оговариваться в технических заданиях на проектирование. При эксплуатации изделий вследствие нагрева их солнечными лучами происходит дополнительное повышение температуры приблизительно на 5 °С.

В частности, для изделий, устанавливаемых в машинных и котельных отделениях кораблей, верхнее значение температуры воздуха принимается на 5 °С выше, чем для изделий, предназначенных для работы в помещениях с искусственным регулируемым климатом. Для железнодорожного подвижного состава, предназначенного для районов с умеренным климатом, нижнее рабочее и предельное значения температуры рекомендуется принимать минус 50 °С.

Исследования показывают, что использование изделий в исполнении для умеренного климата в районах с влажным климатом возможно при условиях: средний ежегодный максимум температуры не превышает 40 °С; сочетание температуры воздуха, равной или выше 20 °С при относительной влажности воздуха 80 % и более, наблюдается менее 12 ч в сутки или более 12 ч в сутки, но за непрерывный период менее двух месяцев в году; высота местности не более 1000 м. Применение изделий в исполнении для умеренного

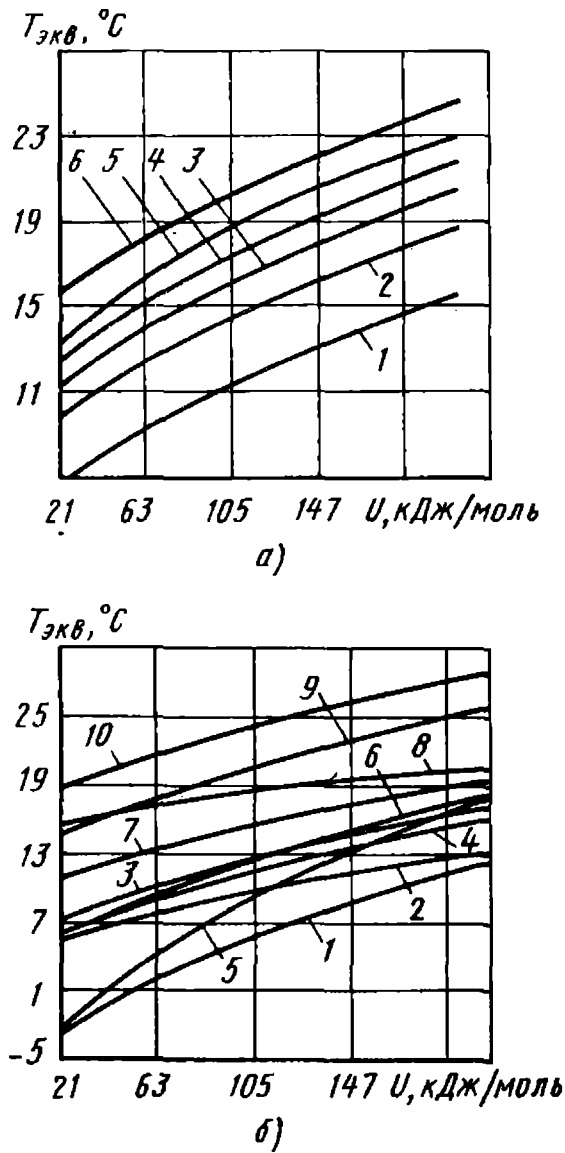


Рис. 16. Зависимость $T_{экв} = f(U)$ для представительных пунктов:

а — климатических районов стран СЭВ: 1 — Покрад; 2 — Саибетхей; 3 — Гурбаново; 4 — Враца; 5 — Бухарест; 6 — Санданели; б — районов СССР: 1 — Салехард; 2 — Таллинн; 3 — Калининград; 4 — Владивосток; 5 — Якутск; 6 — Москва; 7 — Одесса; 8 — Багуми; 9 — Ташкент; 10 — Ашхабад

климата в районах, отнесенных к холодному климату, может быть допущено, если средняя из ежегодных минимумов температура воздуха в данном пункте не ниже минус 45 °С.

При оценке показателей надежности изделий необходимо исходить из конкретных температурных условий эксплуатации. В частности, если температура нестационарная, то вводится так называемая эквивалентная температура

36. Зависимость срока эксплуатации и хранения материалов от эквивалентных температур

Климатический район (представительный пункт)	Эквивалентная температура при $U = 105,2 \cdot 10^3$ Дж/моль		Срок эксплуатации, годы	Срок хранения, годы
	К	°С		
Холодный (Салехард)	278,5	5,5	1,0	53
Умеренно холодный (Москва)	285,8	12,8	3,2	17
Умеренно теплый (Одесса)	289,0	16,0	5,1	10
Жаркий сухой (Ташкент)	294,0	21,0	10,7	5

тура. Под этой величиной подразумевают такую условную постоянную температуру, при которой в материалах за рассматриваемое время происходят те же изменения, что и в нестационарных условиях. Для различных физико-химических и механических процессов (химических превращений, диффузии, разрушения, деформирования) выражение для эквивалентной температуры имеет вид [6, 7]

$$T_{\text{экв}} = -\frac{U_i}{R} \left\{ \ln \left[\frac{1}{t_0} \sum_{j=1}^n \Delta t_j \times \exp \left(-\frac{U}{RT_j} \right) \right] \right\}^{-1},$$

где $T_{\text{экв}}$ — эквивалентная температура; U_i — эффективная энергия активации соответствующего процесса, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная; n — число интервалов времени Δt_j со средней температурой T_j на рассматриваемом отрезке времени t_0 [в нашем случае Δt_j — частота (вероятность) появления температуры T_j в течение года].

Эффективная энергия активации U для большинства физических и химических процессов, протекающих в материалах, находится в диапазоне $(21 - 210) \cdot 10^3$ Дж/моль.

На рис. 16 приведена зависимость эквивалентной температуры от значений эффективной энергии активации для рассматриваемого нами процесса.

Приведенные значения эквивалентной температуры можно рассматривать как обобщенную характеристику теплонапряженности различных климатических районов по интенсивности протекающих в материалах (изделиях) процессов и применять как температуру экстраполяции при прогнозировании изменений свойств материалов и изделий при эксплуатации и хранении.

При анализе кинематических процессов часто используют среднегодовую температуру климатических районов. Эквивалентная температура всегда выше среднегодовой. Поэтому использование при расчетах среднегодовой температуры может привести к ошибочному ответу [7]. Это положение базируется на известном соотношении между скоростью процессов и температурой

$$W = W_0 \exp \{-U/RT\},$$

где W — эффективная скорость процесса; W_0 — константа.

В табл. 36 приведены значения эквивалентных температур для различных климатических районов СССР.

Как следует из табл. 36, сроки эксплуатации и хранения изделий в различных районах могут различаться в 10 раз.

В качестве требований по стойкости различных категорий изделий к воздействию температуры можно принимать нормальные значения температуры воздуха при эксплуатации изделий, приведенные в табл. 37 (ГОСТ 15150—69), и ориентироваться на экстремальные значения.

37. Нормальные значения температуры воздуха при эксплуатации изделий

Исполнения изделий	Категории изделий	Нормальные значения температуры воздуха при эксплуатации, °С				
		рабочие			предельные	
		верхние значения	нижние значения	средние значения	верхние значения	нижние значения
У — для районов с умеренным климатом	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 3.1; 5; 5.1	+40	—45	+10	+45	—50
		+40	10	+10	+45	10 ³
		+35	—5	+10	+35	—5
ХЛ — для районов с холодным климатом	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 3.1; 5; 5.1	+40	—60	+10	+45	—60
		+40	—10 ³	+10	+45	—10 ³
		+35	—10	+10	+35	—10
УХЛ — для районов с умеренно холодным климатом	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 3.1 4 4.1 4.2 5; 5.1	+40	—60	+10	+45	—60
		+40	—10 ³	+10	+45	—10 ³
		+35	+1	+20	+40	+1
		+25	+10	+20	+40	+1
		+35	+10	+20	+40	+1
		+35	—10	+10	+35	—10
ТВ — для районов с влажным тропическим климатом	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 3.1 4 4.1 4.2 5; 5.1	+45	+1	+27	+50	+1 ¹
		+45	+1	+27	+50	+1
		+25	+10	+20	+49	+1
		+45	+10	+27	+45	—10
		+35	+1	+10	+35	+1
Т, ТС — для районов с тропическим климатом	1; 1.1; 2; 3; 3.1; 2.1 ⁴ 4 ⁴ 4.1 ⁴ 4.2 ⁴ 5; 5.1	+45	+10	+27	+35	+1
		+45	+1	+27	+55	+20
		+25	+10	20	40	+10
		+45	+10	+27	+45	+1
		+35	+1	+10	+35	—20 ¹
О — для всех макроклиматических районов	1; 1.1; 2; 2.1 4 4.1 4.2 5; 5.1	+45	—60	+27	+55	—60
		+45	+10	+27	+35	+1
		+25	+10	+20	+40	+1
		+45	+10	+27	+45	+1
		+35	—10	+10	+35	—1

Продолжение табл. 37

Исполнения изделий	Категории изделий	Нормальные значения температуры воздуха при эксплуатации, °С				
		рабочие			предельные	
		верхние значения	нижние значения	средние значения	верхние значения	нижние значения
М — для морских судов в районах с умеренным и умеренно холодным климатом	1; 1.1; 2; 2.1;	+40	−40 ²	+10	+45	−40
	3; 5; 5.1					
	4; 3.1	+40	−10 ³	+20	+40	10 ³
	4.1	+35	+15	+20	+40	+1
	4.2	+40	+1	+20	+40	+1
ТМ — для морских судов в районах с тропическим климатом	1; 1.1; 2; 2.1;	+45	+1	+27	+45	+1
	3; 5; 5.1					
	4	+45	+1	+27	+45	+1
	4.1	+25	+20	+20	+40	+1
	4.2	+45	+1	+27	+45	+1
В — для всех районов	1; 1.1; 2; 2.1;	+45	−60	+27	+55	−60
	3					
	3.1; 4	+45	10 ³	+27	+55	10 ³
	4.1	+25	+10	+20	+40	+1
	4.2	+45	+1	+27	+45	+1
ОМ — для неограниченного района плавания	1; 1.1; 2; 2.1;	+45	−40 ²	+27	+45	−40
	3; 5; 5.1					
	4; 3.1	+45	−10 ³	+27	+45	−10 ³
	4.1	+35	+15	+20	+40	+1
	4.2	+40	+1	+27	+40	+1

¹ Для некоторых областей с субтропическим климатом принимают минус 10 °С.

² Для судов, не используемых в районах Северного Ледовитого океана, в зимнее время значение принимают равным минус 30 °С.

³ Для эксплуатации объектов в нерабочем состоянии значение принимают таким же, как для категории 3.

⁴ Для исполнения Т.

Примечание. Классификация климатических исполнений изделий: категория 1 — изделия, предназначенные для работы на открытом воздухе. Категория 2 — изделия, предназначенные для работы в помещениях. Категория 3 — изделия, предназначенные для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией. Категория 4 — изделия, предназначенные для работы в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями. Категория 5 — изделия, предназначенные для работы в помещениях с повышенной влажностью (например, в неветилируемых подземных помещениях).

38. Условия хранения изделий

Обозначение условий хранения			Температура воздуха, °С		Верхнее значение		Среднемесечное значение в наиболее теплый и влажный период		
основное	вспомогательное		Верхнее значение	Нижнее значение	Относительная влажность, %	Температура, °С	Относительная влажность, %	Температура, °С	Продолжительность, ч
	буквенное	текстовое							
1		Отапливаемое хранилище	+40	+5	80	25	65	20	12
1.1	Л	Хранилище с регулируемой влажностью	+50	—60	40	50	30	20	12
1.2		Хранилище с регулируемой температурой и влажностью	—15	+5	55	15	40	20	12
2	С	Неотапливаемое хранилище в макроклиматических районах с умеренным холодным климатом	+40	—50	98	25	80	20	6
3	Ж3	Неотапливаемое хранилище	+50	—50 *1	98	35	80	27	12
4	Ж2	Навесы в макроклиматических районах с умеренным и холодным климатом в условно чистой атмосфере	+50	—50 *2	100	25	80	20	6
5	ОЖ4	Навесы в микроклиматических районах с умеренным и холодным климатом	+50	—50 *2	100	25	80	20	6

Основное	Обозначение условий хранения		Температура воздуха, °С		Верхнее значение		Среднемесячное значение в наиболее теплый и влажный период		
	вспомогательное		Верхнее значение	Нижнее значение	Относительная влажность, %	Температура, °С	Относительная влажность, %	Температура, °С	Продолжительность, ч
	буквенное	текстовое							
6	ОЖ2	Навесы (палатки, металлические хранилища без теплоизоляции)	+60	—50	100	25	90	27	12
7	Ж1	Открытые площадки в макроклиматических районах с умеренным и холодным климатом	+50	—50 * ²	100	25	80	20	6
8	ОЖ3	Открытые площадки с умеренным и холодным климатом	+50	—50 * ²	100	25	80	20	6
9	ОЖ1	Открытые площадки в любых макроклиматических районах	+60	—50 * ²	100	35	90	27	12

*¹ Допускается нижнее значение температуры принимать минус 10 °С, если изделие не будет транспортироваться либо храниться на территории с умеренным и холодным климатом в зимнее время и транспортироваться самолетом в любое время года.

*² Значение температуры минус 60 °С для изделий исполнения УХЛ (ХЛ), О, В.

чения температуры, приведенные в табл. 25 и 26.

Требования к покрытиям поверхности изделий, подвергаемых нагреву солнцем: верхнее и среднее значения рабочей и предельной температур должны быть выше указанных в табл. 35, например, для изделий категории 1: для поверхностей, имеющих белый или серебристо-белый цвет — выше на 15°C ; для поверхностей, имеющих иной, кроме белого или серебристо-белого, цвет — на 30°C .

При определении требований по стойкости изделий к воздействию климатических факторов определенное значение имеют вопросы, связанные с хранением и транспортировкой изделий. Характеристика условий хранения по группам условий приведена в табл. 38.

Для изделий, предназначенных для транспортирования на самолетах, должны учитываться также воздействие низкой температуры, равной минус 60°C (нижнее значение), резкая смена температур.

При эксплуатации наземных изделий, не предназначенных для работы в высокогорной местности, рабочее давление составляет 86,6—106,6 кПа, нижнее предельное значение 84 кПа (нормальная высота над уровнем моря не должна превышать 1000 м).

Интегральная плотность теплового потока солнечной радиации (верхнее рабочее значение) для высот до 15 км составляет $112,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$, в том числе плотность потока ультрафиолетовой части спектра (длина волн 280—400 мкм) — $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.

Интегральная плотность теплового потока солнечной радиации (верхнее рабочее значение) для высот выше 15 км составляет $138 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$, в том числе плотность потока в ультрафиолетовой части спектра (длина волн 200—400 мкм) — $10 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.

Плотность озона в приземном (в приземном) слое воздуха составляет для исполнения изделий ТВ, ХЛ, О, М, ОМ, В — $40 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, для исполнений ТС, У — $20 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$.

За номинальные значения факторов внешней среды при испытаниях изделий принимают следующие:

температура	$+25 \pm 10^{\circ}\text{C}$
относительная влаж-	
ность	45—80%
атмосферное давле-	
ние	84—106,6 кПа

При температуре выше 30°C относительная влажность не должна быть более 70 %.

Формулировки требований к стойкости изделий должны соответствовать типовым формулировкам требований по воздействиям климатических факторов, приведенным в ГОСТ 15150—69, и содержать характеристики:

видов климатических исполнений изделий;

требований к изделиям в части видов и номинальных значений климатических факторов. Эти требования записывают, как правило, в ссылочной форме на стандарты. Конкретные значения требований записывают в том случае, если более 50 % номинальных значений климатических факторов отличаются от нормальных значений, приведенных в табл. 37 и 38.

7. ЗАЩИТА ИЗДЕЛИЙ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Осуществление мероприятий по защите изделий от воздействия климатических факторов начинается с разработки изделия. В процессе конструирования непрерывно идет выбор того или иного решения: либо применять высококачественные элементы, либо достигать того же результата благодаря применению средств защиты. Выбор того или иного варианта определяется габаритно-весовыми характеристиками разрабатываемого изделия, требованиями по надежности, стоимостными показателями и др.

В результате глубокой проработки возможных вариантов конструкции изделий, их узлов и деталей достигается значительное ослабление воздействия внешних факторов. Высокая эффективность защиты достигается только в результате осуществления комплекса мероприятий. Выбор материалов и элементов — важная, но не единственная составляющая этого комплекса. Необходима глубокая проработка во-

просов совместимости материалов. Например, проблему контактирующих пар следует учитывать не только для металлов, но и для соприкосновения металлов с другими материалами, в особенности с пластмассами.

При выборе вида защиты выделяют материалы, обладающие высокой гигроскопичностью или склонные к концентрации влаги. Их поверхность должна быть по возможности герметичной. Этим требованиям более полно удовлетворяют термопластичные материалы. Многие прессованные детали из термоактивных пластмасс оказываются непригодными вследствие повреждений пленки, образующейся при прессовании.

Большинство неисправностей и отказов технических изделий при эксплуатации возникает в контактах металлов и металлов с пластмассами. Не все металлы и их сплавы могут надежно контактировать в сложных условиях эксплуатации.

В ГОСТ 9.005—72 указаны допустимые и недопустимые контакты различных материалов и их сплавов. Допустимость контактов установлена с учетом разности потенциалов металлов, их поляризуемости в данной среде, омического сопротивления среды и соотношения площадей металлов, находящихся в контакте.

В изделиях, предназначенных для эксплуатации в легких условиях (см. табл. 36), допустимы контакты любых металлов, кроме магниевых сплавов. Для магниевых сплавов в легких условиях допустимы следующие контакты при условии защиты грунтовыми или смазочными материалами:

с магниевыми сплавами, отличающимися по составу;

с алюминий-магниевыми сплавами (3—7 % магния);

со сплавами на цинковой основе;

с любым металлом, покрытым цинком, кадмием, хромом, оловом, толщина которых в средних по жесткости условиях эксплуатации должна быть не менее 9 мкм, для жестких и очень жестких условий — не менее 12 мкм. Для изделий, эксплуатируемых в морской воде, толщина покрытий должна быть не менее 40 мкм.

Подробная характеристика допустимости контактов металлов в изделиях, предназначенных для эксплуатации в средних, жестких и очень жестких условиях, приведена в ГОСТ 9.005—72. В средних атмосферных условиях допустимо применение контактов следующих 16 групп металлов: магний и магниевые сплавы; бериллий; алюминий и алюминиевые сплавы, содержащие и не содержащие медь; цинк и цинковые сплавы; кадмий и кадмиевые покрытия; чугун; сталь низколегированная, углеродистая; олово, оловянные и оловянно-свинцовые покрытия, припой ПОС; свинец; медь и медные сплавы; латунь; бронза; никель, никелевые сплавы и покрытия; хром, хромовые покрытия; хромистые стали; хромоникелевые стали; цирконий, циркониевые сплавы; титан, титановые сплавы; серебро, серебряные покрытия; платина, золото, родий, палладий и покрытия из них (шестнадцатая группа).

В изделиях, предназначенных для эксплуатации в средних условиях, контакты любых из перечисленных металлов, кроме магниевых сплавов, являются допустимыми при условии их размещения: в помещениях с регулируемой параметрами атмосферы при относительной влажности воздуха не выше 70 %; в закрытых помещениях сухого тропического климата, предохраняющих от резких перепадов температуры, вызывающих конденсацию влаги; в кожухах изделий с естественной или искусственной вентиляцией, эксплуатируемых на открытых площадках сухого тропического климата.

В изделиях, предназначенных для эксплуатации в морской воде, допустимо применение контактов следующих групп металлов: цинковые сплавы и покрытия; алюминий и алюминиевые сплавы; кадмий; углеродистые и низколегированные стали; низколегированные чугуны; свинец; олово; простые и специальные латуни; медь; бронзы; медноникелевые сплавы; хромистые стали; хромоникелевые стали; титановые сплавы.

При выборе контактирующих металлов необходимо руководствоваться соотношениями площадей контактируемых металлов (площадь анодного ме-

талла меньше, равна или больше площади катодного металла).

Защита от контактной коррозии должна осуществляться: электрической изоляцией (электрическим разъединением) контактирующих металлов; электрохимическими методами (катодная и протекторная защита, анодные покрытия); исключением или уменьшением агрессивного воздействия коррозионной среды (введение ингибиторов, обессоливание, обескислороживание).

Для изделий, предназначенных для эксплуатации в морской и пресной воде, следует применять комплексные методы защиты: электрохимическая защита, окраска и уплотнение зазоров; электроразъединение; применение допустимых и ограниченно допустимых контактов металлов. При конструировании изделий контакты следует располагать в местах, где условия эксплуатации менее агрессивны: отсутствуют воздействия электролита и периодическое смачивание, воздействие брызг воды.

В сварных и паяных конструкциях разность потенциалов между сварным швом и основным металлом (а также между заклепками и основным металлом) не должна превышать 30—50 мВ. Необходимо исключать возможность скапливания воды в местах контакта разнородных металлов.

Способы электрического разъединения, толщина и форма прокладок и других разъединительных деталей устанавливаются в специальных стандартах. Применяемые лакокрасочные покрытия в качестве изоляционного материала для изделий, эксплуатируемых в атмосферных условиях, следует наносить на оба контактируемых металла (допускается наносить только на катодный металл).

Электрохимическая защита от контактной коррозии применяется в случаях, когда можно осуществить электрическое разъединение контактируемых металлов. Для изделий, эксплуатируемых в морской или пресной воде, электрохимическая защита контактов металлов осуществляется с помощью протекторов (магнелиевые сплавы, цинк, сплавы алюминия с цинком, сталь), которые присоединяются к контактной паре. Марка металла-протектора, его

конструкция и форма определяются местом установки протектора и сроком службы изделия. При эксплуатации в средних, жестких и очень жестких условиях, а также в морской и пресной воде защиту контактов осуществляют посредством их изоляции от воздействия внешней среды (применение лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков, шпатлевок). Применяют специальную обработку коррозионной среды посредством снижения концентрации соли и кислорода, введением ингибиторов коррозии.

Степень защищенности изделия от воздействия внешних факторов существенно зависит от выбора формы детали. Например, следует избегать острых краев у металлических деталей, так как коррозия прежде всего начинается на краях. Применяя склеивание металлических деталей, следует иметь в виду, что соединения высококачественными клеями не всегда стойки к воздействиям влажной и теплой окружающей среды.

При монтаже изделий следует учитывать климатические условия на рабочем месте. Работы должны проводиться при более низкой температуре, чем точка росы, а детали, подлежащие герметизации, должны быть высушены. Если этого не сделано, то при колебаниях температуры образуется конденсат внутри герметизированного блока, что может стать причиной серьезных повреждений. При конструировании необходимо придавать большое значение теплоотдаче, используя все возможности, а именно лучеиспускание, теплопроводность, конвекцию. Например, лучеиспускание можно существенно регулировать посредством окраски. Конструкция изделия должна быть выполнена так, чтобы возникающие в результате нагрева воздушные потоки не встречали препятствий.

Защита изделий от воздействия влажно-теплого комплекса. Все изделия подвержены воздействию климатических факторов. Последствия воздействия зависят от их уровня, продолжительности, качества материалов, из которых изготовлены изделия, и примененных мер защиты от внешних факторов. Методы защиты изделий весьма разнообразны. Однако абсолютная за-

щита изделий от внешних факторов практически недостижима. В качестве наиболее близкого достижения абсолютной защиты рассматривают применение герметичных кожухов (подобных герметичным кожухам, применяемым в крупном трансформаторостроении).

Защита металлических изделий. Применяемые методы защиты этих изделий должны обеспечить исключение коррозии металлов. Одним из простейших методов защиты металлов является полирование их поверхностей. Для получения качественной поверхности с помощью полирования и шлифования необходимо учитывать свойства материалов металлов.

В промышленном производстве получили самое широкое применение искусственные шлифовальные средства. Применяют в основном следующие материалы: для стали — электрокорунд (60—95% окиси алюминия и окиси железа, кремния и титана), для чугуна — карбид кремния (кристаллический SiC), для твердых металлов — карбид бора (более 90% B_4C), для очень тонкого шлифования твердых металлов — алмаз.

Для защиты металлов от коррозии необходимо блокировать химическую реакцию между металлом и окружающей средой. Способность металла переходить в данной среде в раствор характеризуется электрохимическим потенциалом металла. Если в данной среде электрохимический потенциал металла детали (анодное покрытие) выше, чем у покрытия, то покрытие защищает деталь даже при нарушении целостности слоя, потому что покрытие является растворимым электродом и скорее подвергается разрушению, чем металл детали. Если в данной среде электрохимический потенциал покрытия больше, чем электрохимический потенциал металла детали (катодное покрытие), то покрытие защищает деталь только механически до момента его оголения.

Защитные свойства и продолжительность срока службы анодных покрытий зависят в основном от их толщины, а катодных — от толщины и пористости. Для беспористого покрытия толщина медного подслоя должна быть не

менее 20 мкм; для покрытия никелем — 15 мкм; хромом — 0,5 мкм.

Для реализации рекомендаций по защите изделий и деталей необходимо учитывать следующие положения.

При защите магнитопроводов встречаются следующие трудности: покрытие сердечника влияет на магнитные характеристики (изменяется сила притяжения якоря); покрытие кадмием уменьшает силу притяжения по сравнению с непокрытым сердечником; меньшие качественные потери дает покрытие никелем.

Крепежные изделия (диаметром более 6 мм) для средних условий эксплуатации можно защищать беспористым хромовым покрытием с толщиной слоя 12—10 мкм, никелем с подслоем меди (меди 6 мкм, никеля 6 мкм) или кадмия с последующим хромированием.

Не рекомендуется наносить гальванические покрытия на пружины, так как это делает их ломкими.

Для защиты от коррозии деталей из меди и медных сплавов, особенно при содержании меди менее 62 %, рекомендуется применять никелирование и хромирование.

Для стальных деталей можно применять трехслойное покрытие: медь—никель—хром. Толщину слоя хрома для деталей, предназначенных к применению в тяжелых условиях, следует увеличить до 2,5 мкм. При кадмировании стальных деталей следует применять покрытие бесцветным лаком СБ-1 с горячей сушкой в течение 2 ч при температуре 150 °С.

Лакокрасочные покрытия. Лакокрасочное покрытие придает изделию красивый вид и одновременно служит для защиты от влаги. Лакокрасочные покрытия применяют тогда, когда на детали нет точных допусков и когда они не подвержены трению.

Для окраски применяют лаки, краски и эмали, получаемые на основе растительных и синтетических пленкообразных веществ. Для улучшения качества покрытия осуществляют пигментирование лаков (введение в лаки пигментов, например, двуокиси титана рубиновой модификации).

Для обеспечения требуемой защиты изделий с помощью лакокрасочных

покрытий необходимо по специальной технологии подготовить поверхность защищаемой детали, выбрать шпатлевку, грунт и режим сушки покрытия.

В ГОСТ 9.074—77 приведены технические требования и перечни разрешенных к применению лакокрасочных покрытий: перечень эмалей, лаков, красок, грунтовок и шпатлевок; перечень грунтовок, применяемых для металлов; перечень допустимых сочетаний грунтовок и шпатлевок с эмалями; перечень лакокрасочных материалов и их сочетания для древесины и древесных материалов; перечень допустимых сочетаний лаков, эмалей, красок с грунтовками и шпатлевками. Требования по стойкости перечисленных лакокрасочных покрытий к воздействию условий эксплуатации приведены в табл. 39.

В качестве защиты изделий при работе в жестких климатических условиях наносят покрытие из двух, трех или четырех слоев эмали (лака).

Для покрытия радиодеталей, применяемых в радиоэлектронной и электротехнической аппаратуре, широкое применение получили эпоксидные и кремнийорганические лаки и эмали. Они обладают высокими электроизоляционными свойствами, исключительной влагостойкостью и способностью работать при высоких температурах.

Защиту поверхности от влаги осуществляют обычно с помощью глянцевых эмалей. Для защиты от климата свободной атмосферы необходимо применять только эмали, содержащие светостойкие пигменты. Для разбавления эмалей служат специальные разбавители.

Рассматривая вопросы защиты изделий с помощью лакокрасочных покрытий, необходимо учитывать следующие положения:

эффективность защиты в значительной степени повышается, если при заданной толщине покрытия наносить несколько слоев тонких пленок вместо одной толстой;

в условиях тропиков хорошо зарекомендовали себя алкидно-акриловые эмали марки АС совместно с грунтами марки ФЛ;

эпоксидные и кремнийорганические лаки и эмали обладают высокими электроизоляционными свойствами.

39. Требования по стойкости лакокрасочных покрытий (по ГОСТ 9.407—84)

Стойкость покрытий	Балл по ГОСТ 9.407—84, не более	
	по декоративным свойствам	по защитным свойствам
К воздействию температуры, влажности, солнечного излучения, сернистого газа	3	1
К воздействию температуры, влажности и солнечного излучения	3	1
К воздействию температуры, влажности и сернистого газа	2	1
К воздействию температуры и влажности	2	1
К непродолжительному воздействию температуры, влажности и солнечного излучения	2	1

Высокой электрической прочностью порядка 9 кВ и сопротивлением изоляции 10^9 — 10^{10} Ом обладают покрытия эпоксидной эмалью марки ЭП без грунта или по грунту при общей толщине 170 мкм;

для повышения степени защиты изделий в тропических условиях на покрытие наносят предохранительный состав на основе высокоплавкого синтетического церезина при добавлении раствора бутилкаучука или полиизобутилена.

В радиотехнической практике, кроме рассмотренных выше, применяют еще ряд методов защиты изделий от воздействия влаги, в частности, защиту с помощью гидрофобной поверхности, пропитку изоляционными материалами, заливку смолами и компаундами, опрессовку изоляционными материалами и вакуумплотную герметизацию.

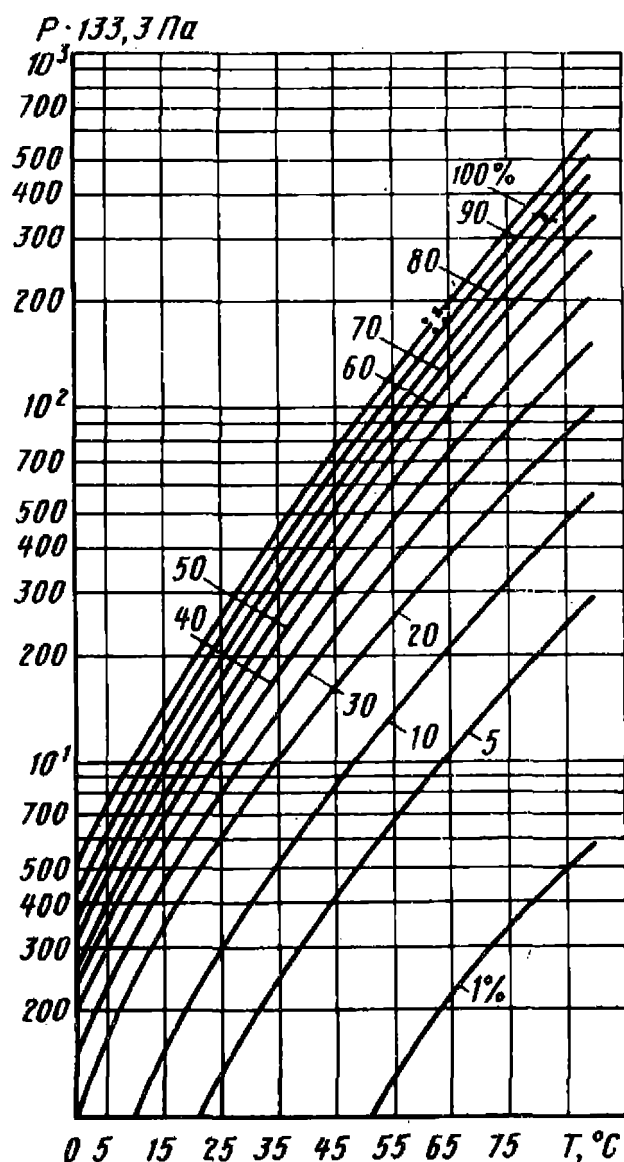


Рис. 17. Зависимость давления водяных паров от температуры при различных значениях относительной влажности

Для того чтобы сделать поверхность гидрофобной, ее покрывают специальными гидрофобизирующими веществами, препятствующими проникновению влаги внутрь изделия. Например, хорошие результаты повышения влагостойкости гетинакса получают в результате гидрофобизации эпоксидной смолой без пластификатора.

Пропитку изоляционными материалами применяют не только для повышения влагостойкости, но и для повышения сопротивления изоляции. В качестве пропиток широко применяют компаунды из акриловых смол, а также эпоксидную смолу. Компаунды на

основе стирола и полиэфирных смол обладают высокими влагозащитными свойствами.

Полиэфирные пропиточные составы сохраняют цементирующую способность в процессе длительного воздействия температуры до $+180^{\circ}\text{C}$.

Компаунды на основе эпоксидной смолы и полиорганосилоксанов могут быть использованы в интервале температур от минус 60°C до плюс 200°C . Этот компаунд рекомендуется для пропитки трансформаторов.

В качестве пропиточных материалов применяют трансформаторное и конденсаторное масла, конденсаторный вазелин, совол, касторовое масло, жидкий полиизобутилен, фторорганические и кремнийорганические жидкости. Совол и касторовое масло относят к полярным пропиточным материалам, имеющим большую зависимость удельного объемного сопротивления, диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от температуры. Ценными свойствами обладают жидкие фторизованные углеводороды, применяемые для пропитки малогабаритных трансформаторов. К положительным свойствам этих жидкостей относят весьма малый и постоянный до частот порядка 10^7 Гц угол потерь, малую диэлектрическую проницаемость, невоспламеняемость. Жидкий полиизобутилен относят к низкомолекулярным материалам. Конденсаторы, пропитанные жидким полиизобутиленом, имеют значительно более высокие показатели надежности, чем пропитанные конденсаторным вазелином.

Время эффективной защиты, ч, оболочки из неполярного органического материала можно подсчитать по формуле [4]

$$t = \frac{4hd^2}{\pi^2\rho} \ln \frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{P_k}{P_0} \right),$$

где h — коэффициент растворимости влаги в материале оболочки, $\text{г}/(\text{см}^3 \times \text{ч})$; d — толщина оболочки, см; ρ — коэффициент влагопроницаемости материала, $\text{г}/(\text{см} \cdot \text{ч})$; P_k , P_0 — давление паров воды соответственно внутри и снаружи оболочки.

На рис. 17 приведена зависимость давления водяных паров от темпера-

туры. С помощью этих данных легко определить по относительной влажности давление паров воды (P , Па) и абсолютную влажность, выраженную (при взятом масштабе) в мг/л или г/м³.

На рис. 18 приведены данные об изменении сопротивления изоляции различных видов покрытий. Покрытие эпоксидной смолой сохраняет самое высокое поверхностное сопротивление изоляции.

При заливке сборок имеется опасность проникновения влаги через поверхность раздела заливочной массы и металла выводов, особенно при изменении температуры. Для предотвращения этого явления применяют заливочные массы, которые при усадке плотно обжимают и смачивают металл. Этими же свойствами обладают эпоксидные смолы.

Применяя заливочные компаунды, необходимо учитывать, что отдельные из них могут химически взаимодействовать с материалом, из которого сделана деталь. Ниже приводятся отдельные положения, которые следует учитывать при выборе компаундов.

Перечни пластмасс для изделий, предназначенных для эксплуатации в различных макроклиматических районах по ГОСТ 15150—69, приводятся в специальных государственных стандартах Союза ССР, разработанных в единой системе защиты от коррозии и старения. В частности, в ГОСТ 9.703—79 приведен перечень и даны характеристики пластмасс, предназначенных для эксплуатации в районах с тропическим климатом. При выборе пластмасс учитывают виды исполнения и категории размещения изделий и стойкость пластмасс к старению в условиях тропического климата. Стойкость пластмасс к воздействию одного или нескольких климатических факторов определяют по следующим показателям: грибоустойчивости; коэффициенту сохранения свойств (K), определяемому по изменению показателей физико-механических свойств; изменению показателей электрических свойств и внешнего вида.

Расчет показателей защиты изделий от тепловых воздействий. Применение рассмотренных выше методов защиты изделий от воздействия температурно-влажностного комплекса будет эффек-

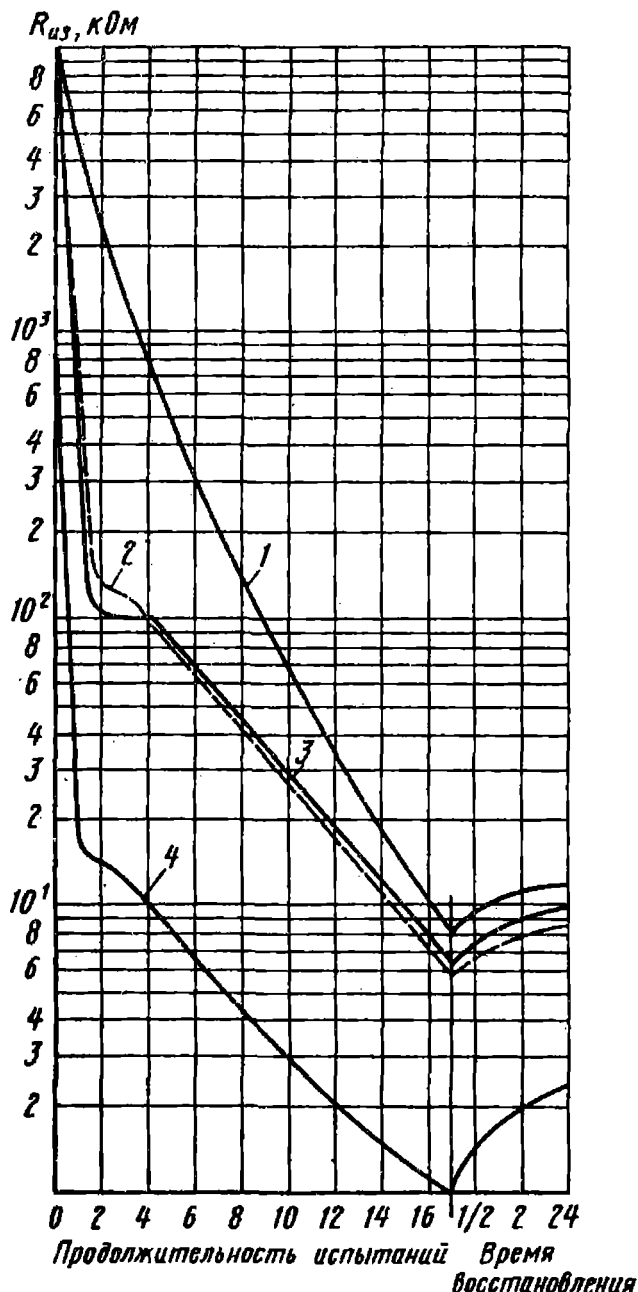


Рис. 18. Сопротивление изоляции $R_{из}$ различных покрытий:

1 — эпоксидная смола; 2 — перхлорвиниловый лак; 3 — фенольный лак; 4 — эпоксидный лак

тивным, если при их реализации учитываются основные законы теплообмена.

С позиций теплофизики многие виды технических изделий представляют собой устройства, преобразующие энергию первичных источников питания в тепловую. Перенос тепла от горячего тела к холодному (или к окружающей среде) происходит вследствие теплопроводности, конвекции и теплового излучения. При оценке всех трех видов теплообмена используют соотношение

$$\Phi = \alpha S \Delta \theta,$$

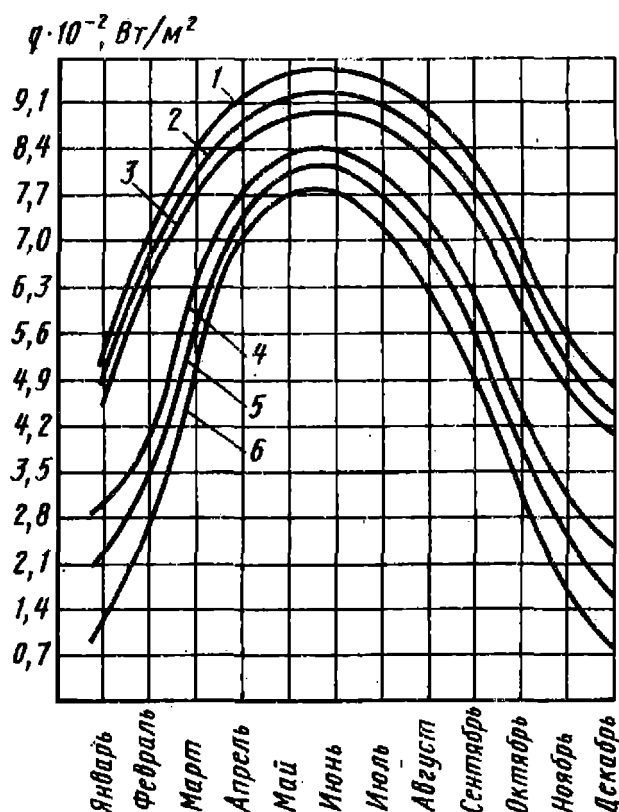


Рис. 19. Характеристика ежемесячных максимумов и минимумов поверхностной плотности потока излучения q по климатическим районам:

1 — Ак-Молле; 2 — Ташкент; 3 — Сухуми; 4 — Улан-Удэ; 5 — Москва; 6 — Якутск

где α — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К), для теплопроводности α_T , конвекции α_K , излучения α_L ; S — площадь поверхности теплообмена, м²; $\Delta\theta$ — перепад температур между двумя изометрическими поверхностями в теле или между двумя телами.

Непосредственное применение этого уравнения для расчетов затруднено из-за больших методических и математических трудностей. Поэтому тепловые расчеты осуществляют, опираясь на приближенные аналитические, численные и графоаналитические методы и методы аналогии.

Расчет теплопроводности. Заменив $\alpha_T = \lambda/\delta$, получим для плоской стенки $\Phi = \lambda S \Delta\theta/\delta$, где Φ — тепловой поток, отводимый вследствие теплопроводности, Вт; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м²·К); S — поверхность, через которую осуществляется перенос тепла вследствие теплопроводности, м²; $\Delta\theta$ — перепад температур между изотермическими по-

верхностями, °С; δ — толщина стенки, м.

При расчетах переноса тепла вследствие теплопроводности по аналогии с переносом электрического заряда пользуются понятиями тепловой проводимости $\sigma = \lambda S/\delta$ и теплового сопротивления $r = \delta/\lambda S$. Значения параметра λ для характерных материалов и оценочных расчетов следующие:

λ , Вт/(м²·К)

Алюминий	200
Медь	380
Латунь	105
Сталь низкоуглеродистая	45
Гетинакс	0,17
Слюда	0,5
Текстолит	0,27

Конвекция. Конвективный коэффициент α_K является функцией многих переменных. Поэтому решение уравнения для непосредственного определения теплового потока вследствие конвекции практически сложно. Задача решается на основе теории подобия и моделирования. Математическую связь между множеством определяющих α_K параметров представляют в виде соотношения, состоящего из двух—пяти критериев Nu , Gr , Pr . Тогда

$$\Phi = f(Nu, Gr, Pr)/S \Delta\theta,$$

где Nu , Gr , Pr — обобщенные безразмерные параметры, называемые критериями Нуссельта, Грасгофа и Прандтля. Критерий Nu характеризует соотношение интенсивностей конвективного теплообмена и теплопроводности в пристеночном слое жидкой или газообразной среды; Gr — характеризует соотношение подъемной и вязкой сил при свободной конвекции в потоке жидкости (или газа); Pr — характеризует физические свойства среды.

Тепловой поток. Формула для потока Φ при коэффициенте α_L имеет вид

$$\Phi = \epsilon_{пр} \Phi_{1,2} f(\theta_1, \theta_2)/S \Delta\theta,$$

где $\epsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты (для алюминия $\epsilon_{пр} = 0,03$; для сильноокисленного алюминия — 0,14; для дюралюминия Д16 — 0,25; для силуминовых отливок — 0,14; для лаков

и красок разных цветов $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,78 \div 0,94$; φ_1, φ_2 — коэффициенты облученности, показывают, какая часть энергии, излученная телом 1, попадает на тело 2; $f(\theta_1, \theta_2)$ — функция, устанавливающая связь между температурами тела 1 и тела 2 при излучении: $f(\theta_1, \theta_2) = 0,227 [0,005(\theta_1 + \theta_2)]^3$ Вт/(м²·К).

Пример. Два тела в виде прямоугольных пластин из дюралюминия Д16 с параметрами $S = 0,02$ м²; $L_1 = 0,1$ м; $\delta = 0,05$ м; $\Delta\theta = 60$ К ($\theta_1 = 350$ К, $\theta_2 = 290$ К) находятся в режиме лучевого теплообмена. Определить тепловой поток Φ , передаваемый от пластины 1 к пластине 2.

Решение. $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,25$; $\varphi_{1,2} = 0,5$ [4]. Тогда

$$f(\theta_1, \theta_2) = 0,227 [0,005(350 + 290)]^3 = 7,44;$$

$$\Phi = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 7,44 \cdot 0,02 \cdot 60 = 1,11 \text{ Вт.}$$

Для иллюстрации особенностей оценки тепловых режимов работы (условий) рассмотрим последовательность расчета тепловых условий работы изделий и их составных частей.

Изделия расположены на поверхности объекта. Характеристиками, определяющими тепловые воздействия на объект и его составные части, размещаемые на внешней поверхности объекта в наземных условиях, являются температура среды и тепловые потоки солнечной радиации. Характеристики ежемесячных максимумов и минимумов поверхностной плотности потока излучения по климатическим районам приведены на рис. 19.

Характеристики интегральной солнечной радиации, приведенные на рисунке, вычислены по максимальным среднечасовым значениям радиации, приходящимся на 12 ч 30 мин самых теплых суток месяца. На основе этих данных определяются максимальные и эффективные значения температуры окружающей объект среды, которые предъявляются в качестве требований к изделиям, размещаемым на внешней поверхности наземных объектов.

Для изделий, размещаемых на внешней поверхности летательных аппара-

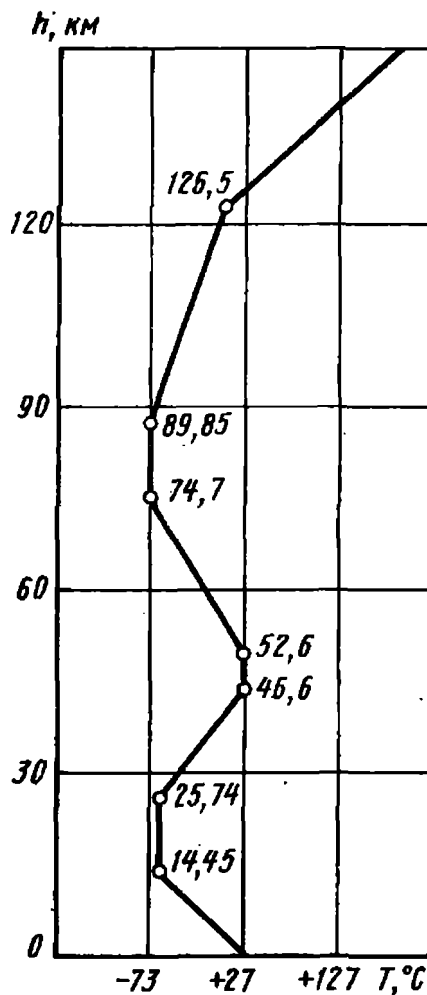


Рис. 20. Изменение температуры атмосферы в зависимости от высоты h

тов, тепловое воздействие зависит от высоты и скорости полета объекта, его конфигурации. С ростом высоты структурные параметры атмосферы (температура, плотность, давление) изменяются. На рис. 20 показан характер изменения температуры атмосферы в зависимости от высоты.

Влияние температуры и других параметров газовой среды на температуру объекта с ростом высоты полета от 90 км и выше снижается вследствие значительного уменьшения концентрации частиц. На высотах выше 200 км основной вклад в тепловой режим объекта вносит лучистый теплообмен, вследствие чего характеристиками внешнего теплового воздействия являются тепловые потоки прямого и отраженного излучения и собственного излучения Земли.

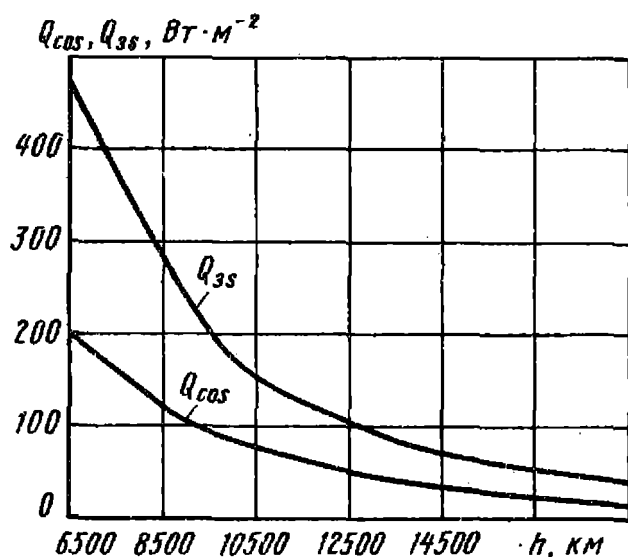


Рис. 21. Зависимость потоков Q_{cso} , Q_{3s} от высоты h

Поток прямого солнечного излучения на участок поверхности объекта определяется соотношением

$$Q_c = Q_0 \cos \alpha,$$

где $Q_0 = 0,14 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ — солнечная постоянная; α — угол между нормалью к участку поверхности и направлением на Солнце.

Поток отраженного солнечного излучения

$$Q_{co} = A Q_0 \sum_{i,j,k,e} a_{ijke} \psi^i \vartheta^j \gamma^k \xi^e,$$

где A — альбеда Земли, $A = 0,35$; $i = 0, 1, 2, 3$; $j = 0, 1, 2, 3$; $k = 0, 1, 2, 3$; $e = 0, 1, 2, 3$; a_{ijke} — коэффициенты аппроксимирующего полинома; ψ_i — угол между нормалью к участку поверхности объекта и направлением Земля — объект; ϑ — относительный азимутальный угол Солнца; γ — зенитный угол Солнца в подспутниковой точке.

Расчет потока Q_3 собственного излучения земли можно проводить по формуле

$$Q_3 = Q_{30} \sum_{i,k,e} b_{ike} \psi^i \xi^e,$$

где $Q_{30} = 0,0221 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; b_{ike} — коэффициенты внутри полинома.

Изделия расположены внутри объекта. Для изделий, размещаемых внутри объектов, уровни тепловых воздействий определяются местом их размещения и тепловой связью со средой,

которая определяется тепловыми потоками солнечного прямого Q_{cs} и отраженного Q_{cos} излучения, собственного излучения земли Q_{3s} и от воздействия газовой среды.

На рис. 21 показана зависимость потоков Q_{cos} , Q_{3s} от высоты.

При определении тепловых условий эксплуатации изделий следует учитывать и параметр связи, характеризующий термическим сопротивлением между поверхностью конструктивных частей изделия и средой в отсеке объекта.

В этом случае средняя температура поверхности изделия внутри объекта

$$T_{\Pi} = T_{cp} + R_{a-0} Q_{\Pi},$$

где Q_{Π} — плотность рассеиваемой блоком мощности, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.

В стационарных условиях

$$Q_{\Pi} = \frac{S_r}{S_{\Pi}} \alpha_{конв} (T_{\Pi} - T_{cp}) + \frac{S_r}{S_{\Pi}} \alpha_{луч} (T_{\Pi} - T_{cp}) + \frac{S_k}{S_{\Pi}} \lambda_{\Pi} \frac{T_{\Pi} - T_{cp}}{\delta},$$

где S_{Π} — полная поверхность изделия; S_r , S_k — поверхности изделия, граничащие соответственно с газовой средой и конструктивными частями объекта; $\alpha_{конв}$, $\alpha_{луч}$ — коэффициенты соответственно конвективного и лучистого теплообмена; λ_{Π} — коэффициент теплопроводности конструктивных частей, соприкасающихся с поверхностью изделия; δ — длина конструктивной части отсека объекта, на которой происходит падение температуры от T_{Π} до T_{cp} .

Составные части (элементы) изделий.

Внешними факторами, определяющими тепловые воздействия на элементы изделий, являются температура $T_{с-и}$ среды в изделии и термосопротивление $R_{и-с}$ между элементами и средой в изделии.

Поле температур в изделиях при заданной температуре поверхности изделия определяется путем решения уравнения теплопроводности.

Превышение температуры $T_{с-и}$ наиболее нагретой зоны над температурой поверхности изделия без принудительного охлаждения определяется из со-

отношения $\Delta T_{c-n} = k\Delta T_{n-o}$, где $k = 1$ для случая, когда тепловыделяющие элементы изделия рассредоточены по шасси; $k = 2,5$ для случая сосредоточенного расположения тепловыделяющих элементов.

Например, для оценки правильности конструирования электро- и радиотехнической аппаратуры определяется термосопротивление между наиболее нагретой зоной и кожухом блока R_{c-n} в соответствии с зависимостью $R_{c-n} = \Delta T_{c-n}/Q_n$.

Максимальную и минимальную температуру поверхности элементов аппаратуры определяют по формулам:

$$T_{o \max} = T_{c-n \max} + \Delta T_{c-n};$$

$$T_{o \min} = T_{c-n \min},$$

где $\Delta T_{c-n} = R_{a-c}q_{\max}$ — плотность номинальной мощности, рассеиваемой элементами блока.

Максимальную и минимальную температуру среды в блоке аппаратуры определяют по формулам:

$$T_{c-n \max} = T_{cp \max} + \Delta T_{cp};$$

$$T_{c-n \min} = T_{cp \min},$$

$$\text{где } \Delta T_{cp} = Q_n (R_{c-n}^* + R_{n-o}^*);$$

$T_{cp \min}$, $T_{cp \max}$ — температура среды в зонах объекта.

Особенности расчета тепловой защиты изделий различного конструктивного исполнения изложены в [4].

Защита изделий от воздействия плесневых грибов. Основным методом защиты можно считать химический метод — применение специальных ядов в качестве фунгисидов, т. е. веществ, умертвляющих плесень, и фунгистатических веществ, приостанавливающих рост плесени.

Универсальных фунгисидов и фунгистатических веществ не существует, каждое из отравляющих веществ действует на определенные разновидности плесени.

По составу различают органические фунгисиды, неорганические и металлоорганические.

Органические фунгисиды — составы на основе хлора, фенола, нитрофенола. Неорганические фунгисиды — соли меди, ртути, цинка и хрома.

Металлоорганические фунгисиды — соединения с медью, цинком, ртутью применяют для предотвращения гниения.

Для защиты деревянных изделий применяют лакоантисептические покрытия с препаратами трихлорфенолата меди, окислинолята меди, фенолмеркуролеата салициланилида и хлордана. При контакте дерева с землей применяют автоклавную пропитку в препаратах таналита, хемонита, нафитаната меди. Для этих целей широко применяют препарат «Селькур» в виде водного раствора состава:

медный купорос	5—6 %
хромпик	5—6 %
уксусная кислота (ледяная)	1—0,5 %
вода	остальное

В табл. 40 приведена эффективность пропиточных составов древесины.

Составы, содержащие медь, нельзя применять для пропитки деревянных изделий и аппаратуры, имеющей резиновые элементы (медь окисляет резину). Материалы, содержащие ртуть (фенил ртути, пиридил ртути и т. п.), нельзя помещать вблизи селеновых шайб.

Фунгисиды — кремнефтористый натрий, оксиды — фенил, паранитрофенол, пентахлорфенолет натрия — предохраняют бумагу и подобные ей материалы от воздействия плесневых грибов при следующих концентрациях:

пентахлорфенолет меди	при концентрации 5 %
пентахлорфенолет натрия	при концентрации 2,3 и 5 %
трихлорфенолет	при концентрации 5 %

В табл. 41 приведены данные о применении фунгисидов.

40. Эффективность пропиточных составов

Защитный материал	Средняя продолжительность «жизни» образца, лет	Защитный материал	Средняя продолжительность «жизни» образца, лет
Каменноугольный креозит	15,3	Арсенат никеля	15,5
Галован	13,9	Бихромат натрия	2,2
Фтористый натрий	2,0	Кремнефтористый натрий	4,2
Бура	2,2	Белый мышьяк	3,2

41. Рекомендации по применению фунгисидов

Фунгисид	Применяемая концентрация, %	Защищаемые материалы
Пентахлорфенол (натриевая соль и эфир)	2—5	Лаки, краски, древесина (при концентрации 5 % эффективен также против термитов), картон, бумага, прессшпан, вулканизированная фибра
Оксихинолят меди	0,1—0,5	Пресс-масса, ацетилцеллюлоза, ацетобутират целлюлозы, нитрат целлюлозы, мягкий поливинилхлорид
Салициланилид	2—5	Ацетат целлюлозы, ацетобутират целлюлозы, нитрат целлюлозы, пресс-масса на фенольной смоле, лаки, краски
Фенолортутные соединения (хлориды, бромиды, стеариты и др.)	0,1	Мягкий поливинилхлорид, ацетат целлюлозы, нитрат целлюлозы

Приложение

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

В результате обобщения данных о климатических условиях эксплуатации объектов техники установлено, что характер изменения основных климатических факторов во времени с достаточным приближением можно считать стационарным случайным процессом. В этом случае изменение температуры воздуха можно представить в виде

$$T(t) = \bar{T}(t) + \psi(t), \quad (1)$$

где $\bar{T}(t)$ — среднее значение температуры, °C; $\psi(t)$ — случайная составляющая температуры, °C, соответствующая времени t .

Анализ результатов обработки срочных наблюдений приземной температуры в различных географических пунктах показал, что математическое ожидание температуры можно записать в виде гармонической функции, включающей сумму нескольких составляющих [14]:

$$\bar{T}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n (A_i \cos \omega_i t - B_i \sin \omega_i t), \quad (2)$$

где A_0 — коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой температуры; A_i , B_i — амплитуды колебаний математических ожиданий температуры, соответствующие частоте ω_i (i изменяется от 1 до n).

Коэффициенты A_0 , A_i , B_i и частоты ω_i находят на основе использования

интегрального преобразования Фурье.

Случайная составляющая $\psi(t)$ распределена по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю.

При анализе случайных процессов изменения температуры необходимо учитывать, что они являются стационарными процессами, обладающими свойством эргодичности. В этом случае дисперсия и среднее квадратическое отклонение случайного процесса являются величинами постоянными на всем интервале наблюдения, а корреляционную функцию $R(t)$ можно найти по одной реализации.

Среднее квадратическое отклонение фактора

$$S_T = \sqrt{R(0)}. \quad (3)$$

Анализ климатических условий показал, что изменение относительной влажности $\phi(t)$ зависит от температуры и ряда других климатических факторов, поэтому для определения изменений влажности во времени необходимо полученную информацию об относительной влажности обрабатывать за тот же период и по тем же сечениям (точкам), что и при получении статистических характеристик случайного процесса $T(t)$. В этом случае полученную зависимость $\phi(t)$ можно рассматривать так же, как стационарный случайный процесс, обладающий эргодическим свойством и распределенный по нормальному закону. По аналогии с (2) математическое

ожидание процесса можно записать в виде

$$\varphi(t) = C_0 + \sum_{j=1}^n (C_j \cos \omega_j t + D_j \sin \omega_j t), \quad (4)$$

где C_j , D_j и частоты ω_j определяют так же, как и A_i , B_i , ω_i с использованием интегрального преобразования Фурье.

В приведенных зависимостях (2) и (4) время измеряется в часах: начало года условно соответствует $t = -4380$, а конец — $t = 4380$ ч.

Значения коэффициентов A_i , B_i , C_j , D_j определяют из соотношений:

$$A_0 = \frac{2}{\theta} \int_0^{\theta} T(t) dt -$$

среднее значение функции $\bar{T}(t)$ за период;

$$A_i = \frac{2}{\theta} \int_0^{\theta} T(t) \cos \omega_i t dt;$$

$$B_i = \frac{2}{\theta} \int_0^{\theta} T(t) \sin \omega_i t dt;$$

$\omega_1 = \frac{2\pi}{\theta}$ — основная частота (первая гармоника); $\omega_i = i\omega_1 = i \frac{2\pi}{\theta}$ — кратная частота (частота i -й гармоники), $i = 1, 2, \dots, n$.

Формулы (2) и (4) можно записать в виде

$$\bar{T}(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} E_i \cos(\omega_i t - \varphi_i), \quad (5)$$

где $E_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}$ — амплитуда i -й гармоники; $\varphi_i = \arctg \frac{B_i}{A_i}$ — фазовый сдвиг i -й гармоники.

Приведем оценки параметров случайного стационарного процесса, об-

ладающего эргодическим свойством. Оценка математического ожидания

$$m_T^* = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} T(t) dt, \quad (6)$$

где θ — период колебания случайной функции $T(t)$.

Оценка дисперсии

$$D_T^* = \sigma_T^{*2} = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} T^2(t) dt - m_T^{*2}, \quad (7)$$

где σ_T^{*2} — оценка среднего квадратического отклонения.

Оценка корреляционной функции

$$R_T^* = \frac{1}{\theta - \Delta t} \int_0^{\theta - \Delta t} [T(t + \Delta t) - m_T^*][T(t) - m_T^*] dt. \quad (8)$$

Оценка нормированной корреляционной функции

$$\rho_T^*(\Delta t) = \frac{R_T^*(\Delta t)}{\sigma_T^{*2}}. \quad (9)$$

С помощью функции $\rho_T^*(\Delta t)$ можно оценить максимальное время корреляции θ_0 (интервал корреляции), т. е. время, при котором величины $T_1(t)$ и $T_2(t)$ при $t_1 - t_2 \geq \theta_0$ практически можно считать независимыми.

Величину θ_0 определяют из соотношения

$$|\rho_T^*(\Delta t)| \leq 0,05 \text{ при всех } \Delta t \geq \theta_0. \quad (10)$$

Оценка функции распределения значений случайного процесса $T(t)$ в любой момент времени t (мгновенных значений)

$$F_{\text{мгн}}^*(T) = \frac{t_T}{\theta}, \quad (11)$$

где t_T — суммарное время, в течение которого

$$T(t) \leq T$$

или

$$F_{\text{мгн}}^*(T) = \frac{n_T}{N}, \quad (12)$$

П1. Значения коэффициентов для районов умеренного климата (Москва)

t_0	A_t	B_t	ω_t	t_0	A_t	B_t	ω_t
0	4,65	—	—	13	0,12	—0,19	0,02366958
1	13,46	3,52	0,00071726	14	—0,20	0,07	0,03371122
2	2,27	0,90	0,26180000	15	—0,14	—0,16	0,01506246
3	—0,49	0,20	0,00215178	16	—0,10	0,16	0,02223506
4	0,32	—0,16	0,00430356	17	—0,16	—0,09	0,26323442
5	0,30	0,05	0,01004164	18	—0,17	—0,03	0,03155944
6	0,16	0,25	0,00860712	19	0,12	—0,12	0,01864876
7	—0,16	—0,25	0,00645534	20	—0,05	—0,16	0,03944930
8	0,18	—0,23	0,02510410	21	0,13	—0,11	0,06455340
9	—0,15	—0,25	0,01219342	22	0,14	0,09	0,04016656
10	—0,27	—0,09	0,00788986	23	0,15	—0,07	0,01362794
11	—0,10	0,23	0,00502082	24	0,16	0,03	0,03801478
12	0,07	0,23	0,00573808	25	0,12	0,10	0,03586300

П2. Среднее квадратичное отклонение

Представительный пункт	$\sigma_T, ^\circ\text{C}$	Представительный пункт	$\sigma_T, ^\circ\text{C}$
Диксон	5,6	Рига	5,1
Оймякон	6,0	Калининград	3,6
Якутск	6,4	Одесса	5,1
Улан-Удэ	6,1	Батуми	3,0
Москва	5,0	Астара	3,0
Владивосток	3,6	Ташкент	4,5
Курильск	3,4	Ашхабад	5,0
Минск	5,3	Термез	4,2
Ростов-на Дону	4,3		

где n_T — число точек, лежащих ниже уровня T ; N — число точек наблюдения на интервале времени $(0, \theta)$.

Оценка функции распределения пиковых значений процесса $T(t)$

$$F^*_{\text{пик}}(T) = \frac{n_{\Delta T}}{N_{\text{пик}}}, \tag{13}$$

где $n_{\Delta T}$ — число пиковых точек $T(t) \leq T$; $N_{\text{пик}}$ — суммарное число пиковых точек на интервале времени $(0, \theta)$.

Оценка плотности вероятности мгновенных значений процесса

$$\rho^*_{\text{мгн}}(T) = \frac{n_{\Delta T}}{N} \frac{1}{\Delta T}, \tag{14}$$

П3. Составляющие математического ожидания относительной влажности для районов умеренного климата (Москва)

l	C_l	D_l	ω_l
0	75,2	—	—
1	—9,7	—3,1	0,26180000
2	—7,9	5,4	0,00071726

где $n_{\Delta T}$ — число точек, лежащих в интервале $(T, T + \Delta T)$; ΔT — длина интервала $(T, T + \Delta T)$.

П4. Среднее квадратическое отклонение влажности

Представительный пункт	σ_{φ} , %	Представительный пункт	σ_{φ} , %
Диксон	7,3	Рига	12,8
Якутск	13,6	Калининград	10,6
Оймякон	10,2	Одесса	14,2
Улан-Удэ	16,1	Батуми	16,3
Москва	11,9	Астара	12,1
Владивосток	15,8	Ташкент	17,8
Курильск	12,5	Ашхабад	17,1
Минск	12,9	Термез	16,3

П5. Статистические параметры распределения относительной влажности

Пункт		Статистические характеристики относительной влажности воздуха, %			
		Среднее значение за год	Стандартное отклонение	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Арктический	Андерма	87	9,3	—	—
	Диксон	88	8,4	—	—
	Тикси	82	10,1	—	—
	Ванкара	88	8,8	—	—
Очень холодный	Якутск	67	18,0	—0,71	—0,11
	Оймякон	71	16,5	—0,86	0,42
	Салехард	80	11,9	—0,87	0,89
Холодный	Тюмень	74	18,3	—0,76	—0,27
	Улан-Удэ	66	19,2	—0,62	—0,42
Умеренный	Москва	76	17,2	—0,87	—0,02
	Мурманск	79	14,4	—1,04	0,90
Умеренно влажный	Владивосток	73	21,0	—0,43	—0,98
Умеренно теплый	Минск	80	16,7	—1,0	0,23
	Рига	80	15,6	—0,95	0,26
	Таллинн	82	13,1	—1,0	0,75
	Калининград	81	14,6	—1,04	0,62
Умеренно теплый, влажная зима	Одесса	76	17,0	—0,61	—0,40
	Новороссийск	72	16,2	—0,69	—0,20
Теплый влажный	Батуми	79	14,8	—1,31	1,89
	Астара	81	13,8	—1,29	1,87
Жаркий сухой	Ташкент	58	23,2	0,06	—1,02
	Термез	55	24,2	0,06	—1,12
	Ашхабад	52	25,9	0,21	—1,10

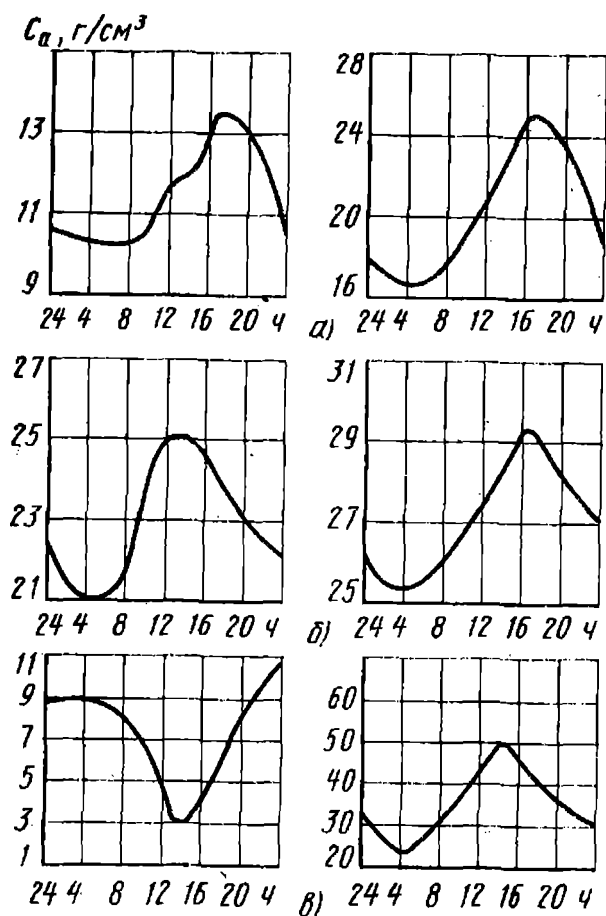


Рис. 22. Суточные изменения абсолютной C_a влажности по климатическим районам:

а — умеренного климата; б — тропического климата; в — района пустынь

Оценка плотности вероятности пиковых значений процесса

$$\rho_{\text{пик}}^*(T) = \frac{n_{\Delta T}/N_{\text{пик}}}{\Delta T}, \quad (15)$$

где $n_{\Delta T}$ — число пиковых значений температуры (относительной влажности и т. п.), лежащих в интервале $(T, T + \Delta T)$; ΔT — длина интервала $(T, T + \Delta T)$.

Точность вычисления оценки зависит от того, насколько мала длина интервала $(T, T + \Delta T)$.

В табл. П1 приведены значения коэффициентов, характеризующих составляющие математического ожидания температуры для районов с умеренным климатом (Москва).

Для других районов СССР аналогичные данные приведены в работе [4].

В табл. П2, П3 приведены обобщен-

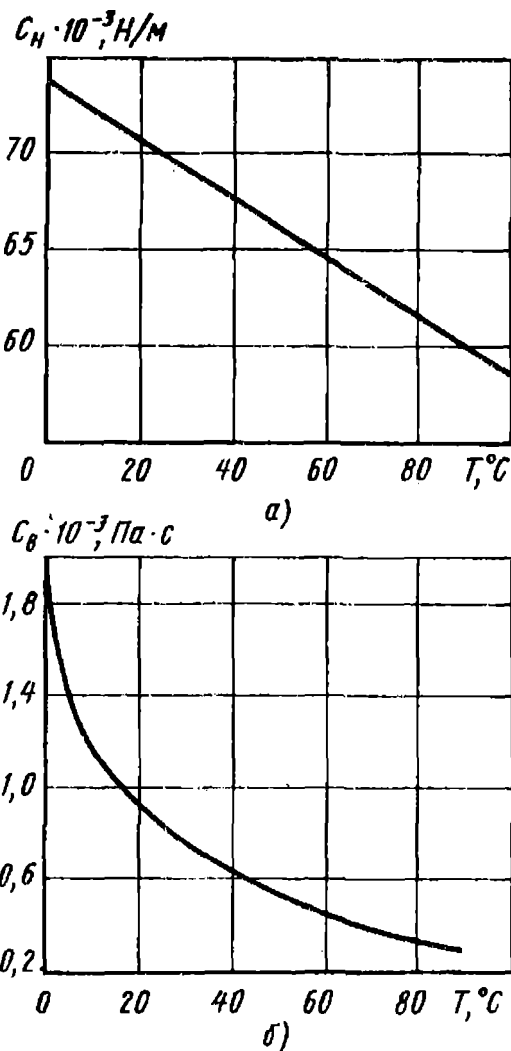


Рис. 23. Зависимость поверхностного натяжения воды C_n в атмосфере (а) и динамической вязкости воды C_b (б) от температуры

ные данные о среднем квадратическом отклонении случайного процесса изменения температуры $T(t)$ и относительной влажности.

В табл. П4 приведены данные о среднем квадратическом отклонении случайного процесса изменения относительной влажности $\varphi(t)$.

Статистические параметры распределения относительной влажности приведены в табл. П5.

Интенсивность физических и химических процессов, обуславливающих воздействие влаги на комплектующие изделия, связана со степенью активности воды как растворителя и способностью воды смачивать материалы и проникать в них [1]. В этой связи, помимо данных об абсолютной и от-

носительной влажности, важны также данные о вязкости и о поверхностном натяжении воды (рис. 22, 23). При повышении температуры воды от 20 до 80 °C вязкость воды уменьшается почти в 3 раза, а поверхностное натяжение более чем в 2 раза. Коэффициенты самодиффузии D^* воды также существенно возрастают при повышении температуры:

Температура, °C	5	15	25
$D^* \cdot 10^5$, см ² ·с ⁻¹	1,58	2,14	2,83

Температура, °C	35	45	55
$D^* \cdot 10^5$, см ² ·с ⁻¹	3,55	4,41	5,41

При повышении температуры от 5 до 55 °C коэффициент самодиффузии увеличивается более чем в 3 раза.

Список литературы

1. Бердичевский Б. Е. Вопросы обеспечения надежности РЭА при разработке. М.: Советское радио, 1977. 384 с.
2. Гарцман Л. Б., Меламед М. Н., Кривокубов А. В., Плево И. П. Методы расчета интенсивности внешних воздействий на механические устройства радиотехнических систем//Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая, 1975. Вып. 6. С. 19—30.
3. Гарцман Л. Б., Меламед М. Н., Кривокубов А. В., Плево И. П. Расчет комплекса параметров гололедно-ветрового режима для проектирования механических устройств радиотехнических систем//Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая, 1976. Вып. 7. С. 26—35.
4. Дульнев Г. Н., Тарановский Н. Н. Тепловые режимы радиоэлектронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1971. 248 с.
5. Защита радиоэлектронной аппаратуры от влияния климатических условий/Под ред. Г. Юбиша. М.: Энергия, 1970. 338 с.
6. Зоткин В. Е. Вопросы стандартизации климатических условий эксплуатации технических изделий//Стандарты и качество. 1977. № 7. С. 170.
7. Зоткин В. Е., Воробьев В. Н. Предложения по стандартизации климатических факторов приземной атмосферы в технических целях//Стандарты и качество. 1978. № 8. С. 168.
8. Каткова Т. Ф. Некоторые характеристики комплекса температуры и относительной влажности (в годовой совокупности) на территории СССР//Тр. НИИАК, 1973. Вып. 83. С. 169.
9. Костинская Б. И. Распределение числа дней с температурой < -30 и ≥ 30 °C//Тр. ВНИИГМИ. Мировой центр данных. Вып. 27. М.: Гидрометеонадат, 1973. С. 160.
10. Костинская Б. И., Савелова О. Ф. Климатическое районирование территории стран — членов СЭВ применительно к хранению и эксплуатации технических изделий и материалов//Тр. ВНИИГМИ. Мировой центр данных, 1979. Вып. 63. С. 139.
11. Новиков М. И., Федоров А. М. Влагостойкость радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1981. 80 с.
12. Сапожникова С. А. Карта-схема числа дней с пыльными бурями в жаркой зоне СССР и на примыкающих к ней территориях//Тр. НИИАК, 1970. Вып. 65. С. 144.
13. Сапожникова С. А. Климатическое районирование территории СССР применительно к хранению и эксплуатации технических изделий и материалов//Труды НИИАК, 1970. Вып. 65. С. 171.
14. Серебренников М. Г., Первоуванский А. А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1969. 260 с.
15. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., «Высшая школа», 1970. 272 с.
16. Справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры/Под ред. Р. Г. Варламова. М.: Советское радио, 1980. 478 с.

Глава 2 УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

Реальные вибрации представляют некоторыми классическими формами: гармоническая; квазигармоническая с непрерывным изменением частоты; широкополосная случайная вибрация; узкополосная случайная вибрация. Основной формой вибрации является гармоническая. Эта классическая форма вибрации редко встречается на практике, однако ее используют при лабораторных испытаниях изделий для оценки реакции системы на более сложные формы вибрации. Квазигармоническая вибрация с непрерывным изменением частоты существует в период разгона и торможения механизмов с вращающимися элементами. Эта вибрация часто используется при лабораторных испытаниях, в которых частота либо колеблется, либо изменяется в сравнительно широких пределах.

Широкополосная случайная вибрация представляет собой идеализацию случайной вибрации, воздействующей на изделия в реальных условиях эксплуатации.

Узкополосная случайная вибрация возникает при колебаниях упругих систем под воздействием широкополосной вибрации.

На рис. 1 приведена классификация вибрационных факторов [2].

Неслучайные вибрации. К этому классу относят периодические и непериодические вибрации. Вибрацию называют периодической, если удовлетворяется условие $x(t) = x(t +$

$+ kT)$, где k — любое целое число; T — период колебаний.

Периодическая вибрация может быть представлена в виде ряда Фурье (амплитудного спектра):

$$x(t) = A_0/2 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos 2\pi kt/T + B_k \sin 2\pi kt/T),$$

где

$$A_0 = 2/T \int_0^T x(t) dt;$$

$$A_k = 2/T \int_0^T x(t) \cos 2\pi kt/T dt;$$

$$B_k = 2/T \int_0^T x(t) \sin 2\pi kt/T dt.$$

Периодическая вибрация полностью определяется амплитудой и формами ее составляющих.

Непериодические вибрации разделяют на почти периодические и переходные.

Почти периодическая вибрация — такая вибрация, когда отношение какой-либо пары частот дискретного спектра представляет собой иррациональное число, т. е. это сумма произвольного числа независимых гармонических колебаний.

Случайные вибрации. Под случайной вибрацией понимают колебательный процесс, который описывается случайной функцией времени, значения которой в любые моменты являются случайными величинами.

Наиболее полной характеристикой случайной вибрации является n -мер-

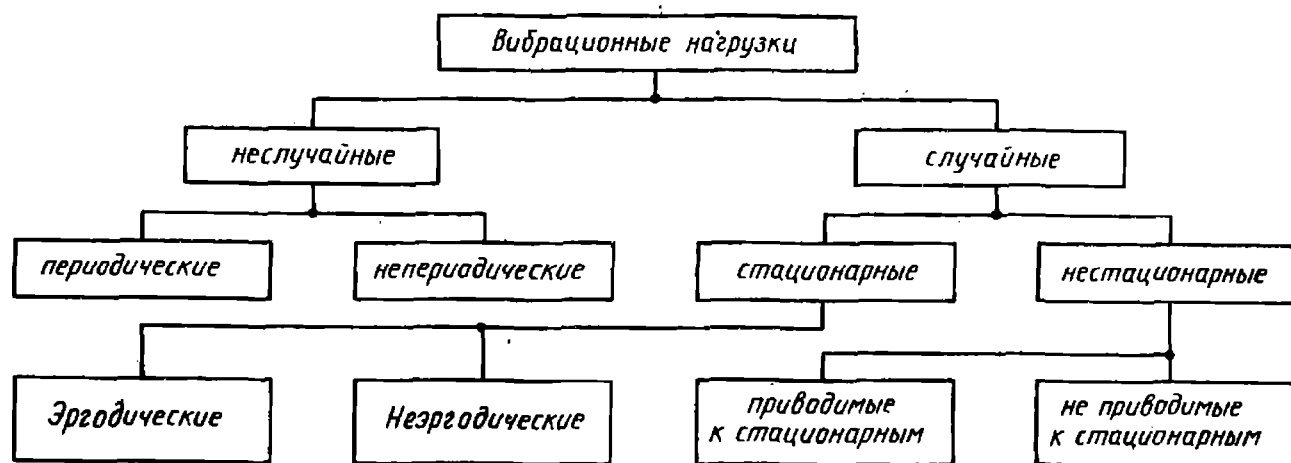


Рис. 1. Классификация вибрационных факторов

ный закон распределения, выраженный в интегральной форме:

$$F_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t_1, t_2, \dots, t_n).$$

Параметры основных видов вибрационных факторов приведены в табл. 1.

Ударные нагрузки. На рис. 2 приведена классификация ударных нагрузок, воздействующих на технические изделия.

Ударные нагрузки называются *непериодическими*, если удовлетворяется условие

$$x(t) = x(t + kT), \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

где T — период повторения.

Ударные нагрузки можно представить в виде тригонометрического ряда

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos \omega k t + B_k \sin \omega k t) = A_0/2 +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(\omega k t - \varphi_k),$$

где $A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt$ — среднее значение функции за период (постоянная составляющая);

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos \omega k t dt;$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin \omega k t dt,$$

где $\omega = 2\pi/T$ — частота первой гармоники; $k\omega = k 2\pi/T$ — частота прочих гармоник (k -й гармоники, $k = 1, 2, \dots$); $C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$ — амплитуда k -й гармоники; $\varphi_k =$

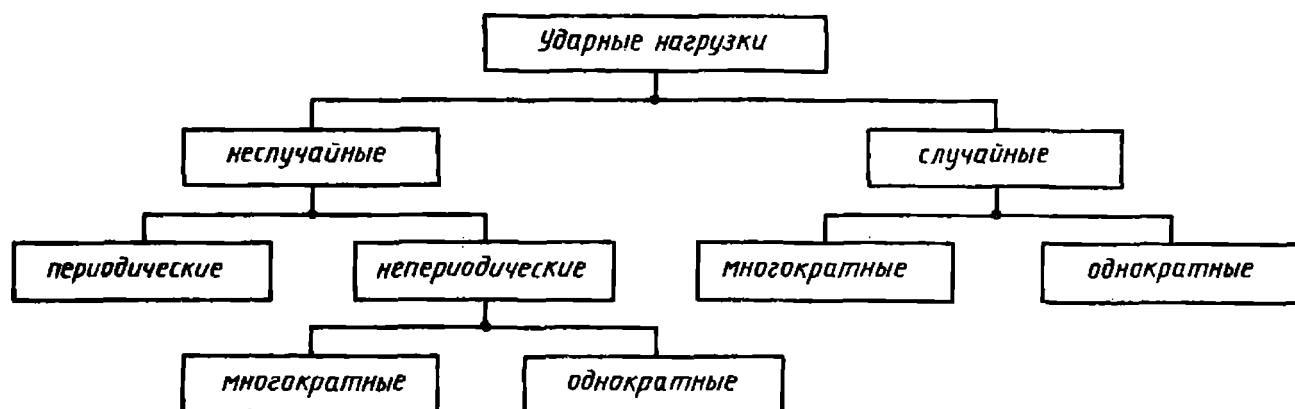


Рис. 2. Классификация ударных нагрузок

1. Параметры основных видов вибрационных факторов

Вид механической нагрузки		Измеряемый параметр			
		Наименование	Обозначение	Размерность	Аналитическое выражение
Постоянно действующее ускорение		Постоянное ускорение	a_0	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	$x(t) = \begin{cases} A_0 & \text{при } t_1 < t < t_2; \\ 0 & \text{при } t \geq t_2, t_1 \geq t \end{cases}$
Неслучайная вибрация	Периодическая	Амплитуда	$A(\omega)$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t)$
	Непериодическая	Амплитудный спектр	$S(\omega)$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$	$S(\omega) = \int_0^{\infty} x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau,$ $x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad x(t) = 0 \text{ при } t < 0$
Случайная вибрация	Стационарная	Спектральная плотность мощности	$G(\omega)$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4} \text{ Гц}^{-1}$	$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\tau) \cos \omega\tau d\tau$
	Квазистационарная	Обобщенная спектральная плотность мощности	$ G(\omega) $	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4} \text{ Гц}^{-1}$	Корреляционная матрица дисперсионного вектора

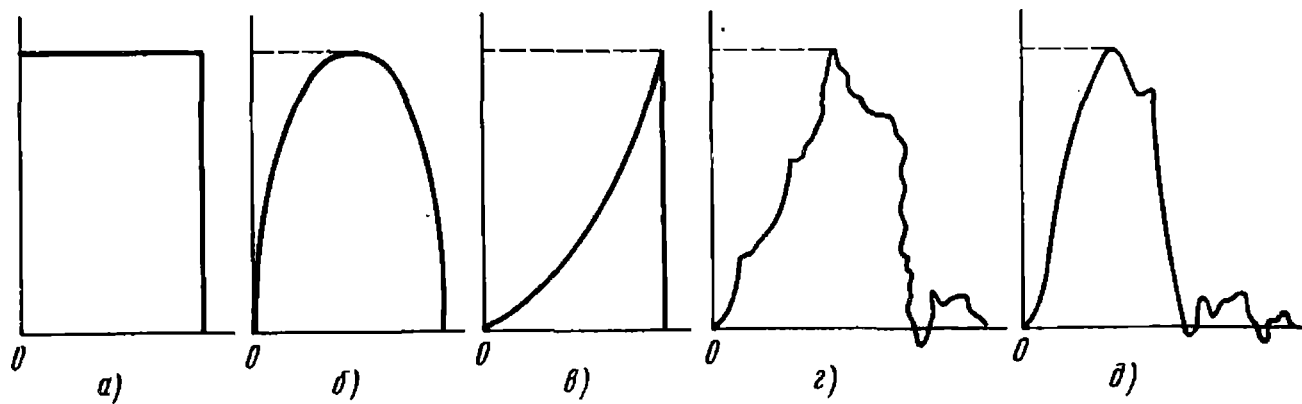


Рис. 3. Формы удара:
а, б, в — простые; г, д — сложные

$= \operatorname{arctg} \frac{B_k}{A_k}$ — фазовый сдвиг k -й гармоники.

Непериодические ударные нагрузки описываются с помощью интеграла Фурье:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{-j\omega t} d\omega,$$

где $S(\omega)$ — спектральная плотность процесса.

На рис. 3 приведены характерные формы ударных нагрузок.

К характеристикам удара относят: функциональную зависимость от времени ускорения $\ddot{x}(t)$, скорости $\dot{x}(t)$, смещения $a(t)$, пикового значения ускорения $\ddot{x}_n$ и скорости $\dot{x}_n$ или смещения a_n .

В табл. 2 приведены аналитические выражения параметров удара в зависимости от времени.

К другим характеристикам удара во временной области относят:

длительность удара $\tau_y = \frac{\int_0^{x_y} |x(t)| dt}{h}$

2. Аналитическое выражение параметров удара

Форма удара	Ускорение $\ddot{x}(t), \ddot{x}_0 = 0$	Скорость $\dot{v}(t), v_0 = 0$	Смещение $a(t), a_0 = 0$
Полусинусоидальная	$x_n \sin \pi t/\tau$	$\frac{v_n}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{t}{\tau} \right)$	$a_n \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{t}{\tau} \right)$
Косинусоидальная	$x_n \left(1 - \cos 2\pi \frac{t}{\tau} \right)$	$v_n \left(\frac{t}{\tau} - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi \frac{t}{\tau} \right)$	$a_n \left[\frac{t^2}{\tau^2} - \frac{1}{2\pi^2} \left(1 - \cos 2\pi \frac{t}{\tau} \right) \right]$
Прямоугольная	x_n	$v_n \frac{t}{\tau}$	$a_n \left(\frac{t}{\tau} \right)^2$
Пилообразная	$x_n \frac{t}{\tau}$	$v_n \left(\frac{t}{\tau} \right)^2$	$a_n \left(\frac{t}{\tau} \right)^3$

3. Амплитудный и фазовый спектры удара

Функция	Амплитудный спектр	Фазовый спектр
Полусину-соидальная	$\frac{2x_n\tau}{2} \frac{\cos \omega\tau/2}{1 - \left(\frac{2\omega}{\pi} \frac{\tau}{2}\right)^2}$	$\arctg \left[\operatorname{tg} \left(\pi - \frac{\omega\tau}{2} \right) \right]$
Косинусоидальная	$\frac{x_n\tau}{2} \frac{\sin \omega\tau/2}{\frac{\omega\tau}{2} \left[1 - \left(\frac{\omega\tau}{2}\right)^2 \right]}$	$\arctg \left[\operatorname{tg} \left(\pi - \frac{\omega\tau}{2} \right) \right]$
Прямоугольная	$x_n\tau \frac{\sin \omega\tau/2}{\omega\tau/2}$	$\arctg \left[\operatorname{tg} \left(\pi - \frac{\omega\tau}{2} \right) \right]$
Треуголь-ная	$\frac{x_n\tau}{2} \frac{2 \left(1 - \cos \frac{\omega\tau}{2} \right)}{(\omega\tau/2)^2}$	$\arctg \left[\operatorname{tg} \left(\pi - \frac{\omega\tau}{2} \right) \right]$

где h — условная величина, напри-
мер, $h = x_n$;

длительность фронта τ_Φ удара, оп-
ределенную на уровне от 0,1 до 0,9
от максимального значения импульса;
импульс удара I . Под импульсом
удара понимают интегральное значе-
ние процесса за время τ :

$$I_x = \int_0^\tau x(t) dt; \quad I_v = \int_0^\tau v(t) dt;$$

$$I_a = \int_0^\tau a(t) dt.$$

Ударные нагрузки могут быть пред-
ставлены и в спектральной форме

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty S(\omega) e^{-j\omega t} d\omega,$$

где $S(\omega)$ — спектральная плотность
процесса, определяемая соотноше-
ниями:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^\infty x(t) e^{-j\omega t} dt;$$

$$S(\omega) = \operatorname{Re} [S(\omega)] + jI_m [S(\omega)].$$

$\operatorname{Re} [S(\omega)]$, $I_m [S(\omega)]$ — действитель-
ное и мнимое значения функции $S(\omega)$.
В табл. 3 приведены аналитические
выражения амплитудного $\Phi(\omega)$ и фа-
зового $\varphi(\omega)$ спектра Фурье простых
форм ударных процессов, а на рис. 4,
 a — z — амплитудные и фазовые спек-
тры ударных процессов.

Энергетический спектр $G(\omega)$ для
описания ударных импульсов приме-
няют редко. Энергию спектра P удара
можно определить по формуле

$$P = \frac{1}{\pi} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^\infty [S(\omega)]^2 d\omega.$$

Действующую ширину спектра уда-
ра Δf определяют как полосу частот,
в которой находится некоторая доля
(обычно $\xi = 0,9$) полной энергии P
спектра; Δf находят из соотношения

$$\int_0^{\Delta\omega} [S(\omega)]^2 d\omega = \xi \int_0^\infty [S(\omega)]^2 d\omega.$$

По результатам обработки и анализа
реализаций случайных процессов, за-

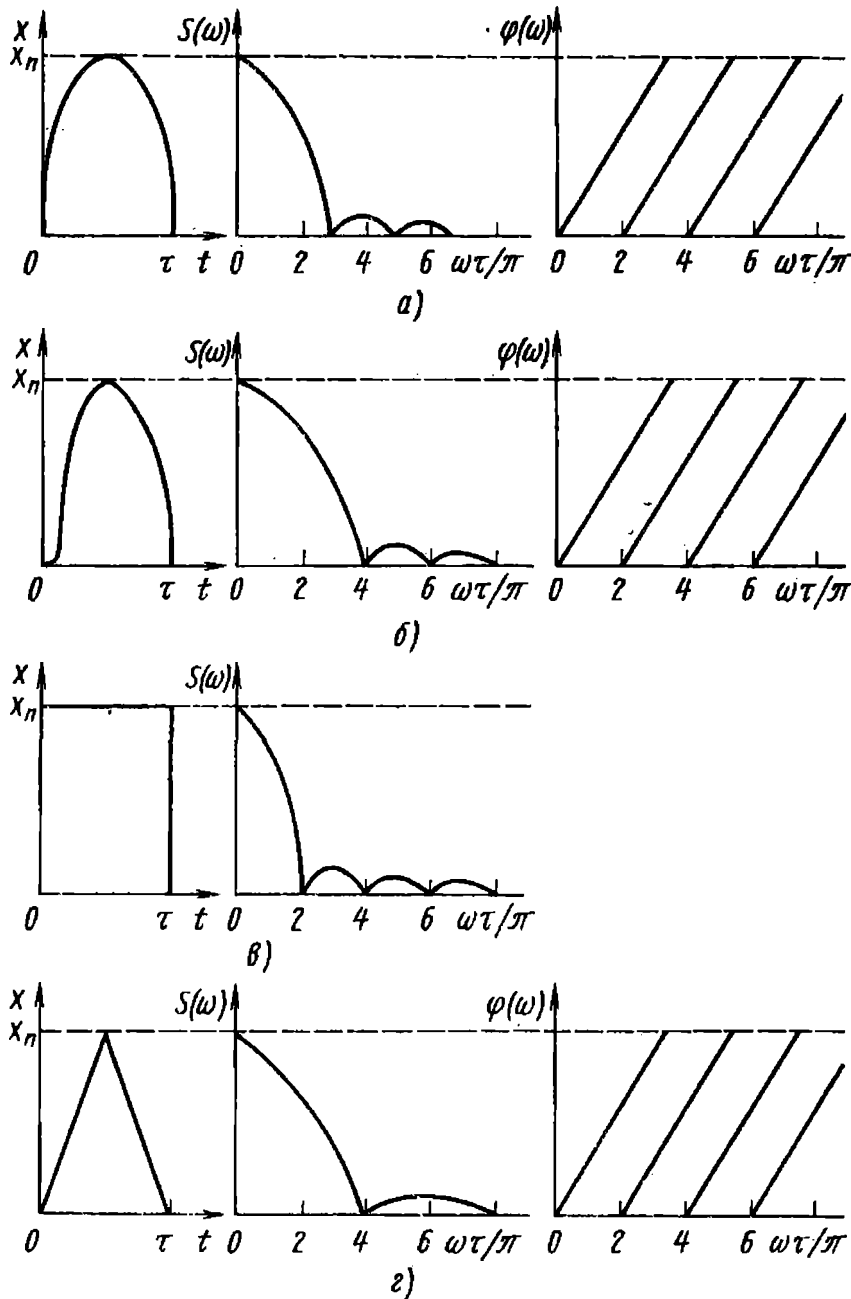


Рис. 4. Амплитудные и фазовые спектры ударных процессов

писанных на различных носителях, определяют следующие вероятностно-статистические характеристики ударно-вибрационных нагрузок: математическое ожидание $m_x(t)$; дисперсию $D_x(t)$; функцию корреляции $R_x(t_1, t_2)$; спектральную плотность мощности $G_x(\omega)$; функцию распределения мгновенных и пиковых значений процесса $F_{\text{мгн}}(x, t)$, $F_{\text{пик}}(x, t)$; плотность вероятностей мгновенных и пиковых значений случайного процесса $P_{\text{мгн}}(x, t)$, $P_{\text{пик}}(x, t)$, а также доверительные интервалы I_β для оценок характеристик.

2. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫМ ФАКТОРАМ

Характеристики ударно-вибрационных факторов определяют с учетом существующей классификации технических изделий по условиям эксплуатации. При таком подходе все разнообразие технических изделий можно разделить на следующие классы: наземной техники; морской (корабельной) техники; бортовой авиационной техники; ракетной техники; космической техники. Каждый класс подвер-

гается определенному комплексу внешних воздействующих факторов, возникающих на этапах эксплуатации и транспортирования изделий.

Уровни воздействующих на изделия ударно-вибрационных нагрузок зависят от вида носителя и места расположения изделия на носителе.

Все виды технических изделий транспортируются к местам установки на объекты техники. Поэтому к изделиям предъявляются требования по прочности и виброустойчивости при транспортировании их всеми видами транспорта (по железной дороге, шоссе, воздуху и по морю).

Колебания изделий наземной техники. Технические изделия, предназначенные для применения в объектах наземной техники, должны быть прочными и устойчивыми к воздействию комплекса ударно-вибрационных нагрузок, присущих наземным условиям эксплуатации.

Все объекты наземной техники в зависимости от условий эксплуатации можно разделить на стационарные, подвижные и носимые.

Различают подвижные объекты на колесном и гусеничном ходу.

Основными ударно-вибрационными факторами, воздействующими на изделия наземной техники, являются вибрация, механический удар и акустические шумы.

Источниками вибрации изделий, размещаемых в кузовах грузовых и легковых автомобилей, на тракторах гусеничного типа и на танках, являются: резонансные колебания поддрессоривания и конструкции машины; резонансные колебания конструкции на дорогах с грубым покрытием; вибрации двигателя; частота укладки траков.

Дорожные условия определяются применительно к сухопутному безрельсовому транспорту (установлено, что условия нагружения перевозимых изделий при этом являются более жесткими по сравнению с железнодорожным, водным и воздушным транспортом).

Перевозку изделий можно осуществлять по дорогам с твердым покрытием (асфальтированное и булыжное шоссе), грунтовыми дорогам (профилированным и непрофилированным) и

естественной местности. Воздействие дорожных условий на перевозимые изделия обусловлено ровностью поверхности, геометрическими размерами, формой и характером чередования неровностей и качественным состоянием покрытия.

В качественном отношении различают малоизношенные, сильноизношенные, разбитые дороги и пересеченную местность. Дорожные неровности в зависимости от длины условно разделяют на импульсные (до 0,3 м), выбоины (от 0,3 до 6 м), ухабы (от 6 до 25 м) и уклоны (свыше 25 м).

Характеристика ровности дорожных поверхностей различного качественного состояния приведена в табл. 4 [7, 12].

В зависимости от высоты (глубины) неровности можно условно разделить на три группы:

шероховатости — неровности высотой до 1 см при длине 0,3 м, не оказывающие заметного влияния на колебания автомашины;

впадины и выступы — неровности, вызывающие интенсивные колебания поддрессоренной части машины. К таким неровностям относят выбоины глубиной свыше 30 см и ухабы крутизной 0,03;

препятствия — выбоины глубиной свыше 30 см и ухабы крутизной свыше 0,03, а также канавы, рвы и т. п.

Различают следующие закономерности в размещении неровностей по длине участка на поверхности дороги:

периодически чередующиеся неровности одинаковых размеров и формы; обособленные неровности, удаленные друг от друга на сравнительно большие расстояния;

случайный микропрофиль — закономерное чередование неровностей различных размеров и формы.

Изменение высоты неровностей q по длине дорожного покрытия характеризуется функцией вида

$$q = f(s).$$

На рис. 5 приведена схематическая характеристика ровности дорожной поверхности, заданной на участке протяженностью $2s$. Для любой точки

4. Характеристика качественного состояния дорожных поверхностей

Неровности	Параметры неровностей	Дорожные покрытия			Пересеченная местность	Рекомендуемая скорость движения
		малоизношенные	сильноизношенные	разбитые		
Импульсные	Число на 1 км	20—50	50—150	100—200	Более 200	$0,7v_{\max}$
	Максимальная глубина, см	До 5	5—7	7—10	10—15	
	Средняя глубина, см	3—4	3—5	5—7	7—10	
Выбоины	Число на 1 км	До 200	200—500	300—600	200—300	$(0,4 \div 0,7) v_{\max}$
	Средняя длина, см	50—150	100—250	150—400	150—500	
	Средняя глубина, см	3—5	5—10	10—15	Более 15	
	Максимальная глубина, см	До 10	10—20	20—40	Более 30	
Ухабы	Число на 1 км	До 5	5—10	10—20	Более 20	$0,2v_{\max}$
	Средняя длина, см	600—900	600—1000	600—1200	800—1600	
	Средняя глубина, см	3—5	10—20	30—50	70—120	
	Максимальная глубина, см	До 10	До 30	До 100	До 200	

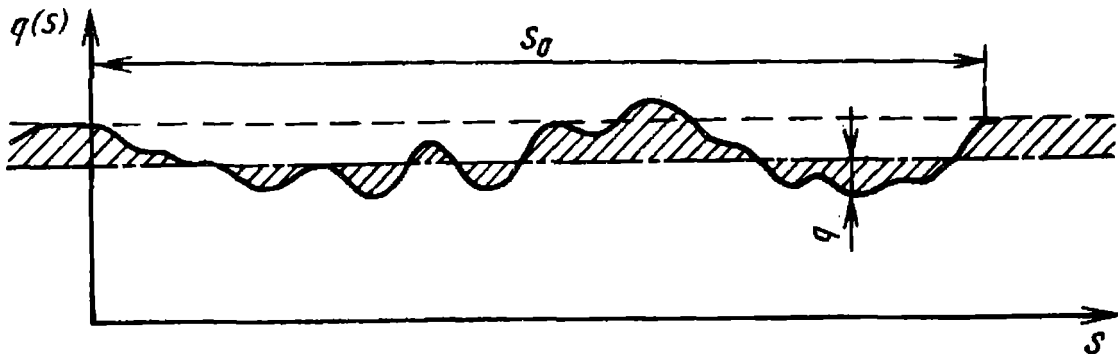


Рис. 5. Схематическая характеристика ровности дорожной поверхности:
 s_0 — представительный участок дороги; $l = s - s'$ — интервал отсчетов глубин (высот) неровностей; $\bar{q} = \frac{1}{s_0} \int_0^{s_0} q ds$ — средняя глубина

участка $2s$ указанная зависимость может быть представлена в виде

$$q(s) = \bar{q}(s) + \varphi(s),$$

где $q(s)$ — случайное значение неровности, соответствующее участку s ; $\bar{q}(s)$ — среднее значение неровности на участке s ; $\varphi(s)$ — случайная составляющая неровности q , соответствующая участку s .

Среднее значение неровности рассчитывают по формуле

$$\bar{q}(s) = \sum_{i=1}^{\infty} \left(Q_{1i} \cos \frac{i\pi}{s} \varphi + Q_{2i} \sin \frac{i\pi}{s} \varphi \right),$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Входящие в это выражение коэффициенты Фурье определяют по формулам:

$$Q_{1i} = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} q(s) \sin \frac{i\pi}{s} ds;$$

$$Q_{2i} = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} q(s) \cos \frac{i\pi}{s} ds.$$

Аналитическое выражение функции микропрофиля для обособленной неровности наиболее характерной синусоидальной формы, имеющей макси-

мальную длину s_0 и высоту $2q_0$, можно представить в виде

$$q = q_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi}{s} \varphi \right),$$

где q_0 — величина смещения средней степени неровности относительно полотна дороги.

Если за профиль обособленной неровности принять половину синусоиды, то

$$q = \sum_{i=1}^{\infty} Q_i \cos (\nu_i - \varphi_i).$$

Рассмотренное соотношение можно представить в другом виде:

$$q = \sum_{i=1}^{\infty} Q_i \cos (\nu_i - \varphi_i);$$

$$Q_i = \sqrt{Q_{1i}^2 + Q_{2i}^2}; \nu_i = i\pi/s;$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{Q_{2i}}{Q_{1i}}.$$

5. Последовательность вычисления коэффициентов Q_{1i}, Q_{2i}

i	Q_{1i}	Q_{2i}	$\frac{\pi}{s} \varphi$

Последовательность вычисления коэффициентов Q_{1i} и Q_{2i} дана в табл. 5.

Заполнив табл. 5, находят оценку математического ожидания неровностей, соответствующего участку $2s$.

Задаваясь величиной доверительной вероятности (обычно $P = 0,9$), находят интервал возможных значений неровностей на этом участке.

Если процесс $q(s)$ является стационарным, обладающим эргодическим свойством, то приведенные выше соотношения и расчеты по ним можно производить по результатам анализа одной достаточно длинной реализации.

Основываясь на отмеченных особенностях процесса появления неровностей, определяют закон распределения высот неровностей, а также проводят расчет корреляционной функции и энергетического спектра микропрофиля участка дорог по формулам:

$$K_l = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} I_m \cos lv \, dv;$$

$$I_m = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{Q^2 v}{s} = 2 \int_0^{\infty} \text{Re} \cos lv \, dl.$$

Площадь энергетического спектра равна дисперсии микропрофиля

$$q_l = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \, dv.$$

По данным, полученным по результатам расчета в соответствии с табл. 5, определяют закон распределения высот неровностей $f(q)$. Во многих случаях в качестве закона принимают

$$f(q) = \frac{1}{q_l \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{q_3}{2q_l^2} \right\}.$$

Вероятное среднее число n выбросов (неровностей) на единицу длины дороги, имеющих высоту больше любой заданной q_3 , вычисляют по формуле

$$n = \frac{N}{2s} \frac{q_c}{2\pi q_c} \exp \left\{ -\frac{q_3^2}{2q_c^2} \right\},$$

где N — общее число неровностей на участке дороги длиной $2s$; q_c — средне-

квадратическое значение первой производной функции микропрофиля.

При исследовании неровности дороги целесообразно определять нормированный энергетический спектр неровностей по формулам:

$$\frac{I_m}{q_c^2} = \frac{x}{\pi} \frac{1}{v^2 + x^2};$$

$$\frac{I_m}{q_c^2} = \frac{x}{\pi} \frac{v^2 + x^2 + \beta_k^2}{(v^2 + x^2 - \beta_k^2) + 4x^2\beta_k^2},$$

где x — коэффициент, характеризующий затухание корреляционной функции профиля дороги; β_k — коэффициент, характеризующий периодическую составляющую микропрофиля.

В большинстве случаев

$$\frac{K_l}{q_c^2} = e^{-x|l|}$$

или

$$\frac{K_l}{q_c^2} = e^{-x|l|} \cos \beta_k l.$$

Колебания массы автомобиля представляют как сумму трех составляющих — низкочастотной, высокочастотной и от действия возмущающей силы.

В зависимости от частоты можно разделить все возникающие вертикальные ускорения на несколько полос: низкочастотные (1—3 Гц), соответствующие вертикальным колебаниям и вертикальным составляющим продольных и поперечных угловых колебаний поддрессоренной части; высокочастотные (10—15 Гц) от колебаний неподдрессоренных частей; вибрации в полосе частот 10—60 Гц от колебаний элементов кузова и двигателя на его упругом подвесе; вибрации на частотах выше 70 Гц, связанные с колебаниями элементов шины.

Ускорения в продольном и поперечном направлениях содержат примерно те же составляющие, что и при вертикальных колебаниях. Вероятность появления тех или иных ускорений достаточно хорошо соответствует нормальному закону распределения.

В табл. 6 приведены средние квадратические значения виброускорений (мс^{-2}), возникающих при движении автомобилей с различными скоростями

6. Значения виброускорений, возникающих при движении автомобиля, мс^{-2}

Конструктивные элементы ходовой части автомобиля	Скорость, км/ч			
	90	120	45	75
	Ровное покрытие		Булыжное покрытие	
Неподдрессоренные:				
вертикальные:				
передние	78	113	296	413
задние	74	108	189	268
поперечные задние	384	39	47	61
продольные передние	39	45	137	154
Поддрессоренные:				
вертикальные:				
передние	15	24	26	33
задние	15	22	23	28
поперечные задние	11	12	15	19
продольные передние	7	11	9	20

по дорогам с ровным и булыжным покрытием.

При расчетах колебаний автомобиля при случайном воздействии обычно исходят из следующих предположений: случайный процесс является одномерным (определяется только микропрофилем дороги в продольном направлении и является нормальной случайной функцией); автомобилю соответствует линейная колебательная система; колебания автомобиля представляют собой стационарный, иногда эргодический, нормальный процесс.

Только экспериментальная проверка может подтвердить правильность этих предположений. Поэтому уровни механических нагрузок, воздействующих на технические изделия, расположенные на автомобилях различных классов, определяют экспериментальным путем.

Возникающие вибрации изделий характеризуются следующими данными: в объектах на колесном ходу — частота до 250 Гц, амплитуда — до 2,5 мм; в объектах на гусеничном ходу — частота до 2000 Гц; амплитуда — до 4 мм [7].

Основными источниками механических ударов в объектах наземной техники являются: преодоление объек-

том естественных и искусственных препятствий на трассах движения (удары, вызываемые при преодолении препятствий) и др.

Различают механические удары многократного действия (пиковое ударное ускорение — до 1500 м/с^2 при длительности действия ударного ускорения 2—5 мс) и одиночного действия (пиковое ударное ускорение — до $30\,000 \text{ мс}^{-2}$ при длительности действия ударного ускорения до 5 мс).

Изделия, переносимые и перевозимые всеми видами наземного транспорта, должны быть прочными и устойчивыми к воздействию вибраций с частотой до 120 Гц и с амплитудой ускорения до 2,5 мм и к воздействию механических ударов с ускорением до 100 мс^{-2} .

Колебания судовых конструкций. Выделяют три вида нагрузок, вызывающих установившиеся и неустойчивые колебания конструкций и корпуса судна в целом [7]:

нагрузки, связанные с неполной уравновешенностью главных и вспомогательных механизмов, с дефектами изготовления гребных винтов, неточностями центрирования и монтажа гребных валов;

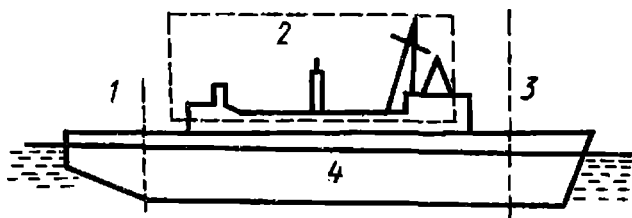


Рис. 6. Корпус судна, разделенный на участки в зависимости от уровня вибраций

нагрузки, связанные с работой гребных винтов внутри корпуса;

нагрузки, вызванные воздействием на судно морского волнения (гидродинамические силы).

Гидродинамические силы вызываются действием морских волн и ветра. Под действием этих сил судно испытывает три вида колебаний: вращательное движение вокруг вертикальной оси, килевую качку вокруг горизонтальной оси, боковую качку вокруг продольной оси. При килевой качке наибольшую амплитуду колебаний имеют нос и корма. При боковой качке наибольшее перемещение совершают средние части борта.

Помимо гидродинамических сил, корпус судна подвергается вибрациям, вызванным работой двигателя и вращением винта. Вибрация корпуса корабля, вызванная вращением винта, имеет незначительную частоту и значительную амплитуду. Например, для судов с трехлопастным винтом частота вибраций изменяется от 0 до 15 Гц, а для судов с пятилопастным винтом — до 25 Гц.

Уровень вибраций, действующих на изделия, размещаемые на судах, зависит от водоизмещения судна и от места размещения изделий. В этом отношении можно условно разделить судно на четыре участка (рис. 6): кормовой 1, мачтовый 2, носовой 3 и основной (центральная часть) 4.

Изделия, расположенные в основном участке судна (4) с большим водоизмещением, испытывают вибрации 1—12 Гц с амплитудой $\pm 0,18$ мм. На кормовом участке (1) амплитуды составляют $\pm 0,36$ мм при частоте до 5 Гц. Максимальные амплитуды могут достигать $\pm 25,4$ мм на частоте 2 Гц и $\pm 0,5$ мм на частоте 12 Гц.

Изделия, расположенные в пределах мачтового участка (2), испытывают вибрации с амплитудой ± 19 мм на частоте 2 Гц (вибрации создаются поперечными колебаниями судна).

На небольших быстроходных судах с небольшим водоизмещением в кормовом участке (1) возникают вибрации с максимальной амплитудой до $\pm 0,3$ мм на частоте 5—15 Гц и с минимальной амплитудой $\pm 0,05$ мм на частоте 150 Гц.

На судах при установке изделий непосредственно на двигателях они испытывают воздействие вибраций с частотой до 2000 Гц при амплитудах до 2,5 мм.

Колебания летательных аппаратов. При проектировании и эксплуатации летательной техники рассматривают два типа колебаний [5]:

траекторные колебания — колебания летательного аппарата как абсолютно жесткого тела, при которых основное значение имеют изменения параметров траектории полета. Эти колебания определяют динамику полета летательного аппарата — его устойчивость и управляемость;

упругие колебания — изменения напряженно-деформированного состояния конструкции. Эти колебания могут привести к возникновению опасных напряжений (вплоть до разрушающих), ухудшению условий работы оборудования, аппаратуры и снижению комфорта экипажа и пассажиров.

В зависимости от типа летательного аппарата частоты траекторных колебаний находятся в диапазоне от долей Гц до нескольких Гц. Частоты упругих колебаний, влияющих на общее напряженно-деформированное состояние конструкции, находятся в интервале от 1 Гц до десятков Гц для тяжелых летательных аппаратов и от нескольких Гц до 100—200 Гц для легких летательных аппаратов. Выше лежит диапазон акустических колебаний.

В зависимости от типа летательного аппарата, режима полета и условий наземной эксплуатации рассматривают следующие виды колебаний упругой конструкции: свободные упругие колебания; вынужденные (резонансные) колебания в наземных условиях (воз-

буждаются при частотных испытаниях для нахождения собственных частот, форм колебаний и амплитудно-фазовых частотных характеристик); шимми (потеря устойчивости при качении колес по поверхности); свободные колебания отдельных частей и всего летательного аппарата в полете (особые виды свободных колебаний в полете: срывные автоколебания, трансзвуковые колебания, совместные колебания конструкции с системой управления, панельный флаттер, автоколебания вертолета в наземном положении с вращающимся несущим винтом, продольные колебания ракет в контуре корпус — топливная система — двигатель, поперечные колебания ракет при воздействии тяги двигателя).

Летательные аппараты имеют замкнутые колебательные системы с источниками энергии. Рабочий процесс в них не предусматривает колебаний, однако при нарушении устойчивости в системах развиваются колебания, которые могут перейти в почти стационарный автоколебательный режим.

Колебательные свойства ракеты обусловлены наличием жидкого топлива в баках и упругостью корпуса. Кроме перечисленных, рассматривают вынужденные колебания летательного аппарата в полете. Источники их возбуждения: периодические воздействия вследствие срыва потока (бафтинг), атмосферная турбулентность, работа двигателей.

К в о з д у ш н о м у в и н т у приложены периодические нагрузки от двигателей. В свою очередь винты являются источником возбуждения других частей самолетов и вертолетов. Особенности вынужденных и свободных колебаний винтов связаны со сложной аэродинамикой вращающихся лопастей и наличием значительных центробежных сил, растягивающих лопасти.

Из рассмотренного следует, что источниками возникновения вибраций на самолете являются: работа силовой установки; работа системы управления; аэродинамическая вибрация.

Вибрации, возникающие при работе силовой установки, характеризуются сравнительно высокой частотой, кратной половине числа оборотов двига-

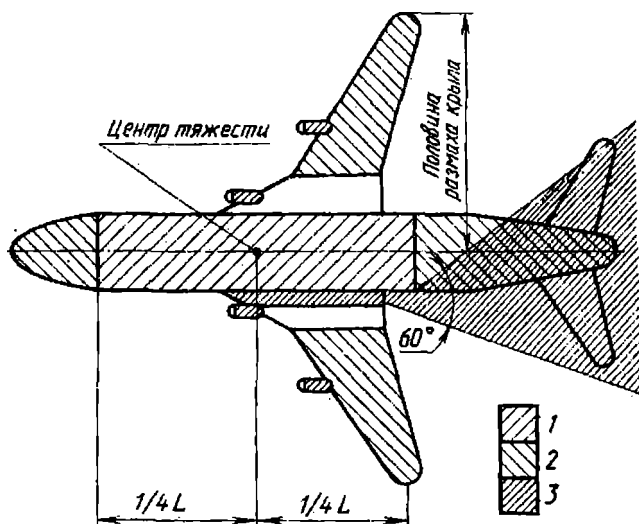


Рис. 7. Планер самолета, разделенный на участки в зависимости от уровня вибрации, L — длина планера

теля. Вибрации, связанные с работой системы управления, вызываются автоколебаниями рулей и элеронов. Частоты аэродинамических вибраций обычно близки к частотам собственных колебаний элементов конструкции. Чем тяжелее самолет, тем ниже собственные частоты колебаний конструкции и больше амплитуды (достигают десятков сантиметров). Неуравновешенные силы инерции двигателей, срывающиеся с крыльев вихри и другие периодически возникающие силы порождают вынужденные колебания.

На рис. 7 показаны участки вибраций самолета. Центральный участок 1 включает в себя почти весь фюзеляж, центроплан и примерно $1/3$ размаха крыльев. Изделия, расположенные на этом участке винтовых самолетов, испытывают вибрацию с частотой от 3 до 50 Гц и, соответственно, с амплитудой от 2 до $\pm 0,75$ мм. Изделия, расположенные на участке 3 силового оборудования, испытывают вибрации от 10 до 500 Гц с амплитудой соответственно от 0,37 до $\pm 0,025$ мм. Изделия, расположенные на крайних участках 2, испытывают вибрации от 3 до 150 Гц при амплитудах 0,25—0,075 мм на верхних частотах.

При взлетах и посадках самолета изделия испытывают большие пере-

7. Уровни вибраций и ударов, воздействующих на технические изделия

Виды технических изделий	Частота вибраций, Гц	Максимальная амплитуда, мм	Ускорение при ударах, мс ⁻²
Изделия наземной техники, размещаемые: в кузовах грузовых авто- мобилей на тракторах гусеничного типа на танках	До 250 До 400—700 До 2000 10—1200	1,0—2,5 $\pm 2,5$ на низ- ких частотах $\pm 2,5$ 0,1—2,5	До 1000 До 1000 До 1500 1000—2000 при ударах в случае падения с высоты 1,3 м
Изделия морской техники, раз- мещаемые: на кораблях малого водо- измещения на кораблях типа эсминец и большого водоизмещения	До 2000 До 60	1,0—2,5 0,5—2,5	До 500 До 1500
Изделия авиационной техники, размещаемые: на самолетах с поршневы- ми двигателями на турбовинтовых самоле- тах на реактивных самолетах	До 200 До 500 До 2000	До 1 0,5 0,025	До 500 До 500 До 500
Изделия ракетной техники: на участках разгона в полете	30—500 300—5000	50—100 мс ⁻²	До 700

грузки n , определяемые из соотношения

$$n = R/G = \frac{ma_{\Sigma}}{mg} = \frac{a_{\Sigma}}{g},$$

где m — масса тела; g — ускорение силы тяжести; a_{Σ} — геометрическая сумма ускорений, включая ускорение силы тяжести.

Возникающие ускорения достигают 500 мс⁻² при длительности ударного импульса 0,25—50 мс.

Вибрации на реактивных самолетах создаются звуковыми колебаниями, вызываемыми реактивной струей и турбулентностью горения, и составляют: частота вибрации 500—10 000 Гц, амплитуда на частотах до 500 Гц достигает 0,025 мм [8].

Основными источниками вибраций, возникающих на ракетах, являются работа ракетного двигателя, системы управления и аэродинамические эффекты (звуковые колебания, вызываемые струей и турбулентностью горения).

Ракетные двигатели на жидком топливе создают вибрации с частотой в несколько сотен герц с ускорением до 500 мс⁻². Менее мощные двигатели создают синусоидальные вибрации с частотами до 2000 Гц.

Более высокому уровню вибраций подвергаются изделия, расположенные в зоне двигателя.

Возникающие в момент старта и разделения ступеней ракеты ударные нагрузки достигают 5000 мс⁻².

8. Классификация механических условий транспортирования изделий всеми средствами транспортирования (дорожный, водный и воздушный транспорт; вертикальный транспорт — подъемные краны, грузовые лифты, подвесные канатные дороги)

Внешний воздействующий фактор	Класс		
	2М1	2М2	2М3
Синусоидальная вибрация: амплитуда перемещения, мм амплитуда ускорения, м·с ⁻² диапазон частот, Гц	3,5 10; 15 2—9; 9—200; 200—500	3,5 10; 15 2—9; 9—200; 200—500	7,5 20; 40 2—8; 8—200; 200—500
Стационарная случайная вибрация: спектральная плотность ускоре- ния, м ² ·с ⁻⁴ диапазон частот, Гц	1; 0,3 10—200; 200—2000	1; 0,3 10—200; 200—2000	3; 1 10—200; 200—2000
Нестационарная вибрация, включая удар: ударный спектр отклика типа I, пиковое ускорение, м·с ⁻² ударный спектр отклика типа II, пиковое ускорение, м·с ⁻²	— —	100 300	300 1000
Свободное падение изделий массой: менее 20 кг с высоты, м от 20 до 100 кг с высоты, м более 100 кг с высоты, м	0,25 0,25 0,1	1,2 1,0 0,25	1,5 1,2 0,5
Опрокидывание изделий массой: менее 20 кг от 20 до 100 кг более 100 кг	— —	Опрокидывание через любую грань Опрокидывание через любую грань —	Опрокиды- вание че- рез любую грань
Качание с угла на угол и падение на основание из наклонного положения: угол период, с	— —	±35° 8	±35° 8
Постоянное ускорение, м·с ⁻²	20	20	20
Статическая нагрузка, кПа	5	10	10

9. Классификация групп механических условий и их уровней, воздействующих на изделия, размещаемые на подвижных наземных объектах

Внешний воздействующий фактор	Класс		
	5М1	5М2	5М3
Синусоидальная вибрация *: амплитуда перемещения, мм амплитуда ускорения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ диапазон частот, Гц	1,5 5 2—9; 9—200	3,3 10; 15 2—9; 9—200; 200—500	7,5 20; 40 2—8; 8—200; 200—500
Случайная вибрация *: плотность ускорения, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ диапазон частот, Гц	0,3; 0,1 10—200; 200—500	1; 0,3 10—200; 200—500	3; 1 10—200; 200—500
Нестационарная вибрация, включая удар:			
ударный спектр отклика типа I, пиковое ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	50	100	300
ударный спектр отклика типа II, пиковое ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	—	300	100
Соударения с другими телами, камнями	—	В стадии рассмотрения	

*. Диапазон частот может быть ограничен значением 200 Гц, если изделие монтируется на конструктивных частях подвижного объекта, имеющих высокий уровень внутреннего демпфирования.

Для всех изделий ракетной техники существенным является воздействие акустического шума в диапазоне десятков тысяч герц при звуковом давлении, превышающем 150 дБ.

В табл. 7 приведены обобщенные данные об уровнях вибраций и ударов, воздействующих на технические изделия, размещенные на различных носителях.

Для сравнения ниже приведена классификация воздействующих на изделия механических нагрузок, принятая в стандартах Международной электротехнической комиссии (стандарты МЭК). В табл. 8 и 9 в качестве примера дана классификация механических (М) условий транспортирования изделий (классы 2М1, 2М2, 2М3) и эксплуатации их на подвижных наземных объектах (классы 5М1, 5М2, 5М3).

2М1. Включает условия транспортирования изделий на грузовых автомобилях обычного типа и грузовых

автомобилях повышенной проходимости с пневматической амортизацией и автомобилях с полуприцепами (трейлеры).

2М2. Кроме условий 2М1 включает условия перевозки изделий на всех видах грузовых автомобилей обычного типа и повышенной проходимости в районах с улучшенными дорогами. В него также входят перевозки по железной дороге на платформах со специальными ударогасящими буферами и перевозка на кораблях.

2М3. Кроме условий 2М2 включает все другие виды транспорта, в том числе в районах без хорошо развитой сети дорог.

5М1. Включает условия, воздействующие на изделия подвижных объектов, используемых внутри помещений с ровными полами (например, работа на складах).

5М2. В дополнение к условиям, охватываемым классом 5М1, включает

изделия, устанавливаемые в любых дорожных транспортных средствах, исключая гусеничный и другие легкие транспортные средства. Подвижные объекты используются в районах с хорошо развитой дорожной сетью.

5МЗ. Кроме условий 5М2 включает подвижные объекты, используемые в районах с плохо развитой дорожной сетью, легкие транспортные средства, гусеничный транспорт и самоходные механизмы. Он охватывает размещение изделия в таких местах, где на него будут попадать летящие камни.

3. ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Различают два механизма влияния механических нагрузок.

Основным признаком механизма первого типа является отсутствие в изделии каких-либо эффектов накопления. Определенный параметр в любой момент времени является функцией состояния изделия в этот момент времени и не зависит от его предыстории.

Основным признаком механизма второго типа является существование эффекта накопления или «памяти» в исследуемом изделии. Наиболее характерным примером механизма этого типа является процесс усталостных повреждений в конструкции изделия.

Механизм воздействия первого типа. Дискретное и квазистатическое нагружение. В качестве основного показателя, характеризующего работоспособность изделия, рассматривается вероятность безотказной работы или вероятность отказа

$$q(t) = \int \dots \int \psi(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, t) \times \\ \times \int \varphi(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, t) \times \\ \times dx_1 dx_2 \dots dx_{k-1} dt.$$

Оценку этого показателя при воздействии ударно-вибрационных факторов проводят в определенной последовательности.

1. Используя методы сопротивления материалов и строительной механики, составляют уравнения, описывающие

напряженное состояние элементов изделия и их несущую способность.

Условия работоспособности изделия можно представить в виде

$$\psi(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, t) = \\ = [R(x_1, x_2, \dots, x_l) - \\ - W(x_{l+1}, x_{l+2}, \dots, x_{k-1}, t)] \geq 0,$$

где $R(x_1, x_2, \dots, x_l, t)$ — случайная функция несущей способности изделия; $W(x_{l+1}, x_{l+2}, \dots, x_{k-1}, t)$ — случайная функция нагрузки.

С помощью методов строительной механики, теории пластичности и теории упругости определяют недопустимые предельные состояния элементов изделия и условия недопустимости наступления предельного состояния ($\psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$).

2. Оценивают случайный характер параметров, входящих в уравнения напряженного состояния несущей способности.

3. Определяют вид и числовые характеристики распределения параметров, входящих в указанные уравнения. По этим данным определяют вероятность безотказной работы (вероятность неразрушения) изделия.

4. Полученные оценки вероятности безотказной работы сравнивают с заданными требованиями.

Задачу решают с использованием математической модели изменения выходных параметров изделия под воздействием ударно-вибрационных факторов:

$$Y(t) = \beta [X(t)].$$

Случай 1. Периоды колебаний случайного вектора $X(t)$ соизмеримы с периодами собственных колебаний конструкции.

Если реакция $Y(t)$ изделия на воздействие случайных факторов $X(t)$ известна, то оценка надежности заканчивается определением вероятности превышения полученными значениями $Y(t)$ заданного уровня Y_0 в течение некоторого времени τ , т. е.

$$P(Y < Y_0/\tau) = e^{-N_0 \tau}$$

при условии, что последовательность выбросов представляет собой простейший поток; N_0 — среднее в единицу времени число выбросов выше Y_0 .

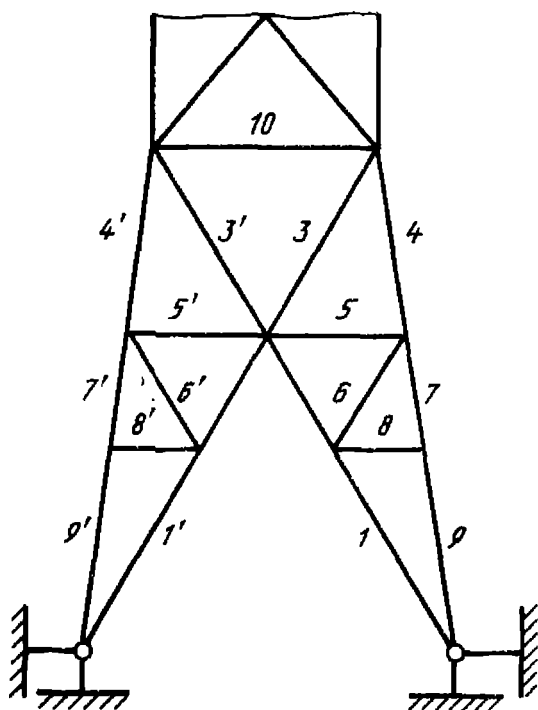


Рис. 8. Конструкция опоры радиорелейной линии

Как показано в работе [2], для случайного стационарного процесса с нормальным распределением

$$N_0 = \frac{\sigma_{\dot{Y}}}{2\pi\sigma_Y} \exp \left\{ -\frac{(Y_0 - m_Y)^2}{2\sigma_Y^2} \right\},$$

где $\sigma_{\dot{Y}}$ — среднее квадратическое отклонение процесса $\dot{Y}(t)$.

Если уровень Y_0 является случайным в интервале $Y_1 < Y_0 < Y_2$, величину N_0 , определяющую среднее число выбросов в единицу времени, можно рассматривать как условную вероятность выброса при возможном Y_0 .

Для случая распределения Y_0 по нормальному закону число выбросов при изменении $Y_1 \leq Y_0 \leq Y_2$

$$N_{Y_1, Y_2} = \frac{1}{2} \frac{e^{-a_1}}{T_{c0}} \left\{ \Phi \left(\frac{Y_2 - a_2}{\sqrt{2c}} \right) - \Phi \left(\frac{Y_1 - a_1}{\sqrt{2c}} \right) \right\},$$

где

$$a_1 = \frac{m_Y \sigma_{Y0}^2 + m_{Y0} \sigma_Y^2}{\sigma_{Y0}^2 + \sigma_Y^2};$$

$$a_2 = \frac{(m_{Y0} - m_Y)^2}{2(\sigma_Y^2 + \sigma_{Y0}^2)}; \quad c = \frac{\sigma_Y^2 \sigma_{Y0}^2}{\sigma_{Y0}^2 + \sigma_Y^2};$$

$$T_{c0} = 2\pi \frac{\sqrt{\sigma_{Y0}^2 + \sigma_Y^2}}{\sigma_Y} > T_c;$$

T_c — новый эффективный период.

Примеры определения показателей стойкости и надежности изделий при воздействии ударно-вибрационных факторов (с учетом внезапных отказов).

Пример. На металлоконструкцию опоры радиорелейной линии (рис. 8) действует ветровая нагрузка, представляющая собой случайный процесс с частотой 0,2—0,5 Гц (период $t_H = 2 \div 5$ с).

Определить вероятность неразрушения опоры [1].

Решение. Оценивают вид колебаний. Период собственных колебаний опоры не превышает (по расчету) 0,7 с. Поэтому воздействие ветра можно считать квазистатическим $t_H \geq 3T_e$, где T_e — период собственных колебаний.

Определяют наиболее нагруженный стержень опоры 9 (9'), испытывающий сжимающую нагрузку от действия ветра.

Если краевые напряжения в стержне не превышают предела текучести, то

$$\sigma_N \left(1 + \frac{\alpha + \beta}{1 - \frac{\sigma_N}{\sigma_0}} \right) \leq \sigma_T,$$

где σ_N — основное напряжение от действующей нагрузки, зависящее от скорости ветра; α и β — соответственно безразмерный эксцентриситет и безразмерный начальный прогиб (изменяются в пределах допуска); $\sigma_0 = \frac{\pi E}{\lambda}$ — Эйлерово напряжение; λ — гибкость стержня; σ_T — предел текучести.

Условие недопустимости предельного состояния

$$\begin{aligned} \psi &= \psi(\sigma_T, \sigma_N, \alpha, \beta) = \\ &= \frac{\sigma_T \sigma_0 + \sigma_N^2 - \sigma_N \sigma_T - \sigma_0 \sigma_N (1 + \alpha + \beta)}{\sigma_0 - \sigma_N} > 0. \end{aligned}$$

Определяют числовые характеристики величины ψ (используют метод линеаризации) по формулам:

$$\begin{aligned}\bar{\psi} &= \varphi(m_{\sigma_T}, m_{\sigma_N}, m_{\alpha}, m_{\beta}) + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m D_{x_i}; \\ D_{\psi} &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{x_i} + \\ &+ \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m (\mu_4[x_i] - \\ &- D_{x_i}^2) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m^2 D_{x_i} D_{x_j} + \\ &+ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m \mu_3[x_i],\end{aligned}$$

где x_i — один из n случайных параметров воздействующей нагрузки (в данном примере случайными являются $\sigma_N, \alpha, \beta, \sigma_T$, т. е. $n = 4$); $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m$, $\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m$, $\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m$ — частные производные, вычисленные при значениях параметров, равных их математическим ожиданиям; $D_{x_i}, \mu_3[x_i], \mu_4[x_i]$ — центральные моменты параметров.

После вычисления частных производных при значениях параметров $\sigma_T, \sigma_N, \alpha, \beta$, равных их средним значениям (полагают $m_{\alpha} = m_{\beta} = 0$), получают

$$\begin{aligned}\bar{\psi} &= \bar{\sigma}_T - \bar{\sigma}_N; \\ D_{\psi} &= D_{\delta_T} + D_{\sigma_N} + \\ &+ \frac{(\sigma_{\vartheta} + \bar{\sigma}_N)^2}{(\sigma_{\vartheta} - \sigma_N)^2} (D_{\alpha} + D_{\beta}) + \\ &+ \frac{\sigma_{\vartheta}^2}{(\sigma_{\vartheta} - \sigma_N)^2} D_{\sigma_N} (D_{\alpha} + D_{\beta}).\end{aligned}$$

Предполагая справедливым нормальный закон распределения величины ψ ,

определяют вероятность неразрушения стержня 9 ($9'$) при заданной ветровой нагрузке

$$\begin{aligned}P_{9(9')} &= 1 - F_0 \left(- \frac{m_{\psi}}{\sigma_{\psi}} \right) = \\ &= F_0 \left(\frac{m_{\psi}}{\sigma_{\psi}} \right).\end{aligned}$$

Пример. Определить вероятность безотказной работы сварной рамы насосной установки двустороннего действия, которая при работе испытывает регулярное знакопеременное нагружение. Рама изготовлена из швеллеров (материал сталь Ст3) со сваркой их по контуру. Амплитуды эксплуатационных напряжений рамы распределены нормально со средним значением $\bar{\sigma}_a = 20 \cdot 10^6$ Па и средним квадратическим отклонением $S_{\sigma_a} = 6 \cdot 10^6$ Па.

Распределение пределов выносливости нахлесточных соединений со сваркой по контуру логарифмически нормальное с параметрами

$$\overline{\ln \sigma_{-1q}} = 1,2150; S_{\ln \sigma_{-1q}} = 0,1.$$

Решение. Определяем диапазон изменения величины $\ln \sigma_{-1q}$ по правилу «трех сигм»:

$$\overline{\ln \sigma_{-1q}} - 3S_{\ln \sigma_{-1q}} \leq$$

$$\leq \overline{\ln \sigma_{-1q}} + 3S_{\ln \sigma_{-1q}}$$

или

$$0,9150 \leq \ln \sigma_{-1q} \leq 1,515.$$

Разбиваем диапазон изменения на $k = 8$ интервалов с шагом $\Delta \ln \sigma_{-1q} = 0,08$ и находим средние значения на интервале $\ln \sigma_{-1q}$, квантили нормального распределения

$$z_p = \frac{\ln \sigma_{-1qi} - \ln \sigma_{-1q}}{S_{\ln \sigma_{-1q}}}$$

и соответствующие им вероятности

$$\begin{aligned}P(\ln \sigma_{-1qi}) &= P(\sigma_{-1q}) = \\ &= \frac{\Delta \ln \sigma_{-1q}}{S_{\ln \sigma_{-1q}}} f_0(z_p),\end{aligned}$$

где $f_0(z_p)$ — табличная плотность нормального распределения.

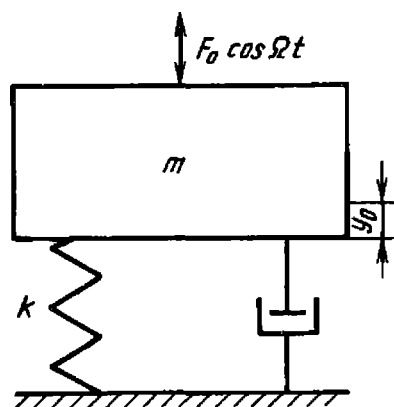


Рис. 9. Схема устройства с одной степенью свободы

Определяем квантили нормального распределения

$$z'_p = \frac{\sigma_{-1qi} - \bar{\sigma}_a}{S_{\sigma_a}}$$

и соответствующие им функции распределения

$$F_2(\sigma_{-1qi}) = F_0(z'_p),$$

где $F_0(z'_p)$ — табличная функция нормального распределения.

Суммируя произведения $P(\sigma_{-1qi}) F_2(\sigma_{-1qi})$, получим

$$P_n \cong \sum_{i=1}^8 P(\sigma_{-1qi}) F_2(\sigma_{-1qi}) = 0,971.$$

Случай 2. Реакция изделий на случайную вибрацию. Исследование конструкции включает в себя подбор подходящего аналога, определение типа возбуждения и установление критерия отказа. При определении реакции конструкции на случайную вибрацию целесообразно в качестве основной рассматривать систему с одной степенью свободы с вязким демпфированием, а в качестве возмущения взять широкополосную случайную вибрацию.

В этом случае реальное изделие можно представить в виде модели, содержащей массу m , пружину k и демпфер c . Многие составные части технических изделий либо непосредственно подходят под эту модель, либо могут быть описаны математически как системы с одной степенью свободы (рис. 9).

Пример. Рассмотрим устройство, возмущением которого является смещение

основания. Движение основания характеризуется переменной $Y = Z - C$ и спектральной плотностью ускорения основания $S_{\ddot{y}}(\omega)$. Определить величину перемещения (Y).

Решение. Дифференциальное уравнение движения массы m запишем в виде

$$m(\ddot{y} - \ddot{s}) + c\dot{y} + ky = 0.$$

Точками обозначено дифференцирование по времени.

Обозначим $\Omega^2 = k/m$ (собственная частота) и $2\Omega\xi = c/m$, где $\xi = c/c_k$ — отношение демпфирования в системе к критическому демпфированию. Тогда можно записать

$$\ddot{y} + 2\Omega\xi\dot{y} + \Omega^2 y = -\ddot{s}.$$

Для получения передаточной функции решение уравнения находим в виде $y_0 e^{j\omega t}$ при возмущении $\ddot{s} e^{j\omega t}$. Подставив эти соотношения в уравнение, получим

$$H_a(\omega) = \frac{y_0}{\ddot{s}} = - \frac{1}{\Omega^2 \left[1 - \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 2j\xi \left(\frac{\omega}{\Omega} \right) \right]}.$$

Среднее квадратическое значение относительного смещения (реакции системы) находим через передаточную функцию

$$\begin{aligned} \overline{Y^2} &= \frac{S_{\ddot{s}}(\Omega)}{\Omega^4} \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{d\omega}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \left(\frac{\omega}{\Omega} \right) \right]^2} = \\ &= \frac{S_{\ddot{s}}(\Omega)}{\Omega^4} \frac{\pi\Omega}{4\xi}. \end{aligned}$$

Если частоту Ω выразить в Гц, а $S_{\ddot{s}}(\Omega)$ в $(\text{м} \cdot \text{с}^{-2})^2/\text{Гц}$, то

$$\sqrt{\overline{Y^2}} = \frac{5}{4} \sqrt{\frac{S_{\ddot{s}}(f_n)}{\pi^3 \xi f_n^3}}.$$

Пример. Возмущением является сила $F(t)$, действующая на массу m . В рассматриваемом случае возмущение ха-

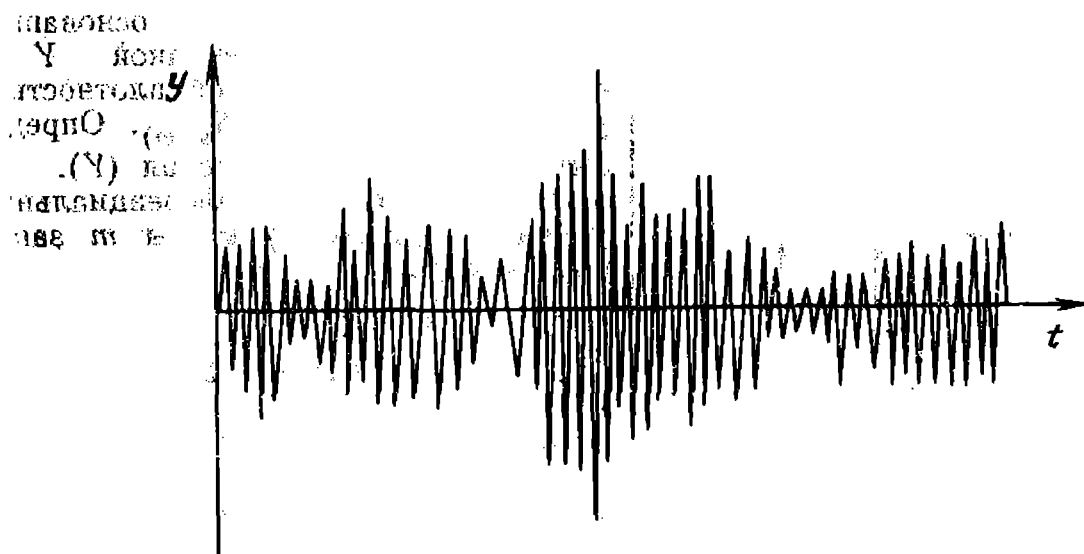


Рис. 10. Временной закон для узкополосной случайной вибрации:
 y — амплитуда перемещений

рактически характеризуют спектральной плотностью силы на единицу жесткости пружины $S_{F/k}(\Omega)$.

Дифференциальное уравнение движения массы (см. рис. 9) будет

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t).$$

Для получения передаточной функции представим $F(t)$ и $y(t)$ в виде $F_0 e^{j\omega t}$ и $y_0 e^{j\omega t}$. В результате решения получим

$$H(\omega) = \frac{y_0}{F_0/k} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2 + j2\xi \frac{\omega}{\Omega}}.$$

Средний квадрат смещения массы $\overline{Y^2} = S_{F/k}(\Omega) \times$

$$\times \int_0^\infty \frac{d\omega}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \frac{\omega}{\Omega}\right]^2} = S_{F/k}(\Omega) \frac{\pi\Omega}{4\xi}.$$

Если частоту выразить в Гц, то получим

$$\sqrt{\overline{Y^2}} = \sqrt{\frac{\pi f_n S_{F/k}(f_n)}{4\xi}},$$

$$\text{где } f_n = \frac{\Omega}{2\pi}.$$

В рассмотренных примерах критерий отказа технических изделий связан с величиной перемещения их под воздействием ударно-вибрационных нагрузок. Вероятность повреждения изделий можно предсказать статистически, используя средние квадратические значения перемещения $\sqrt{\overline{Y^2}}$ и функцию распределения вероятности пиковых значений перемещения Y_n . При решении этой задачи необходимо учитывать, что если демпфирование в системе мало, то ее реакция на широкополосную случайную нагрузку будет представлять узкополосный случайный процесс (рис. 10, гармоника с частотой системы f_Ω и амплитудой, медленно изменяющейся между наибольшим и наименьшим значениями). Распределение пиковых значений Y_n этого случайного процесса можно описать Рэлеевским законом

$$P\left(\frac{|Y_n|}{\sqrt{\overline{Y^2}}}\right) = \exp\left\{-\frac{Y_n^2}{2\overline{Y^2}}\right\}.$$

Числовое значение Y_n можно определить, подставив $\sqrt{\overline{Y^2}}$. Плотность вероятности $\Phi\left(\frac{|Y_n|}{\sqrt{\overline{Y^2}}}\right)$ равна взя-

той с обратным знаком производной

$$P\left(\frac{Y_n}{\sqrt{Y^2}}\right) \text{ по } \frac{|Y_n|}{\sqrt{Y^2}};$$

$$\Phi\left(\frac{|Y_n|}{\sqrt{Y^2}}\right) = \frac{|Y_n|}{\sqrt{Y^2}} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{Y_n^2}{2Y^2}\right\}.$$

Зная допустимое перемещение для установленного критерия отказа, можно определить допустимую величину возмущения так, чтобы вероятность того, что перемещение превысит допустимое значение, была достаточно мала.

Если критерием неисправности является допустимая величина напряжения в конструкции, то в этом случае по относительному перемещению Y массы m нужно найти напряжение в том элементе конструкции, аналогом которого является пружина k . Результат такого преобразования зависит от особенностей конструкции этого элемента.

Динамический анализ системы, представленной на рис. 9, можно использовать для любой формы колебаний реальной конструкции. В приведенных примерах анализировались конструкции, в которых масса упругого элемента (k) пренебрежимо мала по сравнению с массой твердого тела (m), поддерживаемого этим элементом. На сформулированном принципе основано применение при анализе отказов в качестве аналога изделий различных видов балок, масса которых пренебрежимо мала по сравнению с массой груза. Тогда систему балка плюс груз можно рассматривать как систему с одной степенью свободы, причем перемещение балки под нагрузкой относительно основания соответствует прогибу пружины k на рис. 9.

Соотношение между максимальным напряжением балки и прогибом под грузом находится по методам сопротивления материалов.

При исследовании отказов изделий часто возникает необходимость применения в качестве аналога таких балок, массой которых нельзя пре-

небречь по сравнению с приложенной нагрузкой. В этом случае при определении реакции балки-аналога на приложенное возмущение необходимо учесть ее массу. Наиболее простой аналог для исследований — это однородная балка с равномерно распределенной массой.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний однородной балки при отсутствии демпфирования имеет вид [12]

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\mu}{EI} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0,$$

где y — поперечный прогиб балки; x — координата, отсчитываемая вдоль оси балки; μ — масса на единицу длины; E — модуль Юнга; I — момент инерции площади поперечного сечения.

Приведенное уравнение имеет следующее решение:

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k(x) \xi_k(t),$$

где $\varphi_k(x)$ — собственная форма колебаний (первая гармоника); $\xi_k(t)$ — интенсивность формы колебаний с собственной частотой Ω_k . Собственные формы колебаний однородной балки определяются выражением

$$\varphi_k(t) = A \sin d_k \frac{x}{l} + B \cos d_k \frac{x}{l} + C \operatorname{sh} d_k \frac{x}{l} + D \operatorname{ch} d_k \frac{x}{l},$$

$$\text{где } d_k/l = \sqrt{\Omega_k^2 \mu / EI}$$

Собственные частоты колебаний балки

$$\Omega_k = \frac{d_k^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}}.$$

Дифференциальное уравнение для $\xi_k(t)$ можно записать в виде

$$\ddot{\xi}_k + \rho_k^2 \xi_k + \eta_k \dot{s}(t) = 0,$$

где $\ddot{\xi}_k$ можно рассматривать как реакцию балки по k -й форме (гармонике) колебаний; $\dot{s}(t)$ — ускорение опор;

10. Значения коэффициента η в зависимости от аналога

Балка-аналог	η_1	η_2	η_3	η_4	η_5
Защемленно-свободная	0,7830	0,4339	0,2544	0,1819	0,1415
Оперто-опертая	1,2732	0,0000	0,4233	0,0000	0,2546
Защемленно-защемленная	0,8386	0,0000	0,3638	0,0000	0,1158
Свободно-свободная	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Защемленно-опертая	0,8600	0,8626	0,3344	0,0439	0,2070
Оперто-свободная	-0,3703	0,1998	-0,1385	0,1059	-0,0857
Скользяще-опертая	1,2732	-0,4233	0,2546	-0,1819	0,1415
Скользяще-скользящая	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Защемленно-скользящая	0,8309	0,3638	0,2315	0,1698	0,1340
Скользяще-свободная	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

η_k — коэффициент вовлечения k -й формы колебаний:

$$\eta_k = \frac{\int_0^l \mu \varphi_k(x) dx}{\int_0^l \mu \varphi_k^2(x) dx}.$$

В табл. 10 приведены значения η_k для первых пяти форм (гармоник) каждой из десяти различных балок.

При рассмотрении различных критериев отказов целесообразно использовать реакцию балки по каждой форме колебаний отдельно. Тогда выражение для перемещения y_k по k -й форме колебаний можно записать в виде

$$y_k(x, t) = \varphi_k(t) \xi_k(t).$$

Если балка совершает колебания с частотой возмущения ω , то после дифференцирования (дважды) получим

$$\ddot{y}_k(x, t) = -\omega^2 \xi_k(t) \varphi_k(t).$$

Далее находят передаточную функцию перемещения по отношению опор и среднее квадратическое значение перемещения по k -й форме

$$\begin{aligned} \sqrt{Y_k^2(x)} &= 10\eta_k \varphi_k(x) \times \\ &\times \sqrt{-\frac{S_{\bar{s}/g}(f_k)}{64\pi^3 \xi_k f_k^3}}. \end{aligned}$$

Пример. Определить перемещение кронштейна с закрепленным на нем топливным насосом. В качестве аналога кронштейна с закрепленным на нем топливным насосом двигателя внутреннего сгорания можно принять стальную консольную балку длиной 305 мм, шириной 25,4 мм и толщиной 6,34 мм. Опора совершает случайные вибрации, распределенные по нормальному закону со средним квадратом спектральной плотности ускорения 10 (м·с⁻²)/Гц, постоянным в диапазоне частот 20—4000 Гц.

Собственные частоты имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \Omega_k &= \alpha_k^2 \sqrt{\frac{30 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot (0,25)^3}{0,25 \cdot 0,25^5 / 388 \cdot 12}} \approx \\ &\approx 100\alpha_k^2 \text{ рад/с.} \end{aligned}$$

Значения α_k для первых пяти форм колебаний [12]: $\alpha_1 = 1,88$; $\alpha_2 = 4,69$; $\alpha_3 = 7,85$; $\alpha_4 = 11,0$; $\alpha_5 = 14,14$.

Найденные для этих α_k собственные частоты приведены во второй строке табл. 11.

Перемещение балки по каждой из форм колебаний

$$\sqrt{Y_k^2} = 10\eta_k \varphi_k(x) \sqrt{\frac{S_{\bar{s}/g}(f_k)}{64\pi^3 \xi_k f_k}},$$

ξ_k принимаем равным 0,01.

По приведенной формуле, используя значения собственных частот в гер-

11. Значения собственных частот

Параметры	Номер гармоники k				
	1	2	3	4	5
f_k	56,6	354	997	1955	3210
η_k	0,7830	0,4339	0,2544	0,1819	0,1415
$V \sqrt{Y_k^2(x)/\varphi_k(x)}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$8,96 \cdot 10^{-2}$	$10,85 \cdot 10^{-4}$	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$10,85 \cdot 10^{-5}$
$f_k^{1/2}$	7,52	18,8	31,6	44,3	56,5
$V \sqrt{\sigma_k^2(x)/\varphi_k''(x)}$	23,46	5200	1808	928	560

цах (f_k — табл. 11) и значения коэффициента вовлечения η_k (см. табл. 10), находим перемещение балки по каждой из форм колебаний.

На рис. 11 приведена характеристика прогиба консольной балки при случайных вибрациях заделки по первой форме ($k = 1$).

Перемещения по высшим формам колебаний, как следует из табл. 10, мало влияют на полное перемещение. Несмотря на пренебрежимо малый прогиб по высшим формам по сравнению с прогибом по первой форме, соответствующие напряжения по высшим формам и по первой форме соизмеримы между собой. Вероятное максимальное напряжение зависит не только от максимумов напряжений по каждой форме колебаний, но и от вероятности совпадения моментов достижения максимумов по каждой из форм.

Механизм воздействия второго типа. Наиболее характерным примером механизма второго типа является процесс усталостных повреждений в конструкции изделия.

При периодически изменяющихся нагрузках, вызывающих в материалах переменные напряжения σ , наблюдаются прогрессивно растущие трещины усталости. При каждой амплитуде изменений напряжения σ за цикл по достижении некоторого числа N циклов происходит разрушение материала. Естественно полагать, что число циклов нагружения до разрушения при данном напряжении σ есть

убывающая функция размеров трещины. Отсюда вытекает, что число N циклов до разрушения должно подчиняться закону распределения минимального члена из большого числа случайных независимых величин — чисел циклов, отвечающих различным по размерам трещинам.

Полагают, что параметр β , характеризующий скорость роста трещины, имеет вид

$$\beta = c\sigma^\alpha,$$

где c — постоянная; σ — номинальное напряжение; α — показатель, определяемый по экспериментальным данным.

Тогда размер трещины, при котором происходит разрушение,

$$h_0 = A \exp \{c\sigma^\alpha N\}.$$

Откуда

$$\sigma^2 N = \frac{\ln h_0 - \ln A}{c}.$$

Если на изделие действуют циклы нагружения с переменной амплитудой напряжения σ от цикла к циклу, то рассматривают эффективную скорость роста трещины

$$\left(\frac{dh}{dn} \right)_r = \frac{\Delta n_1 (\partial h / \partial n)_1 + \Delta n_2 (\partial h / \partial n)_2}{\Delta n_1 + \Delta n_2}.$$

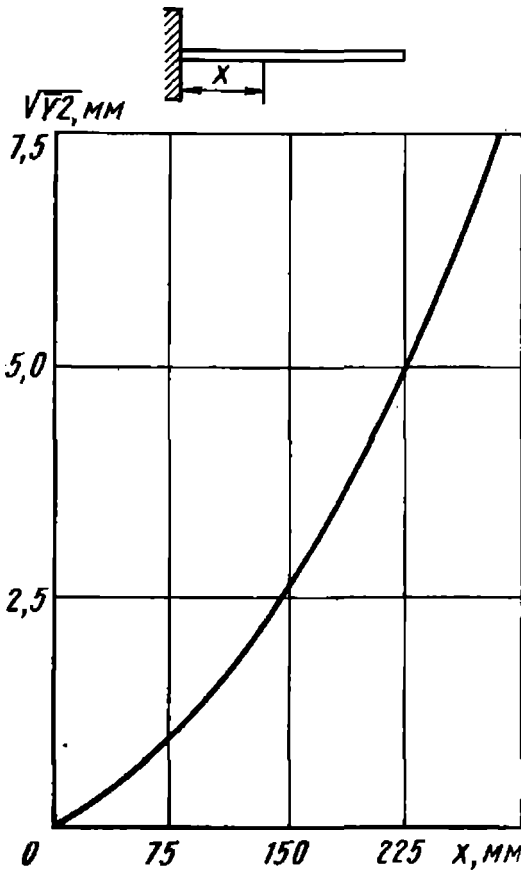


Рис. 11. Характеристика прогиба по первой форме для консольной балки $V\sqrt{Y^2}$ при случайных вибрациях заделки со средним ускорением в заделке, равным $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$:

x — координата, отсчитываемая вдоль оси балки, мм

где Δn_1 — число циклов действия напряжения с амплитудой σ_1 ; Δn_2 — соответственно с σ_2 .

Дифференцирование текущего значения трещины по n с учетом приведенных соотношений и решение полученных соотношений относительно σ_r дает

$$\sigma_r = \left(\frac{\sum_i \Delta n_i \sigma_i^\alpha}{\sum_i \Delta n_i} \right)^{1/\alpha} -$$

эквивалентное напряжение постоянной амплитуды σ_r , при воздействии которого в течение N циклов произойдет разрушение изделия.

Произведя замену $\sum_i \Delta n_i = N$ и сделав ряд преобразований, получим известный линейный закон накопления повреждений

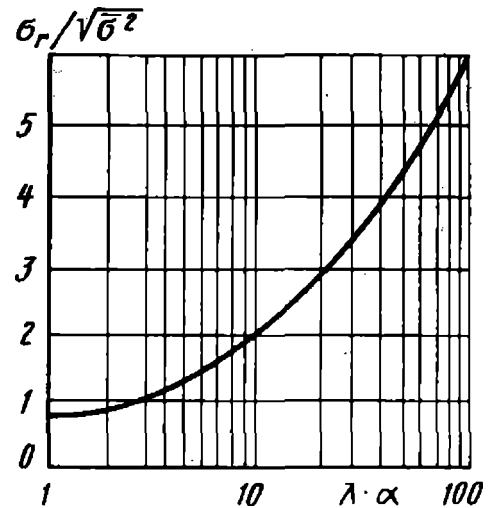


Рис. 12. Амплитуды приведенного напряжения σ_r по среднему квадратическому значению напряжения σ и параметру $\lambda\alpha$ (материал — сталь Ст3)

$$\sum_i \frac{\Delta n_i}{N_i} = 1.$$

Отнеся σ_r к среднему квадратическому значению напряжения, получим

$$\frac{\sigma_r}{\sqrt{\sigma^2}} = \left[\frac{\sum_i \Delta n_i \left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma^2}} \right)^{\lambda\alpha}}{\sum_i \Delta n_i} \right]^{\lambda\alpha},$$

где λ — показатель, определяемый по экспериментальным данным.

Приведенные соотношения, как показано в работе [12], можно распространить на случайные вибрации, когда имеется узкополосный случайный процесс с числом пересечений нулевого уровня, равным сумме числа максимумов и минимумов. Тогда суммирование амплитуд напряжений заменяется интегрированием плотности вероятности пиковых значений в узкополосном процессе.

В результате замены суммирования интегрированием и выполнения специальных преобразований имеем

$$\frac{\sigma_r^2}{\sqrt{\sigma^2}} = \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{2} \right)^{1/\lambda\alpha} \sqrt{\frac{\lambda\alpha}{l}}.$$

На рис. 12, 13 приведены кривые зависимости амплитуды напряжений

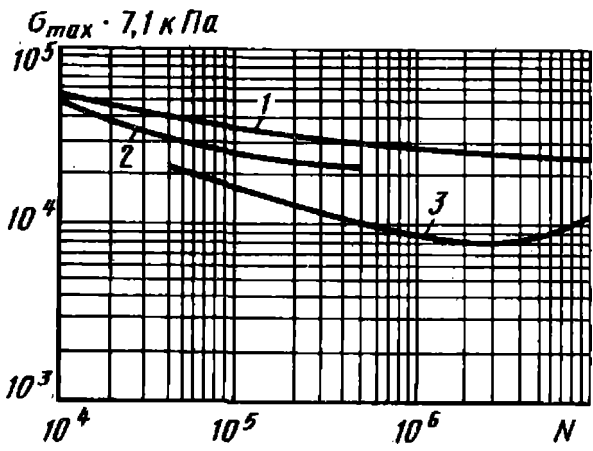


Рис. 13. Зависимость амплитуды напряжения от числа циклов N до разрушения при синусоидальном законе изменения напряжения:

1 — испытано 8 образцов; 2 — 3 образца; 3 — 125 образцов

от числа циклов изменения напряжений до разрушения.

Параметр λ , вычисленный по наклону кривых, приведен в табл. 12.

Оценка усталостного разрушения при сложной зависимости напряжений от времени. Любую сложную зависимость напряжения от времени можно представить в виде комбинации гладких полуволн, каждая из которых дает определенное вычислимое число повреждений. Любая зависимость напряжения от времени содержит число стационарных значений, т. е. точек, в которых $\frac{d\sigma}{dt} = 0$. Поэтому любую зависимость напряжений можно

представить в виде последовательности полуволн, смыкающихся в точках экстремумов. Предполагается, что каждая из полуволн приводит к числу повреждений, вдвое меньшему, чем дает целая волна с теми же значениями максимумов и минимумов.

Рассмотрим экспериментальные данные при воздействии на изделия напряжения, изменяющегося во времени, в виде следующего закона (формы):

$$\sigma = A \sin \omega t + B \sin (2\omega t - \psi),$$
 где для соотношения амплитуд A/B рассматривались значения 0,1; 0,25; 0,67; 1,33; 2,00, а фазовый угол ψ имел значения 0 и $\pi/2$.

Результаты испытаний стальных образцов и образцов алюминиевого сплава приведены на рис. 14. На рис. 15 приведены результаты испытаний тех же материалов при синусоидальном изменении напряжения. Сделано предположение, что время «жизни» образцов при испытаниях по программе, задаваемой указанной формой, может быть установлено по данным экспериментов с гармоническим изменением напряжения, если принять за N число циклов основной гармоника, а в качестве амплитуды — максимальное напряжение негармонического цикла. На рис. 16 приведены результаты определения точности прогнозирования времени «жизни» образца по сформулированной гипотезе. В качестве ординаты принято отношение $R = \ln N_i / \ln N_c$, где N_i — число циклов до разрушения, определенное экспериментально; N_c — число циклов

12. Значения параметра λ

α	Случайные вибрации		σ_r	$\frac{\sigma_r}{\sqrt{\sigma^2}}$	$\lambda\alpha$	λ
	$\sqrt{\sigma^2}$	N_r				
7,32	12 150	$1,3 \cdot 10^5$	28 200	2,32	14,1	1,93
7,32	11 150	$2,1 \cdot 10^5$	26 000	2,33	14,1	1,93
6,15	12 300	$1,38 \cdot 10^5$	27 000	2,20	12,7	2,06
6,15	10 300	$2,95 \cdot 10^5$	23 900	2,32	14,0	2,28
6,15	9 100	$4,50 \cdot 10^5$	22 400	2,46	16,0	2,6
4,51	17 800	$4,29 \cdot 10^4$	20 700	1,16	3,2	0,71
4,51	8 700	$4,29 \cdot 10^5$	12 300	1,42	5,0	1,11
16,7	5 000	$4,29 \cdot 10^6$	9 100	1,82	8,5	0,51

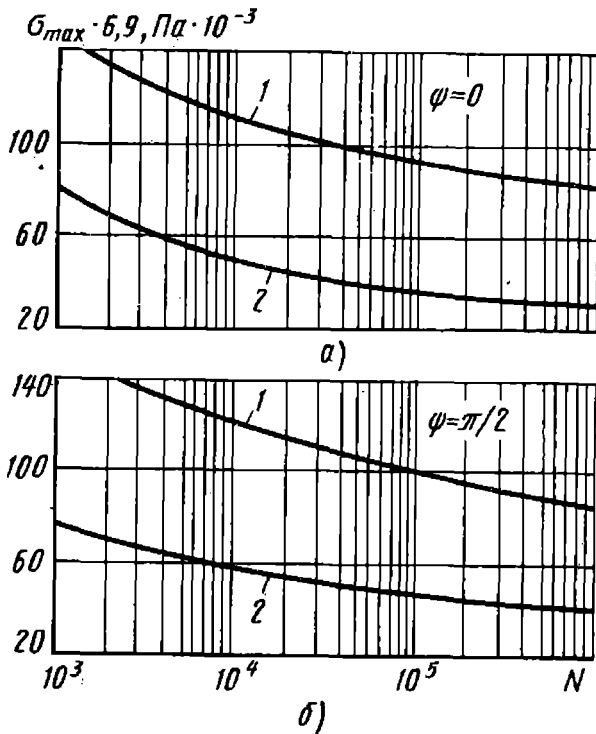


Рис. 14. Зависимость максимального напряжения $\sigma_{\max}$ цикла от числа N циклов до разрушения для приведенного закона изменения напряжения при $A/B = 0,67$:

а — при $\psi = 0$; б — при $\psi = \pi/2$; 1 — сталь; 2 — алюминий

о разрушения, вычисленное по приведенной гипотезе.

По результатам вычисления предкажывается логарифм числа циклов до разрушения с точностью до 10% завышаются результаты при $\psi = 0$ и занижаются при $\psi = \pi/2$.

Из изложенного следует, что расчет на усталость вероятностными методами позволяет определить и оценить связь сроков службы с показателями безотказности.

Методы расчета изделий на прочность могут быть различными в зависимости от стадии проектирования изделий. Если при проектировании экспериментальные данные отсутствуют, то расчет на прочность проводят с помощью методов сопротивления материалов без учета статистических описываемых факторов.

Пример. Оценить вероятность усталостного повреждения боковины рамы тележки (в зоне приварки тяжело нагруженного кронштейна) при пробеге локомотива 510 тыс. км.

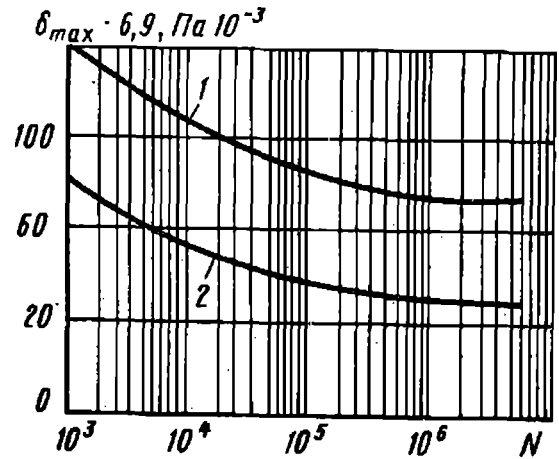


Рис. 15. Зависимость амплитуды напряжения от числа циклов N до разрушения при синусоидальном законе изменения напряжения:

1 — сталь; 2 — алюминий

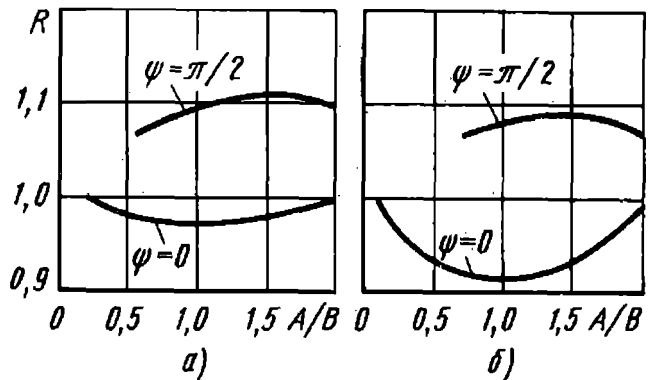


Рис. 16. Зависимость значения R от отношения амплитуд A/B :

а — для стали; б — для алюминия

Суммарное число циклов при пробеге 510 тыс. км составило $N_{\Sigma} = 4 \cdot 10^7$ циклов.

Параметры кривой усталости конструкции в исследуемом сечении боковины рамы оценивали по результатам усталостных испытаний * аналогич-

* Если закон распределения амплитуд представлен в виде ступенчатого графика со ступенями σ_{ai} , то случайные вариации функции распределения амплитуд при их подобном преобразовании могут быть описаны соотношением

$$\sigma_{ai} = \bar{\sigma}_{ai} \varepsilon,$$

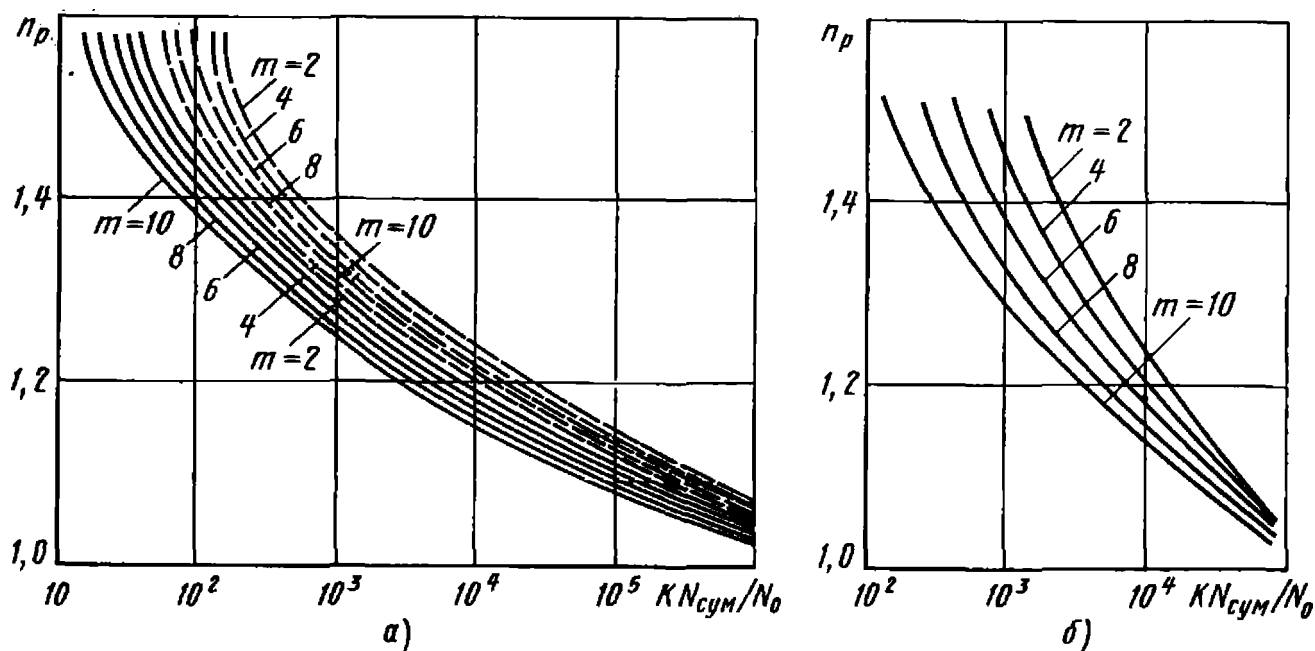


Рис. 17. Вероятность разрушения тележки локомотива при различных законах распределения амплитуд напряжений

ных сварных рам [11]: $\sigma_{-1д} = 28$ МПа; $\nu_{\sigma_{-1д}} = 0,1$; $m = 8$; $N = 210^6$. Известна функция распределения * амплитуд напряжений в раме тележки локомотива при различных скоростях движения $F(\sigma)$. По этим данным и известной гистограмме распределения скоростей движения находят пара-

где $\bar{\sigma}_{ai}$ — среднее значение амплитуды i -й ступени блока; $\varepsilon = 1 + U_p U_\varepsilon$ — нормально распределенная случайная величина, имеющая среднее значение, равное 1; U_ε — коэффициент вариации, характеризующий случайные отклонения уровней нестационарной нагруженности; U_p — квантиль нормального распределения.

* Распределение амплитуд напряжений в раме тележки локомотива с достаточной точностью описывается нормальным законом распределения. Уровень напряжения существенно зависит от скорости движения локомотива. Коэффициент вариации амплитуд ν_{σ_a} остается практически постоянным (следовательно, функции распределения преобразуются в соответствии с уравнением $\sigma_{ai} = \bar{\sigma}_{ai}\varepsilon$).

метры распределения амплитуд:

$$f(\sigma_a) = \sum_k P_k f_k(\sigma);$$

$$\bar{\sigma}_a = \sum_k P_k \bar{\sigma}_{ak}, \quad \bar{\sigma}_{ak} = M\{\sigma_{ak}\} =$$

$$= \int_0^\infty \sigma f_k(\sigma) d\sigma;$$

$$S_{\sigma_{ak}}^2 = \sum_k P_k \bar{\sigma}_{ak}^2 (1 + \vartheta_k^2) - \bar{\sigma}_a^2 =$$

$$= \sum_k P_k [S_{\sigma_{ak}}^2 + (\bar{\sigma}_{ak} - \bar{\sigma}_a)^2],$$

где P_k — относительное время работы машины в условиях с номером k ; $f_k(\sigma_a)$ — плотность распределения амплитуд напряжений в условиях с номером k ; $\bar{\sigma}_{ak}$, ϑ_k — математическое ожидание и коэффициент вариации амплитуд в условиях с номером k ; $\bar{\sigma}_a$, $S_{\sigma_{ak}}^2$ — среднее значение и дисперсия смешанного закона распределения амплитуд.

Для низкоуглеродистой стали $k = 1,33^*$ (для среднеуглеродистой стали $k = 1,65$; для легированной стали $k = 1,80$).

Вероятность разрушения рассчитывают по диаграмме для нормального закона (рис. 17, а).

Находят

$$\frac{kN_{\text{сум}}}{N_0} = \frac{1,33 \cdot 4 \cdot 10^7}{210^6} = 26,6;$$

$$\lg \frac{kN_{\text{сум}}}{N_0} = 1,425.$$

Для этого значения $\frac{kN_{\text{сум}}}{N_0}$ при $m = 8$ и $\vartheta_{\sigma_a} = 0,3$ по рис. 17 получают $n_p = 1,5$. По аналогичному рисунку для случая $\vartheta_{\sigma_a} = 0,4$ получено $n_p' = 1,6$. При линейной интерполяции для $\vartheta_{\sigma_a} = 0,34$ получено $n_p = 1,54$.

Определяют предельный коэффициент нагруженности

$$n_p = \frac{\bar{\sigma}_a \text{ max}}{\sigma_{-1\text{д}}} = \frac{3200}{2800} = 1,14,$$

где $\bar{\sigma}_a \text{ max} = \bar{\sigma}_a (1 + U_p \text{ max } \vartheta_{\sigma_a}) = 32 \text{ МПа}$ — фиксированное значение предела выносливости.

Определяют относительный коэффициент запаса

$$n_3 \simeq \frac{n_p}{n} = \frac{1,54}{1,14} = 1,35.$$

Вычисляют квантиль нормального распределения

$$U_p = \frac{1 - n_3}{\sqrt{n_3^2 \vartheta_{\sigma-D}^2 + \vartheta_{\sigma}^2}} = \frac{1 - 1,35}{1,35^2 \cdot 0,1^2 + 0,15^2} = -1,735.$$

По таблицам нормального распределения находят вероятность разрушения тележки локомотива $q = 4,15\%$.

В случае экспоненциального закона распределения амплитуд при расчетах используют рис. 17, б.

4. ЗАЩИТА ИЗДЕЛИЙ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Технические изделия в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных механических нагрузок: вибрациям, ударам, динамическому воздействию при транспортировании, акустическим шумам и др., вызывающим механические напряжения в отдельных элементах конструкции изделия.

Каждый из указанных видов механических воздействий имеет различные физические свойства, которые по-разному влияют на изделия.

В условиях воздействия длительных вибрационных нагрузок проявляются эффекты усталости материалов, вызывающие разрушение элементов конструкции и отказы изделий. Удары возбуждают в элементах конструкции колебания в широком спектре частот, что может вызвать на собственных (резонансных) частотах большие амплитудные перемещения этих элементов и отказы изделий. Акустические шумы по характеру воздействия подобны вибрациям и ударам только в более высоком диапазоне действующих частот. Они создают амплитудно-частотную паразитную модуляцию колебаний, дополнительные шумы и могут вследствие механических перемещений элементов конструкции привести к отказам изделия.

Для защиты (изоляции) изделий от воздействия механических нагрузок широко применяют специальные виброизолирующие устройства — вибро-

* Предел выносливости поврежденных циклическим деформированием образцов может быть представлен в виде

$$\sigma_{-1 \text{ пов}} = \sigma_{-1 \text{ исх}} \times \left[1 - \frac{n_H}{N_H} k \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1 \text{ max}}} - 1 \right) \right],$$

где $\frac{n_H}{N_H}$ — относительное число циклов начального переменного нагружения при напряжении σ_a .

изоляторы, устанавливаемые между изделием и вибрирующей опорой.

По характеру приложенных внешних нагрузок различают активную и пассивную изоляцию. Если изделие само является источником колебаний, которые необходимо изолировать от опорного основания, то речь идет об активной изоляции.

Если необходимо защитить изделие от колебаний опорного основания, вызванных влиянием других машин, то говорят о пассивной изоляции. Средства изоляции в обоих случаях одни и те же, но требования к виброизоляторам различны в зависимости от характера приложенных внешних нагрузок и рода возбуждаемых колебаний.

Проектирование изоляции состоит в определении числа упругих изолирующих элементов и расположении их относительно изолируемого изделия так, чтобы все шесть собственных частот изделия были бы ниже частоты возбуждения и находились с ней в определенных количественных соотношениях.

Разработка рациональной виброизоляции невозможна без точных данных о всех собственных частотах изделия.

Виброизоляция. При анализе виброизоляции рассматривают совокупность собственных и вынужденных колебаний изолируемого технического изделия.

Для случая периодических вынужденных колебаний в качестве метода исследований применяют метод главных координат, сущность которого сводится к выбору обобщенных координат колебательной системы таким образом, чтобы в выражениях для потенциальной и кинетической энергии системы отсутствовали члены с взаимными произведениями координат. Такие обобщенные координаты называют главными.

При рассмотрении системы под воздействием собственных и вынужденных колебаний необходимо учитывать, что разность между частотами собственных и вынужденных колебаний может принимать и сравнительно малые значения. В этом случае на эффективности виброизоляции начинает сказываться влияние демпфиро-

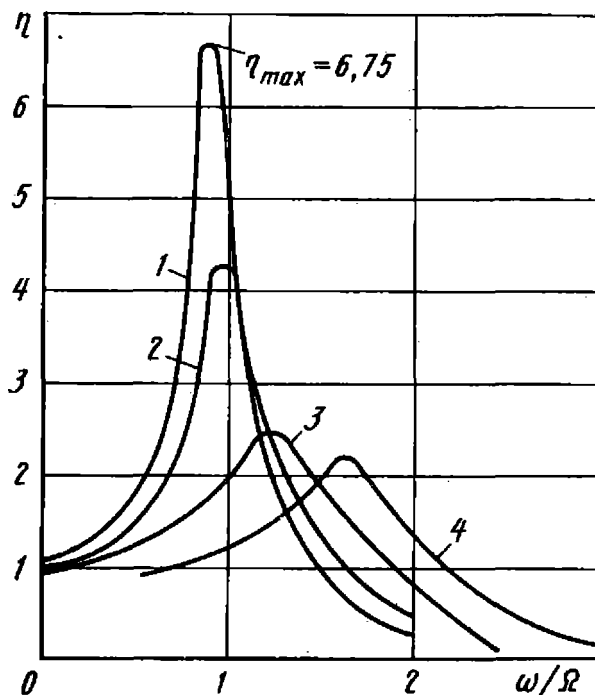


Рис. 18. Зависимость коэффициента ударов η от величины отношения ω/Ω :

1 — $A = 0,8$ мм, $f_{\text{рез}} = 22,5$ Гц; 2 — $A = 0,6$ мм, $f_{\text{рез}} = 24$ Гц; 3 — $A = 0,4$ мм, $f_{\text{рез}} = 29$ Гц; 4 — $A = 0,2$ мм, $f_{\text{рез}} = 39$ Гц

вания, оцениваемое коэффициентом демпфирования колебаний (D).

С учетом изложенного изолирующий эффект изоляции оценивают отношением силы, действующей на основание при наличии виброизоляторов P'_{mi} , к соответствующей силе, действующей на основание при отсутствии виброизоляторов P_{mi} . Это отношение называют коэффициентом виброизоляции:

$$\eta = \sqrt{\frac{1 + 4\gamma^2 D^2}{(1 - \gamma^2)^2 + 4\gamma^2 D^2}},$$

где $\gamma = \frac{\omega_i}{\Omega_i}$ — отношение возбуждающей частоты к собственной; $\Omega_i = \sqrt{\frac{\alpha_i}{\beta_i}}$ — собственная частота изолируемой системы по i -й главной координате; $D = \frac{\vartheta}{\sqrt{4\pi^2 + \vartheta^2}}$ — коэффициент демпфирования колеба-

$$\text{ний; } \vartheta = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{\beta_i \alpha_i}{h_i^2} - 1/4}} \text{ — логарифмический декремент затухания колебаний системы в направлении } i\text{-й координаты.}$$

Зависимость коэффициента виброизоляции ударов η от величины отношения частоты вынужденных колебаний к частоте собственных колебаний изделия $\left(\gamma = \frac{\omega}{\Omega}\right)$ приведена на рис. 18.

Для оценки коэффициента полезного действия виброизоляции используют соотношение

$$\mathcal{E} = (1 - \eta) 100 \text{ \%}.$$

Анализ графика кривых на рис. 18 позволяет сделать следующие выводы о свойствах виброизоляции.

1. При $\omega \ll \Omega$ значение η близко к единице. Это свидетельствует о том, что в рассматриваемом случае применение виброизоляции нецелесообразно.

2. При $\Omega = \omega$ значение η возрастает и при малом демпфировании амплитуда колебаний принимает большие значения (резонанс). Конструкция изделия должна быть выполнена таким образом, чтобы

$$\gamma = \frac{\omega}{\Omega} > \sqrt{2}.$$

При $\gamma > \sqrt{2}$ значение η уменьшается с уменьшением демпфирования. При $D = 0$ коэффициент виброизоляции принимает наименьшие значения.

3. При $\gamma \approx 5$ кривая эффективности идет почти горизонтально, т. е. при $\gamma \geq 5$ применение виброизоляции неэффективно.

При оценке и проектировании виброизоляционной защиты изделий необходимо учитывать воздействие всех возможных источников возбуждающих колебаний. Например, внутри блоков радиоэлектронной аппаратуры часто располагают изделия, создающие механические вибрации (вентиляторы, элементы автоматики и т. п.).

Виброзащита изделий при транспортировании. При транспортировании изделия подвергаются воздействию дина-

мических нагрузок. К виброизоляторам защиты в этом случае предъявляют требования обеспечения защиты изделий от случайных толчков и ударов большой амплитуды.

Анализ уравнений движения технического изделия под воздействием транспортирования показывает, что виброизоляторы, служащие для защиты изделий при транспортировании, должны обладать значительным демпфированием. В этом случае будет исключено воздействие долго не затухающих собственных колебаний. Если на процесс колебаний при транспортировании накладываются нерегулярные возмущения от толчков, то для обеспечения быстрого затухания возникающих при этом собственных колебаний увеличивают демпфирование. Например, при разработке изоляций изделий авиационной техники обеспечивают величину демпфирования, равную 0,5.

Решая вопрос о защите перевозимых изделий, исходят из соотношения $\gamma = 3 \div 5$.

Частоты возбуждающих колебаний при транспортировании определяются видом транспорта. Например, частоты, связанные с колебанием кузовов автомобилей, находятся в пределах:

1-й диапазон частот 2—5 Гц — собственные колебания поддресоренных масс передней и задней подвесок;

2-й диапазон частот 6—14 Гц связан с собственной частотой неподдресоренных масс на шинах и рессорах;

3-й диапазон частот 10—300 Гц связан с вибрациями двигателей;

4-й диапазон частот от 10 до нескольких сотен герц связан с возбуждениями рамы и элементов самого кузова.

Исследования показывают, что так как все виды транспорта имеют средства виброзащиты, то в общем случае нет необходимости в установке на транспортных машинах дополнительных виброизоляторов. Однако при медленной езде и недостаточной загрузке кузова толчки и удары непосредственно передаются на изделия, размещенные в кузове. В этом случае требуется дополнительная легкая виброизоляция транспортируемого изделия.

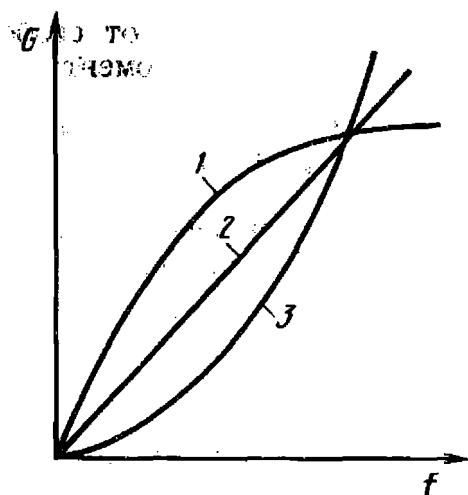


Рис. 19. Особенности характеристики виброизоляции:

1 — мягкой; 2 — линейной; 3 — жесткой;
G — нагрузка

лия. Эта изоляция защищает изделие и при работе их на ходу транспортного средства. Изделия, устанавливаемые на самолетах и кораблях, амортизируются автономно с помощью виброизоляторов с высоким демпфированием и с жесткой характеристикой (рис. 19). Этим требованиям удовлетворяют резиновые виброизоляторы, а также пружинные равночастотные виброизоляторы с воздушно-резиновым демпфированием.

Изоляция ударов. Технические изделия при эксплуатации испытывают воздействие ударов, имеющих форму неустановившихся импульсов. При этом развиваются ускорения от единиц до десятков тысяч $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$. Инерционные нагрузки, действующие в момент удара, могут превзойти допустимые значения и привести к разрушению изделия. Ослабление воздействия ударных нагрузок достигается с помощью специальных виброизоляторов. При этом, чем больше деформация виброизоляторов (чем мягче виброизолятор), тем меньшие ударные ускорения получит изделие. Выбор виброизоляторов для изоляции ударов, как и виброизоляции, проводит на основе анализа законов смещения основания и параметров данной колебательной системы (m , k , h_z , где m — масса изолируемого изделия; k — коэффициент жесткости виброизоля-

тора на сжатие; h_z — коэффициент внутреннего трения виброизолятора).

При решении уравнения движения изделия относительно неподвижного основания под действием ударного импульса рассматривают следующие три случая:

1) угловая частота собственных колебаний больше коэффициента затухания ($\Omega > \delta$);

2) угловая частота собственных колебаний равна коэффициенту затухания ($\Omega = \delta$);

3) угловая частота собственных колебаний меньше коэффициента затухания ($\Omega < \delta$).

В результате решения уравнения движения при действии на основание одиночного импульса синусоидальной полуволны получены зависимости для определения времени наступления максимумов смещения и ускорения основания.

1-й случай $\Omega > \delta$. Смещение изолируемого изделия состоит из двух слагаемых — смещения от свободных колебаний и смещения от возбуждающего импульса.

Система будет иметь два максимума, соответствующих этим составляющим. Время наступления максимума смещения от собственных колебаний

$$t_{\max} = \frac{\pi/2 - \alpha - \psi}{\Omega},$$

$$\text{где } \psi = \arctg \frac{D}{\sqrt{1-D^2}}.$$

Время наступления максимума смещения изолируемого изделия от возбуждающих колебаний

$$\tau_{\max} = \frac{\pi/2 - \varphi_z}{\omega}.$$

Из соотношений для $t_{\max}$ и $\tau_{\max}$ следует, что на смещение изолируемого тела основное влияние оказывают отношение величин $\omega/\Omega = \gamma$, демпфирование D и разность фаз между складываемыми колебаниями.

Смещение начинает принимать большие значения при $\gamma = 0,4 \div 1,41$ при любом D и любой разности фаз. При этих соотношениях время действия возбуждающего импульса составит $t_{\text{н}} = (0,3 \div 1,3) T$, где T — период

собственных колебаний виброизолируемой системы. Отсюда следует, что упругая система для защиты изделий от ударов должна быть настроена так, чтобы длительность возбуждающих ударных импульсов находилась вне пределов $(0,3 \div 1,3) T$.

Ускорение изолируемого изделия, подвергаемого воздействию ударных импульсов, как и его смещение, состоит из двух слагаемых. Система имеет два максимума ускорения.

Время, при котором наступает максимум ускорения от свободных колебаний,

$$t_{\max} = \frac{\pi/2 - \alpha - 3\varphi}{\Omega}.$$

Время наступления максимума ускорения от вынужденных колебаний

$$\tau_{\max} = \frac{\pi/2 - \varphi_z}{\omega}.$$

Анализ показывает, что наиболее высоких значений ускорения следует ожидать при критическом затухании $D = 1$ и резонансном возбуждении $\gamma = 1$, т. е. когда длительность возбуждающего импульса $t_{\text{и}} = (0,3 \div 1,3) T$.

Из приведенных соотношений следует, что рациональное применение виброизоляторов может быть обеспечено в том случае, если известны не только вибропараметры (частоты и демпфирование), но и внешние факторы возбуждения (перегрузка и длительность ее действия $t_{\text{и}}$).

2-й случай $\Omega = \delta$. Решение уравнения движения системы показывает, что и в этом случае смещение изделия на виброизоляторах будет состоять из двух слагаемых, каждое из которых имеет свой максимум.

Максимум смещения от свободных колебаний наступит в момент времени

$$t_{\max} = \frac{1}{\delta + \frac{\delta^2}{\Omega} \operatorname{tg} \varphi_z}.$$

Максимум смещения от вынужденных колебаний наступит в момент времени

$$\tau_{\max} = \frac{\pi/2 - \varphi_z}{\omega}.$$

Максимум ускорения от свободных колебаний наступит в момент времени

$$t_{\max} = \frac{2\delta^3 \sin \varphi_z + 3\Omega\delta^2 \cos \varphi_z}{\delta^4 \sin \varphi_z + \Omega\delta^3 \cos \varphi_z}.$$

Максимум ускорения от вынужденных колебаний наступит в момент времени

$$\tau_{\max} = \frac{\pi/2 - \varphi_z}{\omega}.$$

Максимальные ускорения, получаемые при ударе изделиями, установленными на виброизоляторах с критическим демпфированием ($D = 1$), находят из уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_{\text{св max}} &= A\eta e^{-\delta t_{\max}} (2\Omega \cos \varphi_z + \\ &+ \delta^2 \sin \varphi_z - \delta^3 t_{\max} \sin \varphi_z - \\ &- \Omega\delta^2 t_{\max} \cos \varphi_z); \end{aligned}$$

$$\ddot{Z}_{\text{в max}} = -A\eta\omega^2 (\omega\tau_{\max} + \varphi_z).$$

Если учесть, что основание имеет при ударе ускорение $\ddot{Z}_{1\max} = -A\omega \times \sin \omega\tau$, то эффективность амортизации равна $\ddot{Z}_{\text{св max}}/\ddot{Z}_{1\max}$ и $\ddot{Z}_{\text{в max}}/\ddot{Z}_{1\max}$.

При $\delta = \Omega$ наибольшие значения ускорения возникают в случае резонансного возбуждения, т. е. когда длительность ударного импульса составляет $t_{\text{и}} = (0,3 \div 1,3) T$.

Установку изделий на виброизоляторы можно начинать только после анализа механических воздействий на изделия.

Большинство существующих стандартизованных виброизоляторов имеют под номинальными нагрузками собственные (резонансные) частоты 10—30 Гц. Поэтому резонансные частоты конструктивных элементов изделий должны быть выше этих частот.

В связи с тем, что вопросы виброзащиты изделий от динамических изделий подробно рассмотрены в работах [6, 13], нами будут рассмотрены лишь отдельные моменты, непосредственно связанные с выбором виброизоляторов.

Требования к виброизоляторам. Защита изделий наземной техники. При перевозке изделий автомобильным или железнодорожным транспортом необходимо учиты-

вать, что этот транспорт сам по себе уже имеет элементы, снижающие воздействие механических нагрузок. Передаваемые от двигателя возбуждающие колебания с частотами от 10 до нескольких сотен герц заметного влияния на перевозимое оборудование не оказывают, так как двигатель автомашины виброизолирован и уравновешен.

Основные воздействия возникают при толчках и ударах при движении автомашины по неровностям дороги, а также от собственных колебаний неподдресоренных масс на шинах с частотами 6—14 Гц (зависят от давления в баллонах, жесткости рессор и загрузки автомашины).

При нормальной эксплуатации перегрузки от толчков и ударов обычно не превышают 30—40 м·с⁻².

Если условие изоляции

$$\frac{(6 - 14)}{(2 - 5)} > \sqrt{2}$$

не выполняется, то удары от неровностей дороги и колебания самих шин и других неподдресоренных масс будут передаваться кузову с оборудованием почти без ослабления.

Защита изделий морской техники. Основные требования, предъявляемые к виброизоляторам корабельного оборудования, сводятся к следующему:

высокая долговечность при эксплуатации в интервале рабочих температур от минус 5 до плюс 70—80 °С;

достаточная прочность виброизолятора по всем направлениям действующих нагрузок;

достаточное демпфирование для быстрого гашения собственных колебаний.

Во избежание резонансов свободных колебаний виброизолированного оборудования с ходовой вибрацией первого порядка (число оборотов главного вала) при расчете амортизирующих креплений должно быть соблюдено условие [6]: $\Omega_i/\omega_B \geq 1,3$, где Ω_i — низшая из шести частот свободных колебаний объекта на виброизоляторе; ω_B — верхняя граница частоты ходовой вибрации первого порядка.

Защита изделий авиационной техники. Виброизоляторы для изоляции самолетного оборудования должны обеспечить надежную виброизоляцию в диапазоне частот от 10 до 200 Гц с амплитудой вибро смещения до 1 мм от работы винтомоторной группы поршневых самолетов и до 0,5 мм от работы двигателей реактивных самолетов. Эти виброизоляторы должны также защищать оборудование от ударов с максимальным ускорением до 40 м·с⁻², возникающим при взлетно-посадочном режиме, а также от однонаправленного линейного ускорения, возникающего при стартовых режимах и при эволюции самолета. Виброизоляторы должны обеспечить быстрое гашение собственных колебаний системы, возникающих при толчках, а также уменьшение вынужденных колебаний в области резонанса. Это будет достигнуто в случае, если виброизоляторы изготовлены из материала с большим внутренним трением.

Турбореактивные двигатели вызывают вибрацию высокой частоты. На турбореактивных истребителях F8И, F9FT, F11F, F1012A при взлете, полете, эволюциях и посадке возникают вибрации от 10 до 200 Гц.

При эксплуатации самолета возникают в основном вибрационные нагрузки, вызываемые работой двигателя, уровень которых не превышает 20 м·с⁻². Ударные перегрузки не превышают 120 м·с⁻², достигая этого значения при посадке.

Из приведенных данных следует, что виброизоляторы самолетного оборудования должны:

обеспечивать защиту оборудования от отдельных ударов до 120 м·с⁻² и работать в условиях однонаправленного ускорения (стартовый режим, эволюции и т. п.);

выдерживать постоянную собственную частоту при разных массах амортизируемого оборудования.

Виброизоляторы конструируют равночастотными, т. е. такими, жесткость которых автоматически меняется под разными нагрузками так, что собственная частота колебаний системы сохраняется неизменной. Этим требованиям отвечают виброизоляторы типа

АД, АПН и АПНИ. Применение равночастотных виброизоляторов резко сокращает номенклатуру и упрощает монтаж оборудования.

Рекомендуются следующие параметры виброизоляторов для самолетного оборудования [13]:

Транспортные самолеты:

резонансная частота в трех направлениях, Гц 7—12

амплитуда допускаемого перемещения, мм $\pm 0,8$

Самолеты с маневрированием:

резонансная частота в трех направлениях, Гц 15—20

Испытания вертолетов показали, что основные вибрации лежат в области низких частот 3—50 Гц при ускорении порядка $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Максимальные ускорения преобладают в средней части фюзеляжа в основном на частотах 10 и 45 Гц и достигают в длительном режиме $12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, в кратковременных режимах $24 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Максимальные ускорения в задней части фюзеляжа в кратковременных режимах достигают $48 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ на частоте 45 Гц.

Основные вибрации на вертолетах вызываются работой двигателя, редукторами, карданными передачами, а также основным ротором вертолета, создающим вибрации с частотами, кратными частоте его вращения и числу лопастей. Вибрации, вызываемые хвостовым ротором, значительно меньше.

Рекомендуются следующие параметры виброизоляторов изделий, устанавливаемых на вертолеты:

резонансная частота, Гц 6—8

амплитуда допускаемого перемещения, мм $\pm 1,5$

В связи с необходимостью выдерживать постоянную собственную частоту в широком диапазоне виброизоляции изделий созданы так называемые равночастотные виброизоляторы. Жесткость таких виброизоляторов автоматически меняется под разными нагрузками так, что собственная частота колебаний системы остается неизменной.

Кроме того, виброизоляторы самолетного оборудования должны обеспечивать требуемую защиту изделий при перепаде температур от -60 до $+60^\circ \text{C}$, при изменении высоты от 0 до 20 000 м и относительной влажности до 98 %.

Защита изделий ракетной техники. Сочетание значительной линейной перегрузки с интенсивной вибрацией при эксплуатации ракетной техники предъявляет особые требования к виброisolаторам. Например, виброизоляторы должны сохранять свои характеристики во время действия линейных перегрузок такими же, как и при их отсутствии, выдерживать без поломки определенный прогиб (статическую деформацию), вызываемый линейной перегрузкой.

Общие рекомендации по требованиям к виброизоляции ракетной техники отсутствуют. В каждом конкретном случае задачу выбора вида виброизоляции и типа виброизоляторов решают конкретно, заново. О значениях перегрузок, имеющих место в ракетах, можно сказать лишь ориентировочно.

Обычно при проектировании ракеты задают конкретные условия работы находящегося на ней оборудования. Например, при разработке канадского самонаводящегося противосамолетного снаряда класса воздух—воздух были приняты следующие условия работы:

ударная перегрузка при работе двигателя, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	300—700
вибрационная перегрузка, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	50—100
частота вибрации, Гц	0—8000
линейная перегрузка, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	До 200
интервал температур, $^\circ \text{C}$	От -60
	до $+70$
влажность, %	До 100
высота полета, м	25 000

Рекомендуются следующие параметры виброизоляторов для ракетной аппаратуры [13]:

резонансная частота по трем направлениям, Гц	30—80
ударные перегрузки, м·с ⁻²	100—400
коэффициент η вибрации в резонансе	4—5

Пример. Выбрать виброизоляторы для изоляции передающего устройства радиостанции.

На основание передающего устройства действуют непериодические ударные импульсы с ускорением $\ddot{x}_{T \max} = 1000 \text{ м·с}^{-2}$ и длительностью $t_{\text{д}} = 0,05 \text{ с}$. Изделия передающего устройства могут выдержать удары с ускорением до 200 м·с^{-2} . Масса передающего устройства 20 кг.

Решение. Определяем коэффициент изоляции удара

$$\theta = \ddot{x}_{T \max} / \ddot{x}_{1 \max} = 200 / 1000 = 0,2.$$

Выбираем значение γ . Рекомендуется $\gamma = 2,5 \div 5$. Примем значение $\gamma = 3$.

Определяем условные период и частоту ударных импульсов

$$T = 2t_{\text{д}} = 2 \cdot 0,05 = 0,1 \text{ с};$$
$$\omega = (2\pi) / T = 62,8 \text{ 1/с}.$$

Из соотношения $\Omega = \omega / \gamma$ определяем частоту собственных колебаний изолированного передатчика на виброизоляторах в направлении удара. Подставив численные значения, получаем

$$\Omega = 62,8 / 3 = 21 \text{ 1/с}.$$

Выбираем тип виброизолятора. Известно, что полученное низкое значение собственных колебаний $\Omega = 21 \text{ 1/с}$ имеют лишь шнуровые виброизоляторы (эластичные резиновые или стальные шнуры).

Число виброизоляторов выбираем, исходя из удобства их размещения. В рассматриваемом случае в качестве виброизоляторов выбираем резиновые шнуры в количестве 8 шт., на которых блок подвешивается в угловых точках. Верхние четыре шнура несут силовую нагрузку, а нижние являются растяжками. При этом условии нагрузка, приходящаяся на шнур, будет равна $20 \cdot 10 / 4 = 50 \text{ Н}$. Диаметр шнура выбираем по приведенным данным:

Диаметр шнура					
$d_{\text{ш}}, \text{ мм}$	8	10	13	16	18
Допустимое усилие, Н	150—250	270—400	650—800	800—1200	1400—1800

Таким образом, диаметр шнура принимаем равным 8 мм.

**5. ОСНОВНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ**

В зависимости от конструктивного исполнения и назначения виброизоляторы разделены на типы, серии и номиналы. Например, наиболее широко применяемые в 80-х годах виброизоляторы АП включают 16 типонаминалов, чашкообразные виброизоляторы АЧ — 15 номиналов, резино-металлические виброизоляторы

АКСС-М (сварные со страховкой, малостойкие) разделены на 11 типонаминалов. Кроме того, в зависимости от назначения различные типы виброизоляторов можно объединить по видам. Например, виброизоляторы типов АП, АЧ, АКСС, АМ, АО, С, АС, АКС, АНС объединяются в один вид: виброизоляторы приборные.

Резинометаллические виброизоляторы типов АП и АЧ. Это наиболее старые типы виброизоляторов. Виброизоляция обеспечивается упругими элементами из резины, скрепленной с металлической арматурой путем вулканизации. Характерной особенностью

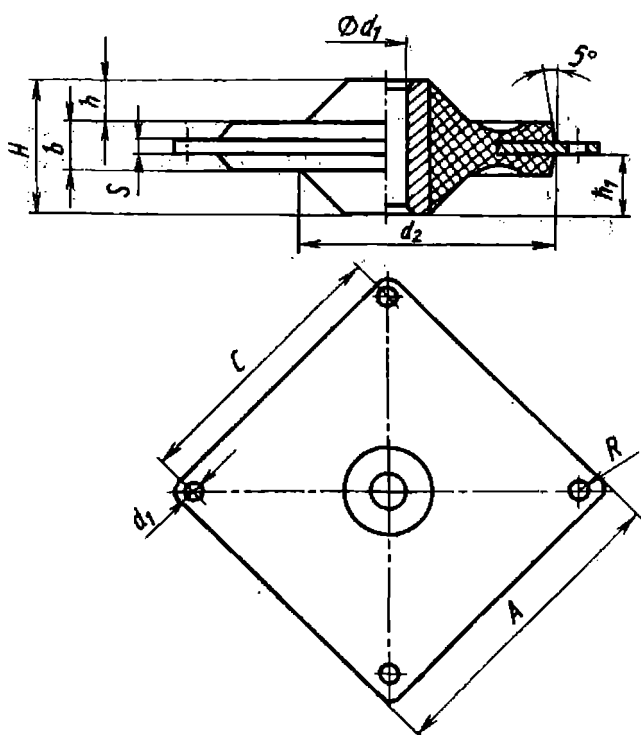


Рис. 20. Конструктивные размеры и основные показатели виброизоляторов типа АП с квадратной пластиной из стали

этих типов виброизоляторов является сравнительно высокая частота собственных колебаний (до 10—20 Гц в вертикальном и 30—35 Гц в горизонтальном направлениях), вследствие чего они не обеспечивают виброзащиты изделий в диапазоне частот меньше указанных.

Виброизоляторы типов АП и АЧ имеют еще ряд недостатков: резина затвердевает при низких температурах и стареет при длительном хранении.

При амплитудах вибрации, превышающих 0,5 мм, обнаруживается явление субгармонического резонанса. Указанные недостатки существенно ограничивают области применения виброизоляторов этих типов.

На рис. 20 приведены конструктивные размеры отдельных типоминералов виброизоляторов типа АП. Различают виброизоляторы типа АП с квадратной и овальной пластинами с магнитной и немагнитной арматурой.

На рис. 21 приведены конструктивные размеры виброизоляторов чашечного типа (АЧ).

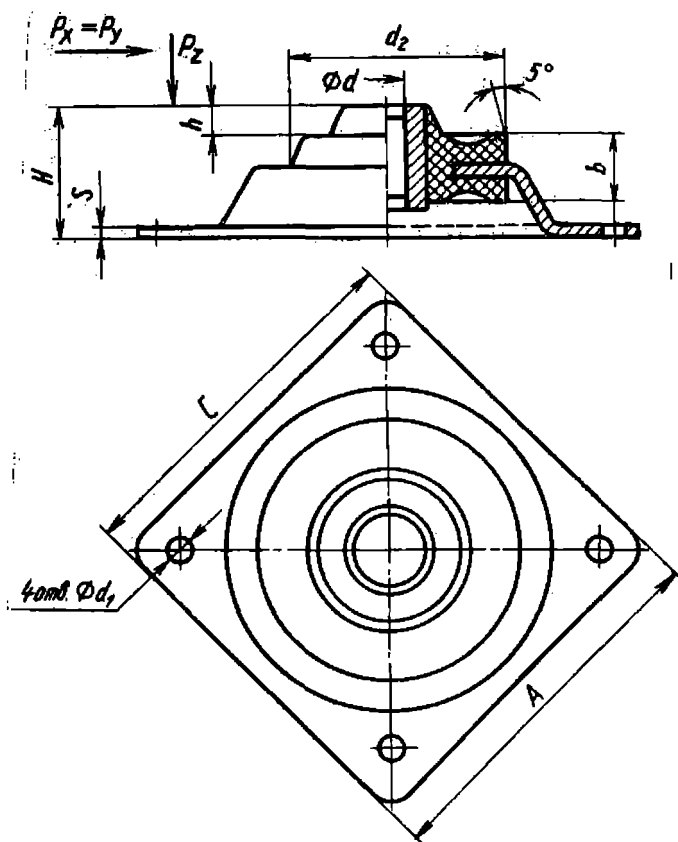


Рис. 21. Конструктивные размеры и основные показатели виброизоляторов чашечного типа (АЧ)

Резинометаллические виброизоляторы АКСС-М. Промышленностью выпускается 11 типов виброизоляторов типа АКСС-М, из них 7 типов бескозырьковые на нагрузку 100—1200 Н и 4 типа козырьковые для нагрузок 1000—4000 Н. Козырьковые виброизоляторы имеют скобу с козырьком, что повышает их жесткость в горизонтальном направлении.

Виброизоляторы типа АКСС-М изготовляют с применением маслостойких резин, они допускают длительную эксплуатацию при температурах от минус 5 до 70 °С.

В табл. 13 приведены статические и динамические жесткости виброизоляторов АКСС. На рис. 22 приведена конструкция виброизоляторов этого типа.

Виброизоляторы типа АКСС-М выдерживают без разрушения статическую сжимающую нагрузку, соответствующую 15-кратной номинальной нагрузке. Положительным качеством виброизоляторов является неизменность

13. Характеристики виброизоляторов АКСС

Вибро- изолятор АКСС-М	Р, Н, в направ- лении осей			С _с ·10 ³ , Н/м, в направлении осей			С _д ·10 ³ , Н/м, в направлении осей			δ, мм, в направ- лении осей			Δz, мм
	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	
10м	100	100	50	1 250	1 700	1000	5 500	2 000	3 000	7	7	8	0,6±0,3
15м	150	150	100	1 500	2 500	1300	6 500	11 500	4 500	7	7	8	0,7±0,3
25м	250	250	100	2 200	5 000	2100	11 000	12 000	6 500	7	7	8	0,9±0,3
40м	400	400	150	4 000	5 000	3500	16 500	17 000	10 000	9	9	10	0,7±0,3
60м	600	600	250	6 400	8 000	6000	22 000	17 000	9 000	10	10	10	0,7±0,3
85м	850	850	350	8 500	9 000	6200	31 000	19 000	10 000	9	9	11	0,6±0,3
120м	1200	1100	500	11 500	12 000	6500	35 000	24 000	13 000	12	12	12	0,9±0,3
160м	1600	1500	700	28 000	16 000	7000	76 000	23 000	16 000	11	11	12	0,6±0,3
220м	2200	1900	800	47 000	25 000	7500	100 000	30 000	28 000	10	10	12	0,6±0,3
300м	3000	2100	900	52 000	32 000	8000	110 000	42 000	20 000	10	10	12	0,6±0,3
400м	4000	2600	1000	72 000	40 000	9000	145 000	56 000	26 000	10	10	12	0,7±0,3

Пр и м е ч а н и е. Р — номинальная статическая нагрузка; С_с и С_д — статическая и динамическая жесткости, соответствующие деформациям в направлении осей z, x, y; δ — свободный ход амортизатора; Δz — прогиб от номинальной статической нагрузки в направлении оси z.

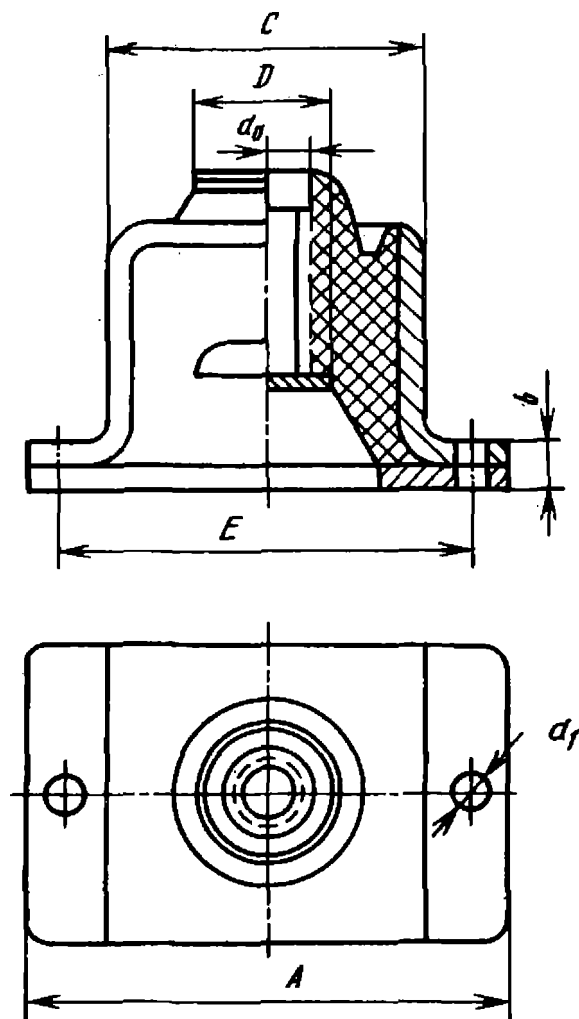
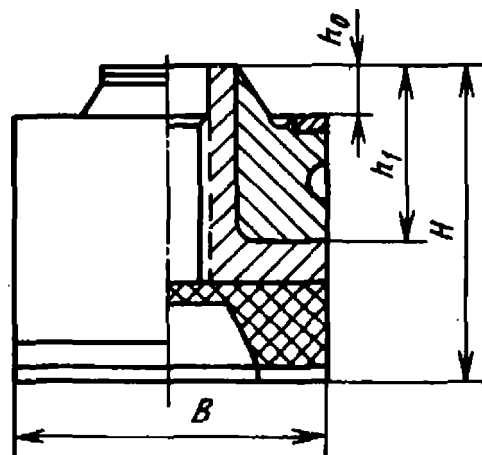


Рис. 22. Конструктивные размеры бескозырьковых виброизоляторов типа АКСС



их упругодемпфирующих характеристик при изменении статической нагрузки. Для этих виброизоляторов следует учитывать независимость отношения динамической жесткости C_d к статической C от амплитуды вибраций и малую зависимость от частоты вибрации (рис. 23).

Динамическую жесткость виброизоляторов АКСС можно определить из соотношения

$$C_d = 1,2C.$$

Эта зависимость сохраняется неизменной для любой из главных осей жесткости x, y, z . На рис. 24 представлены усредненные зависимости коэффициента демпфирования от частоты возбуждения виброизоляторов АКСС-И. Как следует из рис. 24, коэффициент демпфирования C_d/C для всех виброизоляторов типа АКСС с ростом частоты сохраняется неизменным.

Приближенные значения коэффициента демпфирования приведены в табл. 14.

Коэффициент демпфирования виброизоляторов можно находить по формуле

$$\gamma_M = b \sqrt{1 + C^2/AC} \approx bA,$$

где b — малая полуось эллипса, моделирующего гистерезисную петлю

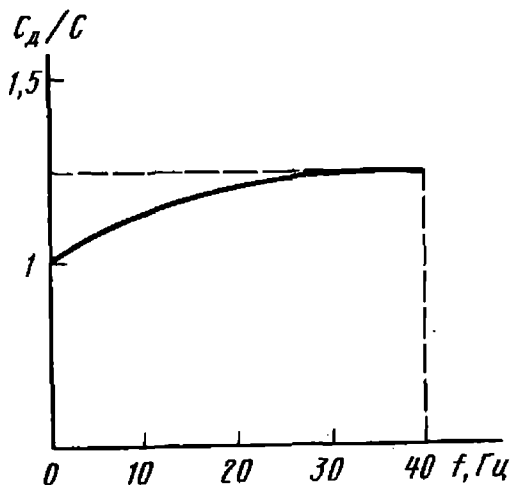


Рис. 23. Зависимость жесткости виброизоляторов АКСС-10М от частоты вибраций

виброизоляторов. Малая полуось b гистерезисной петли изменяется примерно пропорционально амплитуде деформации A .

Резиновые шнуры и прокладки. Эти изделия находят широкое применение для виброизоляции технических изделий. Резиновые шнуры состоят из пучка резиновых нитей прямоугольного сечения, растянутых до 150—200 % начальной длины и фиксированных в таком состоянии текстильной оплеткой. Возможности этого виброизолятора характеризуются следующими данными:

Диаметр шнура, мм	8	10	13	16	18
Допускаемые усилия, H	150—200	270—400	550—800	850—1200	1400—1800

Резиновые и войлочные прокладки работают в основном на сжатие и на сдвиг. Прокладки изготовляют круглой или прямоугольной формы.

На рис. 25 приведены экспериментальные данные, позволяющие выбирать виброизолирующие прокладки в зависимости от нагрузки и собственной частоты системы. После выбора параметров прокладок последние проверяют на отсутствие резонанса, связанного с их собственными частотами, определяемыми из уравнений:

первая собственная частота виброизолятора

$$\Omega = \beta v/h,$$

где β принимает значения от 0 до $\pi/2$; h — высота виброизолятора (толщина прокладки); v — скорость рас-

14. Экспериментальные значения коэффициента демпфирования

№ кривой на рис. 24	Виброизолятор АКСС-И	Коэффициент γ_M	№ кривой на рис. 24	Виброизолятор АКСС-И	Коэффициент γ_M
1	120И	1,1	6	85И	1,12
2	400И	1,15	7	60И	1,18
3	300И	1,23	8	40И	1,25
4	220И	1,23	9	25И	1,2
5	160И	1,25			

пространения волн деформации в материале упругого элемента (скорость звука), $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$; здесь E — модуль упругости материала; ρ — плотность материала;

остальные собственные частоты виброизолятора могут быть найдены из выражения

$$\Omega_k = (2\pi k + \beta) v/h.$$

Виброизоляторы ЦАГИ. Это недемпфированные пружинные виброизоляторы. Частота собственных колебаний

в нагруженном состоянии для вибрации в вертикальном направлении составляет 6—7 Гц. Виброизоляция вертикальных колебаний начинается с частот 10—12 Гц при амплитуде вибрации до 1 мм.

Виброизоляторы ОВ-30, ОВ-31 и коврики КВ-1 и КВ-2 для установки металлорежущих станков позволяют осуществлять виброизоляцию металлорежущих станков большинства типов как при бесфундаментной установке, так и при установке на «плавающих» фундаментах. Рассматриваемые виброизоляторы изготовляют из морозостойкой резины, обладающей малой ползучестью и хорошими динамическими характеристиками. Виброизолятор можно выбрать в зависимости от назначения станка, резонансной частоты вертикальных колебаний и нагрузки на виброизолятор с помощью номограммы (рис. 26). Габаритные размеры виброизоляторов приведены в табл. 15.

Сварные резинометаллические виброизоляторы АР. Эти виброизоляторы предназначены для противоударной и виброизолирующей амортизации механизмов и оборудования.

Они обеспечивают перепад общего уровня звуковых вибраций по ускорению всего виброизолирующего крепления не менее 20 дБ. Ряд виброизоляторов сварного типа включает шесть

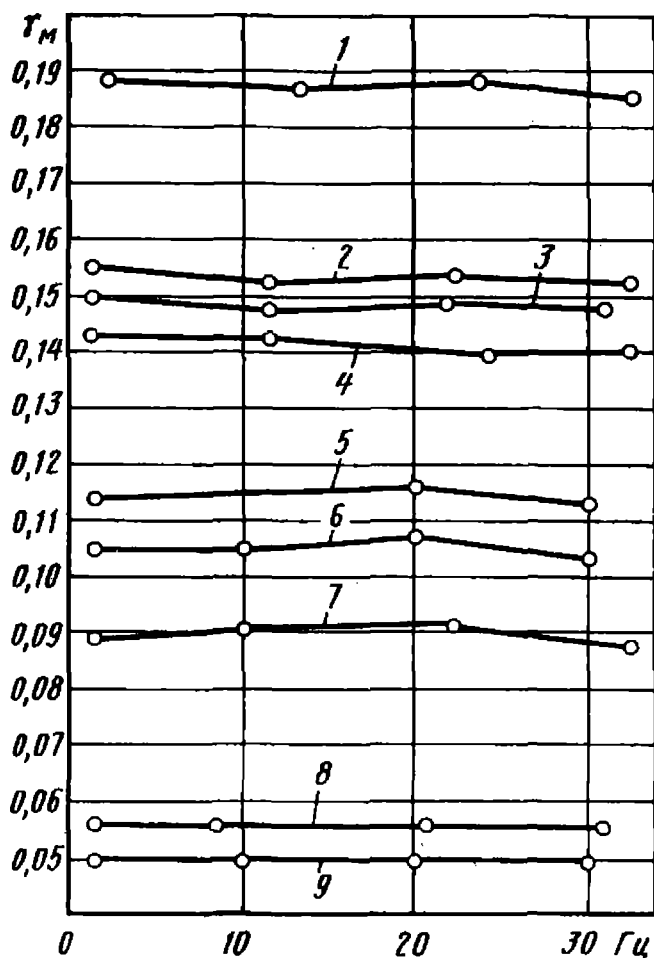


Рис. 24. Усредненные зависимости коэффициента демпфирования γ_M от частоты возбуждения виброизоляторов АКСС:

1 — АКСС-120И; 2 — АКСС-400И; 3 — АКСС-300И; 4 — АКСС-220И; 5 — АКСС-160И; 6 — АКСС-85И; 7 — АКСС-60И; 8 — АКСС-40И; 9 — АКСС-25И; амплитуда деформации виброизоляторов — $A = 0,5$ мм

типоразмеров под нагрузки от 2500 до 20 000 Н на один виброизолятор.

Тросовые виброизоляторы. При виб-

Рис. 26. Номограмма по выбору виброизоляторов для металлорежущих станков в зависимости от назначения станков, резонансной частоты f вертикальных колебаний и нагрузки на один виброизолятор:

А — для токарно-фрезерных станков; Б — для шлифовальных станков; В — прецизионных станков; 1 — ОВ-31; 2 — ОВ-30-3-3; 3 — ОВ-30-3-2; 4 — ОВ-30-2-3; 5 — ОВ-30-2-2; 6 — ОВ-30-1-3; 7 — ОВ-30-1-2; 8 — ОВ-30-1-1

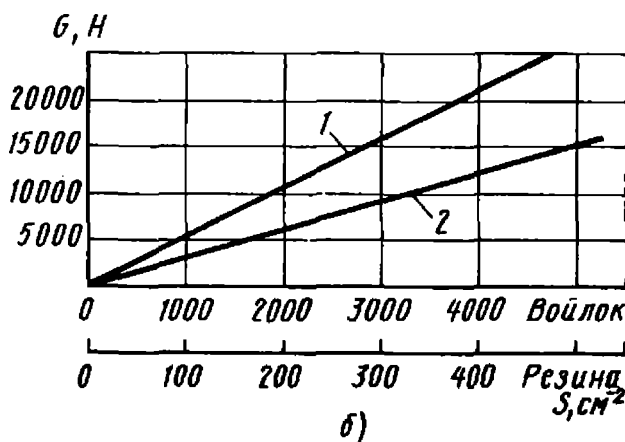
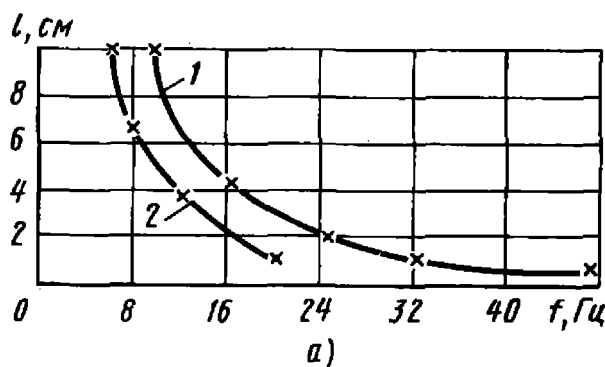
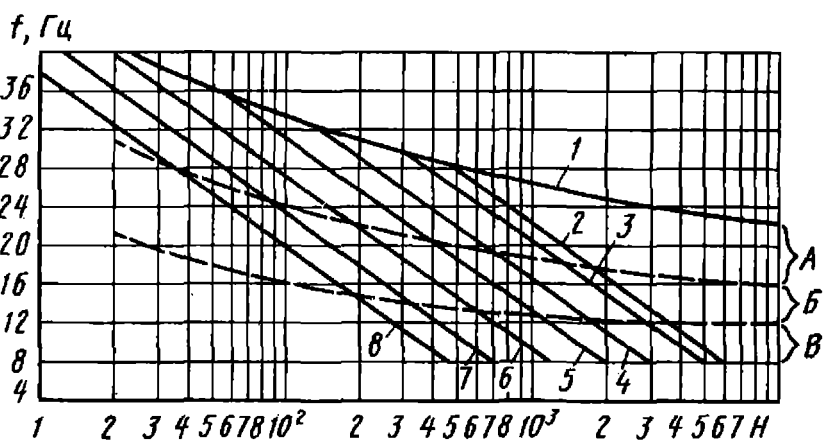


Рис. 25. Характеристика виброизолирующих свойств резиновых шнуров и прокладок:

а — зависимость собственной частоты f от толщины прокладок l ; б — необходимая площадь прокладок S в зависимости от статической нагрузки G ; 1 — войлок; $E = 2$ МПа, $\sigma = 50$ кПа; 2 — резина; $E = 6$ МПа, $\sigma = 300$ кПа

роизоляции оборудования применяют металлические тросы, которые по своим упругодемпфирующим свойствам являются хорошим исходным материалом для изготовления виброизоляторов.

15. Габаритные размеры виброизоляторов, мм

Тип виброизо- лятора	D , мм	H , мм	d , мм	Тип виброизо- лятора	D , мм	H , мм	d , мм
ОВ-31	142	45	M16	ОВ-30-2-2	140	46	M16
ОВ-30-1-1 ОВ-30-1-2 ОВ-30-1-3	105	45	M16	ОВ-30-2-3 ОВ-30-3-2 ОВ-30-3-3	180	50	M20

Существует значительное число конструкций тросовых виброизоляторов. Например, виброизоляторы Г-образного, петлевого и цилиндрического типов.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости для резонансной частоты. В работе [6] приведены следующие эмпирические зависимости:

$$f_{\text{рез } z} = 1,541 \cdot 10^{-3} \times \frac{E^{0,25} g^{0,5} n^{0,38} d^{2,24}}{d_{\text{пр}}^{1,38} i^{0,18} P^{0,25} A_{\text{в}}^{0,28} l^{0,58}};$$

$$f_{\text{рез } x, y} = 1,410^{-3} \times \frac{E^{0,25} g^{0,5} n^{0,38} d^{2,24}}{d_{\text{пр}}^{1,38} i^{0,18} P^{0,25} A_{\text{в}}^{0,28} l^{0,58}},$$

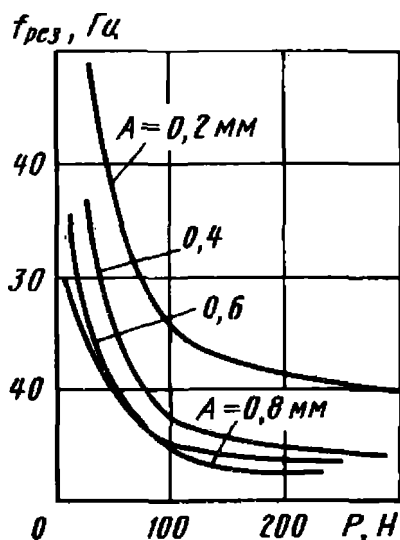


Рис. 27. Амплитудно-частотная характеристика виброизоляторов АТГ под нагрузкой $f_{\text{рез}} = \varphi(P)$; A — амплитуда вибросмещения основания

где $E = 210$ ГПа — модуль упругости для пружинной проволоки из углеродистой стали; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; n — число Г-образных тросовых стержней в виброisolаторе; d — диаметр троса, мм; $d_{\text{пр}}$ — диаметр проволоки, мм; i — число проволок в тросе; P — статическая нагрузка на один виброизолятор, Н; $A_{\text{в}}$ — амплитуда смещения основания (вибростола), мм; l — длина плеча, мм.

Среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных по этим формулам не превышает 10 %.

Разработан ряд серий тросовых виброизоляторов: АТГ на нагрузки 10—30 Н; виброизоляторы петлевого типа (трос поочередно охватывают два опорных стержня, один из которых скреплен с основанием, а другой с амортизируемым объектом и др.). Зависимость резонансной частоты от виброизолируемой нагрузки P , H , приведена на рис. 27. Из рисунка следует, что при одной и той же нагрузке ($P = \text{const}$) с увеличением амплитуды $A_{\text{в}}$ стола вибростенда резонансная частота резко уменьшается, с увеличением груза резонансная зона сужается.

Широко применяют тросовые цилиндрические виброизоляторы АТЦ (рис. 28). Экспериментально получены следующие данные для расчета резонансных частот тросовых цилиндрических виброизоляторов:

$$d = 3,6 \text{ мм } (i = 7 \cdot 19 = 133),$$

$$d_{\text{пр}} = 0,24 \text{ мм};$$

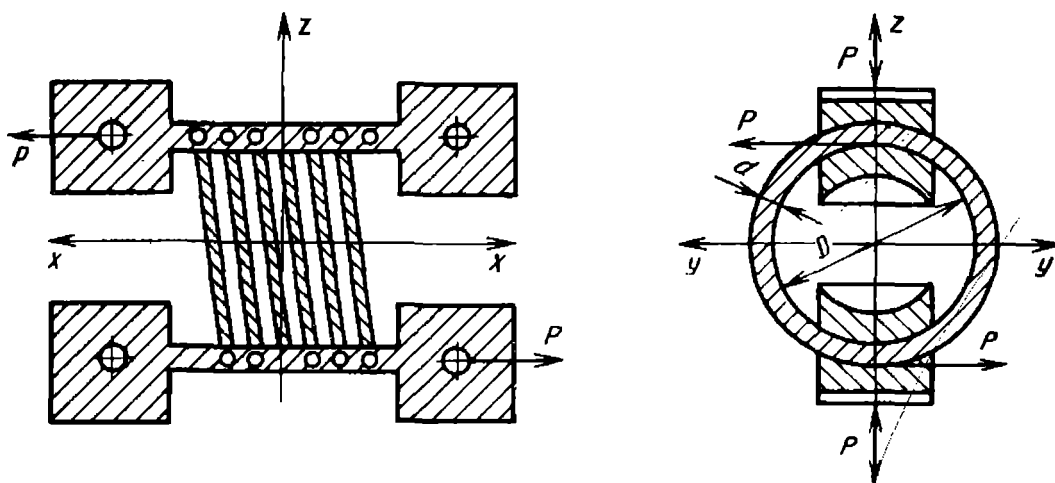


Рис. 28. Конструкция тросового цилиндрического виброизолятора типа АТЦ

$$d = 5,1 \text{ мм } (i = 7 \cdot 19 = 133),$$

$$d_{\text{пр}} = 0,34 \text{ мм};$$

$$d = 6 \text{ мм } (i = 7 \cdot 19 = 133),$$

$$d_{\text{пр}} = 0,4 \text{ мм};$$

$$f_z = 1806 \frac{d^{1,6} (a_n d_{\text{пр}})^{0,5} i^{0,02}}{P^{0,5} D^{1,33} A^{0,27}};$$

$$f_y = 897 \frac{d^{1,6} (a_n d_{\text{пр}})^{0,5} i^{0,02}}{P^{0,5} D^{1,33} A^{0,27}};$$

$$f_{\infty} = 717 \frac{d^{1,6} (a_n d_{\text{пр}})^{0,5} i^{0,02}}{P^{0,5} D^{1,33} A^{0,27}},$$

где i — число проволочек в сечении троса.

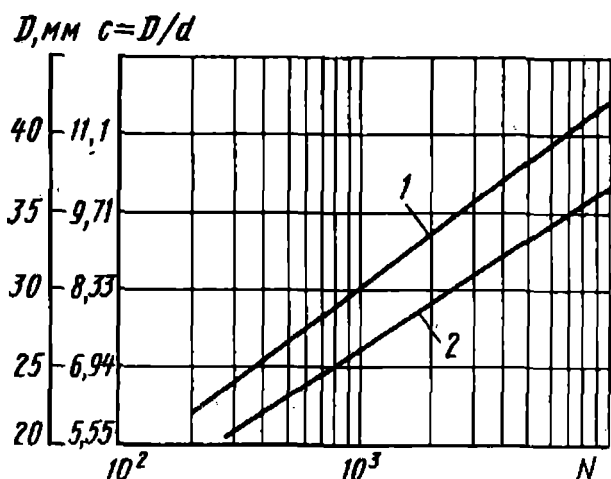


Рис. 29. Зависимость числа циклов N до разрушения виброизолятора АТЦ от индекса витка $c = D/d$:

1 — схема растяжения; 2 — схема сжатия

По приведенным формулам виброизолятор можно выбрать на этапе проектирования.

При расчетах тросовых изоляторов исходят из максимальных напряжений, возникающих в сечении троса под нагрузкой. Из теории максимальных касательных напряжений известно, что эквивалентное напряжение в заделке кольца $\sigma_{\text{экв}} = 1,69RP/0,1d^3a$, где R — радиус кольца; d — диаметр троса.

При малых диаметрах витка в приведенную формулу вводится коэффициент $k = (4c + 2)/(4c - 3)$, где $c = D/d$. Если индекс витка $c > 10$, то $k \approx 1$. Испытаниями установлено, что незначительное изменение диаметра D виброизолятора (при одних и тех же типах троса и значениях деформации) приводит к резкому уменьшению живучести виброизолятора. На рис. 29 приведена зависимость числа циклов до разрушения виброизолятора от индекса витка c при ударном нагружении. Установлено, что $N \approx 0,03 (D/d)^{6,07}$ — схема растяжения; $N \approx 0,03 (D/d)^{6,5}$ — схема сжатия, где $c = D/d$ — индекс витка.

Допустимые напряжения для троса в случае переменной нагрузки выбирают по формуле $|\sigma| = 0,25\sigma_B$. Поправки на кривизну витка $K = 1,135$. Предельно допустимая нагрузка на виток

$$P_{\text{max}} = 0,1d^3a/1,69RK.$$

16. Степень влияния комплекса факторов на технические изделия

Условия окружающей среды	Этапы испытаний							
	Подъем		Траектория или орбита		Приземление или выход в атмосферу		Нахождение в космосе	
	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П
Космическая радиация	0	0	2	2	0	1	1	2
Твердые частицы	1	1	1	2	1	1	1	1
Состав атмосферы	0	0	1	2	0	2	1	3
Давление (высота)	2	2	2	3	2	2	2	3
Влажность	0	0	0	1	0	0	2	2
Коррозия	0	0	1	1	0	0	3	2
Температура	2	2	2	2	2	3	3	3
Ускорение	2	2	1	1	2	2	1	1
Удар	1	1	1	1	3	3	1	1
Вибрация	2	2	1	1	2	2	1	1
Акустика	1	1	0	0	2	2	0	0
Ядерная радиация	0	1	1	1	1	1	1	1
Чувствительность к радиопомехам	1	1	1	1	1	1	1	1
Функциональная работа	1	1	3	3	1	1	3	3

Примечания: 1. Цифры, приведенные в табл. 16, характеризуют степень влияния факторов на показатели надежности.
2. Буквами обозначены виды кораблей: Б — беспилотный, П — пилотируемый.

6. КОМПЛЕКСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

При разработке изделий с заданными показателями надежности имеет существенное значение определение комплекса факторов, воздействию которых они будут подвергаться в условиях эксплуатации.
Исходная предпосылка при решении этого вопроса: изделие должно разрабатываться с учетом всех факторов, при воздействии которых требуется устойчивая работа. Например, изделия, размещаемые на автомашинах, должны устойчиво работать при воздействии вибрационных и ударных нагрузок, повышенной и пониженной температурах, повышенной

влажности, инея и росы, песка и пыли. При выборе состава воздействующих факторов учитывают механизм и продолжительность воздействия каждого из факторов.
В целях более полного обоснования состава комплекса факторов, воздействию которых должны подвергаться различные виды технических изделий, необходимо учитывать степень их влияния на показатели надежности. В табл. 16 приведены результаты такой оценки применительно к космическим изделиям.
При проектировании изделий конкретных типов необходимо учитывать, что при эксплуатации изделия подвергаются воздействию не всего комплекса известных дестабилизирующих факторов, а лишь некоторых из них. Перечень этих факторов определяется при разработке технического задания на

17. Перечень требований по стойкости изделий

Перечень требований по стойкости изделий	Наземные объекты	Суда, плавсредства	Самолеты и вертолеты	Ракеты
Виброустойчивость	+	+	+	+
Виброустойчивость на фиксированной частоте	+	+	+	+
Вибропрочность в диапазоне частот	+	+	+	+
Ударная устойчивость	+	+	+	+
Ударная прочность	+	+	+	+
Устойчивость к воздействию линейных нагрузок	—	—	+	+
Устойчивость к одиночным ударам с большим ускорением	—	+	—	+
Устойчивость к воздействию акустических шумов	—	—	+	+
Устойчивость к качке и длительным наклонам	—	+	—	—
Ветроустойчивость	+	+	—	—
Устойчивость к циклическому изменению температуры	+	+	+	+
Влагоустойчивость	+	+	+	+
Холодоустойчивость	+	+	+	+
Устойчивость к воздействию инея и росы	+	—	+	—
Теплоустойчивость	+	+	+	+
Устойчивость к быстрому изменению давления	—	—	+	+
Устойчивость к пониженному давлению	—	—	+	+
Устойчивость к повышенному гидростатическому давлению	—	+	—	—
Устойчивость к воздействию солнечной радиации	+	+	+	+
Пылеустойчивость	+	—	+	+
Грибоустойчивость	+	+	+	+
Устойчивость к воздействию морского тумана	+	+	+	+
Прочность при транспортировании	+	+	+	+
Прочность при падении	+	—	—	—
Герметичность	+	+	+	+
Пылезащищенность	+	—	+	—

Принятые обозначения: «—» — изделие не подвергается воздействию данного фактора; «+» — изделие подвергается воздействию данного фактора.

разработку изделия и программы его испытаний.
В табл. 17 приведен перечень требований по стойкости изделий к воздействию внешних факторов, с учетом которого должны разрабатываться изделия для эксплуатации на различ-

ных объектах техники [7, 10].
Необходимо учитывать особенности реакции изделий на одновременное воздействие комплекса внешних факторов.
В табл. 18 приведены рекомендации по определению тех внешних факторов,

18. Комплекс факторов, учитываемый при оценке надежности технических изделий

Перечень воздействующих внешних факторов	Повышен- ная темпе- ратура	Понижен- ная темпе- ратура	Влажность	Дождь	Туман (мор- ской)	Солнечная радиация	Грибообра- зование	Пыль и песок	Низкое атмосферное давление	Ветер	Загрязне- ние воздуха	Соляные брызги	Вибрация	Звуковое давление	Удар	Ионизиро- ванные газы
Повышенная температура																
Пониженная температура	7															
Влажность	1	1														
Дождь	X	1—	4													
Туман (морской)	6	X	4	2—												
Солнечная радиация	1	6	1—	7	6											
Грибообразование	4	6	4	4	4	6										
Пыль и песок	6	1—	1—	X	1—	1—	X									
Низкое атмосферное давление	1	3—	1	X	X	1—	X	X								
Ветер	1—	3	X	3	6	1	X	3	6							
Загрязнение воздуха	X	X	1	5	1	X	X	1—	X	6						
Соляные брызги	1	6	6	6	1—	1	X	1—	X	1	X					
Вибрация	1	1	1—	X	X	1	X	1—	1—	X	X	1—				
Звуковое давление	1	1—	X	X	X	X	X	X	1—	X	XO	X	1			
Удар	1	1	X	X	X	X	X	X	1—	X	X	X	X	X		

Перечень воздействующих внешних факторов	Повышен- ная темпе- ратура	Понижен- ная темпе- ратура	Влажность	Дождь	Туман (мор- ской)	Солнечная радиация	Грибообра- зование	Пыль и песок	Низкое атмосферное давление	Ветер	Загрязне- ние воздуха	Соляные брызги	Вибрация	Звуковое давление	Удар	Ионизиро- ванные газы
Ионизированные газы	1	6	X	X	X	1	X	X	5	X	X	X	X	XO	X	
Космическая радиация	X	X	X	X	X	5	X	X	3	X	X	X	X	X	X	1—

П р и м е ч а н и я:

1. Цифры и буквы обозначают последствия, к которым приводит воздействие на изделия того или иного фактора:

1 — сопровождается механическим износом;

2 — сопровождается ухудшением работоспособности;

3 — проявляется механический износ;

4 — действия факторов на изделия взаимосвязаны;

5 — воздействие одного фактора влияет на воздействие другого (взаимное ослабление или усиление воздействия);

6 — взаимоослабляющие факторы;

7 — несовместимые факторы, например, при воздействии дождя не проявляется воздействие солнечной радиации;

X — сочетание данных факторов можно не учитывать.

2. Знак «—» после цифр 1, 2, 3 означает, что совместное действие факторов ослабляет их влияние (например, звуко-
вое давление и низкое атмосферное давление).

19. Средние значения m и средние квадратические значения отклонения σ нагрузок, испытываемых техническими устройствами различного назначения

Условия работы устройств	Окружающая температура, °C		Относительная влажность, %		Вибрация, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$		Удары, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$		M_x	$K = \frac{M_x}{M_{xл}}$
	m_T	σ_T	m_H	σ_H	m_B	σ_B	m_Y	σ_Y		
Лаборатория	6,7	7,6	22,8	6,0	13	7	—	—	198	1
Земля	12,4	13,5	57,1	14,4	35	17	—	—	2 478,1	12
Корабль	14,8	19,7	78,9	18,3	49	27	302	72	5 504	28
Прицеп автомобиля	26,1	26,7	60,6	21,8	76	32	379	86	12 020,6	61
Железнодорожная платформа	23,9	28,7	37,5	19,5	85	39	440	109	11 631	59
Самолет	36,1	32,5	46,6	18,2	122	46	285	118	20 523,6	104
Ракета	85,5	49,1	29,1	14,1	856	137	832	131	212 977,1	1076

20. Дестабилизирующие внешние факторы, воздействующие на радиоэлектронную

Воедействующие факторы (вид испытания)	Группы		
	1	2	3 и 5
Синусоидальная вибрация (на прочность): ν, Гц a, м·с ⁻² t _{выд.} , ч	20 19,6 ≥0,5	20 19,6 ≥0,5	20 19,6 ≥0,5
Обнаружение резонанса в конструкции: Δν, Гц ξ, мм t _{выд.} , мин	10—30 0,5—0,8 ≥4	10—30 0,5—0,8 ≥4	10—30 0,5—0,8 ≥4
Синусоидальная вибрация (на устойчивость): Δν, Гц a, м·с ⁻² t _{выд.} , мин	— — —	— — —	10—70 6,8—37 ≥12
Механические удары: t _{д.} , мс ν, мин ⁻¹ a _{max} , м·с ⁻² N _Σ , ударов	— — — —	— — — —	5—10 40—80 147 ≥60
Циклическое изменение температуры: Δθ, °C t _{выд.} , ч	— —	— —	—50—+60 2—6
Повышенная температура: θ _{прд.} , °C θ _{рб.} , °C t _{выд.} , ч	55 40 2—6	60 50 2—6	60 50 2—6
Пониженная температура: θ ^I _{прд.} , θ ^{II} _{прд.} , °C θ ^I _{рб.} , θ ^{II} _{рб.} , °C t _{выд.} , ч	—40 (—40) +5 (+5) 2—6	—40 (—40) —10 (—25) 2—6	—40 (—50) —24 (—40) 2—6
Повышенная влажность: Вл, % θ _I (θ _{II}), °C t _{выд.} , ч	80 25 (25) 48	93 25 (40) 72	93 25 (40) 72
Иней и роса: θ, °C t _{выд.} , ч	— —	—10 2—6	—10 2—6
Пониженное атмосферное давление: θ, °C P, кПа t _{выд.} , ч	—10 61 2—6	—10 61 2—6	—10 61 2—6
Транспортирование: t _{д.} , мс ν, мин ⁻¹ a _{max} , м·с ⁻² N _Σ , ударов	5—10 40—80 49—245 13 000	5—10 40—80 49—245 13 000	5—10 40—80 49—245 ≥13 000

аппаратуру различных классов и групп

изделий			На самолетах, вертолетах	На ракетах
4	6	7		
20 19,6 ≥0,5	20 19,6 ≥0,5	20 19,6 ≥0,5	10—70 19,6—34,3 —	0—500 До 196,2 —
10—30 0,5—0,8 ≥4	10—30 0,5—0,8 ≥4	10—30 0,5—0,8 ≥4	— — —	— — —
10—30 2,4—10,7 ≥4	10—70 7,8—37 ≥12	10—30 2,4—10,7 ≥4	—	—
5—10 40—80 147 ≥60	5—10 40—80 98 ≥60	— — — —	— — — —	— — 736 500
—50—+60 2—6	—50—+60 2—6	—40—+60 2—6	—40—+60 —	— —
60 50 2—6	60 50 2—6	55 40 2—6	— — —	— — —
—40 (—50) —10 2—6	—40 (—50) —10 (—25) 2—6	—40 (—50) +5 (—10) 2—6	— — —	— — —
93 25 (40) 72	93 25 (40) 72	80 25 48	98 40 —	100 — —
—10 2—6	—10 2—6	— —	— —	— —
—10 61 2—6	—10 61 2—6	—10 61 2—6	(2 ... 101) 10 ³ —	(0,13 ... 101) 10 ³ —
5—10 40—80 49—245 ≥13 000	5—10 40—80 49—245 ≥13 000	5—10 40—80 49—245 ≥13 000	— — — —	— — — —

Воздействующие факторы (вид испытания)	Группы		
	1	2	3 и 5
Многократные удары (на прочность):			
t_d , мс	—	—	5—10
v , мин ⁻¹	—	—	40—80
$a_{\max}$, м·с ⁻²	—	—	147*
N_{Σ} , ударов	—	—	$\geq 12\,000$
Падение с высоты h , мм:			
$m \leq 5$ кг	—	—	—
$m > 5$ кг	—	—	—
N_{Σ} , ударов	—	—	—
Термоудар:			
θ_p , °С/мин	—	—	—
$\Delta\theta_{\text{прд}}$, °С	—	—	—
Погружение в воду на глубину:			
h , м	—	—	—
$t_{\text{выд}}$, мин	—	—	—
Дождь с интенсивностью A :			
A , мм/мин	—	3	3
$t_{\text{выд}}$, мин	—	≥ 20	≥ 20
Пылевой поток:			
v , м/с	—	≥ 10	≥ 10
$t_{\text{выд}}$, мин	—	≥ 60	≥ 60
Соляной (морской) туман с дисперсионностью (95 % капель) A и водостойкостью B :			
θ_h , °С	27	27	27
A , мкм	1—10	1—10	1—10
B , г/м ³	2—3	2—3	2—3
$t_{\text{выд}}$, ч	24	48	48

Примечания: 1. Величины $\theta_{\text{прд}}^I$, $\theta_{\text{прд}}^{II}$ и $\theta_{\text{рб}}^I$, $\theta_{\text{рб}}^{II}$ относятся к первой и

2. В процессе эксплуатации различают два режима: 1) сохранение работоспособными значениями (обычно описывают термином устойчивость) и 2) обеспечение ра действия дестабилизирующих факторов с экстремальными значениями на нерабо

3. $t_{\text{выд}}$ — время выдержки, ч; v — скорость; m — масса, кг; h — высота,

комбинированное воздействие которых следует учитывать при анализе надежности изделий.

Количественную оценку стойкости изделий к комплексному воздействию проводят либо посредством расчета, используя модели процессов, характеризующих зависимость надежности от условий воздействия, либо по результатам испытаний изделий в процессе их разработки.

В частности, комплексное воздействие на технические изделия окружа-

ющей температуры, относительной влажности, вибрации и ударов можно оценить с помощью параметров, приведенных в табл. 19.

Уровень комплексного воздействия внешних факторов можно оценить из соотношения

$$M_x^* = \prod_{i=1}^n m_{xi}; \quad K = \frac{M_x^*}{M_{хл}^*},$$

Продолжение табл. 20

Изделий			На самолетах, вертолетах	На ракетах
4	6	7		
5—10 40—80 147 ≥12 000	5—10 40—80 98 ≥6 000	5—10 40—80 98 ≥6 000	— — — —	— — — —
—	750	500	—	750
—	500	—	—	750
—	11	11	—	10
—	—	—	—271—+263	—
—	—	—	—60—+355	—65—+164
—	≥0,5	—	—	—
—	≥60	—	—	—
3 ≥20	3 ≥20	3 ≥20	— —	— —
—	≥10	—	—	—
—	≥60	—	—	—
27 1—10 2—3 48	27 1—10 2—3 48	27 1—10 2—3 48	33±5 20 2—3 —	— — — —

второй степени жесткости эксплуатации изделий.

способности аппаратуры при воздействии дестабилизирующих факторов с экстремаль-
ботоспособности аппаратуры в нормальных условиях непосредственно после воз-
гающую аппаратуру (обычно описывают термином прочность).

мм; a — ускорение, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$.

где $M_{\text{хл}}^*$ — оценка математического
ожидания комплексного воздействия
в лабораторных условиях.

Характеристика комплекса факторов, воздействующих на радиоэлектронную аппаратуру. Радиоэлектронную аппаратуру в зависимости от назначения размещают на различных носителях: на поверхности земли; в подземных сооружениях; на транспортных носителях (автомобили, тракторы, корабли, самолеты, вертолеты, ракеты); на выючных животных.

Различают аппаратуру: стационарную; возимую на наземных транспортных средствах (автомобильный, гусеничный и железнодорожный транспорт); носимую и портативную (объекты-носители: человек, выючные животные); возимую на речных и морских судах; самолетную и ракетно-космическую (объекты-носители: самолеты, вертолеты, ракеты и космические корабли).

Характеристика факторов, воздействующих на указанные виды аппара-

туры при эксплуатации, приведена в табл. 20 (ГОСТ 16019—78).

Стационарная аппаратура. Различают стационарную аппаратуру, работающую в отапливаемых наземных и подземных помещениях (группа 1), и стационарную, работающую на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях (группа 2).

Возимая аппаратура. Различают аппаратуру, размещаемую в легковых и грузовых автомобилях, полуприцепах, тракторах, железнодорожных вагонах (группы 3 и 5 ГОСТ 16019—78). При задании требований по стойкости аппаратуры этих групп к воздействию внешних факторов учитывают следующие особенности объектов-носителей.

Легковые автомобили — частота колебаний подвески около 1 Гц при амплитудах до 150 мм. Резонансная частота поддрессирования 8—12 Гц при амплитуде $\xi = 0,5$ мм. Вибрации и удары возникают только вследствие толчков от неровностей дороги (асфальт с неровностями 0,7—1,2 см для дорог категории I и 1,5—1,9 см — для дорог категории II). У двигателей вибрации лежат в диапазоне частот 20 Гц и выше при амплитуде $\xi = 0,05$ мм. Перегрузки от линейных ускорений обычно не более 0,98—3,12 м·с⁻². Поэтому собственные частоты систем амортизации берут около 25 Гц, что позволяет избежать сложных резонансных явлений с устройствами подвески и поддрессирования.

Грузовые автомобили — вибрации от толчков и ударов сдвигаются в область более высоких частот (4, 20, 80 Гц и выше при амплитуде 120; 0,15; 0,01 мм) с минимальными перегрузками 1,96—8,5 м·с⁻², что обуславливает выбор собственных частот конструкции в области выше 20 Гц.

Гусеничный транспорт — воздействие толчков и ударов на эту группу аппаратуры в устройствах подвески характеризуется частотами колебаний 1—3 Гц при амплитуде 50 мм, а в конструкции объекта — 100 Гц при амплитуде 0,025 мм, спектр которых может простирается до сотен и тысяч Гц. Дополнительно на них будут накладываться вибрации дви-

гателя (3—30 Гц). Наиболее характерные значения перегрузки 1,96—19,6 м·с⁻².

Перевозка крупногабаритных технических изделий может выполняться на открытых платформах при воздействии всего многообразия метеорологических факторов местности перевозки с дополнительным ветровым напором скоростью 33 м·с⁻¹.

На железнодорожных путях при скоростях движения 4, 20 и 120 км·ч⁻¹ возникают следующие частоты вибраций ν :

при длине плети 12,5 м — 0,086; 0,43; 2,6 Гц;

при длине плети 25 м — 0,043; 0,22; 1,3 Гц;

при длине плети 27,5 м — 0,029; 0,14; 0,86 Гц;

при длине плети 50 м — 0,021; 0,11; 0,65 Гц.

Дополнительно на них будут накладываться вибрации от стука колесных пар в тележке (база 4850 мм) — $\nu = 0,58; 2,9; 17,5$ Гц и между тележками (база вагона до 10 000 мм), колебания за счет боковых наклонов рельсов колеи и неравномерности тяги. Наиболее характерный диапазон частот вибраций $\Delta\nu = 2 \div 100$ Гц с максимальной амплитудой $\xi = 40 \div 2$ мм (перегрузки 1,96—9,6 м·с⁻²). Длительность толчков может быть $t_k = 3 \div 5$ мс. Обычно используют виброисполнители, обеспечивающие $\nu \sim 20$ Гц.

Корабельная радиоволновая аппаратура. В отношении воздействия вибраций суда можно разделить на две категории: большие и относительно тихоходные (пассажирские теплоходы, военные крупнотоннажные) и малые с повышенной скоростью (катера, суда на подводных крыльях). На крупных судах вибрации в носовой части ($0,1l$, где l — длина судна) определяются ударами о волны, в кормовой части ($0,125l$) — вибрацией двигателя ($\nu = 0,5 \div 25$ Гц с ускорением 7,8—58,9 м·с⁻² и вибрацией винта либо другого двигателя ($\nu = 4 \div 100$ Гц) с ускорением 7,8—78,5 м·с⁻²).

Малым судам свойственны более высокочастотные вибрации ($\nu = 5 \div 150$ Гц с ускорением ≥ 196 м·с⁻²).

Возможны линейные ускорения до $58,9 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Систему амортизации рассчитывают на $\nu_0 = 25 \div 30 \text{ Гц}$. Радиоэлектронную аппаратуру многих типов выполняют брызгозащищенной или герметичной. Антенные устройства на судах должны выдерживать ветровые нагрузки со скоростью до $60 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Самолетная, ракетная, космическая аппаратура. Для авиационного, ракетного и космического оборудования определяющим параметром является относительная масса оборудования, которая находится в пределах от 0,14 до 0,08 у пассажирских самолетов, истребителей и истребителей-бомбардировщиков с турбореактивными двигателями и падает до 0,02 ... 0,001 у космических ракет [13].

Технические изделия (в частности, радиоэлектронная аппаратура), расположенные в гермоконтейнерах или кабинах, работают при давлении 79,8 Па на высоте полета 10—12 тыс. м. При расположении изделий на обшивке следует учитывать аэродинамический нагрев до $147\text{—}200^\circ\text{C}$ (в зависимости от скорости полета). Полет выше облаков — значительная солнечная радиация с интегральной интенсивностью $1125 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ при плотности потока ультрафиолетовой части спектра $42 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ($\lambda = 0,28 \div 4 \text{ мкм}$).

Список литературы

1. Борисенко В. С. Оценка надежности сварных конструкций. М.: Знание, 1978. 54 с.
2. Вибрации в технике: Справочник. Т. 1/Под ред. В. В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. 480 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. Т. 5/Под ред. М. Д. Генкина. М.: Машиностроение, 1981. 496 с.

4. Груничев А. С., Кузнецов В. А., Шипов Е. В. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность. М.: Советское радио, 1969. 260 с.

5. Гудков А. И., Лешаков П. С. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1968. 470 с.

6. Ильинский В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. М.: Радио и связь, 1982. 396 с.

7. Кальман И. Г. Воздействие факторов внешней среды на аппаратуру и элементы. Методы климатических и механических испытаний. М.: Знание, 1971. 82 с.

8. Конструкции управляемых баллистических ракет/Под ред. А. М. Синюкова, Н. И. Морозова. М.: Воениздат, 1969. 470 с.

9. Международная электротехническая комиссия. Стандарты МЭК. Публикации 721-3-2, 721-3-5. Издание первое, 1985. М.: Изд-во стандартов, 1987.

10. Оценка эффективности технических мероприятий по обеспечению надежности РЭА/ А. С. Груничев, В. А. Долгов, В. И. Елисеев, А. Г. Цветков. М.: Советское радио, 1976. 122 с.

11. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие/Под ред. С. В. Серенсена. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

12. Случайные колебания: Пер. с англ./Под ред. А. А. Первозванского. М.: Мир, 1967. 248 с.

13. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования/Под ред. В. Г. Варламова. М.: Советское радио, 1980. 480 с.

14. Чевинский В. С. Защита аппаратуры от динамических воздействий. М.: Энергия, 1970. 320 с.

При проектировании и эксплуатации технических устройств наряду с другими воздействующими факторами в ряде случаев следует учитывать возможное воздействие на них полей ионизирующих излучений, возникающих при работе ядерно-физических установок и при ядерном взрыве — статическое и импульсное гамма- или гамма-нейтронное излучения. К ядерно-физическим установкам относят энергетические и исследовательские ядерные реакторы, генераторы нейтронов, мощные рентгеновские установки, а также установки на основе искусственных источников гамма- или гамма-нейтронного излучения.

Характеристики полей ионизирующих излучений ядерно-физических установок и ядерного взрыва изменяются в широких пределах в зависимости от мощности и кинетики протекания цепной реакции, активности нуклидов в изотопном источнике, расстояния от центра расположения источника излучения, а также от материала и геометрических размеров защиты.

Из показателей назначения источников ионизирующих излучений и оценки их воздействия на технические устройства и аппаратуру практическое применение нашли показатели, приведенные в табл. 1.

1. ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЯДЕРНЫХ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Силовые и энергетические установки на основе ядерных реакторов находят широкое применение на атомных кораблях, атомных электростанциях и других технических устройствах, в том

числе и военного назначения. Так, например, в военно-морском флоте США насчитывается более 40 подводных атомных лодок и атомных авианосцев [14]. Хорошо известны также своими эксплуатационными возможностями корабли-атомоходы «Ленин», «Арктика», «Россия» и др. Ядерные установки могут находить применение также в качестве двигателей летательных аппаратов и энергетических установок на борту космических систем и ракет [15].

В качестве силовых и энергетических ядерных установок используют ядерные реакторы различной конструкции. По общепринятой классификации их подразделяют на три класса:

реакторы на тепловых нейтронах, в которых практически все акты деления происходят на тепловых нейтронах со средней энергией около 0,025 эВ;

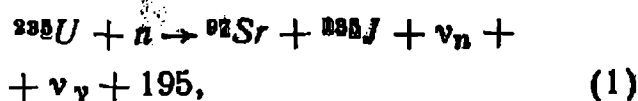
реакторы на промежуточных нейтронах, в которых деление ядерного горючего происходит на нейтронах с энергией от 100 эВ до 100 кэВ;

реакторы на быстрых нейтронах, в которых деление горючего вызывается в основном нейтронами с энергией более 100 кэВ.

Эти классы ядерных реакторов отличаются друг от друга наличием или отсутствием замедлителя в активной зоне, а также материалом теплоносителя, используемого при охлаждении активной зоны.

Все типы реакторов по конструкции подразделяют на гомогенные и гетерогенные. В гомогенных реакторах делящийся материал (ядерное топливо) равномерно распределен в активной зоне в смеси с другими материалами, а в гетерогенных — неравномерно. В качестве ядерного топлива в названных реакторах могут использоваться уран-

^{235}U , уран-238 и плутоний -239. Применительно к урану-235 вероятный акт реакции деления можно записать в виде [7]



где n — нейтрон; ^{92}Sr , ^{141}J — продукты реакции деления — стронций-97 и йод-135; ν_n , ν_γ — число нейтронов и гамма-квантов, испускаемых непосредственно при делении ядра ^{235}U ; 195 — энергия реакции деления, МэВ.

Из детального исследования реакции деления известно, что для урана и других тяжелых ядер основная доля продуктов деления относится к изотопам с массовыми числами от 82 до 156 атомных единиц массы [11]. При этом выход продуктов деления по массе существенно различен. Наиболее вероятно деление, при котором образуются продукты с массовыми числами от 82 до 101 и от 135 до 145. Максимумы выхода изотопов с указанными массами находятся в пределах 6 %. Количественные данные о средних значениях распределения энергии между продуктами в одном акте деления представлены в табл. 2 [7].

В табл. 2 приведены также данные о распределении энергии, выделяемой при полном делении 1 г ядерного топлива. Оно получено путем умножения энергии, выделяемой при одном акте деления, на число ядер, содержащихся в 1 г ядерного топлива. Последнее определяется формулой

$$N = N_0 \frac{P}{A}, \quad (2)$$

где $N_0 = 6,025 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро; $P = 1$ г — масса топлива; A — масса ядра делящегося вещества в атомных единицах массы.

В каждом отдельном акте деления ядер тяжелых элементов испускается целое число нейтронов ν_n . Однако число нейтронов, испускаемых в среднем на каждый акт деления, зависит от энергии нейтронов, вызывающих это деление. Данные о средних значениях числа нейтронов, испускаемых при делении различных тяжелых ядер, приведены в табл. 3 [22]. Нейтроны и гамма-излучение, выделяемые непо-

1. Основные показатели назначения источников гамма- и нейтронного излучения

Показатели назначения	Единицы измерений	
	Наименование	Обозначение
Плотность потока нейтронов	Ядерные реакторы, ускорители, изотопные источники, ядерный взрыв	Секунда в минус первой степени, метр в минус второй степени $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ ($\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$)
Интегральный поток нейтронов (флюенс)	Ядерные реакторы, ускорители, изотопные источники, ядерный взрыв	Метр в минус второй степени м^{-2} (см^{-2})
Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения	Ядерные реакторы, источники гамма-излучения, рентгеновские установки, ядерный взрыв	Ампер на килограмм А/кг
Экспозиционная доза фотонного излучения	Ядерные реакторы, источники гамма-излучения, рентгеновские установки, ядерный взрыв	Кулон на килограмм Кл/кг

2. Распределение полной энергии деления ядер тяжелых элементов

Параметры	Энергия на один акт деления, МэВ	Энергия, выделяемая при делении 1 г топлива, МэВ
Кинетическая энергия осколков деления	162	$4,15 \cdot 10^{23}$
Энергия мгновенного гамма-излучения	6	$1,54 \cdot 10^{23}$
Кинетическая энергия мгновенных нейтронов	6	$1,54 \cdot 10^{23}$
Энергия гамма-излучения осколков деления	5	$1,28 \cdot 10^{23}$
Энергия бета-распада осколков деления	5	$1,28 \cdot 10^{23}$
Энергия, уносимая нейтрино	11	$2,81 \cdot 10^{23}$
Итого (без нейтрино)	184	$4,71 \cdot 10^{23}$

3. Среднее число нейтронов, образующихся при одном акте деления

Ядерное горючее	Число нейтронов $\bar{\nu}_n$, выделяемых при делении на нейтронах	
	тепловых	быстрых
^{233}U	2,31	2,45
^{235}U	2,08	2,33
^{239}Pu	2,03	2,7

средственно в процессе цепной ядерной реакции деления, называют *мгновенными*. Спектральный состав мгновенных нейтронов деления находится в диапазоне энергий от нескольких десятков килоэлектронвольт до (примерно) 10 МэВ и описывается соотношением

$$N(E) = 0,484 \exp(-E_n) \operatorname{sh} \sqrt{2E_n},$$

(3)

где $N(E)$ — число нейтронов с энергией E_n на интервале энергии 1 МэВ; E_n — энергия нейтронов в МэВ.

Средняя энергия мгновенных нейтронов, описываемых соотношением (3), равна 2 МэВ. Нейтроны и гамма-излучение, выделяемые образовавшимися в процессе цепной ядерной реакции продуктами (осколками) деления, называют *запаздывающими*. Количественные данные об энергии и доле за-

паздывающих нейтронов, а также о периоде полураспада осколков, выделяющих нейтроны при бета-распаде, приведены в табл. 4 [20]. На каждый акт деления испускается шесть гамма-квантов. Средняя энергия квантов мгновенного гамма-излучения равна 1 МэВ. Энергетическое распределение квантов этого излучения приведено в табл. 5 [22]. Параметры полей излучений ядерных реакторов, используемых в качестве силовых и энергетических установок, изменяются в широких пределах и определяются энергетической (или тепловой) мощностью реактора, длительностью его работы и расстоянием от активной зоны до места размещения облучаемых объектов, а также наличием и свойством защитного материала. Приближенные соотношения для оценки значения плотности потоков нейтронов и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения для статических реакторов имеют вид [22]

$$\varphi_n = \frac{3,52 \cdot 10^5}{R^2} \frac{W_T (1 - 1/\nu_n)}{B_s (1 + 0,08f_d)};$$

(4)

$$P_\gamma = \frac{3,1 \cdot 10^3}{R^2} \frac{W_T (1 + 0,8f_d)}{A_s (1 + 0,08f_d)},$$

(5)

где φ_n , P_γ — плотность потока нейтронов и мощность дозы гамма-излучения соответственно, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ и А/кг ; R — расстояние от центра активной зоны, см; W_T — тепловая мощность реактора,

4. Характеристика запаздывающих нейтронов деления

Группа нейтронов	Период полураспада, с *	Средняя энергия, кэВ	Доля запаздывающих нейтронов **			
			^{233}U	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu
1	54,5	250	0,086	0,038	0,013	0,038
2	21,8	460	0,274	0,213	0,137	0,280
3	6,0	405	0,228	0,188	0,162	0,216
4	2,2	450	0,316	0,407	0,388	0,328
5	0,50	520	0,073	0,128	0,255	0,103
6	0,18	—	0,023	0,026	0,075	0,035
Общий выход	На деление		0,0070	0,0165	0,0412	0,0063
	На нейтрон, испускаемый при делении		0,0029	0,0067	—	0,0021

* Характерен для деления ^{235}U .

** Выходы для каждой группы представлены в виде доли запаздывающих нейтронов в данной группе от общего количества запаздывающих нейтронов.

5. Энергетическое распределение гамма-излучения при делении ^{235}U

Диапазон энергии, МэВ	Число гамма-квантов на акт деления	Диапазон энергии, МэВ	Число гамма-квантов на акт деления
0,25—0,75	3,1	3,75—4,25	0,065
0,75—1,25	1,9	4,25—4,75	0,024
1,25—1,75	0,84	4,75—5,25	0,019
1,75—2,25	0,55	5,25—5,75	0,017
2,25—2,75	0,29	5,75—6,25	0,007
2,75—3,25	0,15	6,25—6,75	0,006
3,25—3,75	0,062	—	—

МВт, определяемая по массе ядерного топлива, сгораемого в единицу времени, и энергии, выделяемой 1 г топлива (см. табл. 2); A_s , B_s — коэффициенты ослабления гамма- и нейтронного излучения соответственно; f_d — коэффициент, характеризующий отношение выделившейся энергии к ее максимально возможному значению.

Обобщенные данные о характеристиках полей гамма-нейтронного излучения мощных и маломощных ядерных реакторов приведены в табл. 6 [17].

В зависимости от типа и конструкции ядерных реакторов силовых и энергетических установок спектральный со-

став нейтронов и гамма-излучения может иметь различное распределение. Наиболее жесткий спектр будет у реакторов на быстрых нейтронах. Он близок к спектру деления, описываемому соотношением (3). Энергетическое распределение гамма-излучения в зависимости от используемых материалов в активной зоне реактора, защиты и элементов конструкции может быть в той или иной степени сдвинут в жесткую часть спектра гамма-излучения деления, приведенного в табл. 5.

Из соотношений (4), (5) следует, что по мере удаления от активной зоны плотность потока нейтронов и мощ-

6. Данные о полях излучений ядерных реакторов

Вид реактора	Тепловая мощность, МВт	Излучение в активной зоне		
		Плотность потока нейтронов, с ⁻¹ ·см ⁻²	Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения	
			P/c	2,58 А·кг ⁻¹
Мощный	10—5000	10 ¹² —10 ¹⁵	10 ⁴ —10 ⁷	1—10 ³
Маломощный	1·10 ⁻³ —10	10 ⁶ —10 ¹²	10—10 ⁴	10 ⁻² —1

ность экспозиционной дозы гамма-излучения быстро убывают. На расстояниях в несколько метров они будут отличаться от приведенных в табл. 6 на 5—7 порядков. Биологическая защита активной зоны на ядерных энергетических установках снижает уровни ионизирующих излучений до предельно допускаемых для обслуживающего персонала, и действию сильных полей нейтронов и гамма-излучения подвергаются технические устройства, размещаемые вблизи активной зоны.

2. ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Источником ионизирующих излучений при взрыве ядерного заряда служит либо только реакция деления ядер тяжелых элементов (атомный взрыв), либо реакция деления тяжелых элементов и синтез ядер легких элементов (термоядерный взрыв) [22, 24]. В качестве ядерного горючего в атомном взрыве используются уран-235 и плутоний-239, а в термоядерном взрыве наряду с ураном и плутонием используются также ядра лития-6, трития и дейтерия. Процессы образования нейтронного и гамма-излучения при атомном взрыве обусловлены реакцией деления ядер тяжелых элементов, аналогичной в случае применения в качестве ядерного горючего урана-235 соотношению (1). Количественные характеристики распределения энергии между продуктами деления, приведенные в табл. 2 применительно к ядерным реакторам, справедливы и к неуправляемым цепным

ядерным реакциям, протекающим при атомном взрыве. Однако при использовании приведенных в табл. 2—5 количественных характеристик ионизирующих излучений и распределения энергии между продуктами ядерной реакции деления к полям излучения атомного взрыва обычно учитывают следующие особенности: ввиду малой доли запаздывающих нейтронов по сравнению с нейтронами деления их вкладом в поражающее действие нейтронов, выделяемых в окружающее пространство при ядерном взрыве, можно пренебречь; в процессе взаимодействия нейтронов с материалом конструкции ядерного заряда и окружающей среды спектр нейтронов в пространстве, прилегающем к зоне ядерного взрыва, претерпевает существенные изменения по сравнению с энергетическим распределением, описываемым соотношением (3). При взрыве в воздухе на определенных расстояниях от центра ядерного взрыва (несколько длин свободного пробега нейтронов в воздухе) спектр становится равновесным и приближенно описывается функцией спектра замедления, имеющей вид C/E_n , где C — постоянная [22]. Нейтрон как материальная частица обладает конечной скоростью распространения в окружающей среде. Поэтому при взрыве в воздухе приход импульса нейтронов в точку пространства, расположенную на расстоянии R от центра взрыва, запаздывает по сравнению с приходом в эту же точку импульса мгновенного гамма-излучения, распространяющегося со скоростью света. Временной интервал запаздывания прихода импульса нейтронов

Δt можно оценить из соотношения

$$\Delta t = R \left(\frac{1}{1,38 \cdot 10^7 \sqrt{E_{n \max}}} - \frac{1}{v_c} \right), \quad (6)$$

где $E_{n \max}$ — максимальная энергия нейтронов в спектре, МэВ; $v_c = 3 \times 10^8$ м·с⁻¹ — скорость света.

Соотношение (6) можно использовать для получения приближенной зависимости длительности импульса мгновенных нейтронов от расстояния до центра взрыва, подставив в него поочередно минимальную и максимальную энергию нейтронов в спектре ядерного взрыва и взяв разность между ними. Учитывая, что структурные повреждения и ионизационные эффекты в материалах технических устройств обусловлены в основном нейтронами, имеющими энергию от 0,1 до 10 МэВ, для длительности импульса нейтронов τ_n можно получить [22]

$$\tau_n = 2 \cdot 10^{-7} R. \quad (7)$$

При протекании цепной ядерной реакции взрывного типа каждый акт деления сопровождается увеличением числа свободных нейтронов на (ν_n — 1), так как один нейтрон расходуется на поддержание цепной ядерной реакции деления. Конструкция заряда поглощает незначительное число образовавшихся при реакции нейтронов. Поэтому обычно принимают, что на каждый акт деления в окружающее пространство выделяется 1,5 нейтрона [24]. Энергию ядерного взрыва (обычно называют мощностью) принято представлять эквивалентной массой тротила. При этом считают, что при полном делении 60 г урана или плутония выделяется столько же энергии, что и при взрыве одной тысячи тонн тринитротолуола. Определяя по формуле (2) число ядер в 60 г урана или плутония (а это эквивалентно числу делений) и учитывая, что на каждое деление выделяется 1,5 свободных нейтронов, получим число свободных нейтронов, выделяемых при ядерном взрыве мощностью 1 тыс. т. Оно равно $2,3 \cdot 10^{23}$ нейтронов. Используя полученное значение выхода нейтронов и предположение о сферически симметричном распределении нейтронов в воздушном пространстве во-

7. Изменение плотности воздуха в атмосфере по высоте (по ГОСТ 4401—81)

Высота, м	Плотность воздуха, кг/м ³	Высота, м	Плотность воздуха, кг/м ³
0	1,225	4 000	0,819
500	1,167	5 000	0,737
1000	1,112	7 000	0,580
1500	1,058	10 000	0,413
2000	1,001	15 000	0,194
2500	0,957	20 000	0,088
3000	0,909	30 000	0,018

круг центра ядерного взрыва, как это сделано в работах [17, 22], соотношение для расчета интегрального потока нейтронов в зависимости от удаления до центра взрыва можно записать в виде

$$\Phi_n = \frac{k_n q}{R^2} \exp \left(- \frac{R}{\lambda_n} \frac{\rho_v}{\rho_{v0}} \right), \quad (8)$$

где Φ_n — интегральный поток (флюенс) нейтронов, см⁻²; $k_n = 1,8 \cdot 10^{18}$ — «предэкспоненциальный» коэффициент; q — тротиловый эквивалент ядерного взрыва, кг; R — расстояние от центра взрыва, м; $\lambda_n = 190$ м — длина ослабления нейтронов в воздухе при наземных или воздушных взрывах при $\rho_v = \rho_{v0} = 1,225$ кг/м³; ρ_v, ρ_{v0} — плотность воздуха соответственно на высоте взрыва и в приземном слое. Данные о плотности воздуха в атмосфере на различных высотах приведены в табл. 7.

Используя (7) и (8) для максимальной плотности потока нейтронов в с⁻¹·см⁻² на расстоянии R от центра ядерного взрыва, можно получить

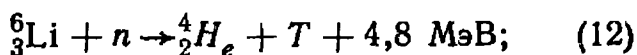
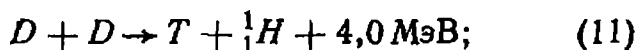
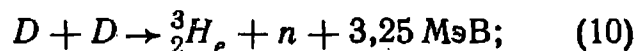
$$\Phi_n(R)_{\max} = \frac{5 \cdot 10^6 k_n q}{R^2} \times \exp \left(- \frac{R}{\lambda_n} \frac{\rho_v}{\rho_{v0}} \right). \quad (9)$$

При использовании в качестве источника энергии ядерного взрыва реакции синтеза легких ядер различают два типа термоядерных зарядов: с использованием химических соединений дейтерия с легким изотопом лития ${}^6\text{Li}$ или с применением жидкого дейтерия

8. Распределение энергии в реакциях синтеза

Реакция синтеза	Продукты реакции	Энергия на 1 акт синтеза, МэВ	Энергия, выделяемая при синтезе 1 г смеси, МэВ
$T+T$	${}^4_2\text{He}$	3	$2 \cdot 10^{23}$
	$2n$	8	
$T+D$	${}^4_2\text{He}$	3,1	$1,2 \cdot 10^{23}$
	n	14,5	

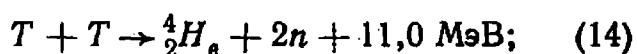
D и трития T [12, 24]. В первом случае имеют место следующие реакции:



где n , ${}^1_1\text{H}$ — соответственно нейтрон и протон.

Результаты рассмотрения кинетики реакций (10) — (13) показали, что в ходе этих реакций выделяется примерно 1 нейтрон на 110 МэВ энергии такого термоядерного взрыва [21]. Это примерно совпадает с числом нейтронов, испускаемых в свободное пространство при взрыве заряда на основе реакции деления. Это означает, что соотношения (8) и (9) справедливы и для термоядерного взрыва первого вида.

Для термоядерного взрыва второго вида, основанного на использовании синтеза жидкого трития или дейтерия, характерны следующие процессы:



Распределение энергии синтеза между продуктами реакции (14), (15) приведено в табл. 8.

Из сопоставления значений энергий, идущих на образование ионизирующих излучений при делении (см. табл. 2) и синтезе (см. табл. 8) единицы массы исходных веществ, следует, что в реакции синтеза, описываемого соотношениями (14) и (15), она составляет 60—80%, а в реакции деления только 12%. Это означает, что выход энергии, уносимой ионизирующими излучениями (преимущественно нейтронами), при термоядерном взрыве второго вида будет в 5—7 раз больше по сравнению с ядерным взрывом на основе только реакции деления. Если учесть, что средняя энергия нейтронов при термоядерном взрыве второго вида будет также существенно (в 4—7 раз) выше, чем у атомного взрыва, то возрастание его поражающего действия вполне очевидно. Значение предэкспоненциального коэффициента k_n в формуле (8) применительно к термоядерному взрыву второго вида может быть получено только при известном отношении энергии, выделяемой по реакциям (14), (15), к общей энергии, выделяемой при ядерном взрыве. Если предположить, что при взрыве термоядерного заряда второго вида синтезируется, например, только 6 г тритийдейтериевой смеси на 1 тыс. т, значение коэффициента k_n в формуле (8) будет примерно равно $1,3 \cdot 10^{19}$.

Основными источниками гамма-излучения при ядерном взрыве являются цепная ядерная реакция деления (мгновенное гамма-излучение), захват нейтронов ядрами окружающей среды (в том числе атомом воздуха) и распад продуктов деления (осколочное гамма-излучение). Мгновенное гамма-излучение представляет собой импульс длительностью примерно 0,1 мкс и средней энергией квантов около 1 МэВ. Их энергетическое распределение подобно приведенному в табл. 5.

В предположении о сферически симметричном пространственном распределении гамма-квантов в воздушной среде, окружающей ядерный взрыв, зависимость экспозиционной дозы мгновенного гамма-излучения от расстояния

до центра взрыва обычно представляется в виде [17, 22]

$$D_{\text{мги}} = \frac{2,58 \cdot 10^4 q}{R^2} \exp \left(- \frac{R}{\lambda_\gamma} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в0}}} \right), \quad (16)$$

где $D_{\text{мги}}$ — экспозиционная доза мгновенного гамма-излучения в Кл·кг⁻¹; $\lambda_\gamma = 285$ м — длина ослабления дозы мгновенного гамма-излучения.

Поскольку мгновенное гамма-излучение испускается до разлета оболочки ядерного заряда, оно частично поглощается материалом оболочки. Поэтому фактическое значение экспозиционной дозы будет отличаться от рассчитанного по формуле (16).

Учитывая приведенное выше значение длительности импульса мгновенного гамма-излучения, из (16) можно получить следующее соотношение для расчета максимального значения мощности экспозиционной дозы мгновенного гамма-излучения, А·кг⁻¹:

$$P_{\gamma \text{ max}} = \frac{2,58 \cdot 10^{11} q}{R^2} \exp \left(- \frac{R}{\lambda_\gamma} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в0}}} \right). \quad (17)$$

Полная экспозиционная доза гамма-излучения определяется суммой указанных выше составляющих гамма-излучения [22]:

$$D_\gamma = D_{\text{мги}} + D_{\text{з}} + D_{\text{оск}}, \quad (18)$$

$$\text{где } D_{\text{з}} = \frac{1,3 \cdot 10^6 q}{R^2} \exp \left(- \frac{R}{410} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в0}}} \right) —$$

доза захватного гамма-излучения, Кл·кг⁻¹; $D_{\text{оск}} = \frac{3,6 \cdot 10^6 q}{R^2} (1 - 0,2q^{0,65}) \times$

$\times \exp \left(- \frac{R}{300} \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в0}}} \right) —$ доза осколочного гамма-излучения, Кл·кг⁻¹. На основе приведенных в работе [22] количественных значений и качественного описания формы импульса мгновенного гамма-излучения ядерного взрыва его примерную аппроксимацию можно представить в виде соотношения

$$P_\gamma(t) = k_\gamma P_{\gamma \text{ max}} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}), \quad (19)$$

где t — текущее время, с; k_γ — постоянная, определяемая в предположении $P_\gamma(t) = P_{\gamma \text{ max}}$; τ_1, τ_2 — постоян-

9. Обобщенные характеристики радиационной обстановки

Характер радиационного воздействия	Вид излучения	Энергия, МэВ	Плотность потока нейтронов, с ⁻¹ ·см ⁻²	Интегральный поток нейтронов, см ⁻²	Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения 2,58 А·кг ⁻¹	Экспозиционная доза гамма-излучения 2,58 Кл·кг ⁻¹
Импульсное облучение	Нейтроны	0—14	10 ¹² —10 ²¹	10 ¹⁴ —10 ¹⁶	—	—
	Гамма-кванты	0,1—10	—	—	10 ⁻² —10 ⁸	10 ⁻⁵ —10 ³
Излучение ядерных энергетических установок	Нейтроны	0—14	10 ³ —10 ⁸	10 ¹⁴ —10 ¹⁶	—	—
	Гамма-кванты	0,1—10	—	—	10 ⁻¹⁰ —10 ³	10 ³

10. Предельно достижимые значения параметров излучений исследовательских ядерных реакторов

Параметр излучения	Виды реакторов	
	статические	импульсные
Мощность реактора, МВт	0,2—50	$(1-2) \cdot 10^{-3}$
Плотность потока нейтронов с энергией $E_n > 0,1$ МэВ, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	10^{14} — $2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{16}$ — $5 \cdot 10^{18}$
Мощность дозы гамма-излучения, А/кг	1—80	$3 \cdot 10^3$ — $3 \cdot 10^5$
Длительность импульса нейтронов на полувысоте *, с	—	$5 \cdot 10^{-8}$ — $2 \cdot 10^{-3}$
Число делений за импульс	—	10^{17} — $5 \cdot 10^{18}$
Интегральный флюенс нейтронов за импульс, см^{-2}	—	$5 \cdot 10^{18}$ — $5 \cdot 10^{15}$

* Длительность импульса нейтронного излучения с точки зрения моделирования необратимых радиационных эффектов.

ные времени, зависящие от кинетики цепной ядерной реакции.

Обобщая значения воздействующих потоков нейтронов и доз гамма-излучения, которые могут иметь место в зоне ядерного взрыва и около энергетических ядерных установок при их эксплуатации в продолжение одного года, можно получить данные, приведенные в табл. 9 [17].

3. ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ МОДЕЛИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

В практике исследований и испытаний материалов и технических устройств на воздействие ионизирующих излучений используется большое число различных ядерно-физических установок импульсного и статического гамма-нейтронного излучения. Это, прежде всего, исследовательские ядерные реакторы, генераторы нейтронов, ускорители заряженных частиц, изотопные источники излучений.

Ядерные исследовательские реакторы являются наиболее мощными источниками смешанного гамма-нейтронного излучения. Параметры излучений этих реакторов изменяются в широких пределах и определяются, как уже указы-

валось, энергетической мощностью реактора, длительностью облучения и расстоянием от активной зоны до места размещения облучаемых объектов. По режиму работы все многообразие исследовательских реакторов можно разделить на статические (работающие непрерывно длительное время) и импульсные (длительность импульса излучения менее 1 с).

Статические реакторы применяют при моделировании гамма-нейтронного излучения ядерных силовых установок. Их используют, как правило, при исследовании необратимых повреждений в материалах и технических устройствах. Верхняя граница достижимых значений интегрального потока нейтронов и экспозиционной дозы гамма-излучения на этих реакторах равна соответственно 10^{16} см^{-2} и 10^4 Кл/кг .

Импульсные реакторы позволяют в определенных пределах моделировать параметры полей гамма-нейтронного излучения ядерного взрыва. Наиболее мощные импульсные исследовательские реакторы обеспечивают облучение крупногабаритных узлов и блоков технических устройств. Некоторые импульсные реакторы с открытой активной зоной могут работать не только в импульсном, но и в статическом режиме. Это существенно расширяет возможности их использования при радиа-

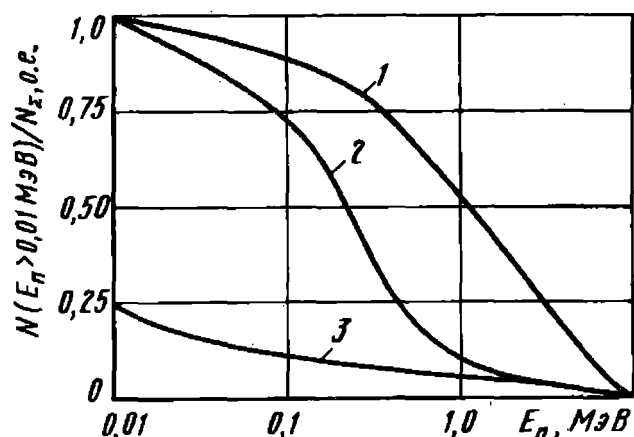


Рис. 1. Спектры нейтронного излучения ядерных реакторов:

1 — импульсные реакторы на быстрых нейтронах; 2 — импульсные реакторы на тепловых нейтронах; 3 — энергетические реакторы на тепловых нейтронах

ционных испытаниях и исследованиях.

Обобщенные данные о предельно-достижимых параметрах полей гамма-нейтронного излучения исследовательских ядерных реакторов приведены в табл. 10 [10].

Спектральные и временные характеристики основных типов реакторов представлены на рис. 1—3. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах в большей степени моделируют нейтронное излучение атомного взрыва и поэтому их использование при испытаниях материалов и технических устройств на радиационную стойкость к нейтронам взрыва предпочтительнее. При испытании материалов и технических устройств на стойкость к ионизирующим излучениям ядерных силовых и энергетических установок предпочтение следует отдавать исследовательским реакторам на тепловых нейтронах.

Форма импульсов гамма- и нейтронного излучения на всех импульсных реакторах практически совпадает (так как удаление испытуемых объектов от активной зоны не превышает нескольких метров) и имеет, как правило, колоколообразную форму. При анализе переходных радиационных процессов ее можно аппроксимировать соотношениями вида

$$P_{\gamma}(t) = P_{\gamma \max} \sin \frac{\pi t}{\tau_{\pi}} \times [1(t) - 1(t - 2\tau_{\pi})]; \quad (20)$$

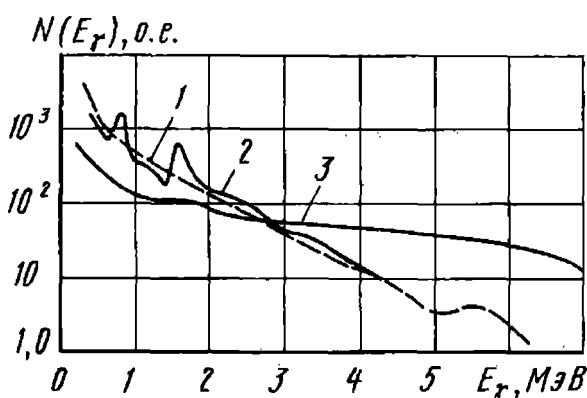


Рис. 2. Спектры гамма-излучения ядерных реакторов:

1 — мгновенное гамма-излучение деления; 2 — гамма-излучение импульсного быстрого реактора; 3 — гамма-излучение энергетического реактора

$$\Phi_n(t) = \Phi_{n \max} \sin \frac{\pi t}{\tau_{\pi}} \times [1(t) - 1(t - 2\tau_{\pi})], \quad (21)$$

где $P_{\gamma \max}$ и $\Phi_{n \max}$ — максимальная мощность экспозиционной дозы γ -излу-

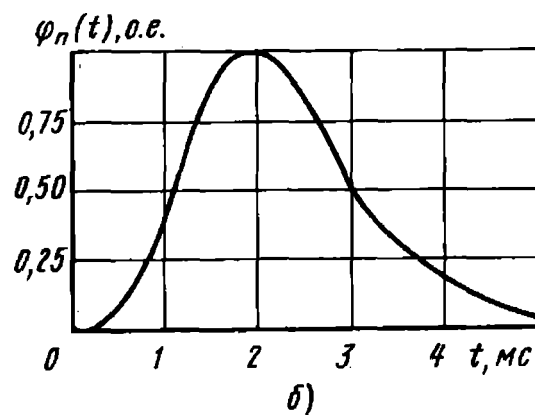
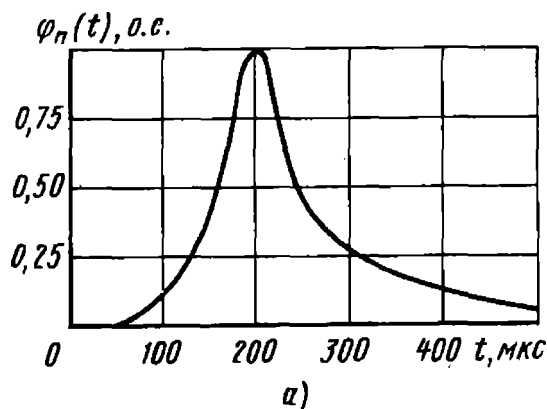


Рис. 3. Типовые формы импульсов излучения импульсных реакторов:

а — на быстрых нейтронах; б — на тепловых нейтронах

11. Параметры гамма-установок на основе ^{60}Co

Тип гамма-установки	Мощность дозы, А/кг (Р/с)	Тип гамма-установки	Мощность дозы, А/кг (Р/с)
К-60 000	$3,5 \cdot 10^{-1}$ (1200)	К-200	$9 \cdot 10^{-2}$ (350)
К-120	$1 \cdot 10^{-1}$ (450)	К-120 000	1,3 (5200)
РХ-γ-30	$5 \cdot 10^{-2}$ (200)	ГУМ	$3 \cdot 10^{-2}$ (120)

чения и плотность потока нейтронов в импульсе; τ_n — длительность импульса ионизирующего излучения на уровне 0,5 амплитуды; $1(t)$, $1(t - 2\tau_n)$ — единичные функции.

Из рис. 3 следует, что для исследования нестационарных эффектов предпочтение следует отдавать импульсным реакторам на быстрых нейтронах.

При исследовании эффективности воздействия нейтронов различного спектрального состава на материалы и технические устройства, установлении зависимости чувствительности датчиков средств измерений от энергии нейтронов, а также при изучении защитных свойств различных материалов, корпусов и экранов некоторое распространение получили генераторы моноэнергетических нейтронов на базе ускорителей заряженных частиц: ЭГ-2,5-VI ($E_n = 0,05 \div 18$ МэВ), НГ-150 ($E_n = 14$ МэВ), ТСНГ-3 ($E_n = 14$ МэВ),

значение потока нейтронов у которых составляет $5 \cdot 10^9 - 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Для моделирования полей гамма-излучений энергетических ядерных установок и при исследованиях дозовых и поверхностных эффектов в материалах и устройствах широко используют изотопные установки с кобальтовыми источниками. Их основные параметры приведены в табл. 11 [17].

Для моделирования воздействия импульса гамма-излучения используют

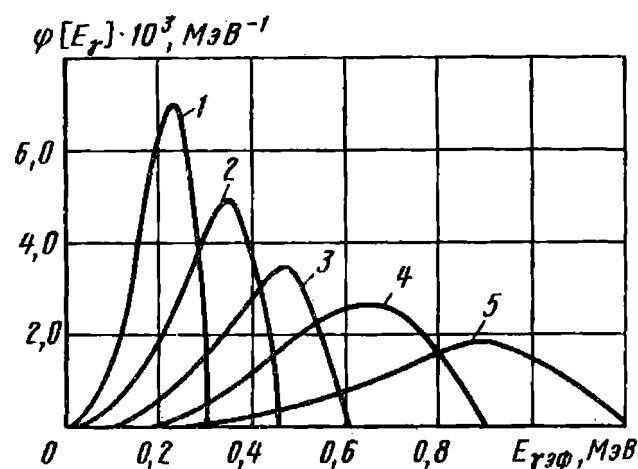


Рис. 4. Спектральное распределение тормозного излучения при энергии электронов:

1 — 0,3 МэВ; 2 — 0,45 МэВ; 3 — 0,6 МэВ; 4 — 0,9 МэВ; 5 — 1,2 МэВ; $\phi[E_\gamma]$ — плотность интенсивности излучения

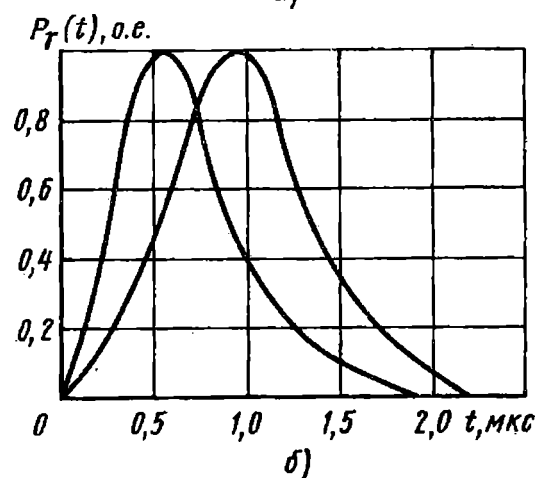
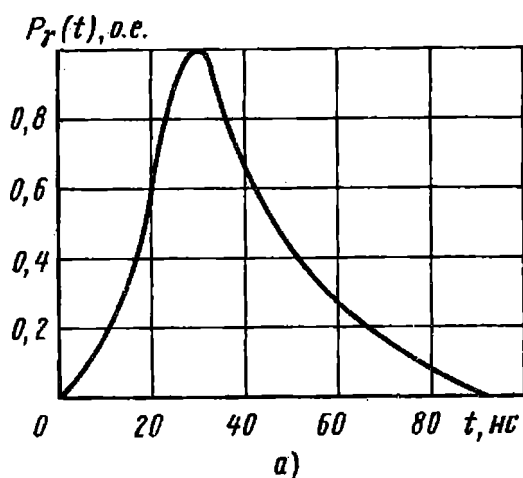


Рис. 5. Типовые формы импульсов гамма-излучения моделирующих установок на базе:

а — ускорителей типа РИУС-5; б — высокоэнергетических ускорителей

высокоинтенсивные рентгеновские установки, сильноточные ускорители электронов, работающие в тормозном режиме, и другие электронные ускорители. Обобщенные параметры установок, используемых при исследованиях и испытаниях, приведены в табл. 12 [1, 17, 18].

Энергетический спектр тормозного излучения моделирующих установок на базе ускорителей электронов определяется энергией ускоренных электронов (ускоряющим напряжением), атомным номером материала мишени, ее толщиной и имеет непрерывный характер. Расчетные энергетические спектры и форма импульсов установок представлены на рис. 4, 5.

Наиболее стабильными параметрами электронного пучка обладают линейные ускорители, но и у них амплитуда и форма импульса изменяется от пуска к пуску. Сильноточные ускорители разрядного типа имеют от пуска к пуску значительный разброс всех параметров электронного пучка. Более того, такие важные характеристики, как энергетический спектр электронов и распределение плотности тока в пучке, изменяются сложным образом в течение длительности импульса. Временную форму импульса фотонного излучения в зависимости от типа моделирующих установок можно представить либо соотношениями (20) для колоколообразных импульсов, либо в виде суммы экспонент:

$$P_{\gamma}(t) = P_{\gamma \max} \sum_{i=1}^n k_i e^{-a_i t}, \quad (22)$$

где a_i , k_i — временная постоянная и вес i -й экспоненты в ряду, определяемые по результатам аттестации моделирующих установок.

При аппроксимации импульса обычно ограничиваются двумя экспонентами. Можно ожидать, что при проведении радиационных исследований и испытаний со временем найдут применение импульсные электронные ускорители в комплексе с импульсными реакторами, работающие в подкритическом режиме как размножители нейтронов и обеспечивающие генерацию импульсов нейтронного и фотонного излучений с параметрами соответственно $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $1 \cdot 10^9 \text{ А/кг}$ [10].

12. Обобщенные параметры импульсных рентгеновских установок и ускорителей электронов

Тип установки	Длительность импульса, с	Ускоряющее напряжение, МВ	Максимальный ток электронов, А	Частота следования импульсов, с ⁻¹	Максимальная мощность дозы гамма-излучения, А/кг
Рентгеновские установки	$(0,2-1,2) \cdot 10^{-6}$	3—30	0,2—50	Одиночные 1—25	30—3·10 ⁷
Наносекундные рентгеновские установки	$(3-70) \cdot 10^{-9}$	0,6—5	$10^3-3 \cdot 10^4$	Одиночные	$8 \cdot 10^3-1,3 \cdot 10^8$
Ускорители электронов	$(3,5-50) \cdot 10^{-6}$	3—10	0,2—0,5	Одиночные 1—400	$8-5 \cdot 10^9$

13. Основные характеристики дозиметров фотонного излучения

Тип дозиметра	Принцип действия	Диапазон измерений, Кл·кг ⁻¹	Диапазон энергий регистрируемого излучения, МэВ	Основная погрешность, %	Независимость показаний от мощности дозы, А·кг ⁻¹	Изменение показаний во времени	Массогабаритные характеристики дозиметра
КТД-02	Термолюминесценция	$2,6 \cdot 10^{-4} - 2,6$	0,05—3	±35	До $2,6 \cdot 10^7$	20 % за 1000 ч	Ø 5×0,9 мм; Ø 3×1 мм; масса 5 г
ИКС	Термолюминесценция	$1,3 \cdot 10^{-3} - 0,26$	0,05—1,25	±15÷±20	До $2,6 \cdot 10^6$	30 % за 1 мес.	Ø 17×11 мм (в упаковке); масса 3,6 г
ДТС-0,01/1,0	Изменение оптической плотности	$1,3 \cdot 10^{-3} - 5,2 \cdot 10^3$	0,08—3	±10 (20)	$2,6 \cdot 10^6$	Менее 5 % за 1 мес.	5×15×15 мм; масса 15 г

4. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЕЙ ГАММА- И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

Измерение экспозиционной дозы. Для измерений экспозиционной дозы гамма- и рентгеновского излучения моделирующих установок применяют твердотельные термолюминесцентные, радиофотолюминесцентные, стеклянные и другие дозиметры. Основные характеристики некоторых дозиметров приведены в табл. 13 [3, 4, 16].

Перед применением должна быть проведена метрологическая аттестация этих дозиметров. При проведении метрологической аттестации дозиметров и их измерительных пультов должны быть учтены особенности параметров полей моделирующих установок и возможные последствия их влияния на свойства дозиметров.

С учетом данных о параметрах полей моделирующих установок средства измерений экспозиционной дозы после их аттестации должны отвечать следующим основным требованиям:

функция преобразования экспозиционной дозы в наблюдаемые изменения физических или других свойств дозиметров должна допускать линейную аппроксимацию значений экспозиционной дозы фотонного излучения в диапазоне доз от $3 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^3$ Кл/кг;

предел допускаемой суммарной погрешности определения экспозиционной дозы фотонного излучения с эффективной энергией от 0,1 до 3 МэВ и мощности экспозиционной дозы до $3 \cdot 10^6$ А/кг не должен быть более ±20% при доверительной вероятности 0,85; показания дозиметров не должны зависеть от мощности экспозиционной дозы до $3 \cdot 10^6$ А/кг;

средства измерений не должны возмущать поле излучения, должны иметь малые размеры и допускать многократное использование и снятие результатов наблюдений.

При соблюдении этих требований феноменологическое соотношение для функции преобразования дозиметров экспозиционной дозы импульсного

гамма- и рентгеновского излучения можно записать в виде

$$D_{\gamma} = \frac{Qk(t)}{k_0^D \gamma k(E_{\gamma}) k_c}, \quad (23)$$

где Q — результат наблюдения; $k(t)$ — коэффициент, учитывающий зависимость значения Q от интервала времени, прошедшего от момента облучения до момента получения результата наблюдений; $k_0^D \gamma$ — коэффициент чувствительности дозиметра к гамма-излучению поверочной дозиметрической установки; $k(E_{\gamma})$ — коэффициент спектральной чувствительности дозиметра; k_c — коэффициент, учитывающий влияние сопутствующего излучения на результат наблюдения.

Коэффициенты $k(t)$, $k(E_{\gamma})$, k_c исключают соответствующие систематические погрешности, обусловленные влияющими факторами и свойствами дозиметров.

Коэффициент $k(t)$, учитывающий изменение результатов наблюдений во времени, зависит от природы физического принципа, положенного в основу работы дозиметра. Так, уменьшение результата наблюдения у термолюминесцентных и стеклянных дозиметров обусловлено освобождением заполненных ловушек вследствие естественного термического отжига. Многообразие причин, влияющих на изменение результата наблюдения во времени, не дает возможности учесть их расчетным путем. Поэтому эту зависимость определяют экспериментально. Как правило, эти изменения для дозиметра не должны превышать единиц процентов в первые дни после облучения.

Необходимость введения коэффициента спектральной чувствительности $k(E_{\gamma})$ обусловлена зависимостью чувствительности дозиметров от энергии излучения. Наиболее сильно эта зависимость выражена в области энергий квантов от 50 до 300 кэВ. Определить значения этого коэффициента экспериментальным путем практически невозможно. Поэтому для этих целей используют расчетно-экспериментальный метод, основанный на экспериментальных данных о коэффициентах чувствительности дозиметров к экспози-

онной дозе $k_0^D \gamma(E_i)$ (или мощности экспозиционной дозы для дифференциальных детекторов), определенных на источниках гамма- и рентгеновского излучения с различными дискретными значениями энергии квантов излучения E_i , и соотношении вида

$$k(E_{\gamma}) = \frac{\int_{E_i} k_0(E) \frac{N(E)}{\eta(E)} dE}{k_0^D \gamma \int_{E_i} \frac{N(E)}{\eta(E)} dE}, \quad (24)$$

где $N(E)$ — спектр фотонного излучения, $\text{квант} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{МэВ}^{-1}$; $\eta(E)$ — плотность потока гамма-квантов, нормированная на единицу мощности экспозиционной дозы, $\text{квант} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{кг}$. Можно показать, что для обеспечения измерений экспозиционной дозы с суммарной погрешностью не более $\pm 20\%$ при достижимых значениях погрешностей определения коэффициентов $\delta k_0(E)$, $\delta k_0^D \gamma$ и δQ необходимо, чтобы чувствительность дозиметра во всем диапазоне энергий регистрируемого излучения не превышала чувствительности к фотонному излучению поверочной установки более чем в 1,3 раза.

Дозиметры КТД-02, основные характеристики которых приведены в табл. 13, являются термолюминесцентными дозиметрами (ТЛД) на основе LiF. Их используют для измерения экспозиционной дозы тормозного излучения сильноточных импульсных ускорителей. Дозиметры обладают некоторой чувствительностью к нейтронному излучению, которая зависит от спектра нейтронного излучения. Поэтому их нельзя использовать на ядерных реакторах.

Дозиметры ИКС — термолюминесцентные дозиметры на основе алюмофосфатных стекол. Существует несколько модификаций этих дозиметров с использованием алюмофосфатных стекол разного состава. Для измерения экспозиционной дозы фотонного излучения моделирующих установок применяют дозиметры ИКС, изготовленные из стекла ИС-7, совместно с измерительными пультами ИКС-А или ИКС-Г.

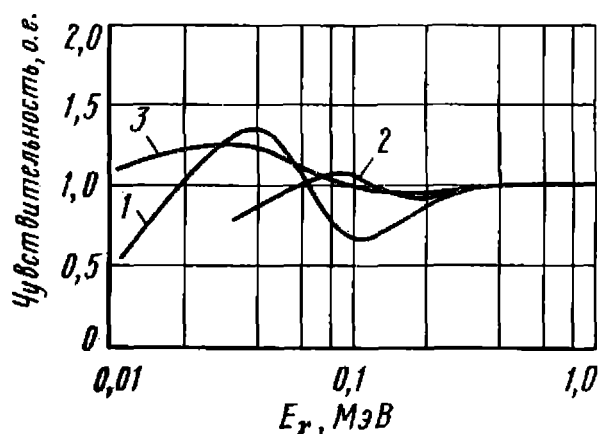


Рис. 6. Энергетические зависимости чувствительности дозиметров фотонного излучения:

1 — ДТС-0,01/1,0; 2 — ИКС; 3 — КТД-02

Дозиметры практически нечувствительны к нейтронам, что позволяет использовать их не только на импульсных установках фотонного излучения, но и на ядерных реакторах при минимальных сведениях о спектре нейтронов [3].

Стеклянные дозиметры ДТС-0,01/1,0 представляют собой силикатные стекла с активирующей добавкой окиси никеля. Так как чувствительность стекол сильно зависит от энергии фотонного излучения, их облучение проводится в свинцовом фильтре толщиной 0,1—0,2 мм. Чувствительность ДТС-0,01/1,0 к нейтронному излучению реактора на быстрых нейтронах составляет не более $7,74 \cdot 10^{-15} \text{ А} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{нейтрон}^{-1} \cdot \text{см}^2$. При такой чувствительности погрешность в определении дозы фотонного излучения в смешанном поле излучения не превышает $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 0,95. В полях излучения реакторов на тепловых нейтронах погрешность показаний дозиметров ДТС-0,01/1,0, обусловленная нейтронами, не превышает $\pm 2\%$ при доверительной вероятности 0,95. Суммарная предельная погрешность измерений доз фотонного излучения, определяемая по наихудшему сочетанию всех действующих факторов (температуры, сопутствующего нейтронного излучения, самопроизвольного обесцвечивания и др.), не более $\pm 20\%$ при доверительной вероятности 0,95 [4]. Так как нижний предел регистрируемых доз составляет

$1,3 \cdot 10^{-2} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$, эти дозиметры можно использовать только на ядерных реакторах и мощных источниках рентгеновского или гамма-излучения.

На рис. 6 приведены зависимости чувствительности рассмотренных дозиметров от энергии фотонного излучения.

Из анализа приведенных в табл. 13 данных можно заключить, что в связи с большими значениями основной погрешности перед аттестацией дозиметры КТД-02 и ИКС должны быть разбиты на группы, в пределах которых разброс показаний Q не должен превышать $\pm 10\%$. После этого провести аттестацию каждой группы отдельно. Лишь при таком условии эти дозиметры смогут обеспечить измерения экспозиционных доз импульсного фотонного излучения с суммарной погрешностью не более $\pm 20\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Измерение мощности экспозиционной дозы фотонного излучения импульсных моделирующих установок проводится косвенными методами и основано, как правило, на преобразовании импульса гамма- или рентгеновского излучения в силу электрического тока и измерении последнего прямыми методами с помощью средств измерений электрических и радиотехнических величин.

Преобразование мощности экспозиционной дозы импульсного фотонного излучения в импульс электрического тока осуществляется детекторами на основе полупроводниковых структур, ионизационных камер, сцинтиллирующих пластмасс в сочетании с фотоэлектронными преобразователями и другими устройствами. Основные технические параметры широко используемых детекторов импульсного фотонного излучения приведены в табл. 14 [2, 5, 6].

Для детекторов некоторых типов на рис. 7 приведены зависимости чувствительности от энергии фотонного излучения, нормированные по чувствительности к гамма-излучению моделирующих установок на основе кобальта-60.

Типовую структурную схему измерителя мощности экспозиционной дозы с применением приведенных в табл. 14 детекторов можно представить в виде схемы рис. 8.

14. Основные технические параметры детекторов импульсного фотонного излучения

Классы детекторов	Тип (вид) детектора	Рабочее напряжение, В	Линейный участок функции преобразования, А	Временное разрешение, нс	Чувствительность к гамма-излучению с $E = 1$ МэВ, А·с·см ² /квант
Фотоэлементы	СДФ 5, 6	1800	0—10	1,5—1,8	1·10 ⁻²⁰ —1·10 ⁻²⁵ (без сцинтиллятора)
	СДФ 7	1800	0—10	1,5—1,8	
	СДФ 10	1800	0—10	0,5	
	СДФ 11	1800	0—3	0,3	
	СДФ 12	1500	0—2	0,07	1·10 ⁻¹⁵ —1·10 ⁻¹⁶ (при наличии сцинтиллятора)
	ФЭК-11	1000	0—8	1,6—1,8	
	ФЭК-15	2000	0—2,5	0,25	
	ФЭК-28	—	0—3	1	
Фотоэлектронные умножители	ФЭУ-30	3 200	0—1,1	4,2—5,5	1·10 ⁻¹⁵ —1·10 ⁻¹⁷ (без сцинтиллятора)
	ЭЛУ-ФТ	3 600	0—5	10	
	СНФ-5	4 800	0—2	1	1·10 ⁻¹⁰ —1·10 ⁻¹¹ (при наличии сцинтиллятора)
	СНФТ-11	10 000	0—2	3	
Полупроводниковые	(ППД)	300—600	До нескольких десятков	2—5	1·10 ⁻¹⁶ —3·10 ⁻¹⁵ (в зависимости от толщины базы и толщины радиатора)
Вакуумные	(ВЗД)	2000	До 100 и более	1	1·10 ⁻²⁰ —1·10 ⁻²²
С диэлектрическим рассеятелем	(ДДР)	—	До 100—800	1	(0,3—1)·10 ⁻¹⁹

Наиболее часто в качестве средств измерений импульсов электрического тока детекторов, имеющих длительность от нескольких наносекунд до десятков микросекунд, применяют скоростные электронные осциллографы с фотоприставками, запоминающие и цифровые осциллографы.

Основные сведения о метрологических характеристиках осциллографов, пригодных для этих целей, приведены в табл. 15.

Метрологические характеристики осциллографов или других измерительных

и регистрирующих устройств обычно известны либо могут быть определены в процессе их поверки в метрологическом органе. Поэтому, чтобы реализовать метод косвенных измерений мощности экспозиционной дозы фотонного излучения с помощью устройств, входящих в структурную схему (см. рис. 8), дополнительно необходимо получить функцию преобразования измерительного тракта с учетом детектора. Каждому детектору импульсного фотонного излучения присуща своя функция преобразования, зависящая от его пере-

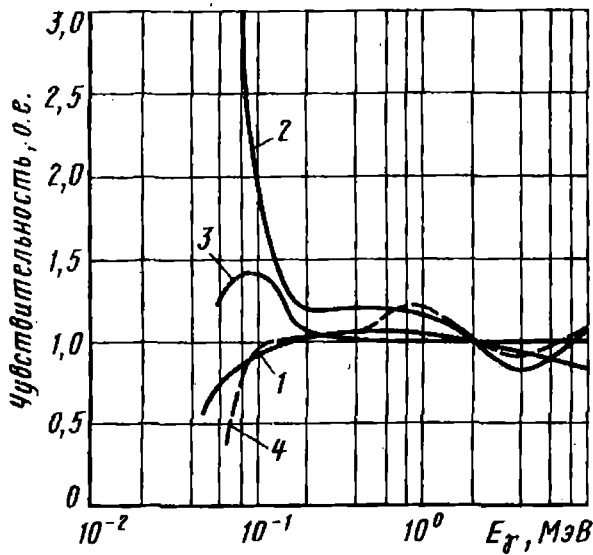


Рис. 7. Энергетические зависимости чувствительности фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и полупроводниковых детекторов импульсного фотонного излучения с различными компенсирующими фильтрами:

1 — ФЭУ, фильтр Fe — 2 мм; 2 — ППД, фильтр Al — 2 мм; 3 — ППД, фильтр Fe — 2 мм; 4 — ППД, фильтр Sn — 2 мм

ходной функции, а также от формы и длительности воздействующего импульса фотонного излучения. Поэтому типовую формулу для функции преобразования измерительного тракта (см. рис. 8) можно получить при некоторых практически приемлемых ограничениях:

детектор и все другие элементы измерительного тракта относятся к линейным преобразователям. Результирующая переходная функция измерительного тракта в безразмерных единицах аппроксимируется соотношением вида

$$h(t) = 1 - \sum_{j=1}^m A_j e^{-a_j t}, \quad (25)$$

где $j = 1, 2, 3, \dots$, — число составляющих переходной функции; A_j , a_j — параметры переходной функции.

Форма импульса фотонного излучения моделирующих установок может быть аппроксимирована одним из соотношений (20), (22).

С учетом этих допущений на основе интегрального преобразования Лапласа—Карсона можно получить следующие приближенные выражения для

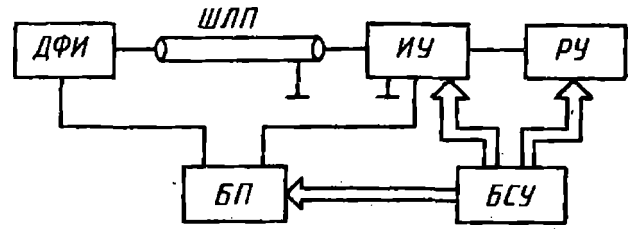


Рис. 8. Структурная схема измерителя мощности экспозиционной дозы фотонного излучения:

ДФИ — детектор (набор детекторов) фотонного излучения; ШЛП — широкополосная линия для передачи импульса электрического тока от детектора к измерителю; ИУ — измерительное устройство; РУ — регистрирующее устройство; БП — блок питания; БСУ — блок синхронизации и управления работой элементов измерителя

импульса излучения с учетом функции преобразования измерительной цепи (см. рис. 8):

$$P_\gamma(t) = \frac{L(t_{\max}^n)}{k_0^P \gamma k(E_\gamma) k(P_{\gamma \max}) \prod_{l=1}^l \alpha_l} \times \times \left\{ \sin^2 at - 2a \sum_{j=1}^m A_j \times \times \left[\frac{e^{-a_j t}}{a_j^2 + 4a^2} - \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{1}{a_j^2 + 4a^2}} \times \times \cos(2at + \lambda_j) \right] \right\}; \quad (26)$$

$$P_\gamma(t) = \frac{L(t_{\max}^n)}{k_0^P \gamma k(E_\gamma) k(P_{\gamma \max}) \prod_{l=1}^l \alpha_l} \times \times \left[\sum_{i=1}^n k_i e^{-a_i t} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_i A_j \times \times \frac{a_i e^{-a_i t} - a_j e^{-a_j t}}{a_i a_j} \right], \quad (27)$$

где $P_\gamma(t)$ — текущее значение мощности экспозиционной дозы, определен-

15. Метрологические характеристики осциллографов

Тип осциллографа (особенности)	Число каналов	Коэффициент развертки, мкс/деление— в/деление	Коэффи- циент откло- нения, мВ/деле- ние— В/деле- ние	Полоса пропускания, МГц	Погрешность измерения, %	
					коэффициента развертки (ам- плитуды)	коэффициента отклонения (вре- мени)
C1-99 (универсальный)	2	0,05—1	5—5	100	4	4
C1-75 (универсальный)	2	0,02—0,1	10—1	250	3	3
C1-116 (универсальный)	2	A : 0,01—0,1 B : 0,01—0,02	5—2	250	3	4
C1-97 (универсальный)	2	0,01—0,1	5—0,5	350	2	5
C1-19 (скоростной)	1	200—0,1·10 ⁻⁸	170 мВ/мм	5000	3	4
C9-4 (специальный)	1	2,5·10 ⁻³ — 0,25·10 ⁻³	2 В/де- ление	10	10	10
C9-4A (специальный)	1	2,5·10 ⁻³ — 0,25·10 ⁻³	10—1	500	(10)	(10)
C8-12, C8-14 (запомина- ющий)	2	0,1—15	10—20	350	(4)	(4)
C8-18 (запоминающий)	2	1—5	0,05—1	50	(3)	(1)
C9-21 (цифровой)	4	0,02—40 *	8 **	10	(0,8)	(0,2)
C9-20 (цифровой)	2 (4)	0,02—40 *	8 **	50	(1,2)	(0,2)
C9-19 (цифровой)	3	2·10 ⁻³ —100 *	8 **	100	(1,5)	(2,5)

* Приведен диапазон исследуемых сигналов, В.
** Приведена разрешающая способность разрядов.

ное по результатам наблюдения; $L(t_{\max}^n)$ — амплитудное значение результата наблюдения по осциллограмме; $t_{\max}^n$ — момент времени, соответствующий положению максимума функции; k^P_γ — коэффициент чувствительности детектора фотонного излучения к мощности экспозиционной дозы установки (источника), принятой за образцовую; $k(E_\gamma)$ — коэффициент спектральной чувствительности детектора; $k(P_{\gamma \max})$ — коэффициент, учитывающий нелинейность функции преобразования детектора при различных максимальных значениях мощности экспозиционной дозы; $\prod_{l=1}^l \alpha_l$ — произ-

ведение коэффициентов преобразования линии передачи, измерительного и регистрирующего устройства; $\lambda_j = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2a}{a_j}$ — параметр фазы.

Применительно к измерениям амплитудного значения мощности экспозиционной дозы функция преобразования запишется в виде

$$P_\gamma(t_{\max}^n) = \frac{L(t_{\max}^n)}{k_0^P k(E_\gamma) k(P_{\gamma \max}) \prod_{l=1}^l \alpha_l}. \tag{28}$$

Это соотношение практически наиболее приемлемо для определения макси-

мального значения мощности экспозиционной дозы при косвенных измерениях. В качестве измеряемой величины здесь выступает амплитудное значение результата наблюдений. Остальные величины в соотношении (28) являются постоянными для каждого конкретного детектора и опыта и определяются в процессе метрологической аттестации детекторов, поверки осциллографов и градуировки элементов измерительного тракта непосредственно перед опытом.

Для оценки суммарной погрешности определения максимального значения мощности экспозиционной дозы по соотношению (28) необходимо иметь информацию о погрешностях определения коэффициентов k_0^P , $k(E_\gamma)$, $k(P_{\gamma\max})$, $\prod_{l=1}^l \alpha_l$, устанавливаемых на этапах аттестации детекторов, поверки осциллографов и градуировки элементов измерительного тракта, а также погрешность измерения значения $L(t_{\max}^n)$.

Коэффициент спектральной чувствительности детекторов мощности экспозиционной дозы $k(E_\gamma)$ определяется по тем же соотношениям, что и для дозиметров экспозиционной дозы. Различие состоит в том, что в соотношение (24) вместо коэффициентов чувствительности детекторов к дозе излучения подставляются коэффициенты чувствительности детектора к мощности экспозиционной дозы, определенные в процессе аттестации.

Измерение интегрального потока нейтронов. Активационные и трековые детекторы наиболее полно удовлетворяют специфике измерений нейтронов в смешанных полях излучения. Они практически нечувствительны к сопутствующему гамма-излучению, обеспечивают измерения флюенса нейтронов в широком диапазоне, допускают применение в статических и импульсных полях излучения, имеют малые размеры и массу, при их применении не требуется сложная аппаратура. При этом обеспечивается разделение во времени процессов облучения и получения результатов. Методы применения активацион-

ных и трековых детекторов, несмотря на их простоту, могут обеспечить высокую точность абсолютных и относительных измерений важнейших параметров полей нейтронных излучений. Остановимся более детально на применении нейтронно-активационного метода измерений [13, 19, 21].

Определение интегрального потока нейтронов Φ_i активационными методами основано на расчете его значения по экспериментально измеренной скорости реакции R_i :

$$\Phi_i = R_i / \sigma_i, \quad (29)$$

где σ_i — сечение взаимодействия нейтронов с материалом по i -й ядерной реакции.

Под скоростью реакции R_i понимают число актов взаимодействия нейтронов, происходящих в облучаемом образце за одну секунду в расчете на одно ядро изотопа-мишени. Она связана с активностью, наведенной в образце детектора в результате его облучения в нейтронном поле, соотношением

$$R_i = \frac{A_{\text{изм}} e^{\lambda t_\beta}}{N_\pi (1 - e^{-\lambda t_0})}, \quad (30)$$

где t_0 — продолжительность облучения; t_β — время, прошедшее с момента облучения до момента получения результата измерения $A_{\text{изм}}$.

При импульсном облучении, когда время облучения мало по сравнению с периодом распада образующихся радионуклидов ($T = \ln \frac{2}{\lambda} \gg t_0$), соотношение (30) запишется в виде

$$R_i' = \frac{A_{\text{изм}} e^{\lambda t_\beta}}{N_\pi \lambda}, \quad (31)$$

где R_i' — число актов i -й реакции за импульс.

Материал детектора, пригодного для использования при определении интегрального потока, должен удовлетворять следующим основным требованиям:

сечение взаимодействия нейтронов с нуклидами вещества по используемой реакции должно быть достаточно большим и хорошо изученным;

радионуклид, образовавшийся в результате ядерной реакции, должен иметь удобный для измерения период полураспада (от десятков минут до нескольких дней);

схема распада измеряемого радионуклида должна быть достаточно проста и хорошо известна;

изотопный состав материала детектора должен быть определен с высокой точностью. Рекомендуются применять материалы, содержащие 80—100 % используемого изотопа;

активность образовавшихся радионуклидов по используемой реакции должна быть существенно выше активности радионуклидов, образовавшихся по другим мешающим реакциям или примесным изотопам, входящим в состав материала детектора.

В практике нейтронно-активационных измерений используется значительно больше типов детекторов, чем выпускается серийно. Сравнительно широко применяют стандартные образцы детекторов в наборах АКН и АКН-Т (активационные комплекты нейтронные), предназначенные для измерений интегральных потоков в полях быстрых и тепловых нейтронов, а также наборы НДС (нейтронно-активационные детекторы сопровождения). Отличительной особенностью указанных наборов является наличие в их составе соответствующих контрольных источников, радионуклиды которых близки по своим характеристикам к радионуклидам активационных детекторов. Однако номенклатура детекторов в указанных наборах весьма ограничена и не обеспечивает в полной мере нейтронные измерения на моделирующих установках непосредственно лицами, проводящими испытания. Форму детекторов и способы их изготовления выбирают с учетом условий их облучения и способов измерения наведенной активности. Обычно используют детекторы, изготовленные из фольг различных металлов, а также прессованием из различных химических соединений и пластиков. Однако последние обладают недостаточной механической и термической прочностью.

Как следует из соотношений (29) — (31), основной экспериментально измеряемой величиной при определении

интегрального потока нейтронов является наведенная в детекторе активность радионуклидов. Остальные величины определяют на этапе аттестации детекторов либо экспериментально, либо по стандартным справочным данным и наиболее достоверным литературным источникам. Практическое применение при измерениях активности радионуклидов находят гамма-спектрометрический метод, метод счета бета-частиц в 4 π -геометрии.

Гамма-спектрометрический метод сравнительно простой и позволяет с погрешностью 2—3 % определять активность радионуклидов используемой ядерной реакции на фоне активности радионуклидов, образовавшихся по конкурирующим реакциям.

Гамма-спектрометр может быть изготовлен, например, на базе стандартного спектрометрического датчика УСД-1 с кристаллом NaJ (Tl) диаметром и высотой 40 мм. Определение выхода гамма-квантов проводится по фотопику полного поглощения. Число импульсов в фотопике можно определить, например, методом линеаризации. При этом активность детектора связана со скоростью реакции по используемому изотопу-мишени соотношением

$$R_i = \frac{e^{\lambda t} \gamma}{\kappa} \frac{A_{t\gamma}}{e N_A P p}, \quad (32)$$

где κ — коэффициент, зависящий от продолжительности облучения ($\kappa = 1 - e^{-\lambda t_0}$ — для облучения в статическом режиме за время t_0 ; $\kappa = \lambda$ — для облучения в импульсном режиме); $A_{t\gamma}$ — число регистрируемых импульсов в фотопике в единицу времени в момент измерения; e — эффективность регистрации по фотопику полного поглощения; N_A — число ядер активируемого изотопа на единицу массы детектора; P — масса детектора; p — выход гамма-квантов на один распад. Эффективность регистрации гамма-квантов различной энергии определяется экспериментально с помощью набора образцовых гамма-источников ОСГИ, перекрывающих диапазон энергий от 0,06 до 1,84 МэВ. Наборы выпускаются серийно и поставляются Всесоюзным объединением «Изотоп».

В отдельных случаях более предпочтительным оказывается метод счета бета-частиц в 4π-геометрии. Для его реализации не требуется высокой квалификации специалистов. Кроме того, с его помощью можно измерять весьма небольшие активности с достаточно высокой точностью. При измерении активности методом 4π бета-счета могут использоваться серийно изготавливаемые приборы (ГОСТ 8.033—84).

При измерениях на 4π бета-счетчике активность детектора связана со скоростью реакции R_i соотношением

$$R_i = \frac{e^{\lambda t_\beta}}{\kappa} \frac{A_{t\beta}}{k_{\text{сп}} N_{\text{я}}}, \quad (33)$$

где $A_{t\beta}$ — число зарегистрированных бета-частиц в единицу времени; $k_{\text{сп}}$ — коэффициент самопоглощения бета-частиц в веществе детектора.

Экспериментально установлено, что зависимость коэффициента самопоглощения бета-частиц ($k_{\text{сп}}$) в детекторе хорошо описывается соотношением

$$k_{\text{сп}} = \frac{1}{\mu d} (1 - e^{-\mu d}), \quad (34)$$

где μ — коэффициент ослабления бета-излучения, зависящий от материала детектора, формы бета-спектра и максимальной энергии бета-частиц; d — толщина детектора.

Для определения μ можно рекомендовать следующее эмпирическое соотношение:

$$\mu = 0,01523 E_{\beta \text{ макс}}^{-0,514}. \quad (35)$$

Перед применением на моделирующих установках образцы нейтроно-активационных детекторов должны пройти метрологическую аттестацию, при которой определяются число ядер активируемого изотопа в детекторе $N_{\text{я}}$, коэффициент самопоглощения бета-частиц, постоянные распада образующихся при облучении нейтронами радионуклидов, сечение взаимодействия нейтронов по используемой ядерной реакции. Аттестация образцов детекторов по числу ядер и коэффициенту поглощения бета-частиц проводится на образцовом или эталонном источнике нейтронов с известной энергией и выходом нейтронов.

При этом обычно сразу определяют значение произведения числа ядер активируемого изотопа в детекторе на коэффициент самопоглощения $N_{\text{я}} k_{\text{сп}}$. В качестве соотношения для определения искомой величины используют

$$N_{\text{я}} k_{\text{сп}} = \frac{A_{t\beta} \sigma_i}{\Phi_i} \frac{e^{\lambda t_\beta}}{1 - e^{-\lambda t_0}}. \quad (36)$$

Из анализа соотношения (36) следует, что погрешность аттестации образцов детекторов зависит от погрешности, с которой воспроизводится интегральный поток нейтронов эталонного (образцового) источника, и погрешностей, с которыми измеряются активность детектора, продолжительность облучения и время, прошедшее от конца облучения до момента измерения активности. Кроме того, она зависит также от погрешности, с которой могут быть определены по стандартным справочным данным постоянная распада радионуклида и сечение взаимодействия нейтронов эталонного источника с ядрами-изотопами детектора.

Из приведенных в общесоюзной поверочной схеме для средств измерений плотности потока нейтронов на ядерно-физических установках данных следует, что предел суммарной погрешности аттестации стандартных образцов детекторов не превышает $\pm 20\%$ (ГОСТ 8.105—80).

При использовании 4π бета-счета необходимо учитывать, что практически 100%-ная эффективность регистрации бета-излучения делает проточные счетчики чувствительными даже к самому мягкому излучению, присущему примесям, содержащимся в материалах детекторов. На результаты измерений с помощью детектора на металлических электропроводящих подложках влияет качество поверхности подложки и покрытия. Результат измерения может быть искажен электростатической эмиссией электронов с заусенцев и шероховатостей поверхности металлической подложки и покрытия.

Определение активности образца, отнесенной к концу облучения, по результатам измерений методом счета бета-частиц целесообразно проводить графическим способом путем построения

зависимости скорости счета от времени в полулогарифмическом масштабе. При этом она будет представлять собой прямую линию с наклоном, соответствующим периоду полураспада изотопа-продукта используемой ядерной реакции. Такой способ несколько увеличивает время, затрачиваемое на обработку экспериментальных данных. Однако он позволяет исключить возможные ошибки, обусловленные активностью радионуклидов, созданной конкурирующими реакциями.

В зависимости от диапазона энергий нейтронов, в котором используются активационные детекторы, они подразделяются на детекторы тепловых ($E_i < 0,5$ эВ), резонансных ($0,5$ эВ $< E_i < 100$ кэВ) и быстрых ($E_i > 0,5$ МэВ) нейтронов.

Наибольшая точность результатов достигнута при определении интегрального потока тепловых нейтронов. Погрешность их определения ограничивается, в основном, погрешностями измерений активности радионуклидов и стандартных справочных данных о сечениях взаимодействия тепловых нейтронов с ядрами детектора.

В табл. 16 приведены основные ядерно-физические постоянные наиболее часто применяемых изотопов детекторов тепловых нейтронов, а также необходимые данные для расчета скорости реакции R_i [4].

Детекторы из золота, марганца применяют для абсолютных измерений интегрального потока нейтронов. Детекторы из меди и фосфора используют, как правило, для проведения относительных измерений. Выбор того или иного детектора определяется значением плотности потока нейтронов ядерно-физической установки, работающей в статическом режиме. Все приведенные в табл. 16 изотопы можно применять при измерениях интегральных потоков тепловых нейтронов в полях любых ядерных реакторов.

Для определения интегрального потока тепловых нейтронов необходимо облучать два детектора: один открыто, а другой — в кадмиевом экране толщиной 0,4–0,5 мм. При одновременном облучении таких детекторов они должны быть размещены не ближе 5 см один от другого, но на одинаковом расстоя-

нии от источника нейтронного излучения. Этим исключается возможность экранирования детектора, облучаемого открыто, кадмиевым экраном соседнего детектора.

Эффективный интегральный поток нейтронов ($E_n < 0,5$ эВ) рассчитывается на основании измеренных скоростей реакции (или числа актов реакции за импульс) детекторов, облученных открыто (R^0) и в кадмиевом экране (R^{Cd}), по соотношению

$$\Phi_T = \frac{R^0 - R^{Cd}}{\sigma_T \lambda}, \quad (37)$$

где σ_T — сечение активации тепловыми нейтронами.

Оценка интегрального потока нейтронов промежуточных энергий может быть проведена по измеренным активностям детекторов тепловых нейтронов, облученных в кадмиевом экране. Для спектров, пропорциональных значению $1/E_n$, интегральный поток нейтронов в десятичном интервале энергии Φ_{10} рассчитывают по формуле

$$\begin{aligned} \Phi_{10} &= \int_E^{10E} \Phi(E) dE = \\ &= 1,15 \sqrt{\frac{E_{Cd}}{E_T}} \frac{R^{Cd}}{\lambda \sigma_T}, \end{aligned} \quad (38)$$

где E_{Cd} — «кадмиевая граница» для $1/E$ -детектора при толщине кадмия 0,5 мм, равная 0,5 эВ; E_T — наиболее вероятная энергия тепловых нейтронов, равная 0,0253 эВ.

Преобладающий вклад интегральных потоков нейтронов тепловых и промежуточных энергий (до 90 % и выше) в суммарный интегральный поток нейтронов характерен для реакторов на тепловых нейтронах. В реакторах с замедлителями из графита, бериллия и тяжелой воды следование спектра закону $1/E$ подчиняется до энергий нейтронов около 0,1 МэВ. Поэтому расчет интегрального потока нейтронов в десятичном интервале для диапазона 0,5 эВ — 0,1 МэВ проводится по соотношению (38). В реакторах с замедлителем из обычной воды спектр нейтронов

16. Основные числовые характеристики изотопов веществ, используемых в качестве детекторов тепловых нейтронов

Изотоп (распространенность, %)	Сечение активации, барн	Продукты активации и их параметры						Диапазон измеряемых интегральных потоков нейтронов, см ⁻²
		Изотоп	Период полураспада	Постоянная распада	Энергия гамма- излучения, МэВ (выход, %)	Энергия бета- излучения, МэВ (выход, %)	Активность, Бк·г ⁻¹ (при $\Phi_T =$ $= 10^8 \text{ см}^{-2}$)	
¹⁹⁷ Au (100)	98,7±0,2	¹⁹⁸ Au	2,696±0,002 сут	2,976·10 ⁻⁶	0,412 (95,5)	0,79 (1,2) 0,324 (98,8) 0,255 (14,6)	0,865	10 ³ —10 ¹²
⁵⁵ Mn (100)	13,23±0,05	⁵⁶ Mn	2,579±0,01 ч	7,472·10 ⁻⁵	0,847 (98,9) 1,811 (27,2) 2,110 (14,3)	0,099 (1,16) 0,382 (27,9) 1,216 (56,3)	10,9	10 ³ —10 ⁹
⁶³ Cu (100)	4,5±0,1	⁶⁴ Cu	12,7±0,01 ч	1,495·10 ⁻⁵	0,511 (36,8) 1,340 (0,5)	0,573 (38) 0,656 (19)	0,425	10 ⁶ —10 ¹⁴
³¹ P (100)	0,19±0,01	³² P	14,29±0,03 сут	2,62·10 ⁻⁷	—	1,710 (100)	1,86·10 ⁻³	10 ⁷ —10 ¹³

17. Рекомендуемые значения $E_{\text{пор}}$ и $\sigma_{\text{эфф}}$

Реакция	$E_{\text{пор}}$, МэВ	$\sigma_{\text{эфф}} \cdot 10^{21}$ м ²	θ ($\sigma_{\text{эфф}}$), %
$^{103}\text{Rh} (n, n')^{103m}\text{Rh}$	0,70	920 ± 37	6
$^{115}\text{In} (n, n')^{115m}\text{In}$	1,20	288 ± 25	8
$^{31}\text{P} (n, p)^{31}\text{Si}$	2,30	101 ± 5	5
$^{64}\text{Zn} (n, p)^{64}\text{Cu}$	3,00	183 ± 15	8
$^{32}\text{S} (n, p)^{32}\text{P}$	3,00	306 ± 25	8
$^{58}\text{Ni} (n, p)^{58}\text{Co}$	3,00	306 ± 25	9
$^{54}\text{Fe} (n, p)^{54}\text{Mn}$	3,00	386 ± 23	6
$^{27}\text{Al} (n, p)^{27}\text{Mg}$	4,40	51 ± 5	10
$^{28}\text{Si} (n, p)^{28}\text{Al}$	6,10	401 ± 20	5
$^{56}\text{Fe} (n, p)^{56}\text{Mn}$	6,40	$56,6 \pm 3,4$	6
$^{24}\text{Mg} (n, p)^{24}\text{Na}$	7,00	$122,3 \pm 2,5$	2
$^{27}\text{Al} (n, \alpha)^{24}\text{Na}$	7,20	$65,7 \pm 2$	3
$^{127}\text{I} (n, 2n)^{126}\text{I}$	10,30	1205 ± 36	3
$^{65}\text{Cu} (n, 2n)^{64}\text{Cu}$	11,30	689 ± 14	2
$^{19}\text{F} (n, 2n)^{18}\text{F}$	12,80	$51,9 \pm 1$	2
$^{63}\text{Cu} (n, 2n)^{62}\text{Cu}$	12,4	500 ± 15	3

следует закону $1/E$ до энергии нейтронов 0,01 МэВ. В этом диапазоне интегральный поток нейтронов на десятичный интервал также рассчитывают по формуле (38). Деформацию спектра при энергиях более 0,01 МэВ учитывают введением поправочного коэффициента, и интегральный поток нейтронов рассчитывают по соотношению

$$\Phi_{0,01-0,1} = 1,3\Phi_{10}. \quad (39)$$

Измерение интегрального потока быстрых нейтронов активационным методом основано на применении детекторов, содержащих нуклиды веществ, активация которых проводится нейтронами с энергией, превышающей некоторое пороговое значение $E_{\text{пор}}$. К таким относят нуклиды, для которых возможны пороговые реакции типа (n, n') , (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$.

Наиболее простым способом получения информации об интегральном потоке быстрых нейтронов в различных энергетических группах по результатам измерения пороговыми детекторами является использование метода эффективных пороговых сечений. Он основан на представлении сечения реакции одноступенчатой функцией, значение которой равно нулю при энергиях ниже

$E_{\text{пор}}$ и $\sigma_{\text{эфф}}$ при энергиях нейтронов $E_n \geq E_{\text{пор}}$. Значения $\sigma_{\text{эфф}}$ и $E_{\text{пор}}$ подбирают из условия постоянства скорости реакции:

$$\int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma_t(E) dE = \sigma_{\text{эфф}} \int_{E_{\text{пор}}}^{\infty} \Phi(E) dE, \quad (40)$$

где $\Phi(E)$ — дифференциальный энергетический интегральный поток нейтронов моделирующей установки.

Зная $\sigma_{\text{эфф}}$ и $E_{\text{пор}}$, можно определить значение суммарного энергетического интегрального потока нейтронов с энергией больше $E_{\text{пор}}$ по экспериментальным данным о скорости реакции по формуле, аналогичной (29):

$$\Phi_{>E_{\text{пор}}} = \frac{R_t}{\sigma_{\text{эфф}}}. \quad (41)$$

В табл. 17 представлены значения эффективных пороговых энергий и сечений для реакций, наиболее часто применяемых при измерениях интегральных потоков и спектров нейтронов на ядерно-физических установках, рассчитанные на основании современных данных о сечениях взаимодействия, реакторных спектрах [4].

18. Общие характеристики нейтронно-активационных средств измерений

Наименование и тип комплекта	Используемые ядерные реакции	Особенности комплектации	Область применения
Активационные комплекты нейтронные тепловые, АКН-Т	$^{176}\text{Lu} (n, \gamma) ^{177}\text{Lu}$ $^{55}\text{Mn} (n, \gamma) ^{56}\text{Mn}$ $^{56}\text{Fe} (n, p) ^{56}\text{Mn}$ $^{59}\text{Ca} (n, \gamma) ^{60}\text{gCa}$ $^{63}\text{Cu} (n, \gamma) ^{64}\text{Cu}$ $^{54}\text{Fe} (n, p) ^{54}\text{Mn}$	1. Набор детекторов, изготавливаемых из фольг чистых металлов и сплавов с алюминием 2. Градуировочные источники 3. Вспомогательная оснастка	Исследовательские и энергетические реакторы: область тепловых и надтепловых нейтронов
Активационные комплекты нейтронные, АКН	$^{103}\text{Rh} (n, n') ^{103m}\text{Rh}$ $^{199}\text{Hg} (n, n') ^{199m}\text{Hg}$ $^{32}\text{S} (n, p) ^{32}\text{P}$ $^{115}\text{In} (n, n') ^{115m}\text{In}$ $^{58}\text{Ni} (n, p) ^{58}\text{Ca}$ $^{237}\text{Np} (n, f)$	1. Детекторы из родия, индия и никеля из металлической фольги, из серы прессованные с добавкой наполнителя, из ртути с наполнителем фенолформальдегидной смолы, нептуний в виде толстослойной мишени 2. Градуировочные источники 3. Дополнительная оснастка	Исследовательские реакторы: энергии нейтронов 0,3—5 МэВ
Делящиеся комплекты нейтронные, ДКН	$^{239}\text{Pu} (n, f); ^{235}\text{U} (n, f)$ $^{238}\text{Pu} (n, f); ^{238}\text{U} (n, f)$ $^{237}\text{Np} (n, f); ^{241}\text{Am} (n, f)$ $^{232}\text{Th} (n, f)$	1. Тонкослойные мишени из делящихся веществ 2. Регистраторы из слюды 3. Оснастка 4. Детектор-монитор из серы	Критические сборки, исследовательские реакторы: энергии нейтронов от тепловых до 5 МэВ

В качестве рекомендуемого значения $E_{\text{пор}}$ принято такое, при котором эффективные сечения для различных спектров нейтронов имеют наиболее близкие значения. В пределах, указанных в табл. 17, значений погрешностей θ ($\sigma_{\text{эфф}}$) приведенные значения эффективного сечения пороговой энергии нейтронов являются универсальными и приемлемыми для любого реакторного спектра нейтронов.

Стандартизация в области метрологии нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Широкое применение ядерно-физических установок как источников нейтронов при радиационных исследованиях и в технике привело к необходимости обеспечения требуемой точности и достоверности измерений нейтронных полей. Основой метрологического обеспечения нейтронных полей на этих установках является Государственный Специальный Эталон (ГОСТ 8.105—80), в котором передача размеров единиц плотности потока и флюенса нейтронов базируется на активационном методе. Разработан и выпускается серийно комплекс нейтронно-активационных средств измерений для ядерно-физических установок [8]. Типы комплектов, используемые ядерные реакции, особенности комплектации наборов и области применения приведены в табл. 18.

Серийное производство детекторов нейтронов позволило в существенной мере расширить доступность измерений характеристик поля нейтронов специалистами, ранее не занимавшимися метрологией нейтронного излучения и не имеющими возможности производства активационных детекторов. Сравнение данных табл. 18 с приведенными в табл. 16 и 17 показывает, что серийно выпускаемые комплекты пока не охватывают всей возможной их номенклатуры и практически не обеспечивают измерение нейтронов с энергией свыше 5—12 МэВ. Это свидетельствует о том, что вопросы стандартизации этих измерений нельзя считать решенными в полном объеме. Однако принципиальные направления намечены, техническая база для дальнейших совершенствований этих измерений в стране создана.

Измерение плотности потока нейтро-

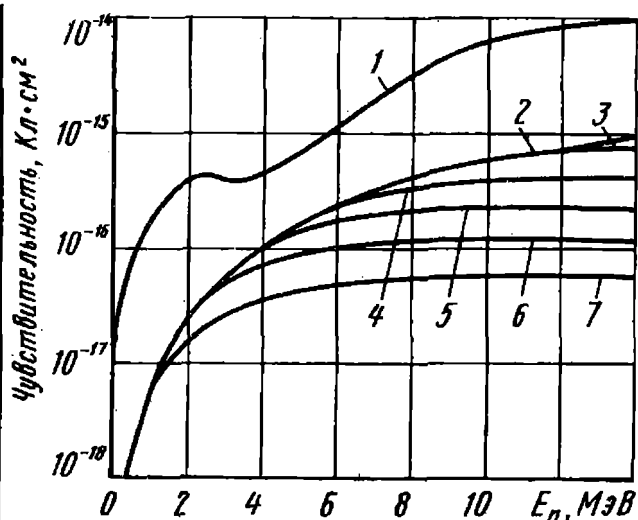


Рис. 9. Энергетическая зависимость чувствительности к нейтронам ППД без радиатора $Sh = 1 \text{ см}^2$ (1) и с полиэтиленовым радиатором $S = 1 \text{ см}^2$ (2—7) при толщине чувствительной области h , равной, см:

2 — 10^{-1} ; 3 — $5 \cdot 10^{-2}$; 4 — $2 \cdot 10^{-2}$; 5 — 10^{-2} ; 6 — $5 \cdot 10^{-3}$; 7 — $2 \cdot 10^{-3}$

нов. Определение плотности потока нейтронов в полях ядерно-физических установок, работающих на постоянной мощности, в большинстве случаев осуществляется по результатам измерений интегральными (активационными или трековыми) детекторами нейтронов или по показаниям штатных мониторинговых измерительных каналов.

Наибольшие затруднения вызывают измерения амплитудно-временных характеристик нейтронов на импульсных ядерных реакторах [23]. Характерными особенностями этого нейтронного излучения являются высокая интенсивность (до $10^{19} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$), сравнительно малая длительность импульса (50—1500 мкс) и наличие высокого уровня сопутствующего гамма-излучения ($2,6 \cdot 10^6 \text{ А/кг}$). Применение в таких условиях ионизационных и сцинтилляционных методов ограничено из-за их высокой чувствительности не только к нейтронам, но и к гамма-излучению, а также вследствие малого значения верхнего предела измерений.

Приемлемые характеристики по чувствительности, быстродействию и габаритам имеют полупроводниковые детекторы (ППД). Для повышения чувствительности к нейтронам эти детекторы

применяют в комплекте с радиаторами. Чувствительность таких детекторов к нейтронам определяется двумя слагаемыми, одно из которых обусловлено ионизирующим действием быстрых нейтронов на материал самого детектора и прямо пропорционально объему его чувствительной области, а второе — наличием перед тонким входным окном детектора полиэтиленового радиатора, генерируемого протоны отдачи, поглощаемые в чувствительной области детектора. На рис. 9 приведены эти составляющие в зависимости от энергии нейтронов.

При использовании детекторов в смешанных гамма-нейтронных полях единственным путем улучшения их избирательности к нейтронам является уменьшение толщины чувствительной области. Оптимальной толщиной для импульсных быстрых реакторов является 10—20 мкм. При такой толщине избирательность детекторов к нейтронам достигается 0,82. Для современных полупроводниковых детекторов типа ДКПН и СППДЗ-01 (СППД4-01), обладающих несколько большей толщиной чувствительной области, избирательность к нейтронам равна соответственно 0,72 и 0,43. Для уменьшения вклада гамма-излучения указанные детекторы могут быть включены по компенсационной схеме с детекторами ДКП и СППДЗ-01 (СППД4-01) без радиаторов, обладающих примерно равной чувствительностью к гамма-излучению.

Максимальный выходной ток ППД в линейной области достигает единиц и десятков ампер и определяется процессами рекомбинации носителей и образования объемного заряда в чувствительной области. Он может быть оценен по соотношению

$$I_{\max} = 1,9 \cdot 10^9 \frac{SU^2}{h^3}, \quad (42)$$

где S — площадь детектора, см²; U — приложенное напряжение, В; h — толщина чувствительной области, см.

Временное разрешение ППД зависит от параметров детектора, напряжения питания, значения емкости, сопротивления нагрузки и для указанных выше детекторов оно не превышает единиц наносекунд.

Причиной, несколько ограничивающей применение ППД, является их сравнительно низкая стойкость к действию нейтронов.

Список литературы

1. Абрамян Е. А., Вассерман С. Б., Долгушин В. М. и др. Генераторы электронных пучков и рентгеновского излучения (РИУС-5)//Приборы и техника эксперимента. 1971. № 3. С. 223.
2. Альбинов З. А., Веретенников А. И., Козлов О. В. Детекторы импульсного излучения. М.: Атомиздат, 1978. 170 с.
3. Бочвар И. А., Гимадова Т. И., Кеирим-Маркус И. Б. и др. Методы дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977. 222 с.
4. Брисман Б. А., Генералова В. В., Крамер-Агеев Е. А. и др. Внутри-реакторная дозиметрия: Практическое руководство. М.: Энергоатомиздат, 1985. 200 с.
5. Веретенников А. И., Горбачев В. М., Предин В. А. Методы исследования импульсных излучений. М.: Энергоатомиздат, 1985. 152 с.
6. Воробьев В. В., Афанасьев В. Н., Хохряков В. Ф. Полупроводниковые детекторы импульсного гамма-излучения высокой интенсивности//Приборы и техника эксперимента. 1974. № 1. С. 55—57.
7. Галанин А. Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Атомиздат, 1959. 384 с.
8. Галиев Н. Б., Григорьев Е. И., Севостьянов В. Д. и др. Комплекс нейтронно-активационных средств измерения для ядерно-физических установок//Методы и аппаратура для точных измерений параметров ионизирующих излучений. М.: ЦНИИАтоминформ, 1978. Вып. 36. С. 44—49.
9. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 462 с.
10. Гончаров В. В. Обзор работ по исследовательским реакторам и их использованию//Атомная энергия. 1964. Т. 17. Вып. 4. С. 258—269.
11. Гречушкин М. П. Таблицы состава продуктов мгновенного деления

U^{235} , U^{238} , Pu^{239} . М.: Атомиздат, 1964. 68 с.

12. Калитаев А. Н., Живетьев Г. А., Желудков Э. И. и др. Защита от оружия массового поражения/Под ред. В. В. Мясникова. М.: Воениздат, 1984. 270 с.

13. Климентов В. Б., Кончинский Г. А., Фрунзе В. В. Активационные измерения потоков и спектра нейтронов в ядерных реакторах. М.: Изд-во стандартов, 1974. 208 с.

14. Кораблев А. Корабельный состав ВМС стран НАТО//Зарубежное военное обозрение. 1980. № 1. С. 85—86.

15. Кузнецов В. А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. М.: Атомиздат, 1977. 240 с.

16. Кузьмин В. В., Минаев Е. В., Соколов А. Д. и др. Параметры комплекта КТД-02 в диапазоне малых доз//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерное приборостроение, 1986. Вып. 2. С. 32—38.

17. Кулаков В. М., Ладыгин Е. А., Шаховцов В. И. и др. Действие проникающих излучений на изделия электронной техники/Под ред. Е. А. Ладыгина. М.: Сов. радио., 1980. 224 с.

18. Куликов Г. В., Иванов В. И., Козлов О. В. и др. Чувствительность

детектора прямой зарядки к импульсному гамма-излучению высокой интенсивности//Метрология, 1974. № 5. С. 69—78.

19. Материалы III Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИАтоминформ, 1983. Т. 1. 286 с.

20. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 296 с.

21. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. М.: ЦНИИАтоминформ, 1976. Т. 1. 254 с.; Т. 2. 176 с.

22. Мырова Л. О., Чепиженко А. З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 296 с.

23. Серебряков А. К., Снегирев С. Н., Тутуров Ю. Ф. Измерение потока нейтронов при радиационных испытаниях с помощью транзистора//Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИАтоминформ, 1976. Т. 2. С. 146—153.

24. Советские ученые об опасности испытаний ядерного оружия: Сб. статей/Под общ. ред. В. В. Лебединского. М.: Атомиздат, 1959. 120 с.

Глава 4 ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Развитие космической техники непрерывно выдвигает перед ее разработчиками, испытателями, эксплуатационниками все новые задачи и проблемы: требуется обеспечивать надежность многих агрегатов и систем при длительных сроках активного существования космических аппаратов (КА).

Материалы, узлы, аппаратура КА подвергаются раздельному и комплексному воздействию многих факторов, приводящих к необходимости разрабатывать специальные конструкции или меры защиты от этих воздействий. При этом часто возможности защиты оказываются ограниченными из-за жестких требований к энергопотреблению, массе и габаритам защитных оболочек и устройств. Поэтому для определения условий нормального функционирования КА в течение длительного космического полета необходимо тщательно изучить характеристики всех факторов, часто зависящих от параметров орбиты движения КА, оценить возможные последствия воздействий того или иного фактора, которые могут быть как обратимыми (временными), так и необратимыми, а также представлять для функционирования систем и аппаратуры КА большую или меньшую опасность.

Основными воздействиями, которым подвергаются аппаратура, агрегаты, системы, их элементы в космическом пространстве, являются: глубокий вакуум; тепловые воздействия; воздействия ионизирующих излучений радиационных поясов Земли (для КА, орбиты которых находятся в околоземном космическом пространстве), космических лучей и солнечных корпускулярных излучений (для КА, орбиты которых находятся в межпланет-

ном пространстве); микрометеорные частицы и др.

1. ГЛУБОКИЙ ВАКУУМ И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МАТЕРИАЛЫ, АГРЕГАТЫ И СИСТЕМЫ КА

Вакуум является одним из основных физических факторов космического пространства. Плотность и давление атмосферы над земной поверхностью с высотой уменьшаются по экспоненциальному закону (табл. 1). При этом, если на уровне моря давление составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт. ст.), то уже на высоте 100 км оно уменьшается до $4,005 \cdot 10^{-2}$ Па ($0,7 \times 10^{-6}$ мм рт. ст.). Давление ниже 10^{-2} Па принято рассматривать как глубокий космический вакуум.

Обычно считают, что атмосфера Земли распространяется до 20 000 км от поверхности Земли, и ее основные характеристики изменяются в течение суток, сезона, 11-летнего цикла солнечной активности и т. д. Поэтому в табл. 1 приведены усредненные данные. Состав атмосферы Земли не однороден. Состав газа на различных расстояниях от Земли различается как по химическому составу, так и по структуре частиц (частицы газа могут представлять собой молекулы, атомы или ионы). На сравнительно небольших расстояниях газ представляется в основном нейтральными молекулами, на высотах более 700 км начинает преобладать атомарная компонента, а на расстояниях более 1000—2000 км основной компонентой становится ионная. На высотах более 20 000 км атмосфера практически полностью ионизована.

1. Основные характеристики дневной атмосферы для высот более 100 км [1, 11]

Высота, км	Температура *, К	Давление, Па	Плотность, кг/м ³	Преимущественный состав газа
100	210 (210)	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$6,642 \cdot 10^{-7}$	Азот, кислород, озон
150	679 (560)	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$3,087 \cdot 10^{-9}$	Азот, озон, кислород
200	1 290 (901)	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$4,242 \cdot 10^{-10}$	Азот, озон, кислород, аргон, гелий
300	1 650 (1 019)	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-11}$	Озон, азот, кислород, гелий, аргон, водород
400	1 730 (1 037)	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	
500	1 750 (1 040)	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-12}$	
600	1 760 (1 042)	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	Озон, аргон, гелий, кислород, водород
800	1 770 (1 044)	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	Озон, гелий, водород, азот, кислород
1 000	1 770 (1 044)	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-14}$	
1 500	1 700 (1 044)	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-15}$	
2 000	1 770 (1 044)	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-16}$	Гелий, водород, озон
3 000	1 900	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-16}$	Водород, гелий
5 000	3 000	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$4,5 \cdot 10^{-17}$	
10 000	15 000	$2,1 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-17}$	
20 000	50 000	$7,0 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-18}$	
30 000	100 000	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$6,0 \cdot 10^{-19}$	
50 000	200 000	$8,5 \cdot 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^{-19}$	
Межгалактический вакуум	—	$1,0 \cdot 10^{-16}$	—	Ионы водорода

* В скобках приведены средние значения температуры.

Примечания: 1. Характеристики ночной атмосферы до высот порядка 150 км практически не отличаются от характеристик дневной атмосферы, на высотах более 150 км характеристики ночной атмосферы несколько отличаются.

2. Значения температуры (в единицах шкалы Кельвина) характеризуют кинетическую энергию частиц космической среды и из-за ее глубокой разреженности практически не оказывают непосредственного влияния на элементы внешней поверхности КА.

Приведенные в табл. 1 значения характеристик верхней атмосферы являются средними значениями, особенно для высот ниже 300 км. Освещенная солнцем «дневная» сторона атмосферы (рис. 1) нагревается, затененная «ночная» охлаждается. Поэтому наблюдаются вариации температуры и плотности. На высотах как ниже, так и выше 100 км имеют место вариации температуры и плотности в течение 11-летнего цикла солнечной активности, а также вариации, связанные с геомагнитной активностью. На рис. 2

приведены вариации температуры на высотах 300 и 600 км в зависимости от уровня солнечной активности. Как следует из рассмотрения рис. 2, эти вариации достигают весьма больших значений. Во время магнитных бурь на высоте, например, 600 км плотность может увеличиваться в 6 раз, а температура на 500 К [16, 12]. Таким образом, в зависимости от параметров орбиты КА значения характеристик атмосферы, ее давление и состав могут претерпевать существенные изменения.

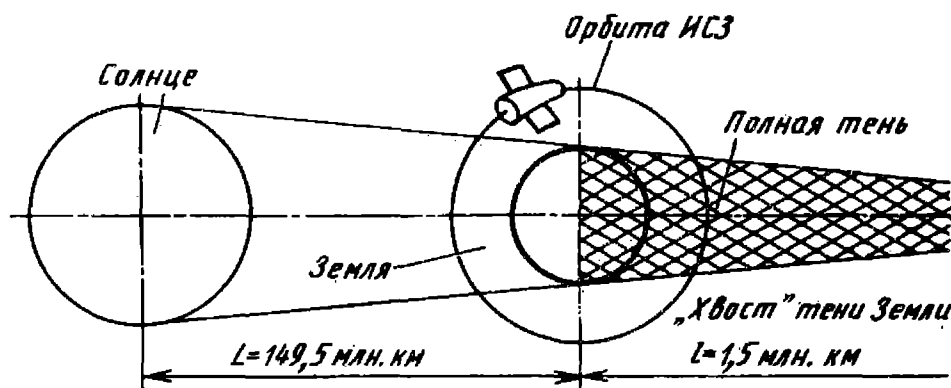


Рис. 1. Схема образования дневной и ночной сторон атмосферы Земли

Сублимация материалов. Потери вещества в вакууме за счет сублимации, т. е. перехода вещества из твердой фазы непосредственно в газообразную, металлических и неметаллических конструкционных материалов и технических устройств приводят к нарушению их поверхностных свойств, изменению теплопроводности и электропроводности, изменению оптических характеристик и др. В вакууме происходит также испарение консистентных и жидких веществ. При этом в космическом пространстве наряду с вакуумом действуют электромагнитные излучения

и потоки заряженных частиц (см. ниже). Это приводит к возбуждению электронных оболочек молекул, у которых энергия химических связей значительно уменьшается и влияние сублимации (испарения) возрастает.

Неравновесное испарение чистого вещества с поверхности в глубоком вакууме, т. е. на высотах более 100 км над Землей, может ориентировочно определяться по формуле

$$G = c_i p_s / \sqrt{2\pi R T_s}, \quad (1)$$

где G — масса вещества, сублимирующего с единичной площади в единицу времени; c_i — коэффициент испарения ($0 \leq c_i \leq 1$); $R = R_0/M$; M — молекулярный вес паров; $R_0 = 8,32 \times 10^3$ Дж/(кмоль·К) — универсальная газовая постоянная; T_s — температура поверхности вещества (материала); p_s — равновесное давление насыщенного пара вещества при температуре T_s .

Наименьшей стойкостью к испарению в глубоком вакууме обладают кадмий, цинк и марганец. В сплавах, состоящих из компонентов, сильно отличающихся значениями давления паров (например, Al—Mg), преимущественно испаряется более летучий компонент. Испарение с поверхности металлов зависит от наличия пленки оксидов. В глубоком вакууме оксидная пленка может образоваться вновь, в других случаях поверхность металла может оставаться чистой в течение длительного времени.

В табл. 2 приведены расчетные данные по скорости сублимации некоторых материалов.

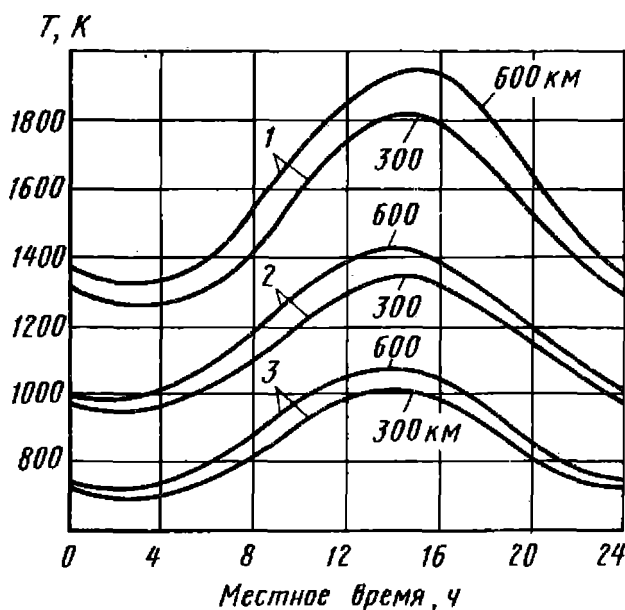


Рис. 2. Суточный ход температуры на высотах 300 и 600 км при различных уровнях активности Солнца:

1 — максимальной активности; 2 — средний уровень; 3 — минимум солнечной активности

2. Скорость сублимации металлов и полупроводников в глубоком вакууме

Материал	Температура (К), при которой данный материал сублимирует за год на			Точка плавления, К
	10^{-5} см	10^{-2} см	10^{-1} см	
Кадмий	313	353	393	593
Цинк	343	403	413	693
Магний	383	443	453	923
Литий	423	483	553	453
Свинец	543	603	703	603
Серебро	753	863	973	1233
Алюминий	823	953	1083	933
Бериллий	893	973	1113	1493
Медь	903	1033	1173	1353
Германий	923	1073	1223	1213
Железо	1043	1173	1273	1813
Кремний	1063	1193	1353	1683
Кобальт	1593	1233	1373	1853
Молибден	1653	1903	2173	2883

Рассмотрение табл. 2 показывает, что при температурах не выше 370 К, обычно имеющих место на внешних поверхностях КА, некоторые материалы (кадмий, цинк, магний) заметно сублимируют, что при длительных полетах может привести к изменениям свойств покрытий, использующих эти материалы. Другие материалы, такие, как, например, алюминий, медь, германий, кремний, в этих условиях сублимируют несущественно, поэтому рациональным является их использование в конструкциях узлов КА, находящихся вне гермоотсеков. При конструировании и испытаниях КА необходимо учитывать и то обстоятельство, что некоторые узлы могут иметь дополнительный разогрев за счет внутренних источников тепла и соответствующее усиление сублимации.

При весьма длительных космических полетах (более 3—5 лет) пригодны неорганические материалы (керамические), состоящие из оксидов и других соединений Al, Be, Cr, Mg, Si. Различные виды стекол, представляющих сложные неорганические соединения, особенно боросиликатное стекло, сублимируют несущественно.

Сублимация может сказаться на работе радиоэлектронных устройств при наличии разности температуры между различными контактирующими материалами. Так, металл, сублимирующий с более нагретой поверхности, может конденсироваться на менее нагретой. При этом возможно образование пленок с соответствующим изменением характеристик электронных схем.

Полициклические полимерные материалы в условиях глубокого вакуума превращаются в более простые, испаряющиеся вещества и, таким образом, достаточно эффективно теряют свою массу. Так, при температуре менее 370 К теряется до 10% вещества за год у нейлона, нитроцеллюлозы, оксида целлюлозы, уретана, хлорвинила, неопрена, метилметакрилата.

При температурах ниже 370 К устойчивы алкидные, фенольные, эпоксидные смолы. Однако при температуре выше 420 К химический состав смол изменяется и происходит их интенсивное испарение. Сильное влияние на скорость потери вещества полимеров в глубоком вакууме оказывает наличие в них примесей. Даже ничтожные количества примесей увеличивают ско-

рость разложения полимеров в вакууме. Особенно это относится к катализаторам, применяющимся при полимеризации и вызывающим в вакууме разложение полимеров. Устойчивость полимеров в вакууме повышается при нанесении на них защитных покрытий.

В условиях глубокого вакуума смазочные материалы из органических веществ с короткими цепями испаряются сравнительно эффективно. При этом, чем больше молекулярный вес (больше длина цепи), тем меньше давление паров и, следовательно, ниже скорость испарения. Большинство применяемых в наземных условиях смазочных материалов в условиях глубокого вакуума использоваться не могут, так как скорость испарения их достигает $1 \text{ (г·см}^{-2}\text{)/год}$ и более. Графитовый смазочный материал не может быть применен, поскольку при отсутствии адсорбированной водяной пленки превращается в абразивный материал. Смазочные материалы на основе парафиновых и эфирных масел, имеющие низкое давление паров, достаточно хорошо проявили себя в условиях глубокого вакуума.

В условиях глубокого вакуума применяются и твердые смазочные материалы, например, дисульфид молибдена с добавками из кремния, фенольных и эпоксидных смол, с толщиной покрытия смазочным материалом 4—12 мкм. Такие покрытия достаточно эффективны в механизмах, имеющих плавный выход на рабочий режим (осколки дисульфида успевают «удаляться» из подшипника в течение разгонного периода). Удовлетворительные результаты показали используемые в качестве твердых смазочных материалов покрытия из серебра, золота, бария. Покрытия наносятся только после того, как соприкасающиеся поверхности тщательно очищены. Толщина покрытия должна быть всего несколько долей мкм.

Хорошо зарекомендовали себя твердые смазочные материалы типа молибденита MoS_2 . Механические свойства таких твердых материалов практически не изменяются в условиях глубокого вакуума. Кроме молибденита используются фторопластовые покрытия, отличающиеся химической

инертностью. Это позволяет использовать фторопласт даже в случаях контакта с компонентами ракетного топлива.

Изменение оптических характеристик. В результате испарения защитных пленок и сублимации поверхностных слоев (особенно при высоких температурах) изменяются оптические характеристики терморегулирующих покрытий и оптических материалов. У белых терморегулирующих покрытий возрастает отражательная способность. На оптические свойства материалов могут оказывать влияние осаждающиеся частицы веществ, сублимирующих с узлов КА. Оптические характеристики материалов могут измениться и в результате диффузии ионов водорода «солнечного ветра» при полете КА на больших высотах (более 30 000 км) в поверхностные слои материала, обогащающиеся водородом.

Изменение условий теплопередачи. В условиях глубокого вакуума отсутствуют внешний конвективный теплообмен и теплопроводность среды. Уже при давлении 10^{-2} Па теплопроводность среды составляет всего 0,01% теплопроводности среды при атмосферном давлении. Единственным путем обмена теплом КА с внешней средой является поглощение и излучение электромагнитной энергии преимущественно в видимом или инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. На низких орбитах (в области 100 км) КА подвергаются сильному аэродинамическому нагреву, который обычно превышает нагрев от солнечного излучения. На орбитах более 200 км аэродинамический нагрев незначителен и им, как правило, пренебрегают. Основным источником лучистой энергии, вызывающим нагрев поверхности КА, становятся электромагнитное излучение Солнца как прямое, так и переизлученное Землей (Луной), а также источники тепла самого КА (работающая радиоэлектронная аппаратура и др.).

При наличии в составе герметичных отсеков КА жидких или газообразных теплоносителей в условиях невесомости приходится применять принудительную конвекцию, так как естественная конвекция практически от-

сутствует. Поэтому обеспечение нормального теплового режима КА для условий глубокого вакуума и невесомости является достаточно сложной задачей. Применяемая экранно-вакуумная изоляция при глубоком вакууме может изменять теплофизические свойства, прежде всего спектральные коэффициенты поглощения и излучения, что приводит к ухудшению условий энергетического обмена с окружающей средой.

Изменение поверхностных и объемных свойств материалов. В условиях глубокого вакуума могут изменяться механические и электрические свойства материалов. Испарение оксидных и других поверхностных защитных пленок оказывает влияние на механические свойства материалов, усиливается адгезия (когезия), т. е. «прилипание» поверхностных слоев двух разнородных, жидких или твердых веществ (материалов) при их соприкосновении. Когезия является частным случаем адгезии, когда соприкасающиеся материалы вещества однородны. При этом могут возникать микроскопические поверхностные трещины, интеркристаллитная коррозия, возрастает коэффициент трения, в некоторых случаях поверхности материалов могут «свариваться» в холодном состоянии.

Возможны изменения объемных свойств материалов (усталостная прочность и т. д.). Пластики и эластомеры, содержащие элементы, эффективно испаряющиеся в глубоком вакууме, становятся хрупкими при потере вещества всего в несколько процентов.

Широко применяющиеся в узлах КА резиновые уплотнители имеют высокие адгезионные свойства. Нанесение тонких фторопластовых покрытий на резиновые уплотнители позволяет устранить эффекты прилипания резины к соприкасающимся изделиям и снизить коэффициент трения в несколько раз [1].

В ряде случаев изменяются и электрические характеристики материалов за счет неравномерной сублимации, при этом изменяется химический состав материалов. Потери кислорода, азота и воды в керамических материалах приводят к увеличению их

электрического сопротивления. Иногда на диэлектриках могут возникнуть поверхностные токи утечки.

2. ТЕПЛОВЫЕ УСЛОВИЯ И ВОЗДЕЙСТВИЯ В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ

Тепловые условия в космическом полете могут быть стационарными (квазистационарными) и нестационарными. Последние являются кратковременными, например, при вхождении возвращаемых отсеков КА в плотные слои атмосферы. Тепловые нагрузки здесь весьма интенсивны и задача решается специальными конструктивными средствами (применением абляционных покрытий спускаемых отсеков). Но эти тепловые нагрузки аэродинамического характера не являются факторами космического пространства и здесь не рассматриваются.

Тепловые условия в космическом пространстве в основном определяют тепловой режим многих устройств и систем КА. Особенно чувствительны к тепловому режиму электронная аппаратура, а также системы жизнеобеспечения космонавтов. Для обеспечения необходимого теплового режима КА оборудуются системами терморегулирования, имеющими большие энергопотребление, объемы и массу, которая достигает до 30% массы КА [16].

Излучение Солнца. Солнце — мощный источник лучистой энергии, посылающий каждую секунду в окружающее пространство излучение суммарной мощностью $3,86 \cdot 10^{23}$ кВт. На орбите Земли плотность солнечного лучистого потока составляет около 1400 Вт/м^2 (считается, что эта величина определена с погрешностью $\pm 2\%$). Но указанное значение плотности лучистого потока не остается неизменным: в течение 11-летнего цикла солнечной активности оно изменяется до 2%. Кроме того, сезонные изменения, вызываемые эллиптичностью орбиты Земли, достигают $\pm 3,5\%$ (в декабре—январе плотность потока составляет 1444 Вт/м^2 , в июне—июле — 1349 Вт/м^2). В тепловых расчетах пользуются понятием радиационной температуры Солнца, определяемой как

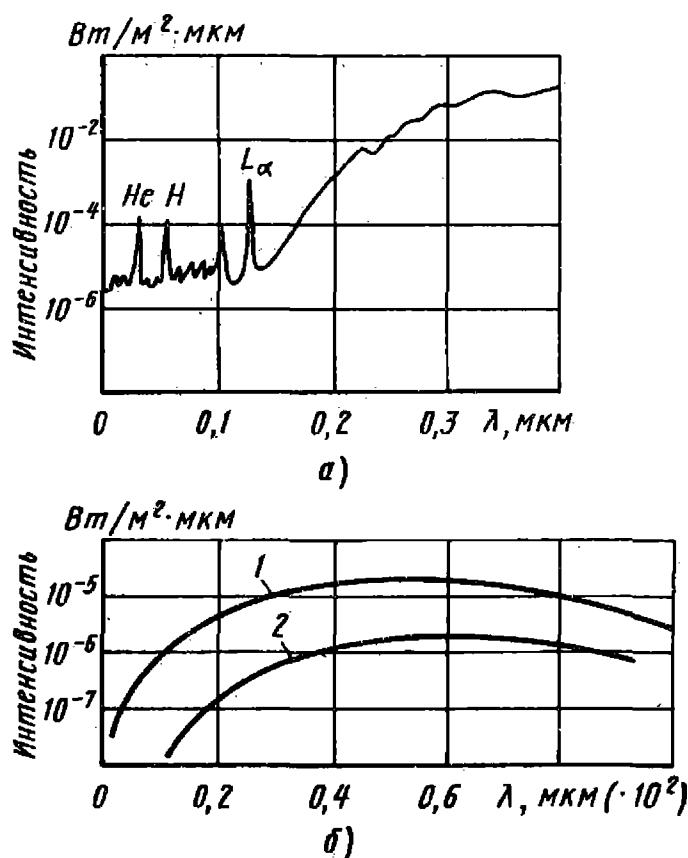


Рис. 3. Интенсивность солнечного излучения:

а — ультрафиолетовое излучение в период максимума солнечной активности; б — рентгеновское излучение в период максимума (1) и минимума (2) солнечной активности

температура абсолютно черного тела, которое, имея угловой размер Солнца ($32'$), создает в вакууме на поверхности, перпендикулярной к падающим лучам, такую же энергетическую освещенность, как Солнце. Эффективная радиационная температура Солнца составляет 5785 К .

Важный вклад в тепловые условия КА вносит солнечное излучение в диапазоне волн $\lambda = 0,3 \div 3\text{ мкм}$. В этом диапазоне сосредоточено примерно 92% всей лучистой энергии Солнца. На коротковолновую часть ($\lambda = 0,2 \div 0,38\text{ мкм}$) приходится около $7,4\%$ этой энергии. Коротковолновая, ультрафиолетовая (УФ) часть ($\lambda < 0,38\text{ мкм}$) спектра солнечного излучения не дает существенного вклада непосредственно в долю солнечной энергии, поглощенной поверхностью КА, но она значительно влияет на оптические характеристики поверхно-

сти и таким образом на тепловой режим КА. Под влиянием УФ излучения происходит потемнение светлых покрытий КА.

Спектральное распределение интенсивности солнечного излучения [$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$] от длины волны в ультрафиолетовой и рентгеновской областях представлено на рис. 3.

Рассмотрение рис. 3, а показывает, что в коротковолновой части УФ излучения на непрерывный спектр накладывается ряд характерных линий. Из них наиболее интенсивная линия $L\alpha$ излучения атомарного водорода (линия Лайман-альфа), имеющая $\lambda = 0,1216\text{ мкм}$ и интенсивность $0,6 \cdot 10^{-2}\text{ Вт}/\text{м}^2$ (в периоды максимума солнечной активности) и $0,01 \times 10^{-2}\text{ Вт}/\text{м}^2$ (в периоды минимума солнечной активности). Солнечные вспышки на интенсивность линии Лайман-альфа, как и на интенсивность других линий, влияют незначительно. В рентгеновской части спектра (см. рис. 1, б) интенсивность излучения значительно изменяется в течение цикла солнечной активности, увеличиваясь дополнительно примерно на порядок во время крупных солнечных вспышек. При крупных солнечных вспышках интенсивность излучения с $\lambda < 0,01\text{ мкм}$ возрастает более чем вдвое по сравнению со спокойным Солнцем. Рентгеновское излучение Солнца, как и УФ излучение, вызывает потемнение светлых покрытий поверхности КА, а также уменьшение оптической прозрачности стекол.

Излучение Земли, Луны и планет. Излучение планет Солнечной системы, в том числе Земли, обычно рассматривают в виде двух составляющих. Первая связана с отражением планетой солнечного излучения. Вторая составляющая определяется собственным инфракрасным излучением, источником которого является переизлучение планетой поглощенной энергии солнечного излучения. Внутренним тепловыделением планет, как правило, пренебрегают.

Количественной характеристикой отражательной способности планеты является сферическое альбедо ($A_{\text{сф}}$), численно равное отношению полного количества солнечной энергии, рассеян-

3. Альbedo для различных участков земной поверхности и облаков

Характер земной поверхности (облаков)	Альbedo
Покров земной поверхности:	
травяной	0,14—0,37
песок (пустыня)	0,24—0,28
свежий снег	0,80—0,90
старый снег	0,45—0,70
лед	0,37
Лесной массив	0,03—0,10
Морская поверхность	0,04—0,45
Плотный облачный покров	0,78
Сплошные слоисто-кучевые облака	0,56—0,81
Высокослоистые облака с редкими разрывами	0,17—0,36
Слоистые облака толщиной, м:	
>300	0,60—0,85
150—300	0,40—0,50
<150	0,10—0,50

ной планетой по всем направлениям (Φ), к полному потоку лучистой энергии от Солнца ($S_c F_n$), падающему на поверхность планеты:

$$A_{сф} = \frac{\Phi}{S_c F_n},$$

где $S_c = 1400 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная (на орбите Земли), количество энергии солнечного излучения, проходящее в единицу времени через элементарную площадку, нормальную солнечным лучам; F_n — площадь, нормальная к направлению падения лучей, представляющая проекцию поверхности, на которую падает излучение (для сферической поверхности $F_n/F = 0,25$).

Чем больше альbedo, тем более светлой выглядит данная поверхность. Сферическое среднее альbedo Земли составляет 0,29. Среднее альbedo Луны (точнее ее поверхности, обращенной к Земле) принимается равным 0,073, но в зависимости от областей лунной поверхности оно изменяется от 0,05 до 0,20. Так, «морские» районы Луны рассеивают во всех направлениях 6 % падающей солнечной энергии, «материковые» области — 12 %.

Достаточно сложна структура излучения Земли. Отраженное солнеч-

ное излучение складывается из излучения, отраженного от облачного покрова, излучения, отраженного от земной поверхности, излучения, рассеянного атмосферой Земли. Если КА движется по орбите, не превышающей 1000 км, то он облучается в каждый момент времени от сравнительно небольшого участка земной поверхности, для которой альbedo может сильно отличаться от среднего сферического альbedo Земли. Эти изменения могут быть оценены данными, приведенными в табл. 3 [10, 16, 17, 18].

С учетом того, что при движении КА характер земной поверхности и облачного покрова обычно достаточно сильно изменяется, иногда применяют среднегодовые значения альbedo в функции географической широты при различных метеорологических условиях (рис. 4).

Альbedo изменяется и в зависимости от сезона. Наиболее сильно сезонные колебания выражены для низких широт (до 30°). В среднем летом альbedo несколько больше, чем зимой. Для приближенных расчетов среднегодовое альbedo Земли принимают равным 0,35 [12].

Собственное тепловое излучение Земли, в основном, представляет длин-

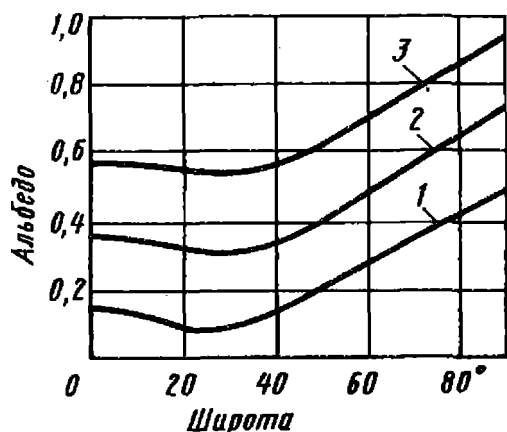


Рис. 4. Среднегодовые значения альбедо Земли для различных широт и метеорологических условий:

1 — ясное небо; 2 — облачность с разрывами; 3 — сплошная облачность

новолновое (в инфракрасном диапазоне $\lambda = 5 \div 50$ мкм) излучение поверхности Земли и ее атмосферы. Максимум излучения соответствует температуре около 250 К ($\lambda \approx 11$ мкм). Среднегодовые значения потока излучения Земли и ее атмосферы для различных широт показаны на рис. 5 [9]. Для уходящего потока, излучаемого поверхностью Земли (водой и сушей) и атмосферой, существуют два крайних случая: Земля покрыта сплошной облачностью и облачности нет вовсе. В первом случае излучение соответствует температуре 218 К и во втором 288 К. При ориентировочных расчетах средний поток излучения Земли и ее атмосферы принимается равным 230 Вт/м^2 , что эквивалентно излучению черного тела при температуре 253 К. В летние месяцы на широтах выше $40\text{--}50^\circ$ поток излучения увеличивается по сравнению со средним примерно на 10% и в зимние месяцы уменьшается на 5—8% [12].

Температура лунной поверхности определяется освещенностью Солнцем. Яркостная температура в центре видимого диска, измеренная в ИК области спектра, достигает днем 400 К, ночью (в местную полночь) падает до 100 К. Ночью, перед восходом Солнца, ночная поверхность Луны «остывает» до 73 К. Из-за малой теплопроводности лунных образований, которая препятствует выравниванию тем-

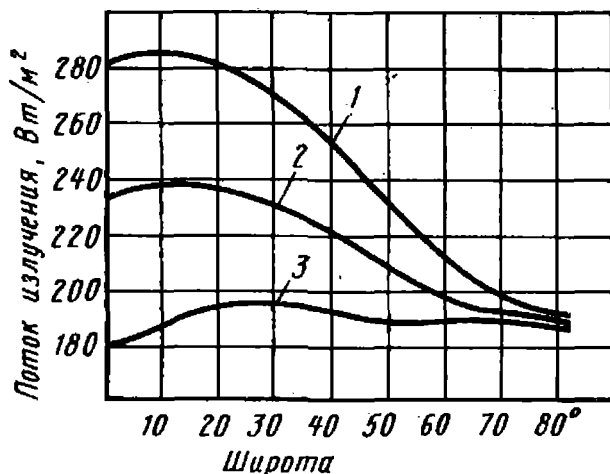


Рис. 5. Среднегодовой поток излучения Земли в зависимости от широты:

1 — ясное небо; 2 — облачность с разрывами; 3 — сплошная облачность

ператур, температура теневой (ночной) стороны Луны падает резко.

Фотометрические наблюдения показали, что распределение отраженных лунной поверхностью солнечных лучей по различным направлениям неравномерно, причем основная часть отраженного от Луны солнечного излучения направляется обратно в сторону Солнца. Это наблюдается с Земли: максимальная яркость видимой с Земли лунной поверхности наступает тогда, когда направления на Солнце и на Землю совпадают. Это условие выполняется в полнолуние, когда лунные образования наблюдаются наиболее яркими, независимо от того, где эти образования находятся — в центре лунного диска или на краях.

В табл. 4 приведены общие сведения по характеристикам излучения Земли, Луны и планет солнечной системы, за исключением Урана, Нептуна и Плутона, имеющих ничтожно малые излучательные возможности [1, 9, 12].

С учетом приведенных данных можно проводить ориентировочную оценку тепловой энергии, падающей на поверхность КА и поглощаемой поверхностью КА [14, 17].

Величина тепловой энергии прямого солнечного излучения Q_F для элемента поверхности dF составляет

$$Q_F = a_S S_c \cos \varphi dF, \quad (2)$$

4. Основные характеристики излучения Земли, Луны и планет

Характеристика	Земля	Луна	Мер- курий	Венера	Марс	Юпи- тер	Сатурн
Расстояние от Солнца (среднее), млн. км	150	~150	58	108	228	778	1428
Средний диаметр, км	12 700	3476	4860	12 200	6780	140 000	120 000
Средняя плотность по- тока солнечного излу- чения, Вт/м²	1400	1400	9400	2700	620	52,8	15,7
Сезонные изменения, Вт/м²	±49	±49	±3160	±36	±117	—	—
Среднее (среднегодо- вое) значение альбеда	0,35	0,073	0,06— 0,07	0,73— 0,80	0,15— 0,17	0,51— 0,67	0,42— 0,69
Средняя плотность по- тока отраженного излучения, Вт/м²	265	49	330	940	50	14	5
Сезонные изменения, Вт/м²	±10	±16	±110	±13	±88	—	—
Средняя плотность по- тока собственного из- лучения, Вт/м²	220	326	2200	170— 200	130	6,5	1,6
Эффективная темпера- тура, К:							
максимальная	252	410	685	316	300	—	—
минимальная	200	118	43—73	213	173	—	—
средняя	250	280	440	230	224	102— 135	76— 120

где a_S — коэффициент поглощения падающего излучения, равный отношению поглощаемого потока к падающему; $S_c = 1400$ Вт/м²; φ — угол между нормалью к элементу и направлением солнечных лучей.

Тепловой баланс КА определяется не только падающим солнечным излучением, но также излучением Земли (планеты), внутренними источниками тепла (радиоэлектронная аппаратура, двигатели коррекции орбиты, системы обеспечения жизнедеятельности экипажа пилотируемых КА и др.), а также излучением (рассеянием) тепла поверхностью КА.

Мощность излучения тепла поверхностью КА

$$W = \varepsilon \sigma T^4 S, \tag{3}$$

где ε — степень черноты поверхности, показывающая, насколько реальная излучательная способность поверхности S отлична от излучательной спо-

собности абсолютно черного тела ($\varepsilon = 1$); $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана; T — температура поверхности, К.

В соответствии с законом Кирхгофа коэффициент поглощения падающего монохроматического излучения $a_\lambda = \varepsilon_\lambda$, где ε_λ — монохроматическая степень черноты тела. Черное тело имеет спектр излучения во всем диапазоне длины волн от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$ и обладает наибольшей лучеиспускательной поверхностью по сравнению с любым реальным телом, имеющим одинаковую с ним температуру. Серые тела, как и черные, излучают во всем диапазоне волн, но при одинаковых температурах имеют меньшую спектральную интенсивность излучения. Степень ее снижения для серого тела остается постоянной, т. е. $\varepsilon = \varepsilon_\lambda$.

Для поверхностей, излучающих энергию в диапазоне волн с различной интенсивностью, значение ε_λ зависит

Б. Излучательные характеристики материалов

Материал	Коэффициент поглощения a_s	Степень черноты * поверхности ε
Полированные металлы	0,1—0,2	0,2—0,25
Оксид магния	0,14	0,95
Бериллий	—	0,05
Оксид цинка	0,17	—
Алюминиевый сплав	0,60	0,32
Коррозионно-стойкая сталь	0,54	0,60
Белое глянцевое покрытие ($\text{TiO}_2 +$ + силиконовая смола)	0,29	0,90 ($\lambda = 3 \div 9$ мкм)
Металлы с матовой поверхностью	0,45—0,65	0,3—0,6
Черные краски	0,7—0,8	0,8—0,92
Белые краски	0,1—0,25	0,8—0,95

* Приведены средние значения ε .

от длины волны, следовательно, значение a_s зависит от λ , т. е. в общем случае $a_s \neq \varepsilon$. Это свойство селективно излучающих поверхностей и используется при создании терморегулирующих покрытий КА. Особенностью теплообмена путем переизлучения является то, что он происходит между телами с разными температурами. Как уже указывалось, более 90% излученной Солнцем энергии приходится на диапазон длин волн от 0,3 до 3 мкм. Но температура поверхностей КА более чем в 15 раз меньше, чем эффективная температура Солнца и поэтому основная энергия их излучения приходится на длинноволновый диапазон ($\lambda > 4$ мкм).

Применяя специальные покрытия, представляется возможным получить неодинаковые коэффициенты поглощения солнечного излучения a_s и интегральную степень собственной черноты ε и, таким образом, изменять температуру покрытий в достаточно широких пределах. Правда, *собственное излучение планет*, в том числе Земли, происходит в том же диапазоне длин волн, что и излучаемое поверхностью КА. В связи с этим интегральный коэффициент поглощения энергии планет для поверхности КА примерно равен степени ее черноты, и это не позволяет получить температуру

КА, подверженного воздействию собственного излучения планеты (Земли), ниже той, которая была бы у КА с черной поверхностью. Если же говорить об отраженном от планеты (в том числе от Земли и Луны) солнечном излучении, то оно имеет спектр, близкий к солнечному, и ее излучение поглощается поверхностью КА, так же как солнечное излучение.

Значительную долю лучистой энергии металлы поглощают (и излучают) в видимой части спектра и лишь небольшую ее часть — в ИК области спектра, в связи с чем температура металлических частей КА при облучении их Солнцем может достигать 770 К и более. При применении специальных покрытий (на основе белых красок) с небольшим значением коэффициента a_s в видимой части спектра и большим — в ИК области спектра удастся снизить температуру поверхности КА. Применяется также покрытие частей поверхности КА, не предназначенных для теплообмена, экранной или экранно-вакуумной изоляцией при обработке ее таким образом, чтобы радиационные характеристики удовлетворяли высказанным ранее условиям.

В табл. 5 приведены значения коэффициентов поглощения и излучения для некоторых материалов [1, 10].

Для КА, имеющих обычно сложную форму конструкции, коэффициенты α , и β в формулах (2) и (3) теоретически рассчитать довольно трудно, а упрощенные расчеты не являются достаточно достоверными. Поэтому обычно при разработке и испытаниях КА проводят экспериментальное моделирование тепловых режимов КА [4], что также является технически непростой задачей: испытания необходимо проводить в камере с глубоким вакуумом и создать другие условия, в частности, стенки камеры целесообразно охлаждать жидким гелием или, при упрощении опытов, жидким азотом.

Проблему отвода избыточного тепла от поверхности КА решают комплексно: применением терморегулирующих покрытий, эффективно излучающих и обладающих малым поглощением; ограничением внутренних источников тепла; обеспечением тепловых контактов освещенных и теневых сторон поверхности и т. д.

Терморегулирующие покрытия играют важную роль в обеспечении нормального функционирования КА, и, вместе с тем, они чувствительны к воздействию факторов космического пространства, особенно ультрафиолетового солнечного излучения, глубокого вакуума, потоков заряженных частиц, метеорных частиц. При этом с течением времени увеличивается значение коэффициента поглощения. Так, белые покрытия постепенно становятся желтыми или коричневыми.

3. СОБСТВЕННАЯ АТМОСФЕРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Вследствие газовыделения, сублимации материалов конструкции КА, выброса твердых частиц при работе двигателей ориентации и коррекции, а также за счет утечки газов и частиц из внутренних отсеков КА (например, при шлюзовании) вокруг КА образуется облако газа и твердых частиц, называемое *собственной атмосферой КА*. Поэтому в непосредственной близости от поверхности КА давление существенно отличается от того, которое на данной орбите (высоте) имеется в космическом пространстве. Особенно

плотность собственной атмосферы высока (на несколько порядков превышает окружающий «фон») в первые недели после запуска КА за счет интенсивного газовыделения поверхностных слоев конструкций КА. После обезгаживания плотность собственной атмосферы стабилизируется и определяется установлением динамического равновесия между поступлением частиц в газовое облако, возвратом (оседанием) их на поверхность КА и рассеянием в окружающее пространство.

Пространственное распределение плотности собственной атмосферы КА имеет сложный характер и в значительной мере зависит от геометрических форм КА, состава материалов и покрытий КА, расположения источников утечки газа из внутренних отсеков и двигателей. Особенно резкое повышение плотности наблюдается при работе двигателей, осуществлении стыковки КА и др. Например, непрерывные потери массы КА «Аполлон» составляли $3 \cdot 10^{-5}$ кг/с, а двигатели ориентации через каждые 20 мин выбрасывали около 200 г несгоревшего топлива [1].

Наличие собственной атмосферы приводит к ряду неблагоприятных воздействий на материалы и аппаратуру КА: осаждение продуктов собственной атмосферы приводит к загрязнению поверхностей (возрастает коэффициент поглощения терморегулирующих покрытий, ухудшается прозрачность стекол); рассеяние света и люминесценция на частицах собственной атмосферы могут отрицательно сказываться на работе оптических устройств; при значительном ухудшении вакуума возможны возрастания токов утечки в открытых высоковольтных устройствах и снижение электрической прочности. В составе частиц собственной атмосферы имеется большое число ионизированных, заряженных частиц, которые под влиянием электрического и магнитного полей КА попадают в любые части конструкций КА.

Наиболее опасным для функционирования КА является возникновение дополнительного светового фона за счет рассеяния света внешних источников как прямого солнечного излучения, так и отраженного от элементов

конструкции КА. При этом яркость рассеянного свечения частиц диаметром в несколько микрон близка к яркости звезд, используемых в качестве ориентиров для астронавигационных датчиков, что может приводить к сбоям систем ориентации КА.

При конструировании КА обычно принимаются различные меры для ослабления эффектов воздействия собственной атмосферы. С этой целью производится предварительное обезгаживание материалов, применяются слабосублимирующие материалы, улучшается герметизация отсеков КА, устанавливаются экраны, защитные козырьки, шторы и др. Для «рассасывания» загрязняющих пленок используется естественный процесс десорбции (отрыв молекул, покрывающих поверхность адсорбента, и переход их в газ), которая резко усиливается при нагревании поверхности КА. Возможно применение методов плазменной очистки загрязненных участков поверхности КА.

4. МЕТЕОРНЫЕ ПОТОКИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Метеорные тела в космическом пространстве имеют различные размеры (от долей микрон до сантиметров, и, в крайне редких случаях, до нескольких метров) и движутся в зависимости от направления прихода со скоростями примерно от 12 до 72 км/с. Большинство метеорных тел имеют размеры от долей микрон до десятков микрон — они называются *микрометеорными частицами*. Масса этих частиц небольшая (от 10^{-8} до 10^{-10} г), но значительная скорость вызывает при столкновении с преградой ударную волну, в результате которой может происходить превращение вещества из одной, например, кристаллической структуры в другую, более плотную. Сокращение межатомных расстояний в полупроводниках и диэлектриках под действием высоких давлений в ударной волне приводит к металлизации участков, в которые попадает микрометеорная частица.

Распределение потока метеорных частиц в околоземном пространстве по

массе m (в граммах) ориентировочно определяется по формуле

$$\lg N = -(10,7 \pm \pm 0,5) - (0,57 \pm 0,05) \lg m, \quad (4)$$

где N — плотность потока частиц, $1/(m^2 \cdot c)$.

Плотность потока микрометеорных частиц в межпланетном пространстве составляет 10^{-3} — 10^{-6} $1/(m^2 \cdot c)$. В окрестности Земли, на высотах ниже 400—500 км, частицы с массой 10^{-8} г имеют плотность потока 0,3—0,7 $1/(m^2 \cdot c)$ и с увеличением высоты она быстро уменьшается.

Вероятность встречи с крупной метеорной частицей порядка 1 г и более в космическом пространстве мала и составляет за 10 лет активного существования менее 0,001.

Плотность остатков метеорных тел, достигающих окрестности Земли, составляет около 3 г/см², если они имеют каменистую природу. Метеорные тела астероидного происхождения имеют плотность около 8 г/см² и по составу относятся к железоникелевым [11]. Предполагается, что существуют метеорные частицы и малой плотности (до 0,4 г/см² и менее).

Исследования показали, что при ударе металлической частицы о стальную мишень со скоростью 10—70 км/с давление в зоне сжатия достигает 10^{11} — 10^{13} Па. Удельная энергия за фронтом ударной волны имеет соответственно 10^7 — 10^9 Дж/кг, т. е. превышает удельные энергии плавления и испарения материалов. В результате испарения и ионизации вещества оно разлетается из кратера сначала в виде плазмы, а затем в виде «протуберанца», состоящего из пара и жидкой фазы. При дальнейшем распространении ударной волны температура за ее фронтом уменьшается в десятки раз, процессы испарения и ионизации вещества прекращаются, но продолжается плавление и некоторая часть вещества выбрасывается из образовавшегося кратера в виде расплава. На этом завершается гидродинамическое действие ударной волны, и она трансформируется в упругопластическую, под действием которой вещество (металл, пластик) мишени течет (выдавливается) вдоль стенок кратера. В круп-

ких мишенях (стекло) гидродинамическая ударная волна преобразуется в ударную волну хрупкого разрушения, вызывающую механические разрушения (растрескивания) мишени. Затухая, ударная волна трансформируется в упругоакустическую волну сжатия. В случае превышения растягивающих напряжений в «зоне разгрузки» предела прочности материала будет происходить откол пластинок материала на внутренних поверхностях мишени. При этом толщина (диаметр) пластинок может при больших скоростях падения давления за фронтом волны достигать толщины мишени.

При скоростях соударения метеорной частицы с преградой, превышающей 10—20 км/с, испарение вещества происходит взрывным образом (за время 10^{-10} с), увеличивая площадь повреждения (кратеров). Образование кратеров — эрозия поверхности мишени — само по себе представляет опасность, особенно для оптических приборов, так как отдельные кратеры значительно изменяют характеристики пропускания и отражения стекол (линз, зеркал) светового потока, что приводит к световым помехам, в том числе ложным сигналам. Ложные сигналы могут быть созданы в момент удара метеорной частицы за счет световой вспышки при испарении и ионизации материала в зоне удара. Это же обстоятельство приводит к падению КПД солнечных батарей.

Микрометеорные частицы могут в ряде случаев даже пробить тонкостенную оболочку КА. Так, каменная частица при скорости 15 км/с пробивает оболочку, в 5—6 раз превышающую размер частицы, при скорости 30 км/с — в 10—12 раз. Частица массой всего 10^{-10} г при скорости 50 км/с распыляет массу оболочки, в 10^3 раз превышающую массу частицы.

При проектировании КА нельзя не считаться с возможностью серьезных повреждений, вызываемых метеорными телами. Поэтому в СССР и за рубежом все чаще применяют различные способы *противометеорной защиты*: многослойная (сотовая) конструкция оболочек КА; многослойная экранно-вакуумная изоляция оболочек; секционирование отсеков; установка защит-

ных крышек для оптических приборов.

Наиболее эффективной мерой защиты от ударов метеорных частиц является установка на КА дополнительных тонкостенных оболочек (экранов). Если экран и будет пробит метеорной частицей, она значительно (в 2 раза и более) потеряет свою скорость, а во многих случаях разрушится еще на несколько более мелких частиц. В результате разрушение основных оболочек КА будет значительно меньше тех, которые были бы при непосредственном столкновении оболочки с частицей. Например, если перед основной оболочкой толщиной 1 мм установить экран толщиной всего 0,3 мм, то такая конструкция выдержит удар метеорных частиц, которые пробili бы одиночную оболочку толщиной 4 мм. Толщина защитного экрана выбирается равной половине толщины (диаметра) «расчетной» метеорной частицы, а расстояние от основной оболочки — не менее 20 диаметров [12].

5. ИСТОЧНИКИ И СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В околоземном и межпланетном пространствах существуют мощные потоки преимущественно заряженных элементарных частиц, определенным образом воздействующих на материалы и аппаратуру КА и требующих определенной защиты от их воздействия на экипажи КА. Энергетический спектр элементарных частиц и их структура в межпланетном и околоземном пространствах настолько сложны, что это вызывает необходимость при проектировании искусственных спутников Земли (ИСЗ) и межпланетных станций рассматривать радиационную обстановку конкретно для каждого КА в зависимости от орбиты его движения, времени активного существования, конструктивных особенностей агрегатов и систем и многих других факторов. Поскольку взаимодействие элементарных частиц с материалами и техническими устройствами КА связано с ионизацией, то совокупность потоков элементарных частиц в космическом пространстве принято называть **космическим ионизирующим излучением**

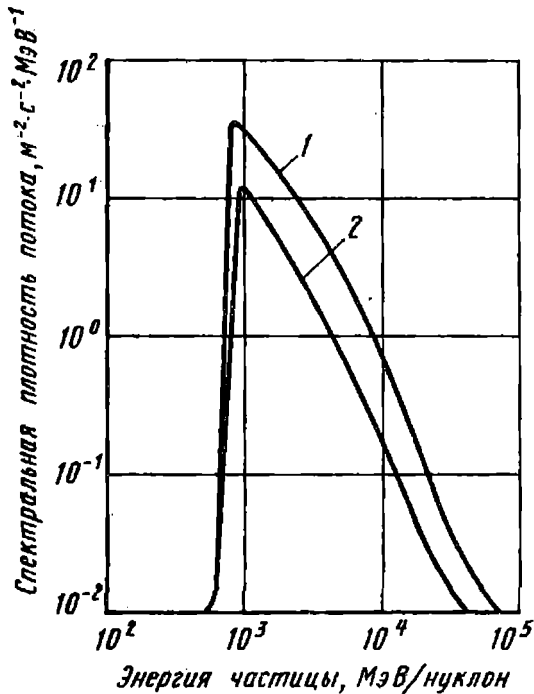


Рис. 6. Дифференциальные энергетические спектры ядер галактических космических лучей:

1 — тяжелые ядра; 2 — протоны

(КИИ) или космической радиацией. При этом КИИ, приходящее к Земле из межпланетного пространства, в том числе от Солнца, называют *первичным* КИИ, а возникающее при взаимодействии с атмосферой и магнитным полем Земли (магнитосферой) — *вторичным*. Вторичное КИИ представляет собой значительно более сложную структуру, может быть естественным и искусственным, является основным источником радиационной опасности для КА на околоземных орбитах.

Первичное КИИ часто называют также *космическими лучами*, которые приходят к Земле регулярно из Галактики (галактические космические лучи) и от Солнца (солнечные космические лучи).

Галактические космические лучи, которые, как считают, связаны с ускорением заряженных частиц при вспышках сверхновых звезд, состоят преимущественно из протонов (90%) и ядер гелия, т. е. α -частиц (~7%), ядер более тяжелых элементов (~1%), около 1% электронов и позитронов, незначительную долю составляют γ -кванты. Энергия галактических ча-

стиц довольно большая — от 10 кэВ (0,16 Дж) до 10^{12} эВ ($1,6 \cdot 10^7$ Дж) и более*.

При этом частицы с энергией более 10^8 эВ имеют весьма низкую плотность потока. Потоки рентгеновского и γ -излучения в галактических космических лучах, в основном, не представляют опасности функционированию КА. Но с определенной вероятностью возможны всплески этих излучений, исходящие из активного ядра Галактики (один из взрывов ядра произошел около 100 млн. лет назад), с опасным воздействием которых, особенно на экипажи пилотируемых КА, нельзя не считать.

Плотность потока галактических космических лучей в межпланетном (околосолнечном) пространстве во времени непостоянна, что связано с меняющимся уровнем активности Солнца в течение 11-летнего периода и 27-дневного периода (период вращения Солнца). Так, в годы максимума солнечной активности (последний максимум приходился на 1979—1980 гг., очередной ожидается в 1990—1992 гг.) плотность потока галактических космических лучей с энергией выше 100 МэВ составляет примерно 1—2 $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, годы минимума солнечной активности (последний был в 1986 г.) плотность потока возрастает до 4,5 $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ [26]. Это связано с тем, что при распространении в межпланетном пространстве галактические космические лучи взаимодействуют с магнитным полем, источником которого является Солнце (в годы повышенной активности магнитное поле усиливается), как бы выталкиваются этим полем в межзвездное пространство, где плотность потока галактических космических лучей, вероятно, в несколько раз больше, чем в межпланетном. На рис. 6 представлен примерный дифференциальный энергетический спектр

* Электронвольт (эВ) — внесистемная единица энергии, наиболее часто используемая в ядерной физике. 1 эВ — энергия, приобретаемая единичным электрическим зарядом при прохождении им разности потенциалов в 1 В ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

6. Значения интегрального потока частиц для некоторых солнечных вспышек

Время вспышки	Протоны ($1/\text{м}^2$) при E , МэВ, более			α -частицы ($1/\text{м}^2$) при E , МэВ, более	
	10	30	100	40	20
10 мая 1959 г.	$5,5 \cdot 10^{13}$	$9,6 \cdot 10^{12}$	$8,5 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{12}$	$4,2 \cdot 10^{11}$
10 июля 1959 г.	$4,5 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$2,4 \cdot 10^{11}$
14 июля 1959 г.	$7,5 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$8,0 \cdot 10^{11}$
16 июля 1959 г.	$3,3 \cdot 10^{13}$	$9,1 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	$7,5 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^9$
3 ноября 1960 г.	$9 \cdot 10^{11}$	$3,5 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^9$
12 ноября 1960 г.	$4 \cdot 10^{13}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$4,0 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{12}$
15 ноября 1960 г.	$2,5 \cdot 10^{13}$	$7,2 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{12}$	$9,0 \cdot 10^{11}$

для ядер галактических космических лучей [25].

Солнечные космические лучи представляют собой поток заряженных частиц, ускоренных при солнечных вспышках. Во время мощных вспышек на Солнце выделяется гигантская энергия, достигающая до 10^{25} — 10^{26} Дж, которая идет, главным образом, на нагрев плазмы в области вспышки до 10^8 — 10^9 К и некоторая часть этой энергии расходуется на ускорение заряженных частиц, излучаемых солнечной плазмой, — протонов, α -частиц и электронов. Кроме того, за счет взаимодействия заряженных частиц с солнечной плазмой при вспышках генерируются рентгеновское и γ -излучение. При оценке радиационной безопасности действием последних видов излучений, как правило, пренебрегают, так как их дозовый эффект по сравнению с потоками заряженных частиц невелик. Энергетический спектр солнечных космических лучей простирается от десятков электронвольт (эВ) до сотен МэВ. Во вспышках иногда наблюдаются частицы (протоны) с энергией до нескольких ГэВ/нуклон (нуклон — объединение двух частиц — протона и нейтрона, из нуклонов построены все атомные ядра).

По сравнению с галактическими солнечные космические лучи имеют в ряде случаев достаточно большие плотности потоков частиц. Так, среднегодовая эффективность излучения заряженных частиц с энергией более 20 МэВ во

время солнечных вспышек составляет примерно 10^{37} , а средняя плотность потока $2 \cdot 10^{13}$ $1/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. При больших вспышках, длящихся сутки, поток протонов с энергией больше 30 МэВ может достичь опасных не только для человека, но и для функционирования систем КА значений 10^{14} $1/\text{м}^2$.

В табл. 6 приведены значения интегральных потоков протонов и α -частиц, зарегистрированных в 1959—1960 гг. [13, 25].

Следует сказать, что вспышки 1959—1960 гг. относятся к достаточно сильным. Они произошли в годы максимума 19-го цикла солнечной активности; в 20-м и в 21-м циклах мощных вспышек, подобных вспышкам 14 июля 1959 г. и 12 ноября 1960 г., не наблюдалось. Но измерения потоков заряженных частиц при солнечных вспышках ведутся всего в течение нескольких циклов солнечной активности и можно предположить, что возможны еще более крупные солнечные вспышки. Например, во время солнечной вспышки 23 февраля 1956 г. поток космических лучей был настолько интенсивен и имел столь высокую энергию, что даже на поверхности Земли превышал в несколько раз тот уровень, который наблюдался ранее при других мощных вспышках (в Москве он увеличился в 4 раза). В 1956 г. еще не было спутниковых измерений, но, вероятно, указанная вспышка была опасной для функционирования аппаратуры как межпланетных, так и околоземных КА, если бы они в то

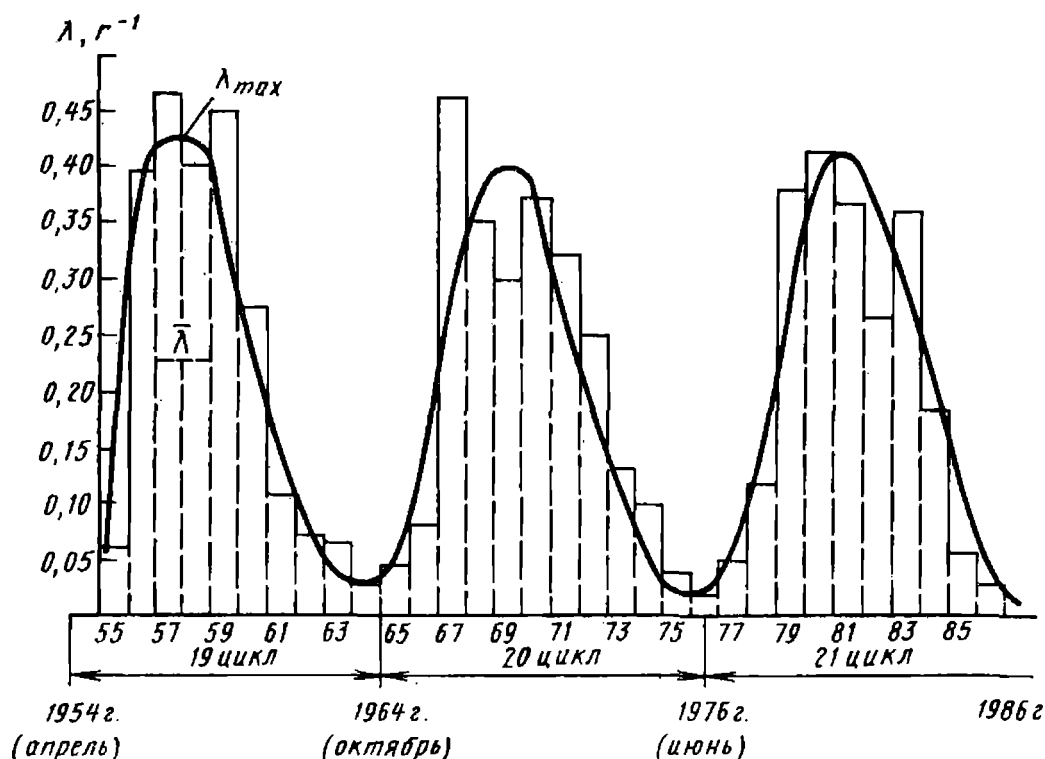


Рис. 7. Характер изменения среднегодовых значений интенсивности потока солнечных вспышек в течение 19—21 циклов солнечной активности

время находились в космическом пространстве [17]. Таким образом, при проектировании аппаратуры КА, особенно межпланетных при времени активного существования 3—5 лет и более, следует считаться с возможностью возникновения подобных вспышек. В этом случае, прежде всего, следует оценить воздействие солнечных космических лучей на оптические устройства и солнечные батареи. Поэтому при оценке радиационной опасности для аппаратуры межпланетных КА и тем более для экипажей КА (в том числе и на околоземных орбитах) необходимо оценивать дозы излучения, полученные за время активного существования за счет солнечных вспышек. Провести такую оценку не просто, так как КА и его аппаратура разрабатывается за несколько лет до запуска, а полет межпланетных КА, для которых ионизирующие излучения солнечных вспышек являются основным источником, может длиться несколько лет. Прогнозирование радиационной обстановки затрудняется также тем, что потоки солнечных космических лучей возникают в случайные моменты

времени, а их энергетический спектр также изменяется непредвиденно.

Для прогноза потоков солнечных космических лучей, статистически изученных еще недостаточно, используется обычно обширный материал по «световым» солнечным вспышкам, наблюдаемым астрономами и физиками на протяжении более чем 200 лет. «Протонные» вспышки являются частью потока «световых» вспышек. Если условно принять, что общий поток солнечных вспышек состоит из независимых между собой световых и протонных вспышек, то это означает, что наблюдаемая вспышка, которая сопровождалась потоком протонов (α -частиц, электронов), относится не к световой, а к протонной.

Интенсивность потока солнечных вспышек может быть определена как математическое ожидание их числа за единицу времени [24]:

$$\Lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} k p_k(t), \quad (5)$$

где $p_k(t)$ — вероятность возникновения числа k солнечных вспышек за время t .

Чтобы рассчитать значения вероятностей $p_h(t)$, необходимо иметь данные по характеру и количественным характеристикам интенсивности потока солнечных вспышек в течение ряда циклов солнечной активности.

На рис. 7 показан характер изменения среднегодовых значений интенсивности потока солнечных вспышек $\bar{\lambda}$ (1/ч) в течение 19—21 циклов солнечной активности, рассчитанных по данным каталогов солнечных вспышек [27]. Данные рис. 7 указывают на нестационарность процессов на Солнце, вызывающих солнечные вспышки и, вместе с тем, на квазипериодический характер изменения интенсивности потока солнечных вспышек между циклами солнечной активности (период цикла в среднем составляет 11 лет). Это позволяет заключить, что при ориентировочном прогнозировании уровня солнечной активности на еще «не прожитый» цикл можно пользоваться среднегодовыми значениями интенсивности потока, усредненными по аналогичным периодам за несколько циклов (от цикла к циклу значения λ колеблются, особенно в годы максимума солнечной активности). При этом следует учесть то обстоятельство, что нестационарность потока протонных вспышек в цикле солнечной активности выражена слабее, чем их общий поток, а максимум суммарного потока солнечных вспышек часто не совпадает с максимумом потока протонных вспышек и может быть как в годы нарастания солнечной активности (чаще), так и в годы спада солнечной активности [5].

С целью прогнозирования среднегодовых значений интенсивности потока солнечных вспышек при долгосрочном прогнозировании можно пользоваться аналитической функцией аппроксимирующей кривой изменения значений $\bar{\lambda}$ (см. рис. 7), дающей удовлетворительные результаты:

$$\lambda(t) = \bar{\lambda} [1 + \mu \sin \theta (t - t_0)], \quad (6)$$

где $\theta = \frac{2\pi}{11 \pm \varphi}$ — фазовая составляющая, учитывающая отличие длительности цикла солнечной активности от 11 лет (она может несколько изме-

няться от цикла к циклу); $\mu = \frac{\lambda_{\max}}{2\bar{\lambda}}$ —

множитель, учитывающий вековые колебания солнечной активности ($\lambda_{\max}$ — максимальное прогнозируемое значение среднегодовой частоты солнечных вспышек в очередном цикле); t_0 — год цикла, для которого $\lambda(t) = \bar{\lambda}$.

Значения $\lambda_{\max}$ могут непосредственно определяться по прогнозируемым на очередной цикл солнечной активности месячным числам Вольфа (число Вольфа равно сумме удесятеренного числа наблюдаемых на Солнце групп солнечных пятен и общего числа солнечных пятен во всех группах), усредненным по годам цикла солнечной активности [27].

С учетом аппроксимации вида (6) среднее значение интенсивности потока солнечных вспышек за период (τ, t) составляет

$$\Lambda(\tau, t) = \bar{\lambda} \left\{ 1 - \frac{\mu}{\theta(t - \tau)} \times \right. \\ \left. \times [\cos \theta(t - t_0) - \cos \theta(\tau - t_0)] \right\}. \quad (7)$$

Для определения прогнозируемых значений потока заряженных частиц используется теория редящих потоков, что позволяет из массы солнечных вспышек, не сопровождаемых существенными потоками заряженных частиц высоких энергий (более 100 кэВ), выделить те редкие вспышки, которые сопровождаются потоком заряженных частиц. Так, в 1958 г. (один из годов максимума солнечной активности 19-го цикла) протонных вспышек с энергией $E > 100$ МэВ произошло всего 21, а общее число солнечных вспышек превысило 4000. Функция распределения промежутков времени между соседними протонными вспышками (при применении оператора редящего потока солнечных вспышек), имеющими поток протонов $\Phi(>E)$:

$$F(\tau, t) = 1 - \exp \{ -\Lambda(\tau, t) \times \\ \times p[\Phi(>E)(t - \tau)] \}, \quad (8)$$

где $p[\Phi(>E)(t - \tau)]$ — вероятность возникновения за период времени (τ, t) протонной вспышки с интегральным потоком протонов $\Phi(>E)$, имеющих энергию E больше заданной.

Прогнозируемое значение суммарного потока заряженных частиц с энергией, превышающей E за время t , можно найти по формуле

$$\Phi_{\Sigma}(>E, t) = \Lambda(t) \times \\ \times p[\Phi(>E)] \Phi(>E) t. \quad (9)$$

Если статистически оценить вероятность $p[\Phi(>E)]$ затруднительно из-за недостаточности статистических данных, то можно дать, например, пессимистическую оценку по известному числу n протонных вспышек за период (τ, t) , сопоставляемый с прогнозируемым периодом, с потоком протонов $\Phi(>E)$:

$$\Phi_{\Sigma \max}(>E, t) = \frac{1}{2} \Phi(>E) \chi_{\alpha/2}^2 \times \\ \times \{2n[\Phi(>E)]\}, \quad (10)$$

где $\chi_{\alpha/2}^2$ — квантиль распределения χ -квадрат (при уровне значимости α).

Пример. Требуется определить ожидаемый уровень воздействия солнечных космических лучей в 1990 г. с $E > 30$ МэВ с доверительной вероятностью 0,9 ($\alpha = 0,1$). В соответствии с процедурой прогнозирования следует сопоставить 1990 г. 22-го цикла солнечной активности с соответствующим периодом 21-го цикла, т. е. 1979 г. (с небольшой погрешностью, так как минимум 21-го цикла приходился примерно на середину 1976 г.).

В 1979 г. число $n[\Phi(>30 \text{ МэВ})]$ составило 7, а усредненное значение $\Phi(>30 \text{ МэВ})$ составляло около 10^{13} 1/м^2 . Следовательно, ожидаемое значение $\Phi_{\Sigma \max}$ (1990 г.) $\approx 2 \times 10^{13} \text{ 1/м}^2$ и оно близко к среднему за последние циклы активности. Если воспользоваться обычной процедурой, т. е. подсчитать число вспышек в сопоставляемом году и определить суммарный поток с заданной энергией, то получим значение прогнозируемого потока примерно 10^{14} 1/м^2 , т. е. в 5 раз больше, чем представляет пессимистическая вероятная оценка. Более точные результаты при наличии оценки величины $p[\Phi(>E)]$ дает вычисление потока заряженных частиц с помощью формулы (9).

6. РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ

Радиационные пояса Земли (РПЗ) представляют собой области околоземного пространства, заполненные заряженными частицами, главным образом, протонами и электронами, удерживаемыми магнитным полем Земли. При этом значения потоков заряженных частиц на много порядков превышают потоки частиц галактических и солнечных космических лучей. РПЗ делятся на внутренний и внешний, и это деление обосновано как характеристиками заряженных частиц в поясах, так и их изменением во времени [19, 20, 21].

Основным фактором, определяющим образование РПЗ и их особенности, является магнитное поле Земли, его структура. В первом приближении структура магнитного поля Земли — распределение напряженности поля и направление его силовых линий в пространстве подобны распределению этих характеристик вокруг магнитного диполя с магнитным моментом M (для магнитного поля Земли $M = 6,35 \times 10^{21} \text{ А} \cdot \text{м}^2$). На поверхности Земли в районе геомагнитного экватора горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля достигает максимума (средняя напряженность составляет около 25 А/м, магнитная индукция около $0,312 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$), для северного магнитного полюса ($78^\circ 31' \text{ с. ш.}, 70^\circ 01' \text{ з. д.}$) вертикальная компонента напряженности магнитного поля (продольная здесь равна нулю) составляет около 46 А/м. Магнитное поле Земли в десятки тысяч раз больше величины межпланетного магнитного поля, имеющего солнечное происхождение. Средняя напряженность межпланетного поля в спокойные периоды составляет 4 мА/м на расстоянии 1 а. е. от Солнца. При повышенной активности Солнца напряженность межпланетного магнитного поля может возрастать в десятки раз.

Магнитное поле Земли убывает обратно пропорционально кубу расстояния от Земли и на удаленностях, равных 10—15 радиусам Земли ($R_{\text{З}} =$

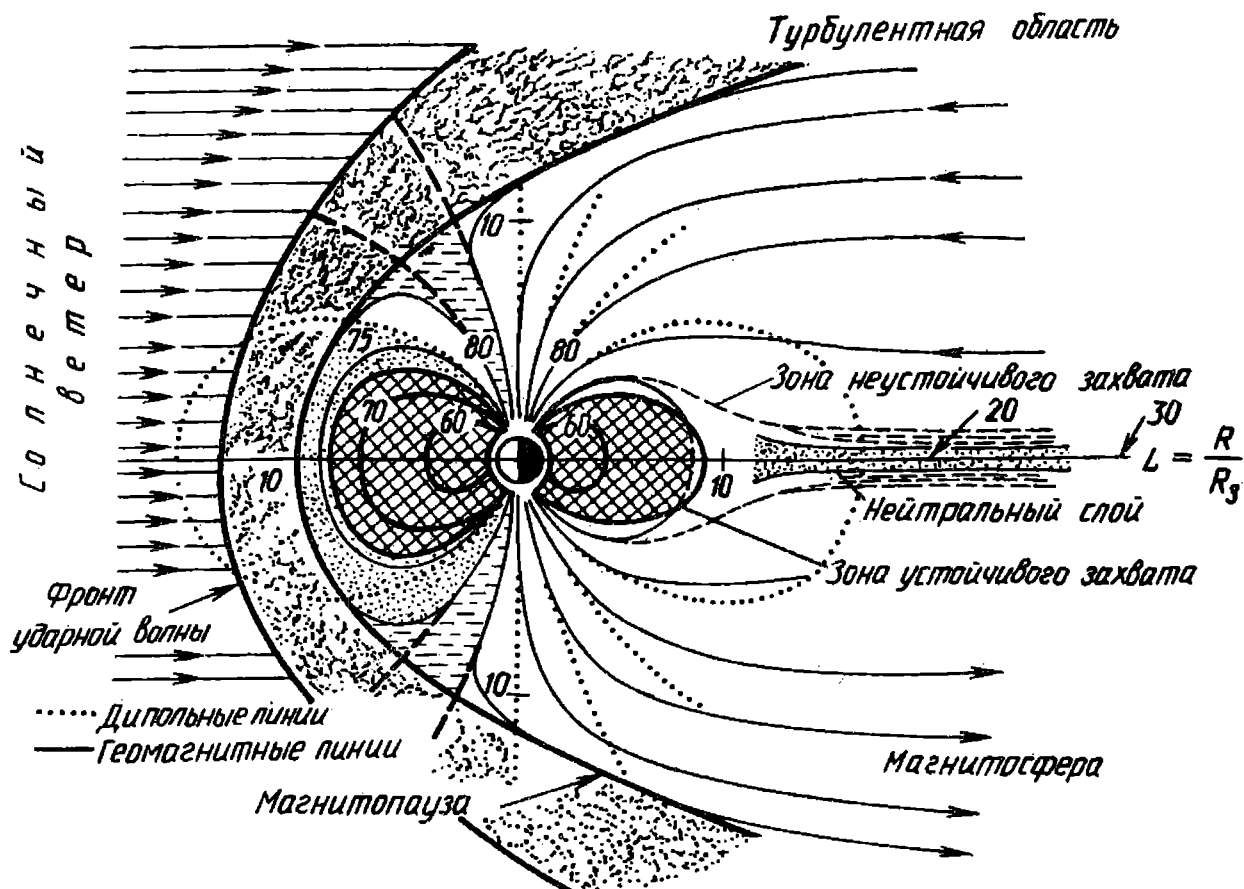


Рис. 8. Меридиональное сечение магнитосферы Земли ($L = R/R_З$ — параметр магнитной оболочки в плоскости экватора; $R_З$ — радиус Земли)

= 6370 км), начинает испытывать воздействие межпланетного магнитного поля и особенно межпланетной (солнечной) плазмы, называемой *солнечным ветром*. Параметры солнечного ветра в невозмущенном состоянии на орбите Земли (в периоды минимума солнечной активности) характеризуются скоростью плазмы 300—400 км/ч и плотностью частиц в потоке порядка 10^7 1/м³.

Средняя плотность потока частиц солнечного ветра составляет 3×10^{12} 1/(м²·с). Средняя энергия протонов (ионов водорода) в солнечном ветре равна 1 кэВ, энергия α -частиц около 4 кэВ, электронов — десятки эВ. При этом число α -частиц в потоке солнечного ветра в десятки раз меньше, чем протонов, а концентрация электронов приблизительно равна концентрации ионов.

Солнечный ветер, достигая окрестностей Земли на удалении (10÷15) $R_З$, воздействует на магнитное поле Земли

таким образом, что на освещенной Солнцем стороне происходит поджатие поля, а на ночной стороне его растяжение (рис. 8). При этом геомагнитное поле оказывается ограниченным в области пространства, называемой *магнитосферой Земли* [23].

Образование РПЗ в значительной степени связано с процессами, происходящими на границе магнитосферы. В результате взаимодействия с магнитосферой заряженные частицы солнечного ветра образуют ударную волну. В области между фронтом ударной волны и границей магнитосферы (магнитопаузой) образуется турбулентная область частиц солнечного ветра — область горячей плазмы.

Со стороны освещенной магнитосферы линии геомагнитного поля качественно подобны силовым линиям магнитного диполя (см. рис. 8), но поджаты к Земле. Внутренняя часть магнитосферы представляет собой зону устойчивого захвата заряженных ча-

стиц, в которой и существуют РПЗ. Геомагнитные линии на ночной стороне магнитосферы вытянуты и замыкаются на очень больших удалениях от Земли (около $100R_E$). Вблизи плоскости экватора Земли геомагнитные линии идут параллельно этой плоскости и имеют противоположное направление в северном и южном полушариях (см. рис. 8).

Вытянутая в сторону от Солнца область называется *хвостом магнитосферы*, а тонкий узкий слой вблизи плоскости экватора — *нейтральным слоем*. У поверхности нейтрального слоя индукция магнитного поля составляет около $2 \cdot 10^{-8}$ Тл, внутри слоя она значительно меньше, ширина слоя составляет около 600 км.

Установлено, что образование нейтрального слоя служит одним из основных путей прорыва солнечной плазмы в хвост магнитосферы. Действительно, нейтральный слой, где геомагнитное поле резко ослаблено, не является препятствием для заряженных частиц солнечного ветра. Переносимые сюда частицы солнечного ветра затем ускоряются геомагнитным полем (от нескольких кэВ до сотен кэВ) и пополняют электроны и протоны соответствующих энергий РПЗ. Другим путем прорыва частиц в магнитосферу Земли служат так называемые *полярные каспы* (нейтральные линии) в северном и южном полушариях, представляющие собой ветвящиеся высокоширотные геомагнитные линии: в местах их излома магнитное поле обращается в нуль и не препятствует прохождению внутрь магнитосферы частиц солнечного ветра. Источник протонов с $E > 30$ МэВ и электронов с $E > 500$ кэВ в РПЗ — проникновение в магнитосферу Земли таких частиц, приходящих в составе солнечных космических лучей (в основном, во время солнечных вспышек), а также *нейтроны альbedo*.

Галактические и солнечные космические лучи, проникая (в силу высокой энергии) во внутренние слои магнитосферы Земли, взаимодействуют с атомами верхней атмосферы и образуют при этом множество вторичных частиц, в том числе и нейтронов. Нейтроны, являясь нейтральными, не

взаимодействуют с геомагнитным полем и некоторая их часть выходит из атмосферы Земли в межпланетное пространство. Этот отраженный поток и представляет нейтроны альbedo космических лучей.

Поскольку нейтрон является неустойчивой частицей, имеет время жизни около 12 мин, распадаясь затем на протон и электрон, то многие нейтроны альbedo успевают распасться в магнитосфере Земли, пополняя зону устойчивого захвата высокоэнергичными протонами и электронами (высокоэнергичные электроны захватываются магнитным полем не столь эффективно, как протоны).

Выходу заряженных частиц из магнитосферы препятствует конфигурация силовых линий (см. рис. 8) геомагнитного поля, создающего для заряженных частиц своеобразную *магнитную ловушку*. Попавшие в магнитную ловушку частицы совершают сложное движение. На заряженную частицу в магнитном поле действует сила

$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \vec{B}),$$

где q — заряд частицы; $\vec{E}$ — вектор электрического поля; $\vec{B}$ — вектор магнитного поля; $\vec{v}$ — вектор скорости частицы. Таким образом, вектор движения частицы складывается из двух составляющих: равноускоренного движения под действием силы $q\vec{E}$ и вращения вокруг вектора магнитного поля.

С первой составляющей связано электрическое поле в магнитосфере, определяемое вращением Земли и движением плазмы солнечного ветра вдоль магнитопаузы. В результате вдоль поверхности магнитопаузы текут квазистационарные токи, а в самой магнитосфере, в том числе ионосфере, текут токи, меняющиеся во времени и служащие источником магнитных бурь.

Сравнительно медленное движение заряженных частиц в направлении, параллельном плоскости экватора (скорость этого движения зависит от энергии и массы частиц), происходит неодинаково для электронов и протонов: электроны дрейфуют вокруг

Земли в восточном направлении, положительно заряженные частицы (протоны, α -частицы) — в западном направлении (рис. 9). Полный оборот вокруг Земли частицы совершают за время от нескольких минут (высокоэнергичные частицы) до нескольких суток.

Под действием второй составляющей $q\vec{v} \times \vec{B}$ частицы совершают колебательное движение по спиральной траектории вдоль геомагнитной линии из Северного полушария в Южное и обратно, как это показано на рис. 9. В однородном и постоянном магнитном поле заряженная частица будет двигаться по окружности, если угол между вектором скорости частицы и направлением силовых линий, называемый *питч-углом*, составит 90° .

Поскольку для большинства частиц питч-угол отличен от 90° , то частица движется по спирали. Шаг спирали и ее радиус постепенно уменьшаются из-за увеличения напряженности магнитного поля при приближении частицы к Земле. Вектор скорости частицы, оставаясь неизменным по величине, при этом приближается к плоскости, перпендикулярной вектору напряженности (индукции) магнитного поля. В некоторой точке, называемой зеркальной или точкой отражения, шаг спирали становится равным нулю (мгновенный питч-угол составляет 90°), после чего направление движения частицы меняется, она начинает двигаться в обратном направлении — к сопряженной зеркальной точке в противоположном полушарии.

Для электронов и протонов РПЗ радиус вращения, называемый *ларморовским*, ориентировочно определяется по формуле [14], км:

$$\rho \approx \frac{33 \cdot 10^4 \sin \alpha}{B} E_0 \times \sqrt{\left(\frac{E_K}{E_0}\right)^2 + 2 \frac{E_K}{E_0}}, \quad (11)$$

где α — питч-угол; B — магнитная индукция поля, Тл; E_K — кинетическая энергия частицы, МэВ; E_0 — энергия покоя частицы, МэВ (для электронов $E_0 = 0,511$ МэВ, для протонов $E_0 = 938$ МэВ).

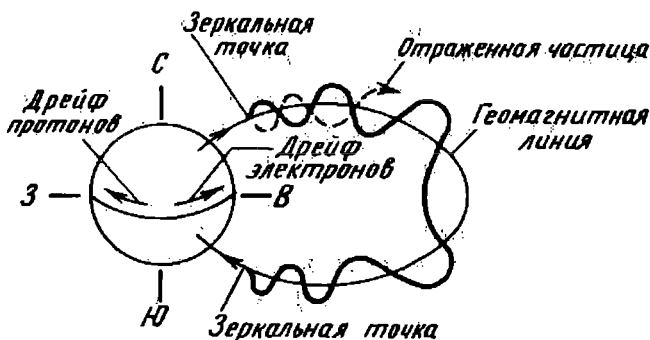


Рис. 9. Траектории движения заряженных частиц в магнитосфере Земли

Например, электроны с энергией $E_K = 1$ МэВ при $\alpha = 30^\circ$ на высоте над земной поверхностью около 18 тыс. км (в плоскости экватора) имеют $\rho = 2,3$ км, а протоны с энергией 30 МэВ — $\rho = 240$ км.

Положение зеркальных точек можно определить с помощью уравнения, связывающего значение магнитной индукции в точке отражения частиц ($B_{отр}$, Тл), питч-углом частиц на экваторе (α_0) и удалением от Земли данной магнитной оболочки (на экваторе):

$$B_{отр} = \frac{0,312 \cdot 10^{-4}}{L^3 \sin^2 \alpha_0}, \quad (12)$$

где L — параметр магнитной оболочки геомагнитной линии, который равен расстоянию (в радиусах Земли) от магнитного центра Земли до точки пересечения геомагнитной линии с плоскостью экватора.

Параметр L широко используется в космической физике для определения любой точки пространства по значениям магнитной индукции B и параметра L (система геомагнитных координат B, L).

Составлены специальные таблицы, графики и карты, позволяющие найти значения L и B для любой искомой точки (на картах магнитная индукция указывается в Тл, номера магнитных оболочек в радиусах Земли) [11, 21, 23].

Параметр L имеет и простой физический смысл: на оболочках с небольшими значениями L существуют заряженные частицы, обладающие большими энергиями, чем частицы, захваченные магнитными оболочками с большими значениями L (чем мень-

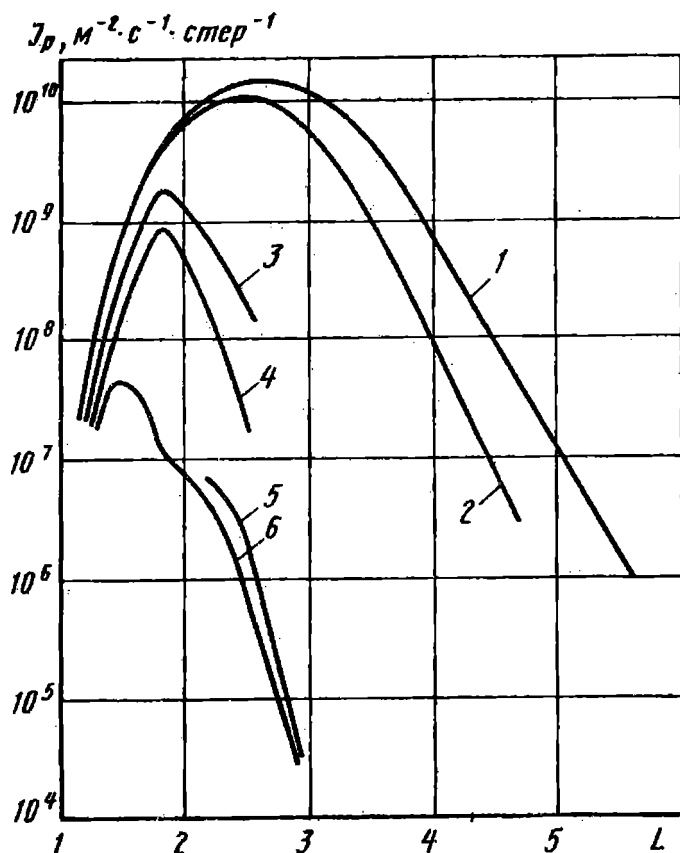


Рис. 10. Потоки протонов различных энергий в плоскости экватора в зависимости от расстояния над поверхностью Земли:

1 — $E_p > 1$ МэВ; 2 — $E_p > 1,6$ МэВ; 3 — $E_p > 5$ МэВ; 4 — $E_p > 9$ МэВ; 5 и 6 — $E_p > 30$ МэВ (J_p — поток протонов различной энергии)

ше L , тем больше напряженность магнитного поля Земли). Это и обусловило деление РПЗ на *внутренний пояс*, «населенный» высокоэнергичными частицами, и на *внешний пояс*, удерживающий частицы сравнительно невысоких энергий.

Внутренний РПЗ характеризуется наличием протонов высоких энергий от 20 МэВ до 800 МэВ. Протоны больших энергий почти не удерживаются магнитным полем Земли. Максимум плотности потока протонов с $E_p > 40$ МэВ достигает $2 \cdot 10^8$ протон/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$) и находится на расстоянии $L \sim 1,5$ (удаление от Земли в плоскости экватора составляет около 3300 км). На рис. 10 [19] представлено экваториальное положение поясов протонов различных энергий. Оболочки L в меридиональном сечении пересекают

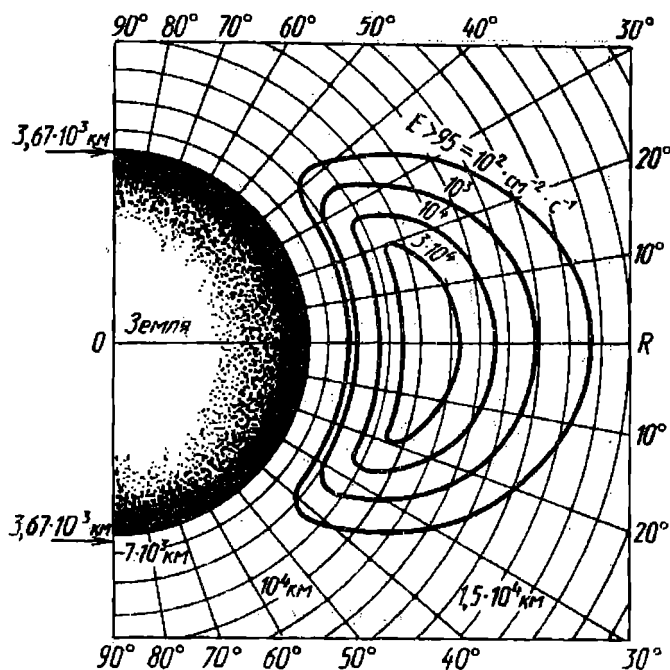


Рис. 11. Распределение потоков протонов с энергией больше 35 МэВ во внутреннем поясе (цифры на контурах обозначают значения потока протонов в $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)

поверхность Земли на более низких или более высоких широтах (в зависимости от того, больше или меньше напряженность магнитного поля на оболочках L), а следовательно, больше или меньше энергия протонов, удерживаемых на оболочке (рис. 11). Внутренний протонный пояс ограничен широтами не более $\pm 45^\circ$.

Во внутреннем РПЗ имеются также электроны с энергиями от 20—40 кэВ до 1 МэВ (иногда и выше). Плотность потока электронов с $E_e > 40$ кэВ достигает 10^9 — 10^{10} электрон/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$).

С внешней стороны магнитосферы внутренний РПЗ ограничен магнитными оболочками с $L < 2,2 \div 2,5$. Ближе всего к поверхности Земли внутренний РПЗ располагается в районе отрицательных магнитных аномалий (области с аномально слабой напряженностью магнитного поля по сравнению с обычными его значениями на соответствующих высотах в других областях). Наиболее сильная магнитная аномалия — Южно-Атлантическая, а ее часть, в которой величина B достигает абсолютного минимума, находится в районе побережья Бразилии и называется Бразильской

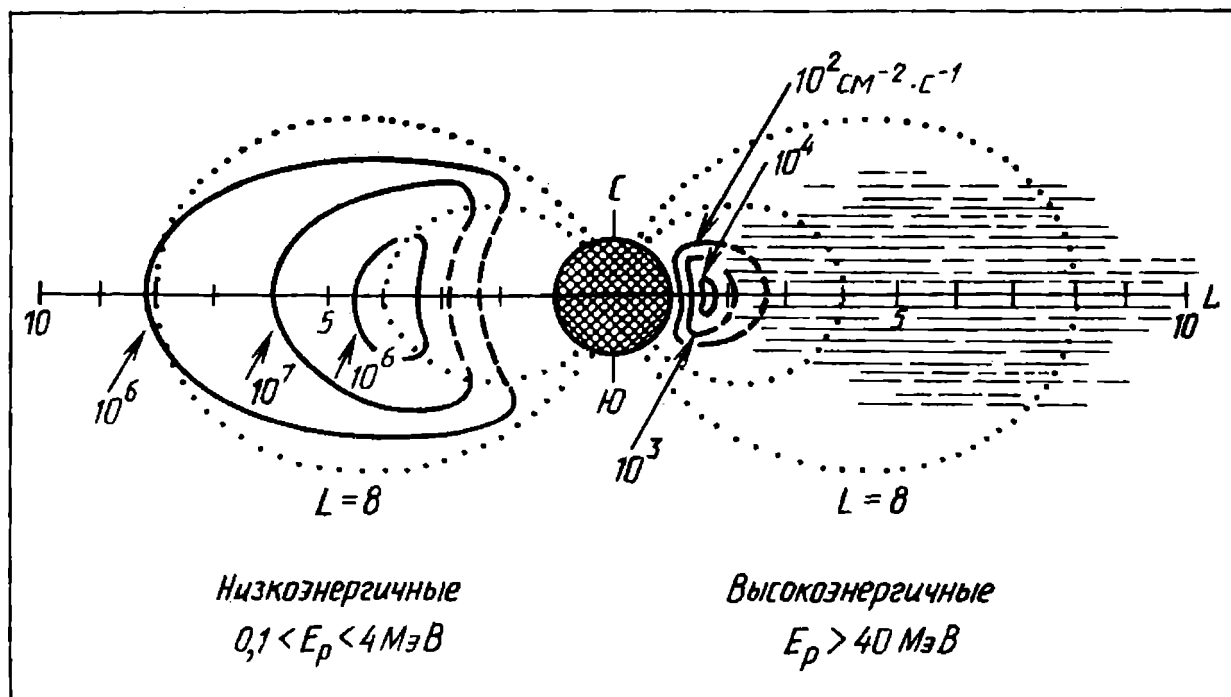


Рис. 12. Пространственное распределение потоков протонов с низкой и высокой энергией (заштрихованная область соответствует меняющимся во времени потокам протонов)

магнитной аномалией. В районе этой аномалии внутренний РПЗ опускается до 200—300 км. Необходимо заметить, что в процессе долготного дрейфа вокруг Земли заряженные частицы в районах магнитных аномалий настолько приближаются к Земле, что попадают в достаточно плотные слои атмосферы, при столкновении с атомами и молекулами теряют свою энергию, рассеиваются и поглощаются в атмосфере.

Но и в других районах над Землей нижняя граница внутреннего РПЗ не одинакова: например, над США она находится на высоте 600 км, а над Австралией 1600 км.

Максимум внутреннего РПЗ находится на $L = 1,5$ (~1800 км в плоскости экватора). Здесь поток протонов $E_p > 40$ МэВ достигает 2×10^8 $1/(m^2 \cdot c)$ и более.

Внешний РПЗ характеризуется наличием электронов с энергиями преимущественно 40—100 кэВ, но в поясе наблюдаются и потоки электронов с высокой энергией (1—2 МэВ и выше). Максимальная плотность потока низкоэнергичных частиц в среднем составляет 10^9 — 10^{11} электрон/ $(m^2 \cdot c)$

и находится на $L \approx 4,5$. При этом в центральной области внешнего РПЗ ($L = 4,0 \div 4,5$ в плоскости экватора) плотность потока электронов с $E_e > 40$ кэВ составляет $3 \cdot 10^{11}$ $1/(m^2 \cdot c)$, с $E_e > 230$ кэВ — $3 \cdot 10^{10}$ $1/(m^2 \cdot c)$, с $E_e > 1,6$ МэВ — $3 \cdot 10^9$ $1/(m^2 \cdot c)$. Временные вариации этих потоков в зависимости от состояния магнитосферы могут достигать двух порядков (с увеличением L возрастает уровень вариаций).

Во внешнем РПЗ существуют также протоны, преимущественно с энергией 100 кэВ $< E_p < 5$ МэВ, причем плотность потока протонов достаточно высока [в области энергий порядка 1 МэВ она достигает $5 \cdot 10^9$ $1/(m^2 \cdot c)$] и в отличие от электронов внешнего пояса протонные потоки достаточно устойчивы.

Внешний пояс в основном заключен между магнитными оболочками $L \sim 3$ и $L = 6 \div 7$. Среднее время жизни заряженных частиц внешнего РПЗ больше, чем у частиц внутреннего РПЗ, и достигает 3000 ч и более. Спектр энергий электронов становится более жестким по мере приближения магнитных оболочек к Земле.

Пространственное расположение, энергетические спектры и плотность потока электронов внешнего РПЗ сильно меняются с течением времени. Наибольшее влияние на эти характеристики оказывает солнечная активность. При сильных солнечных вспышках во внешнем поясе часто регистрируются потоки электронов с энергией 4—6 МэВ [23].

Считается, что основным источником электронов внешнего РПЗ является диффузия частиц из внешних областей магнитосферы, в том числе из ее хвоста, в глубь магнитосферы. При этом диффузия происходит во время магнитных суббурь и других колебаний геомагнитного поля. Максимум плотности потока частиц той или иной энергии соответствует магнитной оболочке, для которой время диффузии от границы пояса приблизительно равно времени жизни частиц. Процесс диффузии частиц, проникающих с границы зоны устойчивого захвата во внешней магнитосфере во внутренние ее области, сопровождается увеличением кинетической энергии частиц за счет ускорения (по мере прохождения частицы во внутренние области возрастает величина индукции магнитного поля).

Наряду с внутренним и внешним РПЗ, имеющими вполне определенную конфигурацию и сравнительно хорошо изученные характеристики, существуют и другие зоны радиации. Это пояс протонов малых энергий ($E_p < 10$ МэВ), простирающийся между магнитными оболочками $L > 1,5$ до 8 (рис. 12). Другой зоной является зона квазизахвата, расположенная на $L > 7$, т. е. за внешним РПЗ. Основными частицами в области квазизахвата являются электроны и протоны малых энергий (менее 100 кэВ). Зона квазизахвата «проецируется» на Землю на высоких широтах (более 60°), т. е. совпадает с областью максимальной частоты возникновения полярных сияний.

7. ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ

Наряду с естественными РПЗ в магнитосфере Земли могут быть образованы искусственные РПЗ. С этой

целью на определенных высотах над Землей и широтах инжектируются заряженные частицы с помощью специальных источников частиц. Наиболее мощные искусственные РПЗ можно образовать с помощью высотных ядерных взрывов. Высота взрыва в этих целях должна быть более 200 км, иначе значительная часть заряженных частиц не сможет быть устойчиво захвачена магнитным полем и эффективно поглотится атмосферой. Использование очень больших высот (более 2000—3000 км) также неэффективно, так как магнитное поле там слабее и искусственный пояс, охватывая огромные пространства магнитосферы, не вызовет значительного повышения плотности потока частиц.

Помимо ядерного взрыва искусственные РПЗ можно образовывать путем испарения в космическом пространстве радиоактивных веществ, являющихся источниками α - или β -распада (с небольшими значениями периода полураспада). Испарение можно осуществить с помощью обычного взрыва. Кроме того, достаточно узкий искусственный РПЗ возможно образовать с помощью электронного или протонного ускорителя, доставленного на заданную орбиту ИСЗ.

Рассмотрим процесс образования искусственных РПЗ с помощью ядерных взрывов. Механизмы инжекции заряженных частиц различны для реакций деления и синтеза [21, 23, 25]. При ядерном взрыве обычной атомной бомбы, основанной на реакции деления, основная доля энергии расходуется на осколки деления. При взрыве термоядерной бомбы основная доля энергии выделяется при реакции синтеза. В реакции синтеза обычно принимают участие дейтерий (d) и тритий (t). В реакциях (d, d) образуются нейтроны с энергией около 3 МэВ, в реакциях (d, t) энергия нейтронов составляет около 14 МэВ. При распаде этих нейтронов образуются электроны и протоны с энергией 3 и 14 МэВ соответственно. Однако выход заряженных частиц в реакции синтеза значительно меньше, чем при реакциях деления. При системе ядерного взрыва «деление — синтез — деление» основной реакцией будет реакция деления.

Осколки деления (при ядерном взрыве) представляют в основном радиоактивные изотопы различных элементов. При делении ядер каждый из осколков испускает за счет β -распада примерно пять-шесть электронов. Энергетический спектр электронов β -распада осколков деления занимает широкий спектр, вплоть до 10 МэВ. Средняя энергия электронов составляет около 1 МэВ (47% образующихся электронов). Осколки деления космического ядерного взрыва разлетаются от точки взрыва со скоростью 10^9 км/с и, будучи ионизированными, взаимодействуют с магнитным полем Земли, препятствующим их уходу во внешнее пространство и в слои атмосферы (хотя значительная часть осколков деления проникает в верхние слои атмосферы, теряет там свою энергию и гибнет). При ядерном взрыве мощностью в 1 кт происходит $1,5 \cdot 10^{23}$ делений ядер и при этом выделяется около 10^{24} электронов в спектре от 0 до 10 МэВ, которые имеют скорость, близкую к скорости света. Подобные электроны эффективно захватываются магнитным полем, совершая колебания между зеркальными точками, и, таким образом, образуют искусственный РПЗ.

Но далеко не все электроны захватываются магнитным полем: электроны с небольшимиpitch-углами «смываются» в нижние слои атмосферы (ниже 100 км над Землей) и гибнут при взаимодействии с атомами атмосферы. При этом эффективность захвата с увеличением высоты взрыва возрастает от 0,1% на высотах около 100 км (над экватором) до 0,9 на высотах около 2500 км (над экватором).

Кроме основной составляющей потока электронов в искусственном РПЗ за счет β -распада осколков деления имеет место и дополнительная, более слабая, составляющая за счет распада нейтронов, число которых при взрыве ядерной бомбы мощностью 1 кт составляет 10^{23} со средней энергией около 1 МэВ. Сами нейтроны не захватываются магнитным полем, но при своем распаде создают электроны и протоны, которые могут быть захвачены магнитным полем, если нейтрон не успеет до момента распада (в тече-

ние 12 мин) достигнуть плотных слоев атмосферы и там погибнуть или выйти за пределы магнитосферы Земли. Поэтому электроны за счет распада нейтронов, распределяясь на большие области магнитосферы, создают примерно на три порядка меньшую плотность потока по сравнению с электронами β -распада осколков деления. Ионизированные осколки деления тормозятся магнитным полем, имеют существенно меньшую скорость по сравнению с нейтронами, вследствие чего β -распад происходит в локализованной области магнитосферы, что и обуславливает высокую плотность потока электронов β -распада.

Вообще говоря, число электронов в элементарном объеме космического пространства не является большим, но вследствие их большой скорости, близкой к скорости света, плотность потока оказывается большой. Поэтому при средней концентрации в кубическом сантиметре всего один электрон, плотность потока электронов составит около $3 \cdot 10^{13}$ электрон/(см²·с).

Ядерные взрывы производились в космическом пространстве в 1958 и 1962 гг. Наиболее изученным является ядерный взрыв «Старфиш», произведенный США в июле 1962 г. над островом Джонстон (в центральной части Тихого океана) на высоте 400 км. Мощность ядерного боеприпаса была 1,45 Мт. В результате взрыва «Старфиш» образовался искусственный РПЗ в области $L = 1,15 \div 1,6$ (в экваториальной области — на высоте более 900 км до высоты около 4000 км). Плотность потока электронов в искусственном поясе в тысячи раз превысила плотность потока на указанных L -оболочках до взрыва «естественных» электронов и для электронов с $E_e > > 40$ кэВ максимальная плотность потока достигала примерно 10^{13} электрон/(м²·с) [23, 25].

Следует указать на серьезную опасность, которую представляют собой искусственные РПЗ для функционирования КА. Так, вскоре после ядерного взрыва «Старфиш» отказали три ИСЗ, запущенные США. При этом уменьшение потоков электронов в искусственных РПЗ происходит сравнительно медленно: за время около двух

месяцев после взрыва «Старфиш» плотность потока электронов уменьшилась всего на 50%, а для полного рассасывания искусственного пояса потребовалось более восьми лет.

При взрыве «Старфиш» также наблюдалось значительное изменение структуры внутреннего РПЗ. Так, через три недели после взрыва на высоте 400 км в районе Южно-Атлантической аномалии плотность потока протонов с энергией 55 МэВ была в пять раз выше, чем до взрыва. Это может быть объяснено перемещением высокоэнергичных протонов из более высоких участков внутреннего РПЗ в нижние участки. При этом из-за сильного вертикального градиента потока протонов даже перемещение нескольких их процентов приводит к большим изменениям на малых высотах (время движения протонов между зеркальными точками при малых значениях L значительно сокращается), т. е. плотность потока увеличивается.

8. ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Оценка радиационных условий на борту КА представляет весьма сложную задачу. Во-первых, как было показано, источники космических ионизирующих излучений имеют многообразие энергетических распределений и плотностей потоков заряженных частиц в зависимости от параметров орбиты КА (часто значительно меняются от одного участка траектории движения КА к другому). Во-вторых, различные отсеки КА (обитаемые, приборные, энергетические и т. д.) имеют различные конфигурацию, толщину и химический состав конструкционных материалов. Все это приводит к необходимости индивидуального расчета радиационных условий при проектировании КА или подготовке его к полету [21, 26]. При соответствующих расчетах приходится находить совместное решение уравнений пространственно-временного распределения потоков заряженных частиц и траектории движения КА.

Вместе с тем, в большом числе практических задач достаточно иметь приближенные или средние значения параметров, определяющих возможность или невозможность обеспечения радиационной безопасности экипажа или аппаратуры КА при данных траектории его полета и времени активного существования. В этих случаях можно использовать метод траекторных коэффициентов [6], позволяющий найти значения поглощенной дозы радиации за защитой 1 г/см² (по алюминию). Исходными данными для вычисления поглощенной дозы являются следующие: высота апогея орбиты КА (H_a), высота перигея (H_p), угол наклона орбиты (i), угловое расстояние перигея (ω), время активного существования (t_a), максимальная мощность дозы в околоземном космическом пространстве за защитой 1 г/см² (А1). При этом значение поглощенной дозы D^* составляет, рад/сут:

$$D = p_0 k_1 k_2 k_3 t_a, \quad (13)$$

где $p_0 = 500$ рад/сут — максимальная мощность дозы за защитой 1 г/см² (А1); k_1 — коэффициент, определяющий зависимость дозы радиации от высоты апогея H_a и перигея H_p (рис. 13); k_2 — коэффициент, определяющий зависимость дозы радиации от угла наклона орбиты i (рис. 14); k_3 — коэффициент, определяющий зависимость дозы радиации от углового расстояния перигея ω (рис. 15).

Коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 определяются по следующим формулам:

$$k_1 = \frac{p_{cp}(H_a \text{ var}, H_p \text{ var}, i = \text{const}, \omega = \text{const})}{p_0},$$

где $p_{cp}(H_a \text{ var}, \dots)$ — среднее значение мощности дозы для орбиты с данными значениями высот апогея и перигея,

* Единица измерения дозы излучения, рад, является внесистемной единицей, получившей на практике наибольшее распространение. Перевод к системной единице грей весьма прост ($100 \text{ рад} = 1 \text{ Гр}$).

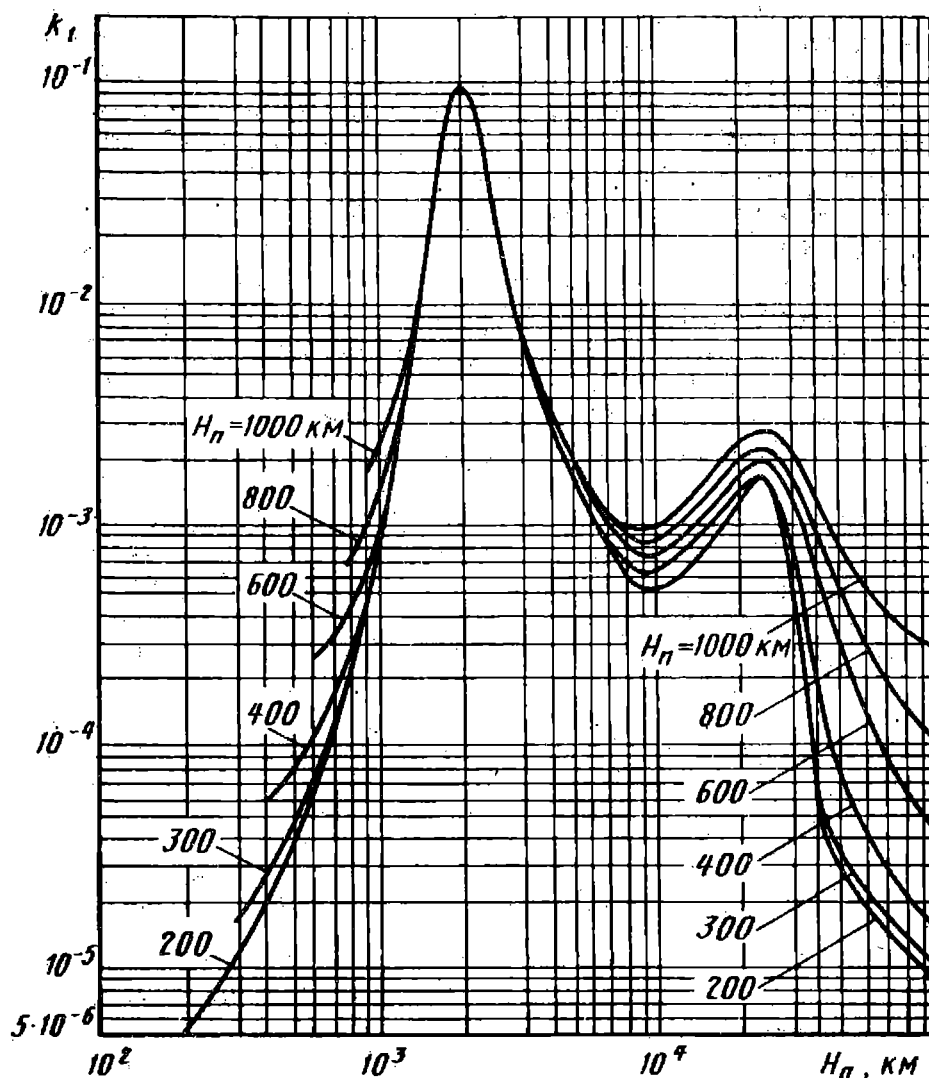


Рис. 13. Зависимость изменения коэффициента k_1 от высоты H_a апогея орбиты КА (высота $H_n = 200 \div 1000$ км)

которые варьируются при постоянных значениях параметров i и ω ;

$$k_2 = \frac{\rho_{\text{ср}}(H_a \text{ var}, H_n \text{ var}, i = \text{var}, \omega = \text{const})}{\rho_{\text{ср}}(k_1)};$$

$$k_3 = \frac{\rho_{\text{ср}}(H_a \text{ var}, H_n \text{ var}, i_{\text{var}}, \omega = \text{var})}{\rho_{\text{ср}}(k_1)},$$

где $\rho_{\text{ср}}(k_1)$ — среднее значение мощности дозы, определенное для условий вычисления коэффициента k_1 .

Пример. Найдём поглощенную дозу радиации для КА, имеющего: $H_a = 3500$ км; $H_n = 500$ км; $i = 65^\circ$; $\omega = 60^\circ$; $t_a = 10^3$ сут.

С помощью рис. 13 определяем $k_1 = 7 \cdot 10^{-2}$; рис. 14 — $k_2 \approx 1,3$, рис. 15 —

$k_3 \approx 10$. Подставляя полученные значения в формулу (13), получим

$$D = 500 \cdot 7 \cdot 10^{-2} \cdot 1,3 \cdot 10 \cdot 10^3 = 455 \cdot 10^3 \text{ рад.}$$

Эта доза будет воздействовать на аппаратуру, узлы, агрегаты, расположенные за защитой 1 г/см^2 (Al), соответствующей толщине алюминиевого листа около 3 мм. Если защита тех или иных отсеков КА меньше или больше 1 г/см^2 (Al), то необходимо соответственно увеличить или уменьшить поглощенную дозу радиации, полученную при расчете по формуле (13).

Перевод толщины защиты R , выраженной в г/см^2 , в длину l пробега заряженной частицы, выраженной в см,

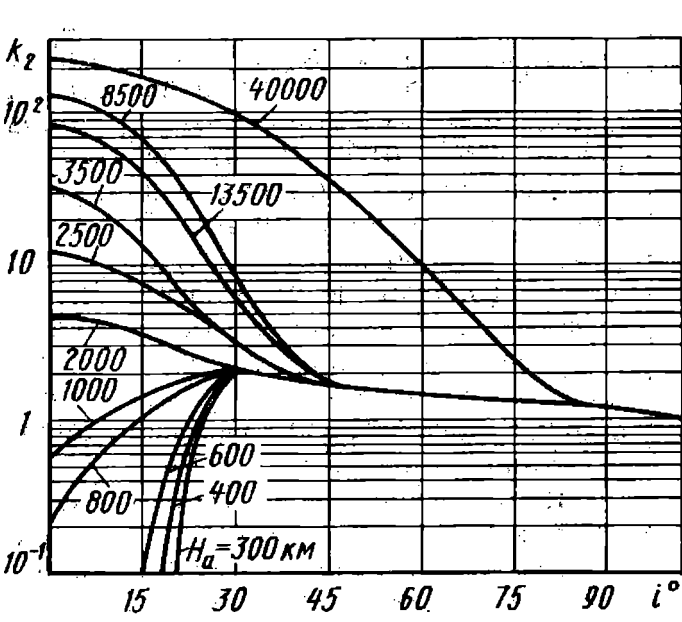


Рис. 14. Зависимость изменения коэф-фициента k_2 от угла наклона орбиты i ($H_{\Pi} = 200 \div 1000$ км)

проводится по формуле

$$R = l\rho,$$

где ρ — плотность вещества, г/см³ (для алюминия $\rho = 2,7$ г/см³).
В табл. 7 приведены пробеги (преодоление защиты) протонов и электронов в веществах в зависимости от энергии.

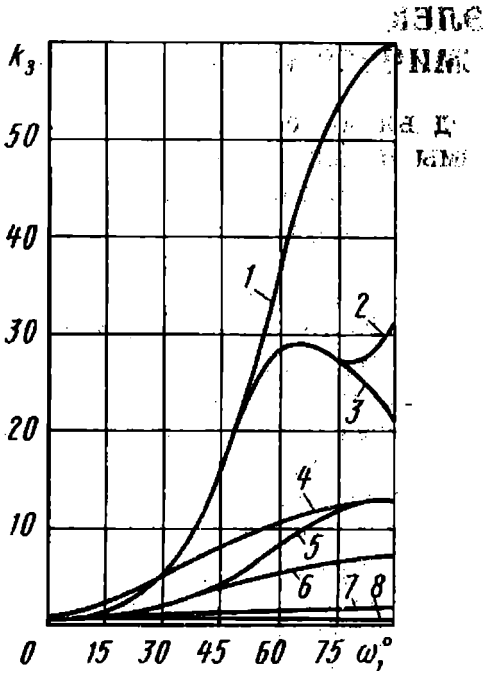


Рис. 15. Зависимость изменения коэф-фициента k_3 от углового расстояния перигея ω ($H_{\Pi} = 200 \div 1000$ км):

1 — $H_a = 8500$ км ($i = 45 \div 90^\circ$); 2 — $H_a = 13\,500$ км ($i = 45$ и 60°); 3 — $H_a = 13\,500$ км ($i = 75$ и 90°); 4 — $H_a = 3500$ км ($i = 45 \div 90^\circ$); 5 — $H_a = 600$ км ($i = 15^\circ$); 6 — $H_a = 400$ км ($i = 15^\circ$), $H_a = 3500$ км ($i = 30^\circ$); 7 — $H_a = 400$ км ($i = 0 \div 90^\circ$), $H_a = 600$ км ($i = 30 \div 90^\circ$), $H_a = 800$ км ($i = 0 \div 90^\circ$), $H_a = 1000$ км ($i = 0 \div 90^\circ$), $H_a = 13\,500$ км ($i = 0 \div 15^\circ$); 8 — $H_a = 2000$ км ($i = 0 \div 90^\circ$)

7. Пробеги протонов и электронов в веществах

Протоны E_p , МэВ	Преодоление защиты, г·см ⁻²			
	Воздух	Алюминий	Кремний	Железо
5	0,042	0,052	0,051	0,066
10	0,143	0,170	0,165	0,208
20	0,492	0,574	0,558	0,687
30	1,020	1,174	1,147	1,396
40	1,712	1,961	1,915	2,315
50	2,557	2,921	2,851	3,430

Электроны E_e , МэВ	Максимальный пробег, см			
	Воздух	Вода	Алюминий	Железо
0,1	12,6	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
0,5	154,7	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$3,16 \cdot 10^{-2}$
1	379,7	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$20,3 \cdot 10^{-2}$	$7,63 \cdot 10^{-2}$
2	690,5	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$50,0 \cdot 10^{-2}$	$10,5 \cdot 10^{-2}$
3	1276,1	$14,8 \cdot 10^{-2}$	$68,5 \cdot 10^{-2}$	$25,2 \cdot 10^{-2}$
5	2095,9	$25 \cdot 10^{-2}$	$114 \cdot 10^{-2}$	$41,2 \cdot 10^{-2}$

9. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Под влиянием потоков космической плазмы и некоторых других факторов КА приобретают определенный электрический заряд, вследствие чего поверхности КА имеют некоторый потенциал относительно окружающей плазмы. Величина и знак электрического заряда (и потенциала) зависят от параметров плазмы (концентрации заряженных частиц, их энергии и др.), а также от электрофизических свойств материалов внешних оболочек КА, их конструктивных исполнений. Кроме того, характер электризации (величина заряда) в значительной мере зависит от того, на освещенном Солнцем или теневом участке орбиты (при движении вокруг Земли) находится КА, освещены или нет отдельные участки его поверхности.

Если бы внешняя поверхность КА была электрически идеально однородной (проводящей или диэлектрической), то влияние электризации, вероятно, не было бы опасным для нормального функционирования КА. Однако значительная часть поверхности КА защищена терморегулирующими и другими покрытиями из диэлектрических материалов, а остальная часть выполнена металлической (часто из разнородных металлов). Поэтому между отдельными участками поверхности КА образуются неодинаковые потенциалы, которые практически не выравниваются. Особенно сильными эффекты электризации оказывались для геостационарных КА (высота орбиты в экваториальной плоскости 36 000 км). Проведенные измерения на геостационарных КА показали, что заряды, накапливающиеся на отдельных участках их поверхности, являются отрицательными и могут достигать 10—20 кВ и более [2].

Незаряженное тело, помещенное в изотермическую плазму, т. е. плазму, состоящую из отрицательно заряженных электронов и положительных ионов с одинаковыми кинетическими энергиями, будет заряжаться отрицательно. Это объясняется тем, что электроны по сравнению с ионами при равной энергии имеют большую

скорость из-за меньшей массы. Если масса электрона составляет $9,108 \times 10^{-31}$ кг, то масса наиболее легких положительных ионов — протонов равна $1,672 \cdot 10^{-27}$ кг. В результате средняя скорость теплового движения электронов в изотермической плазме в 43 раза больше скорости протонов. Таким образом, в начальный момент времени на незаряженное тело из окружающей плазмы поступают в основном электроны и заряжают тело отрицательно. В следующий момент электрическое поле, образованное отрицательно заряженным телом, будет тормозить поток электронов и, наоборот, притягивать положительные ионы. Поэтому потоки электронов и протонов, поступающие на тело, будут постепенно выравниваться. При равенстве электронного и ионного потоков установится отрицательный равновесный потенциал.

При энергии падающих частиц плазмы более нескольких десятков электронвольт эти частицы будут выбивать с поверхности тела *вторичные электроны*. Если поверхность тела освещается Солнцем, то будет образовываться *фотоэлектронный ток* (электроны вырываются с поверхности тела фотонами солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучений). Фотоэлектронный ток, как и вторичные электронные токи, будут уносить с тела отрицательный заряд.

Равновесный потенциал, пропорциональный средней энергии электронов плазмы (температура плазмы), всегда будет устанавливаться при равенстве нулю суммарного тока, текущего через поверхность тела. Изменение составляющей тока, текущего от тела или к телу, вызывает соответствующий обмен зарядами между поверхностью тела и окружающей плазмой до тех пор, пока суммарный ток снова не станет равным нулю. Но это произойдет при другом значении потенциала поверхности тела относительно плазмы.

Определяющее значение в балансе токов на поверхности тела имеет соотношение между электронным и фотоэлектронным токами. Если фотоэлектронный ток равен нулю (на неосвещенной стороне) или меньше элек-

тронного тока, то тело будет, как правило, заряжаться отрицательно (в ряде случаев отрицательный заряд будет компенсироваться вторичным электронным током). Отрицательный потенциал в космическом пространстве может достигать 15—20 кВ. Если фотоэлектронный ток превысит электронный, то тело будет заряжаться положительно и потенциал будет достигать плюс 10—15 В.

Электризация в ионосфере. При полете КА на орбитах 150—800 км, т. е. в пределах ионосферы, зарядение его поверхности имеет ряд особенностей. Ионосфера [12, 18, 23] представляет собой область частично ионизированной верхней атмосферы, свойства которой зависят от высоты над Землей, интенсивности солнечного и галактического излучений, географической обстановки и др. Обычно ионосферу делят на ряд областей (область D на высотах 50—80 км, область E на высотах 80—130 км, область F_1 на высотах 150—250 км, область F_2 на высотах от 250 до 800—1000 км). Главный максимум ионосферы (в области F_2) находится на высоте 300—350 км. Ионосфера состоит из свободных электронов и, в основном, положительных ионов. Концентрация заряженных частиц в ионосфере сравнительно мала в области D , составляя не более 10^3 см^{-3} днем и 10 см^{-3} ночью, растет с высотой (на высоте 150 км днем превышает 10^5 см^{-3}) и достигает максимума на высоте примерно 300 км (днем $1,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, ночью 10^4 см^{-3}). Далее концентрация ионосферной плазмы плавно уменьшается с высотой и на высоте 800 км составляет 10^5 см^{-3} днем и $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ночью, а на высоте 1000 км — $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ днем и $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ночью.

Температура электронов днем на высоте 100 км составляет 240 К, на высоте 300 км — 2000 К, на высоте 800 км почти 3000 К и продолжает с высотой возрастать. В ночные часы температура электронов значительно ниже и на высоте 300 км равна 1200 К. Следует подчеркнуть, что температура электронов на высотах более 100 км и днем, и ночью выше температуры ионов. На высоте 100 км температура ионов днем составляет 210 К

(ночью 210 К), на высоте 300 км — 1400 К (ночью 930 К), на высоте 800 км — 2300 К (ночью 1200 К).

Таким образом, на низких орбитах движения КА температура ионосферной плазмы в среднем составляет около 1000 К, а следовательно, соответствующая ей кинетическая энергия частиц — около 0,1 эВ. Скорость электронов при этом равна примерно 200 км/с, а скорость положительных ионов всего около 1 км/с. Это скорость ионов атомарного кислорода, которые преобладают в ионосферной плазме на высотах 300 км и более. Скорость движения КА составляет 8 км/с, т. е. ионы можно рассматривать как неподвижные, а КА как бы набегают на них.

Плотность потока электронов, падающего на поверхность КА, и плотность потока положительных ионов в ионосфере значительно превосходят плотность потока фотоэлектронов с освещенной части поверхности КА. Кроме того, вследствие малой энергии частиц в ионосфере отсутствует поток вторичных электронов. Поэтому в ионосфере потенциал поверхности КА определяется, в основном, соотношением электронного и ионного токов в окружающей плазме, т. е. КА приобретает значительный отрицательный потенциал. Он составлял бы доли вольта, если бы не эффект *ионной тени*, который состоит в том, что передние участки поверхности движущегося КА «набегают» на ионы и за КА образуется область с пониженной концентрацией ионов. Что же касается электронов, то за счет их большой скорости, в десятки раз превышающей скорость КА, их концентрация за КА снижается незначительно. Поэтому в области ионной тени на поверхность КА попадают преимущественно электроны, и это обуславливает возникновение более высокого отрицательного потенциала на соответствующих участках поверхности КА.

В результате действия указанных и некоторых других эффектов отрицательные потенциалы поверхности КА достигают 3—5 В [2]. Подобные потенциалы не опасны для функционирования бортовой аппаратуры КА,

но они могут приводить к искажениям в работе измерительных устройств, поскольку и при таких небольших потенциалах, неодинаковых на различных участках поверхности КА, могут возникать электрические разряды и соответствующие им электромагнитные помехи.

Заряжение поверхности КА вызывает также дополнительное его торможение в ионосфере из-за действия на заряженный КА кулоновских сил со стороны ионосферной плазмы. Кстати, вследствие индукции вихревых токов в металлических частях КА (при движении в геомагнитном поле) также появляются дополнительные источники торможения.

Если бы орбиты КА были только экваториальными (или с небольшими углами наклона к плоскости экватора), то рассмотренные выше эффекты электризации были бы единственными. Однако при углах наклона орбиты к плоскости экватора, превышающих $30\text{--}40^\circ$, КА периодически оказывается в полярных районах Земли, где он встречается (на высотах $200\text{--}1000$ км) не только с холодной ионосферной плазмой, но и горячей плазмой в области полярных сияний. Полярные сияния возникают над двумя овальными областями, причем на ночной стороне овал полярных сияний (авроральный овал) находится на 70-й геомагнитной параллели, а на дневной стороне — на 80-й . Во время сильных геомагнитных бурь авроральный овал смещается на более низкие параллели. Вдоль геомагнитных силовых линий через полярные каспы (см. с. 180) прорываются ускоренные частицы солнечного ветра с энергиями $0,1\text{--}50$ кэВ. Так как энергия электронов ионосферной плазмы значительно ниже, то последние перестают участвовать в заряджении КА. Положительные ионы ионосферной плазмы продолжают поступать на поверхность КА и равновесное состояние достигается при достаточно более высоком отрицательном потенциале поверхности (он может составлять десятки и сотни вольт).

Время нахождения КА в области полярных сияний невелики и по высоте из этой области равновесные токи

снова будут устанавливаться при обычном отрицательном потенциале, соответствующем полету в ионосферной плазме

Электризация на больших высотах. На больших высотах ($30\text{--}50$ тыс. км) во время геомагнитных возмущений с ночной стороны магнитосферы приходит горячая плазма с энергией частиц $5\text{--}30$ кэВ (их ускорение до таких энергий происходит при движении из хвоста магнитосферы в ее центральные области, прилегающие к Земле). Попадая в область достаточно сильного магнитного поля, электроны начинают дрейфовать на восток, а положительные ионы — на запад (см. с. 181). Во время геомагнитных возмущений плазмосфера сжимается и холодная плазма с больших высот вытесняется ближе к поверхности Земли, уступая место приходящей горячей плазме.

Поэтому на больших высотах во время магнитных бурь, обычно в ночные и ранние утренние часы, возникает поток горячей плазмы, превышающей поток холодной плазмы. При этом температура электронов может отличаться от температуры положительных ионов (в основном протонов), потоки электронов могут превосходить потоки ионов

Плотность потока электронов горячей плазмы, падающей на незаряженный КА, находящийся на геостационарной орбите, достигает 10^{14} $1/(м^2 \cdot с)$.

На освещенной стороне орбиты при этом будет существовать поток фотоэлектронов с поверхности КА, превышающей обычно плотность потока электронов плазмы. Таким образом, на освещенной стороне поверхности КА появляется небольшой положительный потенциал, неосвещенная же сторона заряжается отрицательно, т. е. происходит *дифференциальное заряджение* поверхности КА.

На геостационарных орбитах и на ночной стороне орбиты часть КА обычно освещается Солнцем.

Дифференциальное заряджение поверхности КА различно для случаев проводящей и непроводящей поверхности. На рис. 16 дано схематическое изображение потенциальных рельефов (барьеров) на освещенном гео-

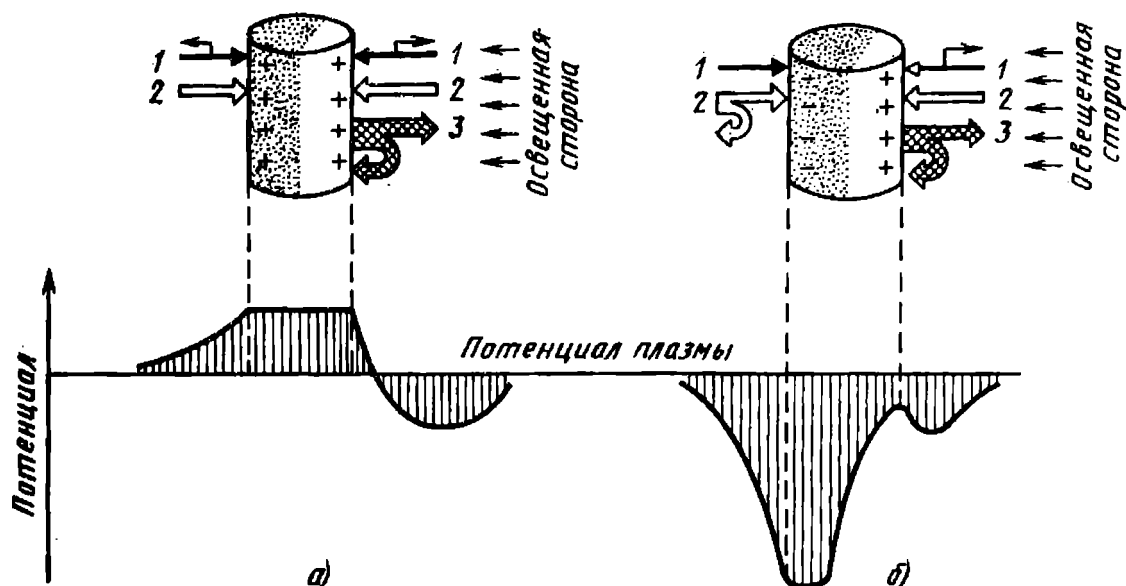


Рис. 16. Условия заряжения КА в случае проводящей (а) и непроводящей (б) поверхности

стационарном КА для двух случаев: поверхность КА является целиком проводящей (рис. 16, а) и непроводящей (рис. 16, б). Стрелками показаны потоки положительных ионов плазмы 1, электронов 2 и фотоэлектронов 3. В случае проводящей поверхности КА избыточные электроны с неосвещенной стороны могут свободно перемещаться на освещенную сторону и удаляться с нее за счет фотоэлектронной эмиссии. В результате поверхность КА будет приобретать положительный потенциал. На неосвещенной стороне потенциал постепенно убывает в окружающее КА пространство и приближается к потенциалу плазмы, на освещенной стороне за счет пространственного электронного заряда вблизи поверхности КА потенциал может стать отрицательным относительно потенциала плазмы.

Если поверхность КА непроводящая, то на неосвещенной стороне накапливается отрицательный потенциал, а на освещенной — положительный, как это ясно следует из рассмотрения схемы, приведенной на рис. 16, б. В случае, если отрицательный потенциал на неосвещенной стороне достигает больших значений, то и потенциал освещенной стороны поверхности может иметь отрицательное значение относительно потенциала плазмы. При

этом в области терминатора на поверхности КА будет существовать значительная разность потенциалов.

В реальном случае, когда одни части поверхности КА являются непроводящими, а другие проводящими, процесс дифференциального заряжения имеет сложную картину с образованием соответствующего числа участков с большой разностью потенциалов. Поэтому вычисление потенциалов на различных участках поверхности КА представляет сложную задачу [3, 8].

Эффекты электризации на больших высотах излучались на многих КА [2]. Для изучения этих эффектов в США (1979 г.) был запущен ИСЗ «СКАТХА» (апогей 43 240 км, перигей 27 550 км, наклонение орбиты к плоскости экватора 7,9°). В процессе функционирования данного ИСЗ регистрировались высокие уровни электризации его поверхности. Например, 24 апреля 1979 г. даже при солнечном освещении поверхность ИСЗ заряжалась до —340 В. При кратковременном нахождении спутника на ночной стороне в этот же день регистрировался потенциал поверхности, равный —8 кВ. На ИСЗ «АТС-6», запущенном США в 1974 г. на геостационарную орбиту, в отдельные моменты отрицательный потенциал поверхности достигал 20 кВ.

На многих КА, функционирующих на больших высотах и геостационарных орбитах, наблюдались многочисленные сбои в работе бортовой аппаратуры из-за электрических разрядов на поверхности. В большинстве случаев полного отказа бортовых систем КА не наблюдалось. Вместе с тем, электризация являлась причиной потери информации, передаваемой на Землю.

Способы защиты от электризации КА делятся на пассивные и активные. К первым относятся конструктивные способы, призванные обеспечить надежность электрических соединений металлического корпуса КА со всеми узлами, блоками, корпусами аппаратуры и систем для образования хороших электрических контактов и недопущения высоких переходных сопротивлений. При этом первостепенное значение имеют надежные электрические соединения экранирующих оплеток электрических кабелей с корпусом КА. Для предотвращения возможности возникновения существенно неоднородных электрических полей конструкцию КА стремятся выполнить без острых изломов и выступов, минимизировать число отверстий в корпусе КА и его составляющих конструкций. Для повышения помехозащищенности радиоэлектронной аппаратуры КА от последствий электрических разрядов в ряде случаев применяют волоконно-оптические кабельные линии.

Значительную часть поверхности КА составляют терморегулирующие покрытия на основе диэлектриков. Это и приводит в основном, к эффектам дифференциального заряжения. Кроме того, в случае тонких диэлектрических пленок, наносимых на металлический корпус, при больших разностях потенциалов могут происходить пробой на корпус. Одним из способов защиты конструкции КА от дифференциального заряжения является нанесение на терморегулирующие покрытия тонких прозрачных пленок с добавками оксида индия (90 %) и оксида олова (10 %), которые обладают хорошей электропроводностью и практически не ухудшают терморегулирующих характеристик покрытий.

Иногда на диэлектрические покрытия наносят тонкие токопроводящие сетки из металлов и их оксидов.

В качестве активных способов уменьшения электрического потенциала КА рассматривают применение электронных и ионных источников (ускорителей) малой энергии (порядка 10 кэВ). Инжекция электронов или ионов в окружающую плазму позволяет снять избыточный заряд с проводящих частей поверхности КА. Однако с непроводящих частей заряд снимается недостаточно эффективно, и картина дифференциального заряжения сохраняется. Для снижения заряда КА можно использовать струи плазменных двигателей: создаваемые при их работе в окрестности КА плазменные образования снижают уровень электризации его поверхности.

Проблема электризации КА активно изучается во многих странах и, вероятно, будут найдены и другие, более эффективные и технологически легче реализуемые способы их защиты от воздействия статического электричества.

Список литературы

1. Акишин А. И., Новиков Л. С. Методы имитации воздействия окружающей среды космических аппаратов. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1986. 92 с.
2. Акишин А. И., Новиков Л. С. Электризация космических аппаратов. М.: Знание, 1985. 64 с.
3. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Питаевский Л. П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964. 382 с.
4. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. Тепловые испытания космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 250 с.
5. Витинский Ю. И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 1973. 258 с.
6. Гецелев И. В. Математическое моделирование физических характеристик радиационных поясов Земли. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1969. 17 с.

7. Гинзбург В. Л. Космические лучи у Земли и во Вселенной. М.: Наука, 1967. 96 с.
8. Громов В. В. Электрический заряд в облученных материалах. М.: Энергоиздат, 1982. 195 с.
9. Даммер А., Гриффин Б. Испытание радиоэлектронной аппаратуры и материалов на воздействие климатических и механических условий: Пер. с англ./Под ред. Б. Е. Бердичевского. М.: Энергия, 1965. 568 с.
10. Инженерный справочник по космической технике/Под ред. А. В. Солодова. М.: Воениздат, 1977. 430 с.
11. Космическая физика: Пер. с англ./Под ред. И. А. Жулина. М.: Мир, 1966. 739 с.
12. Космонавтика. Энциклопедия/Под ред. В. П. Глушко. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 528 с.
13. Крошкин М. Г. Физико-технические основы космических исследований. М.: Машиностроение, 1969. 287 с.
14. Кузнецов В. А. Надежность радиоэлектронной аппаратуры: Справочник по радиоэлектронике/Под ред. А. А. Куликовского. Т. 3. М.: Энергия, 1970. 723—807 с.
15. Мирошниченко Л. И., Петров В. М. Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоиздат, 1985. 152 с.
16. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей среды/Под ред. Г. И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
17. Нусинов М. Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. М.: Машиностроение, 1962. 156 с.
18. Околоземное космическое пространство. Справочные данные: Пер. с англ./Под ред. В. А. Шабанского. М.: Мир, 1966. 191 с.
19. Радиационные пояса Земли и космические лучи/Вернов С. Н., Вакулов П. В., Горчаков Е. В., Логачев Ю. И. М.: Просвещение, 1970. 128 с.
20. Редедер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем: Пер. с англ./Под ред. В. П. Шабанского. М.: Мир, 1972. 192 с.
21. Тверской Б. А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968. 223 с.
22. Хаффнер Дж. Ядерное излучение и защита в космосе: Пер. с англ./Под ред. Е. Е. Ковалева. М.: Атомиздат, 1971. 320 с.
23. Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера: Пер. с англ./Под ред. И. М. Подгорного. М.: Атомиздат, 1972. 352 с.
24. Хинчин А. Я. Работы по теории массового обслуживания. М.: Физматгиз, 1963. 235 с.
25. Ширшев Л. Г. Ионизирующие излучения и электроника. М.: Сов. радио, 1969. 192 с.
26. Ядерные взаимодействия в защите космических кораблей/О. Д. Бриль, А. И. Вихров, С. С. Городков и др. М.: Атомиздат, 1968. 264 с.
27. Solar. Geophysical Data//ESSA Research, Boulder, Colorado, 1955—1985.

В процессе эксплуатации различные технические устройства и их составные части могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений (ИИ) естественного (например, ИИ космического пространства) и искусственного происхождения (ИИ ядерных силовых и энергетических установок).

Воздействие ИИ приводит к обратимым и необратимым изменениям характеристик конструкционных материалов, электроизделий (ЭРИ), значения которых находятся в определенной зависимости от значений характеристик ИИ (интегрального потока нейтронов, экспозиционной дозы гамма-излучения и т. п.). В свою очередь изменения характеристик материалов и ЭРИ, идущих на комплектацию технических объектов, могут привести к отказам этих объектов.

Для обеспечения безотказного функционирования технического объекта в условиях воздействия ИИ разработчик должен, начиная с ранних стадий проектирования, принимать эффективные меры по предотвращению нежелательных последствий воздействия ИИ, а для этого он должен иметь представление о видах радиационных эффектов в технических объектах и их составных частях (аппаратуре, электрорадиоизделиях и т. п.).

1. ВИДЫ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Радиационные эффекты в электрорадиоизделиях. Для оценки возможных нарушений работоспособного состояния электрорадиоизделий и аппаратуры при воздействии ИИ разработ-

чику необходимо располагать информацией о возможных видах радиационных эффектов, их зависимости от амплитудно-временных и спектрально-энергетических характеристик излучений и вида излучений. В настоящее время принято выделять следующие радиационные эффекты: эффекты смещения, переноса заряда и ионизационные эффекты [6, 16, 26, 31].

Эффектом смещения называется перемещение атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке материала. Эти перемещения сопровождаются возникновением структурных дефектов кристаллической решетки, к простейшим из которых относится наличие свободных положений в решетке (вакансий) и дополнительных атомов между ее узлами (межузельных внедрений).

Помимо простейших структурных дефектов, которые в полупроводниках оказываются неустойчивыми при комнатной температуре и могут релаксировать через некоторое время после прекращения облучения, в материале возникают сложные дефекты, (ассоциации различных дефектов между собой, а также ассоциации дефектов с примесями и дефектами решетки), существующие в течение длительного времени.

При облучении электронами и фотонами с энергией ниже 1 МэВ возникают, как правило, простейшие (точечные) дефекты. Облучение нейтронами, протонами и электронами более высоких энергий обычно сопровождается появлением кластеров дефектов, обусловленных движением по кристаллу первичных атомов отдачи с достаточно высокой (0,1—100 кэВ) энергией.

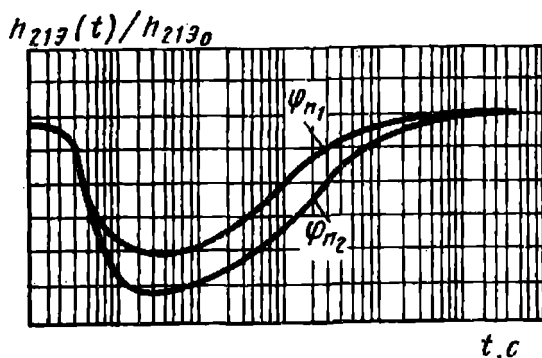


Рис. 1. Зависимость изменения коэффициента передачи тока транзисторов при воздействии импульса нейтронов ($\varphi_{n2} > \varphi_{n1}$, $\Phi_{n2} = \Phi_{n1}$)

В электронных узлах эффекты смещения влияют в основном на работу полупроводниковых приборов, поскольку приводят к существенным изменениям длительности жизни неосновных носителей, их концентрации и подвижности. Величина этих изменений зависит от уровня излучения. Таким образом, говоря об эффектах смещения, следует различать долговременные и кратковременные эффекты смещения.

Долговременные эффекты смещения проявляются в необратимом, сохраняющемся по истечении некоторого времени после облучения изменении различных параметров полупроводниковых приборов, зависящем от интегрального потока частиц и дозы гамма-излучения, их энергетического спектра и температурных условий облучения. При прочих равных условиях более жесткий спектр излучения и понижение температуры облучаемого материала приводят к росту числа структурных дефектов.

При облучении гамма- и нейтронным излучением влияние гамма-излучения на процесс образования структурных дефектов во многих случаях чрезвычайно мало в сравнении с воздействием нейтронов. Однако в случаях воздействия гамма- и нейтронного излучения на униполярные транзисторы, металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) структуры, стекла, органические диэлектрики и смазочные материалы дозовые эффекты от гамма-излучения необходимо учитывать.

Кратковременные эффекты смещения проявляются в обратимых изменениях параметров объектов и характерны для импульсного облучения. Как известно [2, 26], смещенные под действием облучения нейтронами атомы в начальный момент времени представляют собой термодинамически неустойчивые образования, большинство из них, в частности простейшие дефекты, имеют весьма малую энергию активации, определяющую скорость их рекомбинации. Из-за высокой скорости рекомбинации значительная доля созданных дефектов структуры за весьма малые промежутки времени после прекращения облучения «отжигается». В результате этого частично восстанавливаются первоначальные свойства материалов и, соответственно, ЭРИ. Однако с процессами рекомбинации протекают процессы, связанные с перегруппировкой структурных повреждений, взаимодействием их с атомами примеси и дефектами структуры. Если длительность облучения значительно превышает характерные времена таких процессов, то после облучения приходится иметь дело практически с необратимыми повреждениями или медленными и слабо выраженными процессами восстановления параметров.

При воздействии нейтронного импульса эти процессы восстановления не успевают закончиться к моменту его окончания, что проявляется в глубоком кратковременном изменении параметров изделий и схем РЭА, во много раз превосходящем установившееся после облучения значение параметров (рис. 1) [26]. Глубина изменения параметров зависит от плотности потока нейтронов, а длительность процесса восстановления (быстрого «отжига») в основном от свойств материалов и режима работы изделий в РЭА. Кратковременные изменения параметров из-за импульса нейтронов могут привести к полной потере работоспособности аппаратуры на период времени восстановления параметров.

Эффекты переноса заряда обусловлены передачей кинетической энергии ИИ вторичным частицам и проявляются в виде неустановившихся токов,

а также захваченного диэлектриком заряда. При движении вторичных заряженных частиц (например, комптоновских электронов, возникающих под действием фотонов высоких энергий, или протонов отдачи, возникающих при взаимодействии нейтронов с водородсодержащими веществами) создаются электрические и магнитные поля, а также протекают неустановившиеся токи, зависящие от мощности дозы облучения. Эти эффекты могут привести к появлению ложных сигналов и сбоев в аппаратуре или пропаданию полезных сигналов, а также при недостаточной электрической прочности входных и выходных цепей — к их перегоранию. Заряд, перенесенный вторичными частицами в изолятор, может находиться там в течение длительного времени. Его величина зависит от интегрального потока частиц (дозы облучения).

Входящие в состав ИИ заряженные частицы как первичные, так и вторичные, выделяют в веществе энергию преимущественно путем образования вдоль траектории движения электронно-ионных пар. Ионизационными называются эффекты, вызванные этими низкоэнергетичными заряженными носителями. Они отличаются от эффектов переноса заряда, которые определяются как смещение зарядов высокоэнергетичными частицами. Число образующихся электронно-дырочных пар независимо от вида первичных частиц определяется только количеством энергии, выделяемой на ионизацию.

Ионизационные эффекты проявляются в виде переходных эффектов (эффектов свободных носителей), промежуточных релаксационных эффектов, долговременных эффектов захваченных носителей и химических эффектов.

Переходные эффекты связаны с образованием свободных носителей. Средняя продолжительность существования носителей в полупроводниках до захвата или рекомбинации может меняться от 10^{-9} до 10^{-5} с. Поэтому плотность свободных носителей в зависимости от соотношения между длительностью импульса излучения и временем жизни носителей будет зави-

сеть от дозы излучения или от мощности дозы излучения.

Возрастание числа свободных электронов и ионизированных атомов приводит к изменению электрофизических характеристик материала (удельного электрического сопротивления, диэлектрических потерь и др.) и формированию во внешних цепях ЭРИ приращений токов. Из-за высокой подвижности свободных носителей неравновесное состояние, вызванное ионизацией, обычно быстро исчезает после прекращения облучения. Ионизационный эффект и процесс последующего восстановления равновесного состояния зависят от параметров излучения (мощности дозы гамма-излучения и плотности потока нейтронов, спектрального состава излучения, формы и длительности воздействующего импульса) и физических параметров материалов (главным образом, времени существования неравновесных носителей заряда в объеме материала).

В диэлектриках и изоляторах захваченные на ловушки носители иногда могут снова высвободиться за счет тепловых эффектов, вызывая промежуточные релаксационные эффекты. В зависимости от энергии ионизации значения времени их релаксации составляют от долей микросекунды до многих суток, приводя, например, к появлению в радиационно наведенной проводимости составляющих с постепенно возрастающим временем жизни и спадающей амплитудой.

Отдельные носители, генерируемые в диэлектрике и изоляторах, захватываются на глубокие энергетические уровни, их плотность возрастает с ростом дозы и достигает насыщения после заполнения большинства свободных уровней. В этом случае говорят о долговременных эффектах захваченных носителей. И наконец, под действием энергии, высвобождающейся при парной рекомбинации и рекомбинации свободных носителей, возникают химические эффекты, проявление которых в аппаратуре и влияние на работоспособность практически не исследованы.

Возникающие при облучении неравновесные носители в результате их направленного дрейфа и диффузии

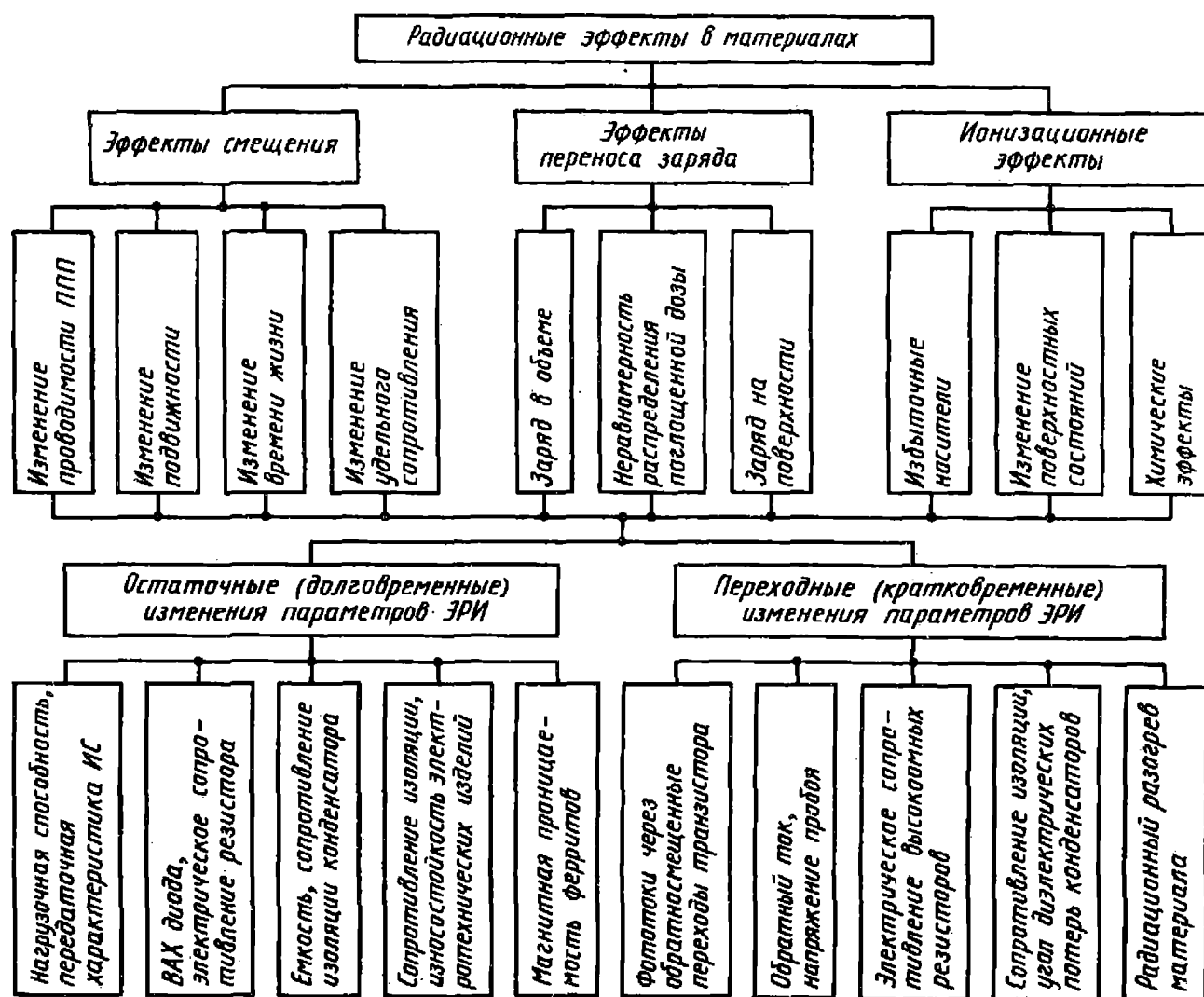


Рис. 2. Эффекты в материалах и электрорадиоизделиях технических устройств

в $p-n$ -переходе и прилегающих к нему областях вызывают переходные токи во внешних цепях полупроводниковых приборов и компонентов ИС, называемые первичными ионизационными токами. Направление этих токов соответствует направлению токов через обратносмещенные переходы. Первичные ионизационные токи, протекающие во входных цепях транзисторов, могут умножаться за счет усилительных свойств транзисторов. Степень усиления зависит от схемы включения транзистора и электрического режима его работы.

Кроме указанных эффектов, на работу полупроводниковых приборов могут оказывать влияние утечки по воздуху между электродами, возникающие при ионизации. Этот эффект может стать определяющим для при-

боров с малой (ниже 10^{-13} — 10^{-14} А $\times$ $\times$ с $\cdot$ Р $^{-1}$) чувствительностью к гамма-излучению.

Таким образом, ионизационные эффекты в ЭРИ при воздействии гамма- и нейтронного излучений вызывают образование избыточных зарядов, появление которых в диэлектриках и изоляторах понижает их изолирующие свойства, приводит к возникновению токов утечки, а в полупроводниках — к образованию ионизационных токов. В результате возникают обратимые изменения параметров аппаратуры, находящейся во включенном состоянии, что может приводить к временной потере ее работоспособности, ложным срабатываниям, сбоям и пропаданию полезного сигнала.

Сводные данные о радиационных эффектах в материалах аппаратуры

и обусловленные облучением изменения параметров электрорадиоизделий приведены на рис. 2 [13].

В отдельную группу иногда выделяют вторичные радиационные эффекты в ИС, причиной происхождения которых являются различные физические процессы, вызванные ИИ (вторичный пробой, перегорание металлизации и т. п.).

В диапазоне мощностей доз, при которых наблюдаются сбои в работе микросхем, наиболее часто встречается такой вторичный радиационный эффект, как «радиационное защелкивание» паразитных четырехслойных структур [13]. Из-за ионизации эти структуры подобно тиристорам могут переходить в низкоимпедансное состояние и оставаться в нем после окончания воздействия. Если ток источника питания не ограничен, то «радиационное защелкивание» в свою очередь может стимулировать перегорание металлизации или развитие вторичного пробоя.

Четырехслойные структуры в биполярных ИС с изоляцией $p-n$ -переходами могут образовываться в рамках одной изолированной области и между соседними областями. При использовании диэлектрической изоляции четырехслойные структуры могут появляться только при формировании нескольких элементов в одном изолированном кармане.

Необходимыми и достаточными условиями перевода четырехслойной структуры в низкоимпедансное состояние являются следующие [12]:

оба транзистора, составляющие структуру, работают в активной области;

произведение коэффициентов передачи тока базы этих транзисторов превышает единицу;

источник смещения способен поддерживать необходимое (удерживающее) напряжение и обеспечивать ток структуры в низкоимпедансном состоянии.

Микросхемы, изготовленные по технологиям эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ), инжекционной логики (I^2L), n -МДП и КМДП/КНС, свободны от тиристорного эффекта. КМДП ИС уязвимы к «радиационному за-

щелкиванию», но предварительное облучение нейтронами, уменьшающее коэффициенты передачи тока базы транзисторов четырехслойной структуры, позволяет исключить этот эффект [14]. По мере увеличения степени интеграции в микросхемах при облучении проявляются отдельные особенности радиационного поведения БИС и СБИС, обусловленные малыми размерами активных и пассивных элементов.

Следствием этого является увеличение роли приповерхностных и пассивных областей в формировании радиационной реакции и повышение чувствительности БИС (СБИС) прежде всего к ионизационным эффектам. Малые размеры элементов приводят к эффектам, связанным с неравновесным характером энерговыделения под действием ИИ (перемежающиеся отказы или единичные случайные сбои) [11, 13]. Существенную роль в формировании радиационной реакции БИС играют взаимное влияние элементов, паразитных эффектов и структур, многоуровневая металлизация и диффузионные шины, а также работа элементов в режимах, близких к предельно возможному для используемого материала. С повышением степени интеграции как в биполярных, так и в МДП БИС проявляется ряд факторов, снижающих их стойкость по остаточным радиационным эффектам и увеличивающих разброс стойкости отдельных элементов. Снижается стойкость БИС с повышением степени интеграции также и по кратковременным (обратимым) эффектам вследствие эффектов усиления ионизационных токов, переключения паразитных четырехслойных структур, влияния паразитных транзисторов и т. п. [13].

2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ (ИМС)

В большинстве случаев нарушения работоспособности аппаратуры связи при облучении и при воздействии импульсных ИИ определяются в основ-

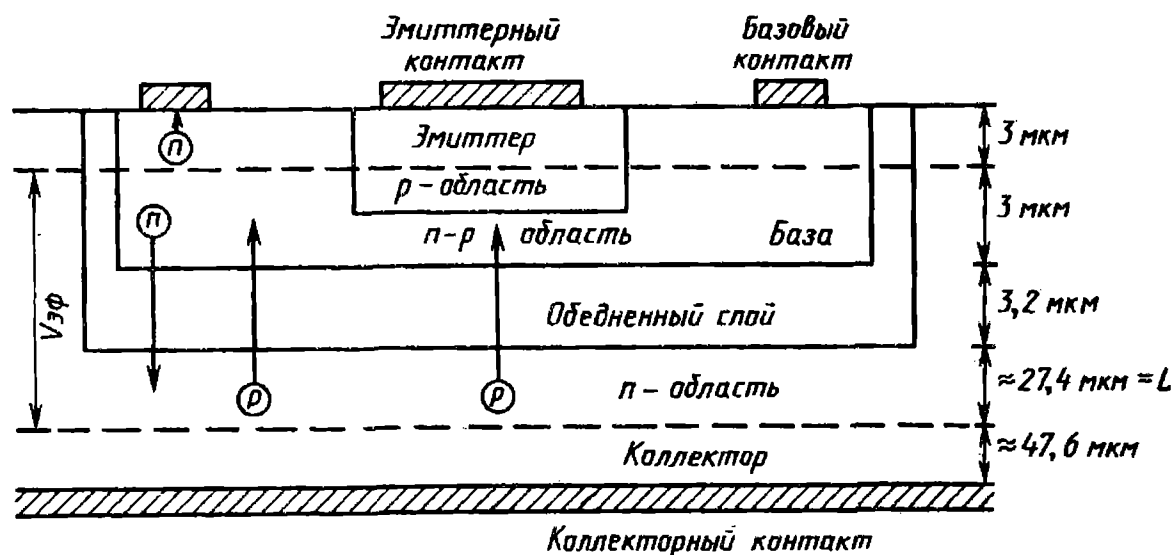


Рис. 3. Схема образования первичного фототока из-за протекания неосновных носителей

ном изменением параметров полупроводниковых приборов (ППП) и ИМС.

О величине изменения параметров ППП и ИМС можно судить на основании справочных данных по стойкости материалов и электрорадиоизделий. Эти справочные данные принято представлять в виде зависимостей нормированных значений математического ожидания и среднеквадратического отклонения параметров материалов [16, 17] и полупроводниковых приборов [21, 26, 29] от уровней ИИ. При этом указываются численные значения характеристик полей излучений моделирующих установок, при воздействии которых получены справочные данные, а также взаимно соотношенные с этими значениями электрические выходные параметры ЭРИ. Заметим, что принципиально информация об изменениях выходных параметров ЭРИ может быть получена либо на основе измеренных при различных уровнях ИИ значениях параметров ППП и ИС, либо на основе рассчитанных с использованием физико-топологических моделей [26, 29] и подтвержденных экспериментально значениях этих параметров.

Наряду с информацией об изменении параметров ЭРИ при воздействии соответствующих уровней ИИ в справочниках приводят информацию о коэффициентах радиационной чувствительности к воздействию гамма-излу-

чения, а также максимальной мощности дозы гамма-излучения, при которой происходит срабатывание ЭРИ в соответствующей схеме (сбой), время потери работоспособности из-за рассасывания накопленного при воздействии ИИ заряда [26].

Наиболее характерные изменения параметров ППП и ИМС, работающих в условиях воздействия ионизирующих излучений, которые целесообразно учитывать при проектировании различных устройств аппаратуры, рассмотрены в работах [6, 10, 26]. Ниже приведены в сжатом изложении основные результаты этого рассмотрения.

Под действием гамма-импульса происходит ионизация в конструкции полупроводникового прибора и его окружающей среде, что вызывает возникновение кратковременных межэлектродных проводимостей и первичных фототоков [26], приводящих к появлению ложных электрических импульсов на выходе ключевых и импульсных схем.

Если известен активный объем ППП, из которого все генерированные ИИ носители могут дрейфовать или диффундировать через переход, прежде чем они рекомбинируют, то ток, протекающий через $p-n$ -переход [12, 14, 15, 26]

$$I = q q_0 p_{\gamma} V_{\text{эф}} = G V_{\text{эф}},$$

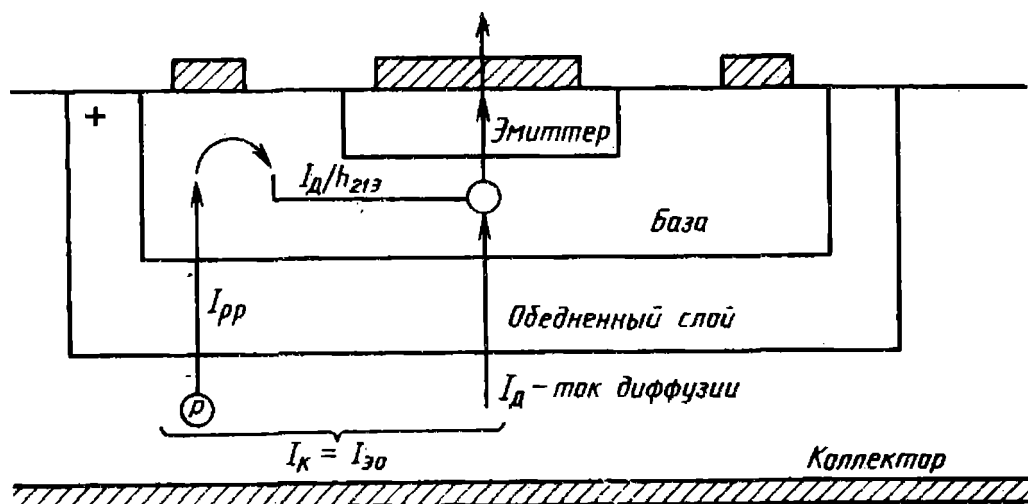


Рис. 4. Схема образования вторичного фототока в транзисторе с разомкнутой базой

где q — заряд электрона; q_0 — коэффициент, характеризующий скорость генерации пар электрон—дырка (для кремния 1Р создает примерно $4 \cdot 10^{13}$ носителей на 1 см^3 , для германия — приблизительно $8 \cdot 10^{13}$); p_γ — мощность поглощенной дозы гамма-излучения, идущей на ионизацию, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$; G — объемная скорость генерации тока в кремнии, равная $6,4 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$.

Различают первичные I_{pp} и вторичные I_{sp} фототоки. Рассмотрение процесса образования первичного и вторичного фототоков в транзисторах приведем на примере эталонного транзистора, воспользовавшись подходом, изложенным в работе [26]. На рис. 3 изображены структура эталонного транзистора и поток неосновных носителей, образующих первичный фототок. Эффективный объем ($V_{эф}$) заключен между штриховыми линиями. Носители, образованные ниже нижней линии, находятся слишком далеко от коллекторно-базового перехода. Средняя длина диффузии для неосновных носителей составляет примерно $27,4 \times 10^{-6} \text{ м}$, что соответствует времени жизни неосновных носителей примерно $600 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ при постоянной скорости диффузии $12,5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Ток I_{pp} в транзисторах создается благодаря разделению зарядов в переходах база — коллектор и база — эмиттер. Если при этом транзистор находится в нормальном рабочем со-

стоянии, то он усиливает часть первичного фототока. Обычно около 70% носителей за счет дрейфа и диффузии проходят через коллекторно-базовый переход. Полагают, что эффективный объем для сбора носителей в коллекторной области имеет глубину в одну диффузионную длину и составляет для планарного транзистора $13,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3$ [26]. Он определяется из соотношения

$$V_{эф} = A_K (r_j/2 + x_K + L_K),$$

где A_K — площадь коллектора; r_j — ширина базы; x_K — ширина обедненного слоя; L_K — диффузионная длина. Тогда при мощности дозы $10^6 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ и напряжении коллектор — база 10 В первичный фототок будет примерно 8,6 мА. Поскольку у эпитаксиальных транзисторов площадь коллектора меньше, то и первичный фототок будет существенно меньше, чем у эталонного транзистора.

Зная природу вызывающих вторичный фототок физических процессов, можно определить его величину. Простейшим из рассматриваемых примеров образования вторичного фототока является случай с разомкнутой базой, заземленным коллектором и поданным на базу положительным напряжением (рис. 4).

Первичный фототок дырок в коллекторе, диффундирующих через коллекторно-базовый переход, приводит к тому, что база становится более положительной, а эмиттерно-базовый

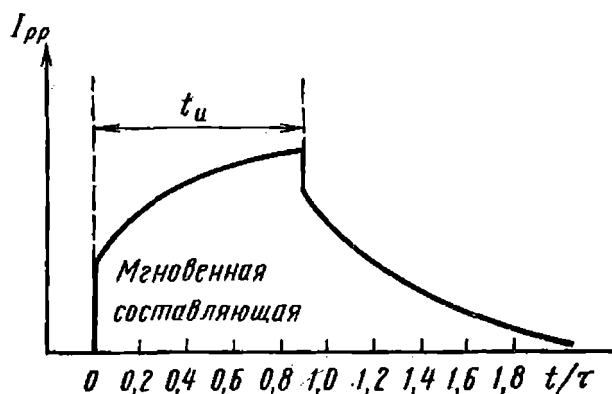


Рис. 5. Зависимость первичного фототока в транзисторе при воздействии прямоугольного импульса излучения

переход — смещенным в прямом направлении. Электроны из эмиттера диффундируют через базу в коллектор. Если один из этих электронов не рекомбинирует в базе, коллекторный ток будет увеличиваться, пока не образуется из-за первичного фототока число дырок, достаточное для рекомбинации электронов в области базы. Это приводит к появлению вторичного фототока

$$I_{sp} = I_K = (1 + h_{21э}) I_{pp},$$

где $h_{21э}$ — коэффициент прямой передачи тока базы. Если сопротивление базы $R_б$ и напряжение на базе $U_б$, то

$$I_{sp} = I_K = (1 - h_{21э}) I_{pp} - \frac{(U_{б.э} - U_б) h_{21э}}{R_б},$$

где $U_{б.э}$ — напряжение на переходе база—эмиттер; I_K — ток коллектора.

Первичный фототок линейно зависит от мощности дозы при $p_{\gamma \text{ max}} \leq 10^8 - 10^9 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$. При более высоких мощностях дозы эта зависимость отклоняется от линейной скачкообразно или плавно из-за нарушения условия низкого уровня ионизации.

Скачки ионизационного тока связаны в основном с пробоем $p-n$ -перехода, чаще всего эмиттерного в биполярном транзисторе или управляющего в полевом транзисторе с поперечным падением напряжения в области активной базы или накала.

Для современных эпитаксиально-планарных структур при правильном

выборе режима работы приборов можно не учитывать возможность появления скачков ионизационного тока, а отклонения от линейной зависимости ионизационного тока в функции мощности дозы связаны с нарушением условия низкого уровня ионизации, т. е. когда из-за ионизации концентрация неосновных носителей меняется незначительно и изменением электрофизических характеристик полупроводника (подвижности μ и времени жизни τ неосновных носителей) и влиянием индуцированных электрических полей можно пренебречь.

Наиболее сильно нелинейные эффекты будут проявляться, когда длительность импульса излучения превосходит время жизни неосновных носителей. Замедление роста ионизационного тока по мере увеличения мощности дозы связано с уменьшением коэффициента диффузии носителей и времени жизни при увеличении концентрации неравновесных носителей заряда, генерированных излучением. При этом избыточные носители заряда играют роль дополнительных центров рассеяния, приводящих к изменению коэффициента диффузии [15].

Протекание фототоков в цепях транзистора может привести к изменению состояния ключевых схем, появлению ложных сигналов в аналоговых схемах, а также к перегоранию транзистора из-за вторичного пробоя, если не приняты меры по его предотвращению последовательным включением индуктивности или токоограничивающих сопротивлений, а также уменьшением напряжения питания во время импульса излучения.

При воздействии импульсного гамма-излучения возникает также нагрев полупроводниковых приборов, который при длительности импульса не более 1 мкс происходит адиабатически.

Приращение температуры ППП зависит от удельной теплоемкости материала и дозы D_γ гамма-излучения [10, 26]:

$$\Delta T \approx 4,2 \cdot 10^{-6} D_\gamma / C_\gamma,$$

где C_γ — удельная теплоемкость. Этот нагрев может привести к временному изменению параметров, которое имеет место при высоких температурах.

Значение вторичного фототока для эталонного транзистора может составить 580 мА и более [26]. Мгновенный импульс гамма-излучения может привести транзистор в режим насыщения.

Ток коллектора в режиме насыщения определяется соотношением

$$I_K = h_{21B} I_{PP} \{1 - \exp[-t/h_{21B} \times (t_6 + 1,7R_L C_{T.K})]\}, \quad (1)$$

где t_6 — время переноса носителей через базу, с; R_L — сопротивление нагрузки, Ом; $C_{T.K}$ — переходная емкость коллектора, Ф.

Чтобы воспользоваться соотношением (1), необходимо располагать оценками значения I_{PP} для короткого импульса и его длительности. Для прямоугольного импульса излучения с амплитудой p_γ и шириной t_H зависимость первичного фототока во времени будет являться суммой мгновенной компоненты, соответствующей сбору носителей из области базы и коллекторно-базового перехода, и задержанной компоненты, обусловленной сбором носителей из коллекторной области (рис. 5).

Тогда выражение для первичного фототока в функции от времени для случая воздействия прямоугольного импульса излучения имеет вид

$$I_{PP} = GA_K \left[\left(x_K + \frac{r_s}{2} \right) + L_K \operatorname{erf} \left(\frac{t}{\tau} \right)^{1/2} \right] \text{ для } t < t_H;$$

$$I_{PP} = GA_K L_K \left[\operatorname{erf} \left(\frac{t}{\tau} \right)^{1/2} - \operatorname{erf} \left(t - \frac{t_H}{\tau} \right)^{1/2} \right] \text{ для } t > t_H,$$

где $\operatorname{erf} (t/\tau)^{1/2}$ — вспомогательная функция, график которой приведен на рис. 6.

Ток коллектора в этом случае составит примерно 155 мА. Если транзистор находился в выключенном состоянии перед воздействием импульса, то наблюдается задержка сигнала на время, необходимое для заряда емкости эмиттерно-базового перехода.

Для рассматриваемого случая задержка составляет примерно 67 нс.

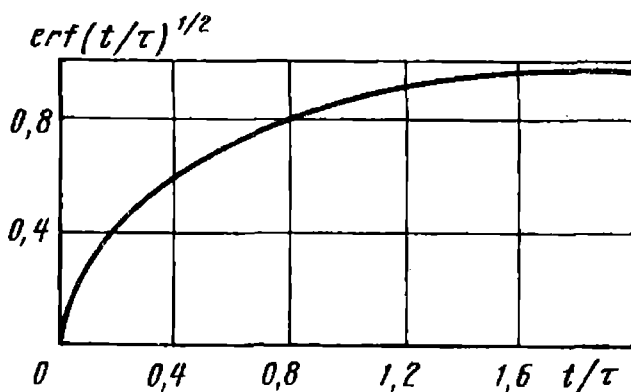


Рис. 6. Вспомогательная функция $\operatorname{erf} (t/\tau)^{1/2}$ для расчета первичного фототока при воздействии прямоугольного импульса излучения

Чем меньше первичный фототок, тем больше время задержки. Если произведение первичного фототока на сопротивление базы не превышает величину $0,7U_{б.э} - U_{б}$ для выключенного транзистора, то транзистор не будет открыт из-за действия импульса ИИ и вторичный ток будет таким же, как и первичный.

Аналогичные эффекты свойственны и другим типам полупроводниковых приборов. Так, например, для тиристоров показано [4, 32], что амплитудное значение мощности дозы гамма-импульса, включающего тиристор, составляет для тиристоров средней мощности примерно $10^6 - 10^7 \text{ Р} \cdot \text{с}^{-1}$ и определяется из соотношения

$$P_{\gamma \text{ макс вкл}} \approx (I_{\text{спр}}/k_\gamma) (1 + \tau_{\text{вкл}}/\tau_\gamma),$$

где $I_{\text{спр}}$ — ток спрямления.

Зная реакцию активного элемента, можно проанализировать реакцию радиоэлектронных схем. Так, в переключающих схемах, например в триггере, первичный фототок закрытого транзистора создает на сопротивлениях резисторов, подключенных к его электродам, определенные падения напряжений. Напряжение, создаваемое фототоком на базе закрытого транзистора, может привести его в активный режим и тем самым вызвать рассасывание носителей в базе насыщенного транзистора. При определенном значении мощности дозы гамма-излучения рассасывающий ток может превысить эффективный ток насыщения базы и тем самым вызвать

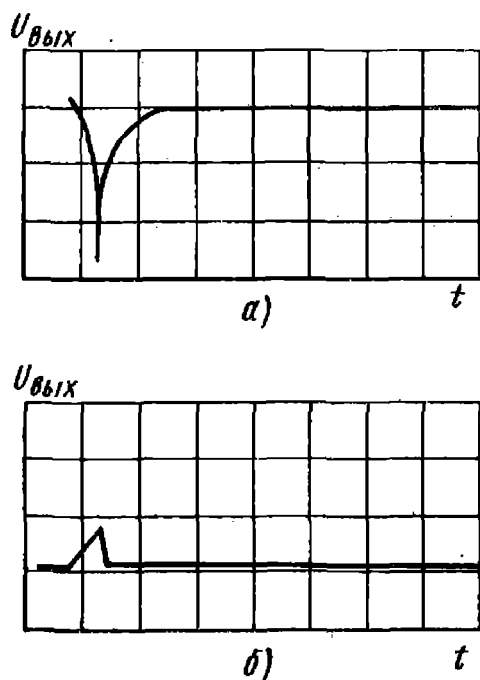


Рис. 7. Изменение выходного напряжения транзисторов в схеме стабилизатора:

а — транзистора VT1; б — транзистора VT3 (дифференциального усилителя)

ложное переключение триггера (под эффективным током насыщения в случае облучения понимается сумма тока базы и первичного фототока коллектора).

В простейшем стабилизаторе с дифференциальным усилителем в цепи обратной связи импульсное облучение транзистора VT2 приводит к увеличению его коллекторного тока, снижению падения напряжения на нем и частичному запирающему регулирующего транзистора VT3. Выходное напряжение при этом падает со скоростью, определяемой постоянной времени нагрузочной цепи. Когда напряжение на коллекторе VT2 восстанавливается, то при достижении на базе положительного смещения через транзистор VT3 течет ток, обеспечивая зарядку выходной цепи (рис. 7).

Из рис. 7, б видно, что облучение регулирующего транзистора VT3 приводит к увеличению тока через него и появлению положительного выброса напряжения на выходе. Однако этот выброс оказывается незначительным по сравнению с тем, который вызывается облучением транзистора VT2. Облучение транзистора VT1 не вызывает на выходе стабилизатора существ-

венного переходного процесса, характерного для ионизационного эффекта.

Облучение полупроводниковых приборов импульсом нейтронов приводит к изменениям основных параметров изделий. Эти изменения обусловлены в основном дефектами в структуре полупроводникового материала, а также ионизирующей способностью нейтронов высоких энергий.

Наиболее чувствительными к воздействию потока нейтронов для маломощных транзисторов по необратимым изменениям являются коэффициент передачи базового тока β и напряжение между эмиттером и коллектором в режиме насыщения ($U_{к.э.нас}$). С ростом потока нейтронов эти параметры ухудшаются. Коэффициент передачи базового тока транзисторов определяется через компоненты токов следующим выражением:

$$1/h_{21э} = I_б/I_к = I_{б.а}/I_к + I_{б.п}/I_к + \frac{I_{гр.э}^v}{I_к} + \frac{I_{гр.э}^s}{I_к} + \frac{I_{нэ}}{I_к} + \frac{I_{кан}}{I_к},$$

где $I_{б.а}$, $I_{б.п}$ — рекомбинационный ток в активной и пассивной областях базы соответственно; $I_{гр.э}^v$ — ток базы за счет рекомбинации в объеме эмиттерного перехода; $I_{гр.э}^s$ — ток базы за счет рекомбинации на поверхности эмиттерного перехода; $I_{кан}$ — ток базы за счет образования каналов на поверхности базы; $I_{нэ}$ — ток базы за счет инжекций носителей базы в эмиттер.

При воздействии нейтронов каждая составляющая претерпевает некоторое изменение, при этом их вклад в изменение $h_{21э}$ различен и зависит, в частности, от технологии изготовления приборов и материала, из которого они изготовлены (германий или кремний).

Так, изменение коэффициента передачи тока кремниевых планарных транзисторов обусловлено уменьшением времени жизни в активной области базы и слое пространственного заряда эмиттерного перехода. Оно описывается выражением [26]

$$\frac{1}{h_{21э}(\Phi)} = \frac{1}{h_{21э}(0)} + t_{пр}E_a\Phi_n + Axk_{гр}\Phi_n,$$

где $h_{21\theta}(0)$, $h_{21\theta}(\Phi)$ — значения коэффициентов передачи тока до и после облучения соответственно; $t_{пр}$ — время пролета носителей через базу; $\bar{k}_a$ — усредненный по концентрации инжектированных в базу носителей коэффициент уменьшения времени жизни в активной области базы; χ — безразмерный коэффициент; $\bar{k}_{гр}$ — усредненный коэффициент уменьшения времени жизни в сильнолегированном материале; Φ — поток облучения;

$$A = \frac{\Phi_T q n_i \epsilon \epsilon_0 S_0^2 \times \left(1 - \frac{\Phi_T}{\Phi_K} \ln \frac{I_K}{I_0}\right)^m}{I_K I_0 C_\theta(0)} \times \left(\frac{I_K}{I_0}\right)^{1/n-1},$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф·см⁻¹ — абсолютная диэлектрическая проницаемость; Φ_T — температурный потенциал; Φ_K — контактная разность потенциалов между базой и эмиттером; n_i — концентрация носителей в собственном полупроводнике.

Изменение коэффициента передачи тока германиевых мезатранзисторов происходит за счет введения в процессе облучения рекомбинационных центров в активную область базы, а мезасплавно-диффузионных и планарных — как в активную, так и в пассивную области базы.

Обратный ток транзисторов в общем случае состоит также из нескольких составляющих, основными из которых являются диффузионная, обусловленная генерацией неосновных носителей в объеме полупроводника вблизи $p-n$ -перехода (объем ограничен расстоянием, равным диффузионной длине), и генерационная, обусловленная появлением носителей в самом переходе.

Для германиевых приборов обратный ток через переход с учетом изменения диффузионной составляющей от потока нейтронов определяется выражением

$$I_{обр}(\Phi) = q n_i^2 S_{pn} \left[\frac{\sqrt{D_p}}{n_n(\Phi)} \times \right.$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{\tau_p(0)} + k_\tau(\Phi)} - \left. - \frac{\sqrt{D_n}}{p_p(\Phi)} \sqrt{\frac{1}{\tau_n(0)} + k_\tau(\Phi)} \right],$$

где S_{pn} — площадь перехода; D_p — постоянная диффузия дырок, см²·с⁻¹; k_τ — коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей заряда.

Для кремниевых приборов поведение обратного тока определяется генерационной составляющей (вплоть до комнатных температур):

$$I_{обр}(\Phi) = \frac{q W_{pn} S_{pn} n_i}{2 \operatorname{ch} \left[(E_T E_{Fi}) \times \right.} \times \left. \left(K T + \frac{1}{7} \ln \frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}} \right) \right]} \times \left(\frac{1}{\tau_{pn}(0)} + k_{\tau pn}(\Phi) \right),$$

где W_{pn} — ширина перехода, которая обычно зависит от приложенного напряжения и может изменяться также при облучении нейтронами за счет изменения концентрации основных носителей; K — постоянная Больцмана; T — температура.

Изменения параметров материалов полупроводниковых диодов приводят к изменению вольт-амперных характеристик диодов. У кремниевых диодов при облучении нейтронами наблюдаются значительные изменения прямой ветви вольт-амперной характеристики. С увеличением потока нейтронов у этих диодов возрастают прямое падение напряжения и дифференциальное сопротивление. У германиевых диодов наибольшие изменения наблюдаются в обратной ветви вольт-амперной характеристики. При этом изменяются как обратный ток, так и напряжение пробоя. На рис. 8 представлены кривые, показывающие изменения прямого напряжения на диоде и обратного тока диода от потока нейтронов.

Изменение обратного тока диодов при облучении определяется несколькими составляющими, отличающимися природой своего появления: диффузионная составляющая обусловлена

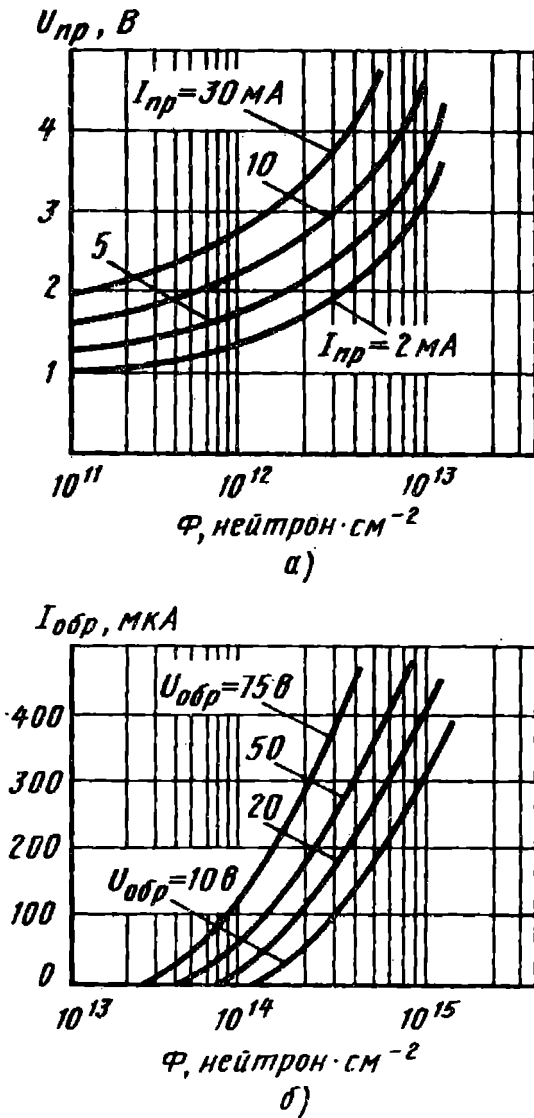


Рис. 8. Изменение прямого падения напряжения на кремниевом диоде (а) и обратного тока перехода германиевого диода (б) при воздействии различных потоков нейтронов

процессом тепловой генерации неосновных носителей в объеме полупроводникового материала, ограниченном расстоянием L (диффузионная длина) от плоскости p — n -перехода; составляющая, обязанная своим появлением процессу генерации носителей обоих видов непосредственно в области p — n -перехода; токи, связанные с утечками по поверхности, с образованием на поверхности каналов и инверсных слоев.

При облучении диодов нейтронами имеет место увеличение пробойного напряжения. Напряжение пробоя p — n -переходов как до облучения, так и

после воздействия нейтронов однозначно связано с концентрацией основных носителей. Поэтому, если облучение нейтронами способствует уменьшению проводимости материала, напряжение пробоя, как при зерновом механизме лавинообразного размножения носителей, должно возрастать. Ионизационная способность нейтронов зависит от их энергии и ее доли, идущей на ионизацию [20, 28]. Анализ влияния фототоков, возникающих в транзисторах и диодах, проводится так же, как и при рассмотрении ионизации гамма-квантами.

Конструктивно-технологическое построение ИМС определяется видом логической функции, требованиями к схеме в целом и внешними условиями, в которых та или схема будет функционировать. Большое разнообразие функций ИМС определяет большое число типов их конструкций и затрудняет выработку общего подхода к анализу радиационных эффектов в них. Поэтому анализ влияния радиации можно проводить только по отношению к конкретной разновидности ИМС.

Основными параметрами, которые используются при определении радиационной стойкости ИМС к воздействию непрерывного и импульсного излучения, являются [6, 10, 26]: статический коэффициент передачи тока транзистора в схеме с общим эмиттером $h_{21э}$; напряжение насыщения коллектор — эмиттер $U_{к.э нас}$; сопротивление базы r_b ; распределенное сопротивление коллектора r_k ; емкость эмиттерного перехода $C_{э}$; емкость коллекторного перехода C_k ; выходной ток закрытой схемы $I_{вых}$; выходной ток открытой схемы $I_{вх}$; выходное напряжение открытой схемы $U_{вых}^0$; выходное напряжение закрытой схемы $U'_{вых}$; ток коллектора закрытой схемы I_k ; остаточное напряжение между эмиттерами $U_{э1,э2}$; напряжение насыщения база — эмиттер $U_{б.э нас}$; сопротивление между эмиттерами r_0 ; время задержки включения $t_{зд}^{1,0}$; время нарастания $t_{нар}$; время рассасывания $t_{рас}$; время спада $t_{сп}$ и др.

Выбор и число параметров, по которым оценивается радиационная стойкость ИМС, зависят от функциональ-

ного назначения ИМС в радиоэлектронной системе.

Из экспериментальных данных по дискретным элементам следует, что по отношению к воздействию ионизирующих излучений «слабыми» местами являются: диодные и, в особенности, транзисторные элементы (параметры $U_{пр}$, $h_{21э}$ будут существенно изменяться при облучении из-за уменьшения времени жизни неосновных носителей тока); полупроводниковые слои с низкой концентрацией легирующей примеси, в которых облучение будет быстро изменять концентрацию основных носителей тока, а также их подвижность; диэлектрические слои, в которых при облучении может накапливаться объемный заряд [15, 24, 25], а также возникать дефектные состояния, резко увеличивающие сквозные токи через диэлектрик; переходные области металл—диэлектрик, металл—полупроводник, полупроводник—диэлектрик и p — n -переходы. В этих областях и в непосредственной близости от них облучение будет создавать центры рекомбинации и захвата носителей заряда. Последние чрезвычайно сильно влияют на свойства этих областей из-за наличия в них сильных электрических полей. Здесь также могут возникать локальные поверхностные состояния и существенно изменяться профили распределения нескомпенсированных доноров и акцепторов.

При воздействии импульсного гамма-излучения в ИМС все обратносмещенные переходы генерируют фототоки, которые могут привести к изменению состояния ИМС, паразитные переходы могут в свою очередь генерировать фототоки, приводящие к нарушениям работоспособности. Характерно то, что в ИМС с изоляцией p — n -переходами ионизационные эффекты примерно на порядок больше, чем в схемах на дискретных элементах. В ИМС с диэлектрической изоляцией эти эффекты меньше. В них предотвращено явление смыкания («тиристорный эффект»), которое может привести к катастрофическому отказу в ИМС с изоляцией p — n -переходами. Некоторого уменьшения вредных последствий, обусловленных ионизацией в ИМС, добиваются переходом к диэлектрической изоляции,

минимизацией областей пространственного заряда в диодных и транзисторных структурах ИМС, включением резисторов или диодов между базой и эмиттером для обеспечения стока фототока, дополнением триггеров элементами памяти (например, на магнитных сердечниках), предназначенных для возвращения триггеров в исходное состояние после выхода из насыщения, использованием токоограничивающих резисторов [26].

При анализе воздействия радиации на параметры ИМС используются радиационные константы k_T и k_P .

Для уменьшения деградации коэффициента усиления обычно уменьшают ширину базы, что приводит в свою очередь к увеличению частоты отсечки f_T . При очень высоких уровнях потока нейтронов на изменение радиационных констант влияет эффект удаления носителей из области коллектора, который может быть частично скомпенсирован увеличением степени легирования коллектора, т. е. уменьшением удельного сопротивления коллектора.

В настоящее время считают, что при разработке радиационно стойких микросхем необходимо соблюдать следующие наиболее общие правила [6, 26]: уменьшение отношения числа активных элементов ИМС к числу пассивных; уменьшение рассеиваемой в ИМС мощности, т. е. в конечном счете уменьшение уровней инжекции в активных элементах; повышение универсальности ИМС, т. е. расширение (особенно для логических ИМС) числа функциональных возможностей; снижение зависимости выходных параметров ИМС от коэффициента усиления входящих в ее состав транзисторов.

3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА РАДИОКОМПОНЕНТЫ

Характер и степень изменения электрофизических свойств радиокомпонентов (электрорадиоизделий) при воздействии ионизирующих излучений и ЭМИ зависят от характеристик излучения (плотности потока, мощности экспозиционной дозы, энергетического спектра, напряженностей электрического и магнитного полей, продолжи-

тельности его воздействия), конструктивных особенностей изделий и примененных в них материалов.

В конструкциях радиокомпонентов широко применяются различные металлы и их сплавы, а также органические диэлектрики. Среди них действию излучений наиболее подвержены высокомолекулярные органические диэлектрики, у которых в момент и после облучения уже при небольших потоках и дозах излучения наблюдаются изменения основных физико-химических свойств [1, 10, 17, 26].

Устойчивые (необратимые) изменения электрических параметров радиокомпонентов происходят вследствие нарушения структуры применяемых в них материалов и определяются потоком нейтронов, их энергетическим спектром и поглощенной дозой гамма-излучения.

Наряду с указанными процессами в радиокомпонентах при воздействии гамма- и нейтронного излучения часть поглощенной энергии преобразуется в тепловую, вследствие чего возможен значительный радиационный нагрев изделий. Изменения электрических параметров конденсаторов связаны с физико-химическими процессами в диэлектриках, радиоллизом пропитки, потерей герметизации из-за разрушения уплотнительных узлов (в отдельных случаях в результате радиоллиза пропитки могут возникать внезапные отказы за счет разгерметизации).

Гамма-нейтронное излучение вызывает временные и остаточные изменения емкости, тангенса угла потерь и сопротивления изоляции электрических конденсаторов. Величина остаточных изменений зависит от потока нейтронов, поглощенной дозы гамма-излучения и их энергетического спектра.

Временные изменения параметров конденсаторов наблюдаются во время и непосредственно после облучения и вызываются в основном ионизирующим действием гамма-излучения. При действии гамма-импульса у конденсаторов критичным параметром является сопротивление изоляции (ток утечки). На степень изменения сопротивления изоляции конденсаторов влияют мощность дозы гамма-излучения, а также форма и длительность импульса.

Поведение конденсатора в условиях

воздействия импульса гамма-излучения при определенных условиях можно характеризовать радиационной постоянной времени, зависящей только от параметров диэлектрика [20]:

$$\tau_p = R_p C = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma_p,$$

где τ_p — радиационная постоянная конденсатора, с; R_p — сопротивление утечки при воздействии излучения, Ом; C — емкость конденсатора, Ф; σ_p — удельная проводимость диэлектрика при воздействии гамма-излучения.

Ток разряда конденсатора при воздействии гамма-излучения определяется соотношением [1, 2, 15]

$$i_p = UC\tau_p^{-1} = UCk_\gamma \rho_\gamma^\Delta,$$

где U — напряжение на конденсаторе, В; k_γ — коэффициент чувствительности к гамма-излучению $(P \cdot s^{-1})^{-1}$; C — емкость конденсатора, Ф; Δ — коэффициент; ρ_γ^Δ — мощность экспозиционной дозы гамма-излучения; Δ — степень.

Основным параметром резисторов является сопротивление, изменение его значения при действии различных составляющих ИИ носит специфический характер.

Действие нейтронов вызывает в резистивном слое и подложке резистора дефекты, которые приводят к изменению общего сопротивления резистора (чаще к увеличению). Однако эти изменения вплоть до потоков 10^{16} нейтрон $\times$ см^{-2} невелики и не превышают пределов технологического разброса номиналов (включая и прецизионные резисторы) [27].

Изменение сопротивлений резисторов под действием импульсного гамма-излучения обуславливается ионизационными процессами в материалах конструкции, резистивном слое и окружающей среде.

Для высокоомных пленочных резисторов, имеющих спиральную нарезку резистивного слоя, основной вклад в величину ионизационного тока вносит ток утечки в межвитковом зазоре за счет увеличения проводимости воздуха и материала защитного покрытия. Значение шунтирующего сопротивления при $\rho_\gamma = 10^7 P \cdot s^{-1}$ может оказать

ся меньше 1 МОм и оценивается по эмпирической формуле [27]

$$R_{\text{ш}} = \frac{1}{\pi D l / t_c} \left[\frac{7,3 \cdot 10^{10}}{\rho_{\gamma}^{0,5}} - \frac{4h}{k \rho_{\gamma}^{\Delta}} \frac{1}{(t_c - a)} \right],$$

где D — диаметр основания резистора, см; l — длина основания, см; t_c — шаг спирали, см; a — межвитковой зазор, см; k — коэффициент, определяющий влияние диэлектрика, использованного для защитного покрытия; $\pi D l / t_c$ — длина спирали.

Уменьшение сопротивления низкомных резисторов под действием импульсного гамма-излучения происходит за счет уменьшения контактного сопротивления, соизмеримого в нормальных условиях с сопротивлением резистивного слоя и обусловленного ионизацией воздуха в неровностях контакта.

Изменение сопротивления резистора в результате воздействия импульсного гамма-излучения, как правило, повторяет во времени форму гамма-импульса. Ионизационные процессы прекращаются сразу же после прекращения облучения.

В трансформаторах и дросселях с учетом их конструкции и особенностей работы, по-видимому, не будет каких-либо изменений параметров, влияющих на работоспособность в условиях воздействия импульсной проникающей радиации.

Заметим, что сопротивление изоляции уменьшается по сравнению с первоначальным на шесть-семь порядков, но это изменение временное. После прекращения облучения сопротивление восстанавливается практически до первоначального значения. После облучения все образцы выдерживают испытание на электрическую прочность [1].

В изделиях из ферромагнитных материалов больше изменяются структурно-чувствительные свойства — проницаемость, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность. Причем изменение этих свойств происходит в зависимости от изменения степени упорядоченности структуры. Материалы с высокой начальной проницаемостью и

низкой коэрцитивной силой в большей степени изменяют свои характеристики (сплав Fe—Ni, пермаллой и т. д.). Материалы с относительно низкой проницаемостью и высокой коэрцитивной силой слабо подвержены воздействию радиации.

Воздействия импульса гамма-излучения с мощностью дозы до 10^{10} Р·с⁻¹ не вызывают «списывания» информации как с ферритовых сердечников, так и с устройств памяти, выполненных на стандартных кубах памяти [1].

Радиационные эффекты в кварцевых резонаторах и фильтрах зависят от типа среза кристалла, технологии его получения, конструктивных особенностей кристаллодержателя, баллона и вида воздействующего излучения. При воздействии ИИ в кварцевых резонаторах имеет место временной сдвиг фазы от 1 до 90°.

Резонансные фильтры во время облучения изменяют свою резонансную частоту в сторону увеличения, но после прекращения облучения приходят в исходное состояние. Повышенной радиационной стойкостью обладают кварцы со срезом типов АТ и ДТ на естественном сырье, а также кварцы типа «Морион» [6].

Для всех типов фильтров при воздействии любого вида ИИ изменение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) лежит в пределах погрешности измерений. Исключение составляют фильтры, содержащие подстроечные конденсаторы с воздушным диэлектриком, где при импульсном воздействии имеют место полная ионизация и потеря работоспособности, а также узкополосные фильтры, где более существенно влияние ухода частоты кварцевых резонаторов на изменение АЧХ фильтра.

Наиболее чувствительными элементами к воздействию непрерывного и импульсного гамма- и нейтронного излучений у радиочастотных соединителей и низкочастотных разъемных контактных соединений являются опорные шайбы и контактные промежутки из различных органических диэлектриков и пластмасс. Наименее радиационно стойкими являются соединители с опорными шайбами из фторопласта-4 [17].

При воздействии импульсного гамма-излучения в материалах опорных шайб и контактных промежутках за счет ионизации возникают токи утечки, что приводит к резкому снижению сопротивления изоляции и ухудшению электрической прочности соединителей и разъемных контактных соединений. Такое изменение сопротивления изоляции носит обратимый характер и после прекращения импульса излучения практически полностью исчезает.

4. ЭФФЕКТЫ В ТИПОВЫХ СХЕМАХ И ВОЗМОЖНЫЕ ВИДЫ ОТКАЗОВ В АППАРАТУРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Воздействие гамма- и нейтронного импульсов на аппаратуру приводит к изменениям ее работоспособности, которые определяются изменениями параметров материалов и электрорадиоизделий, схемным построением подсистем аппаратуры, структурно-функциональным построением аппаратуры, логикой ее работы и характеристиками полей ИИ, воздействующих на аппаратуру. Все многообразие радиационных эффектов в аппаратуре может быть сведено к изменению ее выходных характеристик (чувствительности, точности, разрешающей способности и т. п.) и искажению информационного потока, циркулирующего в аппаратуре (искажение входа команд, выдача неправильных координат цели, срыв автосопровождения, пропадание посылок и т. п.). Указанные эффекты в свою очередь приводят к уменьшению вероятности успешного выполнения аппаратурой заданных функций.

Все характерные отказы в подсистемах аппаратуры принято подразделять на необратимые (устойчивые) и обратимые (временные).

Связанные с интегральными эффектами отказы РЭА по своему физическому проявлению являются необратимыми и возникают вследствие постепенного накопления радиационных дефектов в материалах и изделиях. Отказ аппаратуры (изделия) наступает тогда, когда изменение ее параметров превы-

сит допустимые пределы, что может произойти как в процессе, так и после воздействия нейтронного излучения. Поскольку при достижении предельного для данной аппаратуры (изделия) значения потока нейтронов ($\Phi_{\text{пред}}$) весьма вероятно, что ее параметры выйдут за установленные пределы, необратимые отказы представляют собой основной вид радиационных отказов.

Отказы, обусловленные нестабильными структурными повреждениями, а также ионизационными эффектами, являются обратимыми. Для этих отказов наиболее характерны временные нарушения работоспособности РЭА (временный уход параметров за пределы допусков, искажение информации и восстановление ее через некоторое время после радиационного воздействия), возникающие в момент действия импульса нейтронов.

В связи с существенными различиями физических процессов, происходящих в активных элементах разных классов, типовые схемы целесообразно классифицировать по виду применяемых активных элементов. При этом предполагается, что основные радиационные нарушения связаны с процессами в активных элементах. В большинстве случаев такое предположение справедливо.

С точки зрения применяемых активных элементов можно выделить схемы, выполненные на электровакуумных, газонаполненных и полупроводниковых приборах.

Конструктивное выполнение транзисторных схем в виде функциональных узлов, модулей или микромодулей, а также гибридно-пленочных микросхем не оказывает существенного влияния на характер радиационного изменения их параметров. Спорным остается вопрос о включении в последний класс полупроводниковых интегральных микросхем, так как при работе их в радиационных условиях могут возникать некоторые специфические явления, связанные в первую очередь с влиянием подложки и изолирующих переходов на протекание ионизационных токов при воздействии импульса гамма-излучения, а также с радиационными изменениями параметров не только

1. Характеристика необратимых отказов типовых схем аппаратуры

Тип подсистемы	Необратимые изменения при нейтронном излучении	Причины изменений
Усилители высокой и промежуточной частоты	Снижение чувствительности, увеличение коэффициента шума, сужение диапазона действия АРУ, ухудшение избирательности	Повышение шумов и снижение усилительных параметров активных элементов, смещение рабочих точек транзисторов из-за роста обратных токов, изменения входных и выходных импедансов усилительных каскадов
Усилители низкой частоты	Снижение усиления и чувствительности, рост нелинейных искажений, изменение частотных характеристик	Ухудшение усилительных и шумовых параметров полупроводниковых приборов, изменение рабочих режимов за счет роста обратных токов, изменение входных сопротивлений усилительных каскадов
Генераторы с кварцевой и параметрической стабилизацией частоты	Изменение номинальной частоты, искажение формы сигнала, срыв колебаний	Снижение добротности кварца за счет воздействия потерь, снижение входного сопротивления усилительных каскадов, смещение рабочих точек транзисторов
Видеоусилители, импульсные усилители	Снижение усиления, сужение динамического диапазона, изменение частотной и амплитудной характеристик	Снижение усилительных параметров активных элементов, изменение входных и выходных импедансов, рост шумов
Усилители постоянного тока	Снижение усиления, входного сопротивления и нагрузочной способности, изменение напряжения смещения нуля	Снижение коэффициентов передачи тока транзисторов, рост обратных токов переходов, различия в изменениях параметров транзисторов
Преобразователи напряжения	Снижение уровня выходного напряжения и нагрузочной способности, полный отказ схемы	Снижение усилительных параметров транзисторов, нарушение условий насыщения, рост обратных токов, тепловой пробой транзисторов
Выпрямители	Снижение выпрямленного напряжения, полный отказ схемы	Рост падения напряжения на открытых диодах, рост обратных токов, тепловой пробой диодов
Линейные стабилизаторы напряжения Стабилизаторы напряжения с импульсным регулированием	Рост или снижение выходного напряжения, снижение коэффициента стабилизации Снижение выходного напряжения и коэффициента стабилизации	Различие в изменении коэффициента передачи тока усилителя обратной связи Снижение усиления линейной части схемы, выход из насыщения регулирующих транзисторов

Продолжение табл. 1

Тип подсистемы	Необратимые изменения при нейтронном излучении	Причины изменений
Триггеры	Изменение порогов срабатывания, переход в режим автоколебаний	Изменение напряжений на эмиттерных переходах транзисторов, снижение коэффициентов передачи тока, нарушение условий насыщения транзисторов и переход в активный режим
Логические схемы	Снижение помехозащищенности, нагрузочной способности и амплитуды выходных сигналов	Рост обратных токов и напряжений насыщения транзисторов, снижение коэффициентов передачи токов транзисторов и выход активных элементов из насыщения

2. Характеристика обратимых отказов типовых схем аппаратуры

Тип схемы	Обратимые изменения параметров	Причины изменения
Усилители высокой и промежуточной частоты, видеоусилители	Искажение формы сигналов, появление на выходе помех, потеря усиления на время, определяемое постоянной цепи автоматической регулировки усиления (АРУ)	Кратковременный сдвиг рабочих точек усилительных каскадов, насыщение транзисторов
Усилители низкой частоты и постоянного тока	Кратковременные изменения формы сигналов, значительные выбросы напряжения на выход с длительностью, определяемой полосой пропускания схемы	Сдвиг рабочих точек каскадов, насыщение транзисторов, различия в реакции на импульс излучения транзисторов
Генераторы с кварцевой и параметрической стабилизацией	Изменение частоты с последующим восстановлением, искажение формы, сдвиг фазы, кратковременное уменьшение амплитуды или срыв колебаний	Изменение параметров кварцевого резонатора, снижение усиления и входного сопротивления активной части схемы, временное нарушение условий самовозбуждения
Стабилизаторы напряжения	Кратковременные изменения выходного напряжения на время, определяемое выходной емкостью стабилизатора	Насыщение транзисторов регулирующего элемента и усилителя обратной связи (преобладающее действие того или другого определяет полярность скачка напряжения)

Продолжение табл. 2

Тип схемы	Обратимые изменения параметров	Причины изменения
Триггеры, мультивибраторы, логические схемы	Ложные срабатывания, искажения импульсных последовательностей, потеря записанной информации	Снижение помехозащищенности, кратковременное насыщение транзисторов, приводящее к переразряду емкостей

3. Характеристика радиационных эффектов в некоторых устройствах аппаратуры

Наименование устройства	Возможные необратимые эффекты	Возможные обратимые эффекты
Антенно-фидерные устройства	Увеличение коэффициентов стоячей волны, искажение диаграммы направленности, снижение КПД, фидерного тракта	Пробои во внутренних полостях антенн и СВЧ приборов, нарушение синхронизации фазированных антенных решеток
СВЧ тракт приемных устройств	Снижение уровня принимаемого сигнала из-за рассогласования в СВЧ тракте, изменение частоты и мощности генерируемых сигналов	Самопроизвольный поджиг разрядников, временная потеря сигнала, срыв автоподстройки по частоте
Приемные устройства	Снижение чувствительности, избирательности, динамического диапазона. Нестабильность задержки выходного импульса относительно входного	Сбои в работе приемного устройства, пропадание полезного или появление ложного сигнала
Передающие устройства	Изменение задержки импульса запуска, частоты следования, выходной мощности, спектра	Изменение частоты следования генерируемых импульсов, выходной мощности и несущей частоты передатчика
Синхροпреобразующие устройства	Нарушение синхронизации	Временное нарушение синхронизации
Цифровые вычислительные и управляющие устройства	Снижение точности определения координат, появление ошибок при сопровождении цели	Искажение и потеря полезной информации

активных, но и пассивных элементов. Однако, как показывают результаты многочисленных экспериментов [1, 6, 14], основные причины и характер радиационных нарушений работоспособности полупроводниковых интегральных схем аналогичны для транзисторных схем других конструкций.

При использовании материала классификационных таблиц следует иметь в виду, что в зависимости от функционального назначения и критериев работоспособности конкретной схемы существенными могут оказаться те или иные эффекты.

Так, например, при использовании транзисторных ключей (инверторов) в составе триггерной запоминающей ячейки наиболее опасной может быть потеря информации в результате сбоя под действием импульса гамма-излучения. При использовании тех же ключей в логических схемах в качестве размножителей сигнала наиболее вероятной причиной нарушения их работоспособности будет уменьшение нагрузочной способности и возрастание выходного напряжения в открытом состоянии ключа, вызываемые необратимым уменьшением коэффициента передачи базового тока транзистора в результате воздействия быстрых нейтронов.

Характер изменения входного и выходного сопротивлений транзисторных усилителей при нейтронном облучении зависит от способа включения транзистора (с большим эмиттером или общей базой) и типа обратной связи.

В однокаскадных усилителях без обратной связи входное сопротивление уменьшается в схеме с общим эмиттером и увеличивается в схеме с общей базой. При достаточно глубокой обратной связи характер изменения определяется главным образом типом этой связи. В таком случае изменения входного и выходного сопротивлений определяются уменьшением глубины обратной связи в результате падения коэффициента передачи базового тока транзистора.

В усилителях с отрицательной последовательной обратной связью входное сопротивление при облучении уменьшается, а с параллельной — растет. Выходное сопротивление уменьшается в схемах с отрицательной обратной

связью по току и увеличивается в схемах с обратной связью по напряжению.

Сводная характеристика возможных эффектов из-за действия ИИ в схемах и аппаратуре приведена в табл. 1—3, составленных на основе обобщения результатов работ [6, 10, 14, 26].

5. ПОКАЗАТЕЛИ СТОЙКОСТИ ЭРИ И АППАРАТУРЫ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Из анализа изменений параметров электрорадиоизделий при воздействии нейтронов и гамма-излучения следует, что однозначно показатель стойкости ЭРИ выбрать невозможно.

Это связано с условностью выбора уровня изменения параметра, который принимается за характеристику «предельного состояния» изделия [32] при использовании его в конкретной схеме. Так, например, если в усилительных схемах допускается 30—50%-ное изменение коэффициента прямой передачи тока транзистора от номинала, то в релаксационных схемах для того же изделия возможно 70—80%-ное изменение. Следовательно, в качестве возможных показателей, характеризующих стойкость изделий, можно выбрать следующие:

показатель начальной стойкости $R_{i \text{ нач}}$ — максимальное значение соответствующих характеристик ИИ и ЭМИ [интегральный поток (флюенс) нейтронов, доза гамма-излучения, электронного и протонного излучений, мощность дозы, напряженности электрического и магнитного полей, при которых ни один из параметров i -го комплектующего изделия еще не изменяется];

показатель технической стойкости $R_{i \text{ ту}}$ — значения характеристик излучений, указанные в документации на i -е изделие;

показатель допустимой стойкости $R_{i \text{ доп}}$ — максимальное значение характеристик излучений, при которых изменение параметров примененных в схеме изделий не приводит к выходу параметров данной схемы за пределы нормативов, установленных техниче-

ской документацией на эту схему. При этом изменения параметров комплектующих изделий, не влияющих на работоспособность схемы, могут превышать нормативы, установленные в научно-технической документации на ЭРИ;

показатель предельной стойкости $R_{i\text{пр}}$ — значения характеристик излучений, указанные в технической документации на изделие в качестве его предельной радиационной стойкости.

Показатель начальной стойкости $R_{i\text{нач}}$ определяется по графику зависимости математического ожидания изменения параметра комплектующего изделия от потока нейтронов (дозы гамма-излучения) путем определения точки, где регистрируется изменение рассматриваемого параметра изделия. Поток нейтронов (доза гамма-излучения), соответствующий этой точке, принимается в качестве $R_{i\text{пр}}$.

При определении других показателей стойкости необходимо учитывать статистический разброс показателей стойкости от образца к образцу в партии ЭРИ.

Учет этого фактора осуществляется переходом от количественных показателей, определенных по зависимостям средних значений их параметров от уровня радиационного фактора, к показателям, характеризующим уровень радиационного фактора, соответствующий изменению параметра, принимаемому в качестве критерия отказа изделия. При этом для учета возможного разброса показателей стойкости от изделия к изделию в качестве показателей стойкости лучше принимать нижние границы толерантных интегралов, гарантирующие с доверительной вероятностью γ соответствие этим требованиям доли совокупности изделий рассматриваемого типа, равной p (%). Нижние толерантные границы для показателей находятся по формуле, приведенной в работе [11]:

$$R^* = \bar{R}_i - k s_{R_i}, \quad (2)$$

где $\bar{R}_i$ — значения показателей стойкости, определяемые по средним значениям изменений параметров изделий от потока (дозы); k — табулированный [11] коэффициент, зависящий от объема

выборки n , по результатам испытаний которой получены данные о стойкости ЭРИ, и выбранных (заданных) значений γ и p ;

$$s_{R_i} = \frac{\bar{R}_i s_{q_i}(\bar{R}_i)}{m_{q_i}(\bar{R}_i)} \quad (3)$$

— среднее квадратическое отклонение потока (дозы), определяемое из полуэмпирической формулы; $s_{q_i}(\bar{R}_i)$ — среднее квадратическое отклонение параметров в точке, соответствующей значению $\bar{R}_i$; $m_{q_i}(\bar{R}_i)$ — среднее значение параметра в точке, соответствующей значению R_i .

При определении количественных показателей стойкости к воздействию нейтронного потока необходимо учитывать, к какому воздействию (импульсному или непрерывному) заданы требования по стойкости на аппаратуру, а также на каких реакторах (импульсных или непрерывных) получены имеющиеся данные о стойкости комплектующих изделий. Такой учет может быть произведен при использовании коэффициента относительной эффективности с помощью соотношения

$$\Phi_{i\text{имп}} = k_{\text{эф}}(\Phi_i), \quad (4)$$

где $\Phi_{i\text{имп}}$ — импульсный поток нейтронов, характеризующий стойкость изделия; Φ_i — поток нейтронов (характеризует стойкость изделия), полученный на каком-либо источнике излучения; $k_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективности источников нейтронного излучения.

На рис. 9 представлены зависимости показателей начальной, технической, допустимой и предельной стойкости от потока нейтронов для транзистора.

При определении показателей стойкости по необратимым эффектам могут быть использованы и другие методы. Рассмотренный выше метод применим в тех случаях, когда имеются экспериментальные данные либо в виде граничных значений потока нейтронов, при котором фиксируется отказ i -х образцов ЭРИ, т. е. $\{\Phi_{n_i}\}$, либо в виде зависимостей j -х параметров i -х образцов ЭРИ от уровня потока нейтронов, т. е. $\{q_{ij}(\Phi_n)\}$. В первом случае

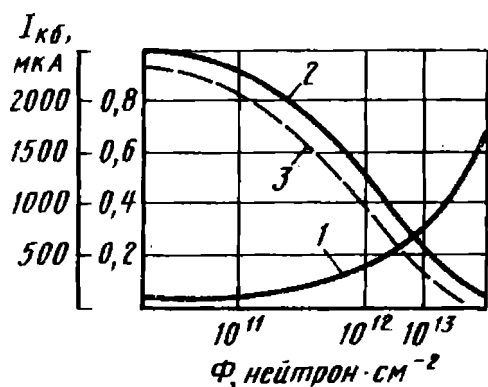


Рис. 9. Характер зависимости параметров транзистора от потока нейтронов:

1 — изменение тока $I_{кб}$; 2 — изменение отношения $q(\Phi)/q(0)$; 3 — изменение отношения $\sigma(\Phi)/\sigma(0)$

используются непосредственно рассчитанные при выбранном критерии отказа значения математического ожидания потока нейтронов, приводящего к отказу, и среднего квадратического отклонения, т. е. $m\Phi_n$ и $S\Phi_n$, а также (3) и (4). Во втором случае осуществляется преобразование m_{qj} и S_{qj} в $m\Phi_n$ и $S\Phi_n$, как показано на рис. 6, с помощью (3).

Выбранный в качестве меры стойкости поток нейтронов, при воздействии которого еще сохраняется работоспособность с γ -процентной доверительной вероятностью, может быть определен с использованием известного соотношения $1/\beta_\Phi = 1/\beta_0 + k_n\Phi/f_T$, где β_Φ — значение коэффициента усиления после и до облучения потоком Φ и β_0 — до облучения соответственно; f_T — граничная частота; k_n — константа нейтронных повреждений, определяемая экспериментально.

В предположении, что отношение f_T/β_0 является постоянным, а k подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения для всех транзисторов, вероятность Q того, что β_Φ будет меньше $\beta_{доп}$, определяется из соотношения

$$Q\{\beta_\Phi < \beta_{доп}\} \approx F_n \times \left\{ 2,25 \left[-\ln \left(\frac{\beta_{мин}}{\beta_{доп}} - 1 \right) - \ln \left(\frac{f_{T\ мин}/\beta_{мин}}{\Phi} - 16,38 \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где $f_{T\ мин}$ и $\beta_{мин}$ — соответственно значения граничной частоты и коэффициента усиления, приведенные в документации на ЭРИ; F_n — функция нормального закона распределения.

Используя выражение (5), можно построить зависимость $Q\{\beta_\Phi < \beta_{доп}\}$ от Φ и, задаваясь допустимой вероятностью отказа, определить значения $\Phi_{нач}$, $\Phi_{ту}$, $\Phi_{доп}$ и $\Phi_{пред}$, которые в последующем могут быть использованы при выборе ЭРИ.

Принцип выбора показателей стойкости к действию видов ИИ, вызывающих необратимые повреждения, связанные с уровнем потока нейтронов, дозой гамма-, протонного или электронного излучений, заключается в определении критерия отказа и соответствия ему некоторого граничного значения характеристики изменения параметра, еще не приводящего к появлению отказа. Этот же принцип может использоваться и при выборе показателей стойкости к действию видов ИИ и ЭМИ, вызывающих обратимые повреждения. Для отдельных классов ЭРИ могут быть сформулированы один или несколько критериев сохранения работоспособности, например, отсутствие ложного сигнала, отсутствие сбоя, потеря работоспособности на время, величина которого такова, что эта потеря не влияет на результаты функционирования ЭРИ, допустимая величина перенапряжения, отсутствие тиристорного эффекта, приводящего к необратимому отказу и т. п. Определив максимальную величину мощности экспозиционной дозы, при которой еще сохраняется работоспособность соответствующего изделия, можно указать максимальную мощность дозы гамма-излучения по критерию работы (без сбоев) $P_{\gamma\ пах\ сб}$, $P \cdot c^{-1}$; максимальную мощность дозы сохранения работоспособности после действия гамма-импульса $P_{\gamma\ пах\ тр}$, $P \cdot c^{-1}$; время потери работоспособности при действии гамма-импульса $P_{\gamma\ тр}$.

Вид показателей стойкости исследуемых изделий рекомендуется выбирать с учетом целей и задач проводимых оценок, этапов разработки изделия и степени достоверности исходных данных.

По виду показателя стойкости могут быть параметрическими и вероятностными. В качестве параметрических показателей стойкости могут быть приняты граничные значения уровней ИИ (при заданной форме импульсов), при которых определяющие параметры q_i ЭРИ сохраняются в пределах допусков ($q_i \in q_{i \text{ доп}}$). При этом показатель стойкости ЭРИ к действию, например, ИИ представляется в виде

$$\Phi_n: P\{q_i \in q_{i \text{ доп}}\} = R_{\text{тр}}, \gamma_{\text{тр}};$$

$$D_{\gamma}: P\{q_i \in q_{i \text{ доп}}\} = R_{\text{тр}}, \gamma_{\text{тр}}.$$

Эти показатели могут быть использованы для ориентировочной оценки стойкости ЭРИ по соответствующему критерию.

Параметрические показатели стойкости целесообразно использовать при оценке стойкости на ранних этапах разработки, так как они дают более наглядное представление о стойкости ЭРИ и позволяют наметить конкретные мероприятия по ее повышению.

Вероятностные показатели стойкости представляются численными значениями вероятности нахождения определяющих стойкость параметров ЭРИ в пределах допусков, т. е. вероятности, с которой при различных значениях уровней ИИ и ЭМИ и требуемой степени доверия эти параметры находятся в установленных пределах допусков. Этот показатель стойкости представляется в виде

$$P\{[q_i] \in [q_{i \text{ доп}}]\}: R_{\text{тр}}, \gamma_{\text{тр}}.$$

Вероятностные показатели удобны для получения обобщенного показателя стойкости ЭРИ (аппаратуры).

Если работоспособность ЭРИ определяется допустимым временем восстановления его параметров $T_{\text{доп}}$ после воздействия ИИ, то критерий стойкости в параметрической форме определяется условием

$$T_{\text{в max}}: \Phi_n, p_{\gamma} \leq T_{\text{доп}},$$

где $T_{\text{в max}}$ — максимальное время восстановления параметров ЭРИ после воздействия полей ИИ.

Вероятностный показатель $P(T_{\text{в}} \leq T_{\text{доп}})$ при заданном значении $T_{\text{доп}}$ и нормальном законе распределения времени восстановления определяется по формуле

$$P(T_{\text{в}} \leq T_{\text{доп}}): R_{\text{тр}} = \frac{1}{2} \times \left[1 + F\left(\frac{T_{\text{доп}} - \mu_{T_{\text{в}}}}{\sigma_{T_{\text{в}}}}\right) \right], \quad (6)$$

где $\mu_{T_{\text{в}}}$ и $\sigma_{T_{\text{в}}}$ — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение времени восстановления составных частей.

Таким образом, на практике разработчик имеет дело одновременно с большим числом показателей стойкости, характеризующих ЭРИ в терминах значений характеристик ИИ, при которых соблюдаются соответствующие критерии сохранения работоспособности. Используя указанную информацию полностью, он имеет возможность выбрать ЭРИ для применения в конкретной разработке таким образом, чтобы в максимальной степени использовать возможности существующей элементной базы при создании стойкой аппаратуры.

Процесс создания РЭА, стойкой к воздействию ИИ, тесно связан с использованием прогнозов и оценок способности аппаратуры выполнять заданные функции при этих воздействиях. Научно-технические прогнозы и оценки поведения РЭА и комплектующих изделий при воздействии ИИ позволяют судить о возможных их состояниях в зависимости от вида и характеристик излучений, а также оценить требуемые для достижения необходимых показателей стойкости мероприятия. На основе этих оценок можно: определить, соответствует ли исследуемая аппаратура предъявленным к ней требованиям по стойкости к ИИ; произвести сравнение стойкости различных вариантов построения системы, на основе чего выявить ее сильные и слабые стороны; направить основные усилия на обеспечение стойкости тех подсистем, которые наиболее критичны к заданным воздействиям; разработать практические мероприятия по обеспечению успешного функционирования электронной системы в условиях эксплуатации.

Область работ, направленных на обеспечение работоспособности РЭА и ЭРИ в условиях воздействия ИИ

охватывает различные этапы проектирования, изготовления и эксплуатации. На всех этапах, начиная с формирования концепции построения аппаратуры, возникает необходимость предсказания в том или ином виде показателей стойкости.

На самых ранних стадиях задача прогнозирования заключается в определении показателей стойкости, которые предположительно будет иметь проектируемая аппаратура (изделие) с требуемыми техническими характеристиками. В этом случае для формирования прогноза проводится анализ возможных технических путей создания такой аппаратуры с использованием всей научно-технической информации о современных достижениях в области проектирования и производства подобной аппаратуры и ЭРИ, идущих на комплектацию, а также обобщается опыт технической эксплуатации и применения систем, близких по своим тактико-техническим характеристикам. Однако вследствие недостаточности многих данных, в частности отсутствия достоверных данных о стойкости ЭРИ (особенно новых), а также ряда неопределенностей в построении аппаратуры, суждение о ее работоспособности носит в значительной степени ориентировочный характер.

В процессе проектирования аппаратуры по мере осуществления тех или иных решений по обеспечению требуемых технических характеристик задача прогнозирования состоит в определении показателей стойкости, которыми будет обладать вариант построения аппаратуры, выбранный разработчиком для реализации. Прогноз осуществляется на основе определенного объема исходных данных, который тем больше (а данные достовернее), чем ближе этап проектирования аппаратуры к завершению. Прогноз и в данном случае тем ценнее, чем он своевременнее, так как при этом существуют большие возможности для использования его результатов при разработке соответствующих решений, позволяющих изменить ожидаемое состояние аппаратуры в требуемом направлении.

Прогнозирование включает в себя: подготовку данных для формирования прогноза; разработку соответствующих

мероприятий, их реализацию (реальную или гипотетическую); измерение или получение дополнительных данных, повышающих достоверность прогноза; сравнение результатов прогнозирования с требованиями, после чего, в случае необходимости, цикл повторяется.

В ходе производства возникает задача обеспечения сохранения требуемых значений технических характеристик и показателей стойкости у каждого из изготавливаемых образцов аппаратуры. На этом этапе могут быть получены достаточно полные и сравнительно достоверные данные о стойкости образцов аппаратуры как на основе расчетных оценок, так и по результатам испытаний. С учетом этих данных разрабатываются рациональные методы контроля качества выпускаемой аппаратуры (изделий).

На этапе эксплуатации (хранения) задачей прогнозирования является определение показателей стойкости конкретных образцов аппаратуры (ЭРИ), а также предсказание возможных нарушений их работоспособности. Это позволяет обеспечить функционирование аппаратуры (ЭРИ) на установленном уровне организацией контроля ее технического состояния и проведением мероприятий по техническому обслуживанию.

Следовательно, на всех этапах разработки, производства и эксплуатации аппаратуры (изделий) основная цель прогнозирования состоит в получении информации, необходимой для разработки эффективных мероприятий по обеспечению требуемой стойкости РЭА (ЭРИ) к воздействию ИИ.

При прогнозировании и оценке стойкости аппаратуры на этапе проектирования могут определяться как общие, так и частные показатели стойкости.

К общим показателям относятся уровни ИИ, при воздействии которых вероятность сохранения работоспособности равна или превышает заданную, или вероятность сохранения работоспособности при воздействии заданных уровней ИИ; к частным — время потери работоспособности при воздействии требуемых уровней ИИ, максимальная мощность дозы гамма-излучения по сбою и т. п. Частные показатели ис-

пользуются, как правило, в интересах разработки мероприятий по обеспечению требуемой стойкости к ИИ.

Сложность и многообразие разнообразных радиационных эффектов в аппаратуре, трудности аналитического описания процесса функционирования в виде зависимостей ее выходных характеристик от параметров, входящих в состав аппаратуры подсистем, ЭРИ и материалов, неизбежно приводят к многоэтапному процессу оценки стойкости аппаратуры. Каждый из этих этапов подчинен решению конкретной задачи, влияющей на конечный эффект. На каждом этапе могут использоваться специфические методы решения.

На ранних этапах проектирования при решении этих задач обычно используются упрощенные методы, а на более поздних — сочетание упрощенных методов и методов, учитывающих особенности схемного построения и специфику воздействия ИИ.

Общая структурная схема процесса оценки радиационной стойкости аппаратуры, разработанная на основе накопленного к настоящему времени опыта, приведена на рис. 10.

В процессе анализа технической документации и изучения аппаратуры определяются: характер и последовательность решаемых задач; характеристики полей ИИ, действующих на аппаратуру; величины допусков на выходные параметры, а также величины вероятностей сохранения выходных параметров в пределах допусков; состав и номенклатура ЭРИ и конструктивных материалов; наличие данных о радиационной стойкости, возможные функциональные режимы работы аппаратуры и т. п.

Затем на основании анализа возможных эффектов, возникающих в электрических цепях РЭА в процессе облучения, а также справочных данных о радиационной стойкости конструктивных материалов и комплектующих элементов определяются возможные виды отказов и оцениваются последствия, к которым они могут привести в подсистемах и аппаратуре.

Этап завершается формулировкой критериев отказов (количественных и качественных признаков) для каждой подсистемы и аппаратуры в целом.

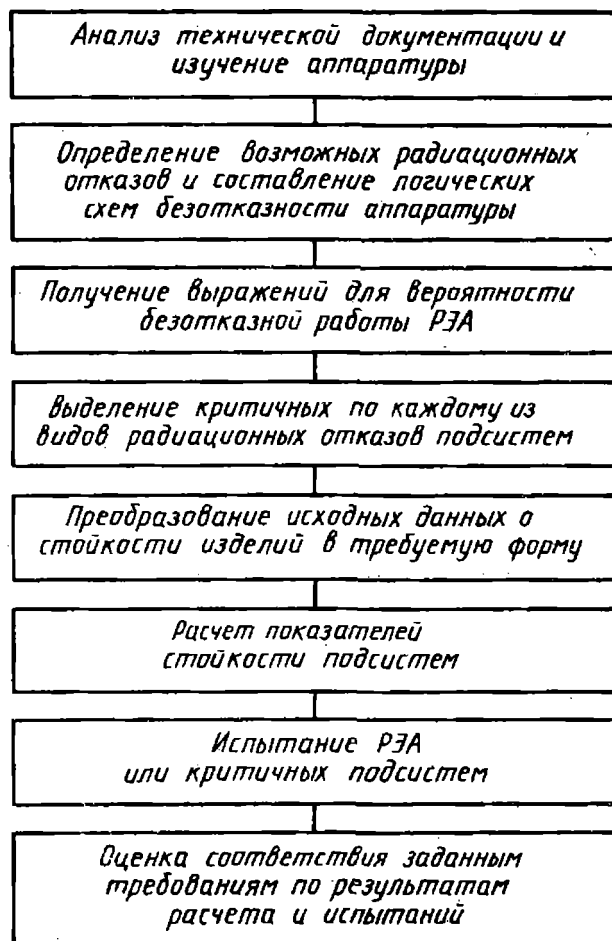


Рис. 10. Общая структурная схема процесса оценки радиационной стойкости аппаратуры

При формировании критериев отказов могут быть использованы электрические, временные, оптические, механические и другие свойства анализируемой аппаратуры, характеризующиеся соответствующими показателями или параметрами.

С использованием этой информации, а также информации об основных и второстепенных задачах, выполняемых аппаратурой, и фазах выполнения этих задач составляется логическая схема безотказности (ЛСБ) аппаратуры. Предварительно строятся частные логические схемы безотказности по каждому из возможных видов радиационных отказов отдельно, для каждого функционального и выборочного режимов работы аппаратуры, которые затем объединяются в общую ЛСБ.

При составлении ЛСБ необходимо прежде всего расчленить аппаратуру на подсистемы, имеющие функциональ-

по законченный характер. Эта работа выполняется на основании функциональных и принципиальных схем аппаратуры и подсистем с учетом результатов, полученных на предыдущих этапах оценки, и возможности математического описания процесса функционирования выделенных подсистем. Затем устанавливаются возможные комбинации логических связей подсистем, характеризующих работоспособность аппаратуры. При этом прослеживается, какими путями условный сигнал может пройти со входа на выход аппаратуры, и оценивается возможность функционирования аппаратуры по каждому из возможных путей при условии отказа одного или всех остальных. Те подсистемы, отказы которых в отдельности приводят к отказу аппаратуры, соединяются в ЛСБ последовательно. При наличии разветвлений возможных путей прохождения условного сигнала необходимо оценить функциональную роль каждой ветви и возможность выполнения заданных функций при условии отказа других ветвей. Если задача, решаемая аппаратурой, может быть выполнена ветвью при условии отказа или ухудшения характеристик другой, то они в ЛСБ соединяются параллельно. В случае необходимости ЛСБ могут составляться и для отдельных подсистем с учетом функционального режима работы аппаратуры.

На основе конструкции ЛСБ аппаратуры с помощью известных способов [1, 9] получают выражения для вероятности безотказной работы. Затем переходят к этапу определения количественных показателей стойкости подсистем, отображением которых являются элементы ЛСБ. Однако в этом случае объем необходимых расчетов может оказаться неоправданно большим из-за выполнения расчетов для тех подсистем, изменение характеристик которых при воздействии излучения незначительно. Поэтому следующим этапом процесса оценки стойкости аппаратуры является этап определения критичных к воздействию соответствующих видов излучения подсистем. Назначением этого этапа является существенное уменьшение трудозатрат по оценке. При этом должны применяться такие методы, которые отличаются простотой

реализации, иногда в ущерб точности, но дают уверенность в том, что подсистемы, которые не могут подвергаться дальнейшему анализу, имеют при заданном уровне излучения вероятность безотказной работы, близкую к единице. Эти методы должны позволить выделить подсистемы, критичные к воздействию излучения по каждому из возможных видов отказов.

После того, как определены критичные по каждому из видов отказов подсистемы, необходимо произвести преобразование исходной информации о стойкости комплектующих изделий и материалов в требуемую для количественного определения показателей стойкости форму. Необходимость введения этого этапа в общую структурную схему процесса стойкости технических устройств продиктована тем, что справочные данные получают, как правило, на моделирующих установках, характеристики излучений которых отличаются от реальных. В связи с этим необходимо преобразовать имеющиеся данные для учета различий в спектре нейтронов реальных источников излучений и моделирующих установок, а также различий, обусловленных длительностью облучения и влиянием сопутствующего гамма-излучения (см. с. 207).

Следующим этапом является определение количественных показателей стойкости подсистем аппаратуры. Сложность этого этапа обусловлена необходимостью получения математического описания каждой из анализируемых подсистем и определения на этой основе показателей стойкости в вероятностном или параметрическом виде. Некоторые методы определения количественных показателей стойкости излагаются в работе [10]. Необходимым условием для реализации этих методов является наличие математической модели подсистемы, учитывающей стабильные структурные повреждения и ионизационные эффекты в изделиях, обусловленные действием излучения.

Требуемые аналитические зависимости выходных параметров подсистем от параметров примененных комплектующих изделий могут быть получены с помощью различных методов анализа электро- и радиоцепей, в частности, с

помощью матричных методов, методов топологического описания структуры подсистем, методов контурных токов и узловых потенциалов и т. п.

Важным этапом составления математической модели подсистем является построение эквивалентной схемы. Оставляя в стороне общие соображения, связанные с построением эквивалентных схем, отметим особенности построения эквивалентной схемы при анализе стойкости подсистем к действию гамма- и нейтронного излучений, вызывающих ионизационные эффекты. В этом случае схема замещения каждого из элементов дополняется либо генераторами тока, либо элементами, проводимости которых меняются под действием радиации.

Эквивалентные схемы основных компонентов электронных схем при воздействии импульсного гамма-излучения приведены в работах [10, 12, 26].

Следующим обязательным этапом процесса оценки радиационной стойкости, который может иметь самостоятельное значение, является этап проведения испытаний.

Конечным этапом является оценка соответствия стойкости аппаратуры заданным требованиям по результатам расчета и испытаний. На этом этапе проводится статистическая проверка того, насколько хорошо результаты расчета совпадают с результатами испытаний.

6. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ, ОБЛАДАЮЩИХ МИНИМАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ К РАДИАЦИОННЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ЭРИ

Приступая к разработке радиационно стойких узлов и типовых схем, разработчик должен знать, какие нарушения работоспособного состояния ЭРИ и типовых схем могут возникнуть при воздействии различных видов ИИ, являются ли они *временными* (обратимыми) или *постоянными* (необратимыми).

Ионизация, обусловленная действием гамма-импульса, оказывает влияние на работу, например, интегральной схемы, благодаря одному из

трех механизмов: возникновению фототоков, протекающих через обратносмещенные переходы, полному нарушению работы транзистора и ухудшению свойств поверхности. Фототоки, протекающие в цепях, могут приводить к появлению сигнала помехи на выходе схемы длительностью от нескольких наносекунд до сотен микросекунд в зависимости от времени восстановления элементов схем. Может также произойти полное нарушение работоспособности транзисторов, например, в ИС с изоляцией $p-n$ -переходами, из-за того, что переход между коллектором и подложкой во время действия гамма-импульса становится проводящим. Полное нарушение работоспособности схемы может также возникнуть из-за того, что соответствующие элементы становятся проводящими и могут пропускать неограниченный ток через переходы в режиме насыщения. При этом могут возникнуть как вторичный пробой, так и выгорание металлизации или перегорание токопроводящих цепей (табл. 4).

Во избежание подобных отказов необходимо принять меры для того, чтобы во все токопроводящие цепи между источником питания и (или) конденсаторами фильтра и «землей», которые содержат ППП, были последовательно включены резисторы. Все схемы должны проектироваться с таким расчетом, чтобы переход ППП из состояния насыщения в нормальный рабочий режим происходил за время, приемлемое с точки зрения выполнения аппаратурой своих функций. В частности, триггеры должны проектироваться так, чтобы была обеспечена асимметричная подача сигнала в базу таким образом, чтобы один из транзисторов преимущественно открывался, а другой — закрывался после выхода из режима насыщения.

Особое внимание должно быть уделено защите устройств памяти таким образом, чтобы обеспечить сохранение всей необходимой информации для последующей нормальной работы. Эти данные могут быть записаны в магнитных элементах памяти, а электронные схемы, предназначенные для их считывания, должны быть разрабо-

4. Сводная характеристика радиационных эффектов в электрорадиоизделиях

Интегральный поток нейтронов, нейтрон·см ⁻²	Эффекты	Мощность дозы, рад·с ⁻¹	Эффекты	Полная доза, рад	Эффекты
10 ¹⁵	Ухудшаются параметры МОП-полевых транзисторов, стойких логических микросхем	10 ¹¹	Полное насыщение ППП	10 ⁶	Ухудшаются параметры отдельных ППП
10 ¹⁴	Ухудшаются параметры высокочастотных и полевых транзисторов	10 ¹⁰	Достигается порог срабатывания стойких логических микросхем	10 ⁵	Ухудшаются параметры КМОП- и МОП-приборов
10 ¹³	Ухудшаются параметры среднечастотных транзисторов	10 ⁹	Возникают условия «смыкания»	10 ⁴	Наступает сдвиг напряжения на затворе промышленных НМОП/КМОП-интегральных схем
10 ¹²	Сдвиг напряжения стабилизации стабилитронов	10 ⁸	Наблюдается значительный фототок во всех транзисторах	10 ³	У отдельных промышленных НМОП-структур наблюдается сдвиг напряжения затвора
10 ¹¹	Изменяются параметры мощных низкочастотных транзисторов	10 ⁷	Возникает фототок в <i>p-i-n</i> -диодах	10 ²	Появляется сдвиг частоты в кварцевых кристаллах

таны так, чтобы предотвращать попадание генерированных ИИ токов в устройства памяти во время действия импульса. Для этих целей могут быть использованы быстродействующие управляемые ИИ ключевые схемы. Если быстродействие несущественно, для записи данных могут использоваться релейные элементы или магнитная лента, считывание с которой осуществляется после воздействия импульсных ИИ. Если требуется быстрое восстановление, то могут использоваться специальные схемы, осуществляющие прерывание цикла вычислений после обнаружения действия ИИ, с последующим проведением расчетов для последнего непрерывного цикла.

Воздействие нейтронов в свою очередь также приводит к полному нарушению работоспособности схемы из-за недопустимой деградации параметров, входящих в состав схемы ЭРИ, либо к временным отказам, обусловленным ионизацией в результате действия нейтронов или отжига нестабильных структурных повреждений. Накопление поверхностного заряда или образование зарядов в окружающей атмосфере также приводит к деградации параметров ЭРИ.

Обобщая известные методы предотвращения нарушений работоспособности схем из-за воздействия ИИ, описанные в работах [6, 14, 23, 26, 27], можно свести эти методы к следующим:

предотвращение нарушений от временных эффектов — к компенсации протекающих токов; защите от протекания избыточных токов; защите от перенапряжений; мерам по ускорению восстановления схемы в исходное состояние; сохранению основных данных в стойкой памяти; мерам по предотвращению потери информации; мерам к предотвращению запираания дискретных схем;

предотвращение нарушений от постоянных эффектов — к использованию высокочастотных приборов; ограничению применения МОП-приборов при высоком уровне дозы; разработке схем, допускающих значительные уходы параметров элементов; обеспечению работы ЭРИ

в предельных режимах; минимизации чувствительности схем к изменению параметров ЭРИ.

Естественно, что эти рекомендации носят достаточно общий характер и их схемные реализации многообразны. Но их рассмотрение позволяет сформулировать облик «идеальной» радиационно стойкой схемы [1]. Эта схема должна иметь: малое отношение числа активных и пассивных элементов; низкую рассеивающую мощность; высокую универсальность, заключающуюся в возможности реализовать широкие функциональные возможности; минимальную зависимость выходных характеристик от коэффициента передачи и времени накопления.

Чем же объясняется, что «идеальная» радиационно стойкая схема должна обладать этими признаками? Малое число активных элементов по отношению к пассивным способствует предотвращению усиления фототоков, минимизации числа более критичных к действию ИИ элементов схемы (активные ЭРИ, как правило, менее стойки, чем пассивные), а также минимизации появляющихся в течение нескольких минут после действия импульса ИИ задержанных паразитных сигналов, обусловленных освобождением зарядов, накопленных в изолирующих материалах. Если схема обладает малой рассеиваемой мощностью, задача создания радиационно стойкого источника питания облегчается, поскольку требуемые для создания мощных источников питания мощные транзисторы и силовые диоды, как правило, обладают меньшей стойкостью по сравнению с другими приборами. Чем большим числом функций обладает схема, тем меньше число типов схем в аппаратуре и тем дешевле становится проверка ее стойкости.

Разработку схемы целесообразно начинать с рассмотрения вопросов обеспечения ее стойкости к воздействию импульса гамма-излучения.

Принципы проектирования схем, стойких к воздействию импульса гамма-излучения, являются достаточно общими для любых видов излучений вызывающих кратковременные (обратимые) изменения параметров в аппаратуре. Самым простым принципом,

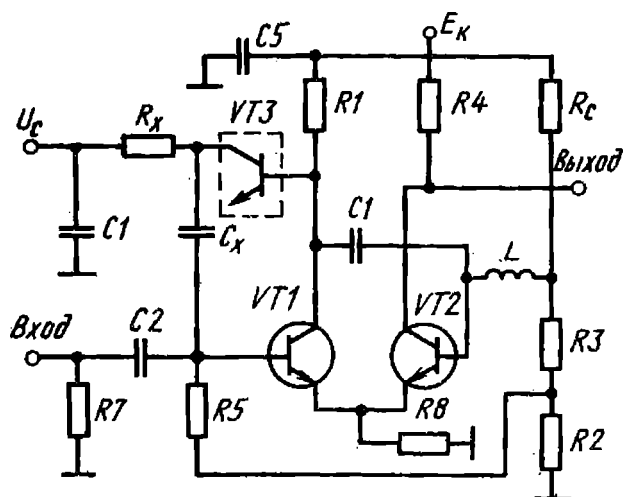


Рис. 11. Принципиальная схема триггера на транзисторах с компенсирующим переходом в цепи база—коллектор

не требующим изменения и усложнения схемы, является применение менее чувствительных к действию гамма-излучения комплектующих изделий. По зарубежным оценкам [23, 26] за счет соответствующего выбора изделий в пределах одного класса стойкость схемы может быть повышена в 5—10 раз, а за счет выбора в пределах различных классов (полупроводниковых или электровакуумных приборов) — в 10—100 раз. Например, стойкость транзисторного ключа (по критическому значению мощности дозы) определяется выражением

$$P_{\gamma \max} \approx \frac{E_{\text{см}} - I_{R0} R_2}{k_{\gamma} R_2 \parallel R_{\Gamma} A}, \quad (7)$$

где $E_{\text{см}}$ — напряжения смещения; P_{γ} — мощность дозы, соответствующая отпиранию транзистора; k_{γ} — коэффициент чувствительности транзистора к гамма-излучению; A — коэффициент, характеризующий амплитуду импульса тока в максимуме и зависящий от временных характеристик схемы; R_{Γ} — сопротивление генератора на входе.

Как видно из выражения (7), стойкость схемы зависит от коэффициента k_{γ} , значения которого для различных типов транзисторов отличаются на порядок и более.

При синтезе структурно-функциональной схемы основное внимание

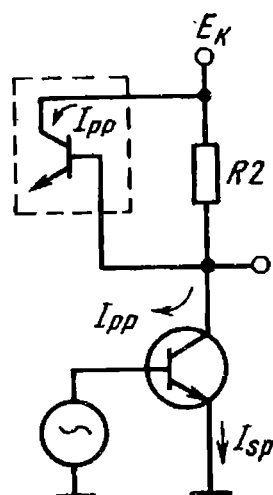


Рис. 12. Компенсация в коллекторной нагрузке

обращается на разработку принципа действия схемы, оптимизацию алгоритма работы, рациональный выбор системы сигналов, применение резервирования нерадиационно стойких составных частей аппаратуры, использование локального или общего блокирования ионизационных токов, возникающих в схеме, путем отключения или снижения питающих напряжений на время облучения с последующим восстановлением информации после действия импульса ИИ.

При проектировании радиоэлектронных схем также учитывают их особенности, а именно: рациональную компоновку, применение поглощающих экранов, заливок и покрытий; применение специальных конструктивных и технологических мер; разработку систем охлаждения.

Рациональная компоновка должна проводиться с учетом плотности заполнения устройств различными материалами и элементами схем. При высокой плотности компоновки следует избегать расположения шин питания и высоковольтных цепей рядом с сигнальными. Следует также разносить цепи, находящиеся под разным потенциалом в целях снижения уровня ионизационных токов и защиты от пробоев в момент воздействия ИИ. Защита нерадиационно стойких схем от воздействия ИИ поглощающими экранами связана с увеличением габаритных размеров и массы

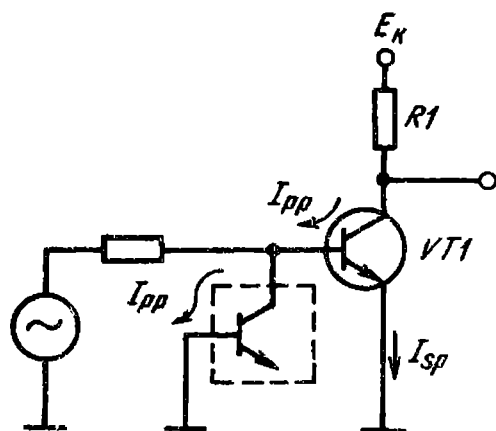


Рис. 13. Базоэмиттерная компенсация

аппаратуры, поэтому при выборе материалов для экранов необходимо учитывать толщину и массу вещества, приходящегося на единицу поверхности экрана, при заданной величине ослабления излучения.

Схемотехнический метод проектирования радиационно стойких схем заключается в разработке и выборе структуры схемы, принципа ее работы, а также оптимизации электрических режимов, номинальных значений параметров изделий и допусков на их изменение с целью ослабления зависимости выходных параметров от изменений параметров изделий. Обеспечение радиационной стойкости схем путем оптимизации электрических режимов изделий основано на использовании зависимости стойкости некоторых классов элементов от режима их работы. Эффективность этого мероприятия зависит от типа схемы и от степени влияния электрического режима на стойкость примененных изделий.

Оптимизация номинальных параметров изделий и допусков на их изменение заключается в выборе элементов, обеспечивающих наименьшее изменение параметров схем при воздействии ИИ и наибольшую область безотказной работы с учетом других воздействующих факторов.

Так, например, при анализе выражения (7) можно убедиться, что на стойкость ключа влияют «номиналы» изделий и их рабочие режимы, при этом оптимальный выбор электрических режимов и «номиналов» изделий

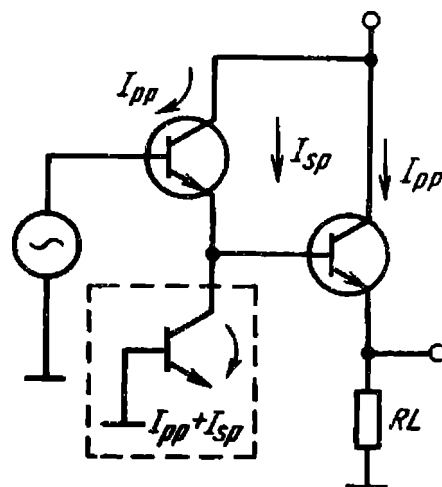


Рис. 14. Компенсация фототоков в схеме на составном транзисторе

может дать выигрыш в несколько раз. В схеме ключа для повышения его стойкости следует увеличивать значения $E_{см}$ и уменьшать сопротивление резистора в цепи смещения до значений, при которых схема остается еще работоспособной. Такой выбор номиналов является оптимальным с точки зрения проектирования схем, стойких к действию импульса гамма-излучения.

Суть одного из компенсационных методов сводится к включению между коллектором и базой транзистора дополнительно обратносмещенного перехода с управлением напряжением на переходе для обеспечения наилучшей компенсации фототоков. Во время

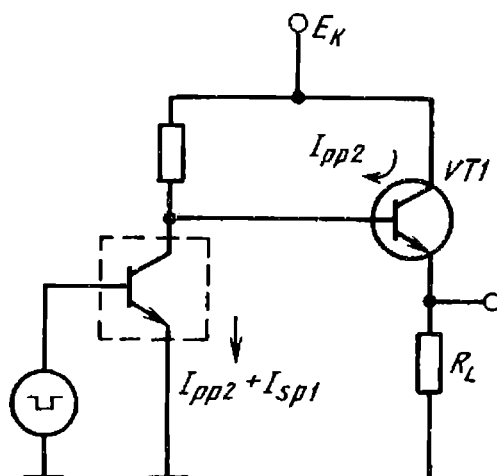


Рис. 15. Компенсация фототоков транзистора с нагрузкой в цепи эмиттера

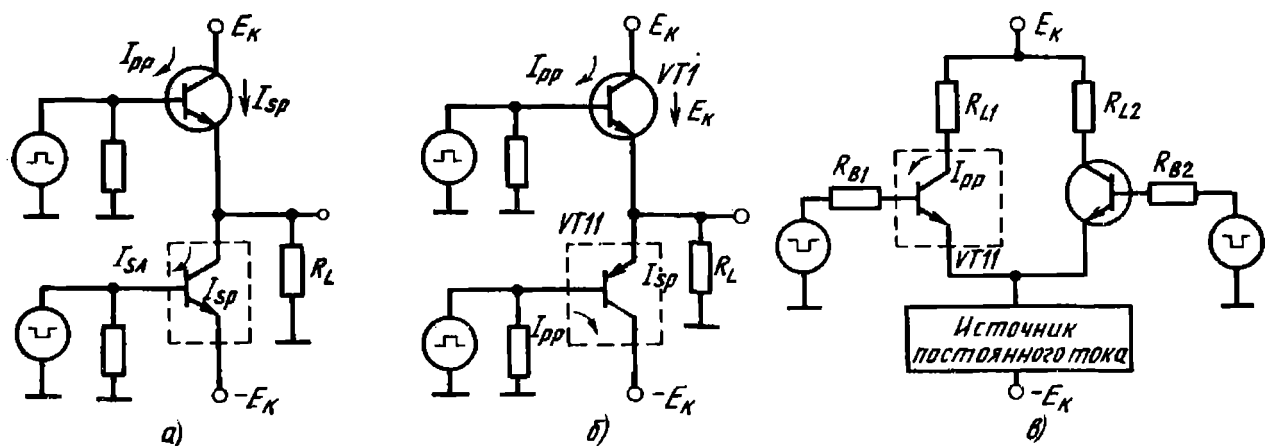


Рис. 16. Компенсация в схемах с транзисторными парами:

а — балансная пара; б — пара дополняющих транзисторов; в — дифференциальная пара

действия гамма-импульса такой обратносмещенный переход создает первичный фототок, который уменьшает отклик исходного транзистора на воздействие этого импульса.

Компенсационная цепь практически не влияет на обычную работу схемы, пока компенсирующий переход остается смещенным. Одно из возможных включений компенсирующей цепи в триггере показано на рис. 11. Принципиально возможны и широко используются на практике и другие виды включения компенсирующих цепей, приведенные на рис. 12—18 [26].

Приведенные схемы могут иметь много различных вариантов построения, при выборе которых следует учитывать необходимость обеспечения стойкости по дозовым эффектам, а также возможные выбросы напряжений и токов и т. п.

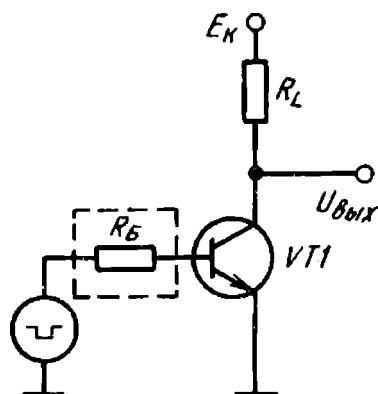


Рис. 17. Схема с транзистором в режиме насыщения и внешним сопротивлением в цепи базы

У схем, для которых пропадание одного или нескольких рабочих сигналов, но критичных к ложным импульсам, не является опасным, стойкость может быть повышена применением специальных изделий, шунтирующих ионизационные токи в определенных цепях на время облучения. В качестве шунтирующих могут применяться изделия, способные изменить свое сопротивление от сотен килоом до единиц Ом. Из имеющихся в настоящее время изделий для этих целей могут использоваться полупроводниковые диоды и транзисторы, фотодиоды и фотосопротивления, а также газоразрядные приборы.

Примером применения такого метода может служить схема, представленная на рис. 18, в которой шунтирующим устройством является транзистор VT2, работающий в ключевом режиме.

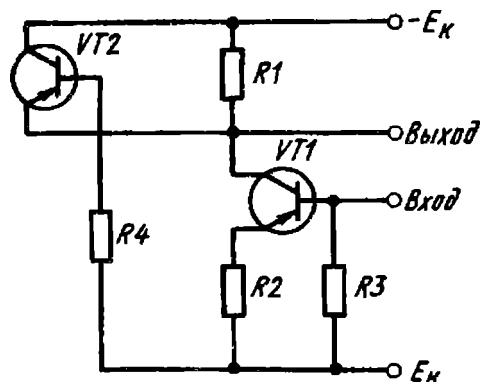


Рис. 18. Схема с шунтирующим транзистором

Стойкость схемы можно повысить выравниванием потенциала во время облучения на соответствующих электродах активного элемента. Это осуществляется с помощью тех же элементов, которые применяются для шунтирования. Например, если в схеме, представленной на рис. 18, эмиттер транзистора VT_2 соединить не с коллектором транзистора VT_1 , а с его эмиттером, то во время облучения потенциал эмиттера при открытом транзисторе VT_2 будет равен потенциалу эмиттера транзистора VT_1 . При этом уровень выходного напряжения при действии гамма-импульса практически не изменится.

Для схем, работоспособность которых в условиях облучения определяется только отсутствием на выходе ложного сигнала (если к ним не предъявляются жесткие требования по быстродействию), можно рекомендовать такой метод повышения стойкости, как увеличение инерционности. Включением соответствующих реактивностей в определенные цепи схемы можно увеличить ее инерционность и тем самым задержать нарастание тока в этих цепях в момент действия гамма-импульса до безопасного уровня.

Для схем, работающих на однополярных импульсах, таких, например, как различного рода ключевые схемы, одновибраторы, блокинг-генераторы, усилители однополярных импульсов, можно рекомендовать построение схем с использованием транзисторов в насыщенном или близком к насыщению режимов в период между входными сигналами [26]. Это обеспечивает их нечувствительность к гамма-импульсу. Получение необходимой полярности может быть достигнуто фазоинверторными связями.

Стойкость схем, работоспособность которых в условиях воздействия гамма-импульса определяется длительностью переходных процессов (сбоев), может быть повышена уменьшением соответствующих индуктивностей, емкостей и других параметров комплектующих изделий, влияющих на инерционность схемы.

Принципы проектирования схем, стойких к воздействию нейтронов по необратимым повреждениям, яв-

ляются общими для всех видов излучений, вызывающих необратимые изменения параметров элементов. К ним относятся: применение стойких изделий; оптимизация электрических режимов, номинальных значений параметров и допусков на их изменение; оптимизация выбора элементов и схем; введение глубоких отрицательных обратных связей (ООС); использование компенсационных схем с дополнительными радиационно-чувствительными изделиями; стабилизация выходных параметров с помощью радиационно-стойких элементов (стабилитроны, линии задержки и др.).

Частные рекомендации по проектированию схем приведены в работе [10].

Таким образом, при разработке типовых схем, обладающих повышенной стойкостью к воздействию гамма-излучения, нейтронов, протонов, электронов, следует руководствоваться следующими основными принципами в отдельности или в совокупности в зависимости от вида эффектов (временных или необратимых):

везде, где это возможно, необходимо использовать логические схемы, работающие в режиме насыщения, пассивные элементы (индуктивности и трансформаторы) и магнитные запоминающие устройства; при выборе ненасыщенного режима работы транзисторов следует обеспечивать максимальный ток базы и минимальное сопротивление базовой цепи;

использовать схемы с максимальным запасом по коэффициенту усиления и по помехоустойчивости, эксплуатировать схему при высокой окружающей температуре и высоких уровнях инжекции. Последнее особенно важно для уменьшения времени потери работоспособности из-за нестабильных структурных повреждений и их отжига;

использовать каскады с непосредственными связями; отрицательную обратную связь и схемы с ограничением протекающих токов;

разрабатывать схемы с умеренным диапазоном изменения нагрузок, максимальной стабильностью напряжений смещения и минимальными требованиями к напряжению стабилизации;

применять компенсацию паразитных токов, использовать малые емкости и сопротивления, вводить экранирование, развязки по цепям, шунтирование, фильтрацию и обратные связи;

использовать методы «адаптивной» защиты, суть которой сводится к обнаружению воздействия ИИ по первичному фототоку диода или по переключению тиристора, переводу информации из быстродействующего в радиационно стойкое запоминающее устройство и после окончания переходных процессов, вызванных действием ИИ, восстановлению информации в исходном запоминающем устройстве.

Эффективным оказывается подход к оптимизации схем по критерию радиационной стойкости, рассмотренный в работе [10].

Список литературы

1. Бердичевский Б. Е. Вопросы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры при разработке. М.: Сов. радио, 1977. 384 с.
2. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969. 311 с.
3. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 203 с.
4. Горохов В. А., Щедрин М. Б. Физические основы применения тиристорov в импульсных схемах. М.: Сов. радио, 1975. 382 с.
5. Горячева Г. А., Шапкин А. А., Ширшев Л. Г. Действие проникающей радиации на радиодетали. М.: Атомиздат, 1971. 113 с.
6. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники/Под ред. Е. А. Ладыгина. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.
7. Зашигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат, 1976. 232 с.
8. Кашур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ./Под ред. И. А. Ушакова. М.: Мир, 1980. 604 с.
9. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
10. Мырова Л. О., Чепиженко А. З. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры связи. М.: Радио и связь, 1983. 216 с.
11. Мырова Л. О., Чепиженко А. З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 296 с.
12. Носов Ю. Р., Петросянц К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. М.: Сов. радио, 1976. 304 с.
13. Перемежающиеся и устойчивые отказы в цифровых интегральных микросхемах при воздействии ионизирующего излучения/А. З. Чепиженко, Ю. А. Борисов и др.//Зарубежная электронная техника. 1986, № 3, 157 с.
14. Проектирование устройств вычислительной техники с учетом радиационных воздействий/Е. В. Аствацатурьян, О. Н. Голотюк, Ю. А. Попов и др. М.: МИФИ, 1985. 84 с.
15. Проектирование электронных схем с учетом радиационных воздействий/Е. Р. Аствацатурьян, О. Н. Голотюк, Ю. А. Попов и др. М.: МИФИ, 1984. 76 с.
16. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций: Справочник/Под ред. Сидорова Н. А., Князева В. К. М.: Сов. радио, 1976. 568 с.
17. Радиационное электроматериаловедение/Костюков Н. С. и др. М.: Атомиздат, 1979. 364 с.
18. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем: Пер. с нем./Под ред. Б. А. Козлова. М.: Мир, 1979. 454 с.
19. Физические процессы в облученных полупроводниках/Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск: Наука, 1977. 253 с.
20. Bendall W. L. Displacement and Ionization Fractions of Fast Neutron

Korma in LLD's and Si//IEEE on Nucl. Sci., 1971, N 6. P. 2516—2520.

21. Diode Data Books//Electronics Information Series, 1978. P. 503.

22. Liptak G., Schuler R., Mayer P. Radiation tests on selected electrical insulating materials for high power and high voltage application//CERN (Sci. Rept.), 1985, N 2, v. 1. P. 58.

23. Mc. Kenzie J. M. Statistical Distribution of Neutron Semiconductor Device Degradation//IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1974, N 6, v. NS—21. P. 3—27.

24. Myers B. K. What happens to semiconductors in a nuclear environments?//Electronics, 1978, N 6. P. 131—133.

25. Notthoff J. K. Radiation Hardness of 256—bit Ga As c — JFET RAM//IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1985, N 6. P. 4061—4064.

26. Rickets L. W. Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronics—

Equipment. — N. J.: Wiley—Interscience, 1972. P. 548.

27. Rose M. A. Nuclear Hardening of Weapon Systems//Defence Electronics, 1979, N 2. P. 13—17.

28. Silicon Ionization and Displacement Kerma for Neutrons from Thermal to 20 MeV/Rogers V. C., Harris L., Steinman D. K., Bryan D. K.//IEEE on Nucl. Sci., 1971, N 6. P. 2326—2329.

29. Thyristors Data Books//Electronic Information, 1979. P. 336.

30. Transistors Data Books//Electronic Information Series, 1979. P. 552.

31. Van Lint V. A. F. Simulation for Radiation Effects in Electronics//Proc: of the IEEE, 1974, v. 62, N 9. P. 1185—1190.

32. Zyborshy J., Lipsky T. Zaberpieczenia diod i tiristorad//Warchawa, MNT, 1979. P. 252.

Глава 6 КОРРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Одним из важных факторов, оказывающих влияние на долговечность технических устройств, является коррозия металлов.

Потери от коррозии в промышленно развитых странах составляют около десятой части национального дохода, например, в США эти убытки превышают 70 млрд долларов в год [11].

Основные потери от коррозии связаны с преждевременным выходом из строя металлоконструкций. В связи с этим большие материальные средства расходуются на профилактическое обслуживание, ремонт и замену отдельных деталей. Другая статья убытков обусловлена необходимостью осуществления комплекса мероприятий по борьбе с коррозией. Сюда относят затраты на нанесение различных покрытий, применение смазочных материалов и ингибиторов коррозии, использование средств и методов химической защиты.

Актуальность задачи борьбы с коррозией не только не уменьшилась, а даже возросла. Это обусловлено, во-первых, значительным повышением агрессивности атмосферы и естественных вод вследствие загрязнения их промышленными выбросами и, во-вторых, ростом удельного веса металлов в отраслях промышленности, в которых используются металлоизделия в агрессивных средах (химическая, нефтехимическая и бумажно-целлюлозная отрасли промышленности, энергетика, автомобилестроение, авиация, морской флот).

Существенную помощь в решении проблемы коррозии может оказать прогнозирование коррозионного поведения металлов в различных условиях на длительные сроки на основе сравнительно кратковременных испы-

таний, а также использование справочных данных. На основе такой информации конструктор сможет правильно подобрать материал и меры защиты от коррозии для конструкции изделия.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Слово коррозия происходит от латинского *corrosio*, что в переводе означает «разъедание». Под коррозией понимают разрушение металла вследствие химического и электрохимического взаимодействия его с окружающей средой.

Коррозионный процесс протекает на границе металл — окружающая среда, т. е. является гетерогенным процессом взаимодействия жидкой или газообразной фазы с металлом.

Причина коррозии — термодинамическая неустойчивость металлов, вследствие чего в природе они всегда находятся в окисленном состоянии.

Определить возможность протекания коррозии, как и любого химического или электрохимического процесса, можно по изменению изобарно — изотермического потенциала (энергии Гиббса) [6].

Если G_1 есть энергия Гиббса исходных веществ, а G_2 — энергия Гиббса продуктов реакции, то изменение энергии системы составит

$$\Delta G = G_2 - G_1. \quad (1)$$

Самопроизвольно протекают лишь те процессы, в результате которых происходит уменьшение энергии Гиббса, т. е. $G_1 > G_2$ или $\Delta G < 0$.

Термодинамический расчет позволяет определить возможность или невозможность протекания коррозии.

Однако он не дает реальных представлений о скорости коррозии. Для ее оценки важнейшее значение имеет кинетика этого процесса.

Реальная скорость коррозии определяется многими факторами — состоянием поверхности металла и особенностями его структуры, температурой, составом и скоростью движения коррозионной среды, механическими напряжениями и др. Поэтому нет абсолютных показателей коррозионной стойкости. Существуют лишь сравнительные данные, отвечающие определенным условиям коррозии.

Поскольку коррозионный процесс имеет гетерогенный характер, его скорость определяется протеканием следующих основных стадий:

1) подведением к поверхности металла коррозионно-активных частиц (ионов, молекул), осуществляемым диффузией или конвекцией. По закону Фика скорость диффузии (количество вещества, перенесенное в единицу времени) определяется следующим уравнением:

$$v_{\text{д}} = k_{\text{д}} S \frac{dc}{dx}, \quad (2)$$

где $k_{\text{д}}$ — коэффициент диффузии; S — площадь сечения, через которое протекает диффузия; dc/dx — градиент концентрации.

Коэффициент диффузии возрастает с увеличением температуры;

2) реакцией частиц с металлом, протекающей во многих случаях многостадийно.

Скорость коррозии определяется в соответствии с уравнением

$$v_{\text{р}} = k_{\text{р}} C \exp \left[-\frac{W}{RT} \right], \quad (3)$$

где $k_{\text{р}}$ — константа скорости реакции; C — концентрация частиц; W — энергия активации, представляющая собой тот избыток энергии по сравнению со средней, обладание которым делает частицу реакционно-активной; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; $\exp \left\{ -\frac{W}{RT} \right\}$ — член уравнения, характеризующий долю частиц, обладающих необходимой энергией

активации, т. е. долю активных частиц.

Из уравнения (3) следует, что скорость реакции выше при низкой энергии активации и что она возрастает с увеличением концентрации и температуры;

3) отведением продуктов коррозии от поверхности металла, осуществляемым в соответствии с законом диффузии.

Продукты коррозии во многих случаях играют решающую роль в торможении коррозионного процесса, например, при образовании на поверхности металлов соответствующих пленок, тормозящих проникновение коррозионно-активных частиц.

По механизму протекания коррозионного процесса различают химическую и электрохимическую коррозию металлов [6].

Химическая коррозия металлов есть взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают одновременно. В качестве примера коррозии такого типа можно указать на коррозию металлов в сухих газах и неэлектролитах. При химической коррозии продукты коррозии образуются непосредственно на частях поверхности металлов, участвующих в реакции.

Газовая коррозия часто встречается в промышленности, например, коррозия металлов при термообработке, коррозия деталей нагревательных печей и др.

Большое влияние на скорость газовой коррозии оказывают температура и состав газовой среды.

Зависимость газовой коррозии от температуры приближенно описывается уравнением Аррениуса [3]:

$$\ln k = A - \frac{B}{T}, \quad (4)$$

где k — скорость реакции; A и B — константы; T — абсолютная температура, К.

Дополнительное влияние оказывают вторичные реакции, вид и свойства продуктов коррозии.

Электрохимическая коррозия металлов есть взаимодействие металла

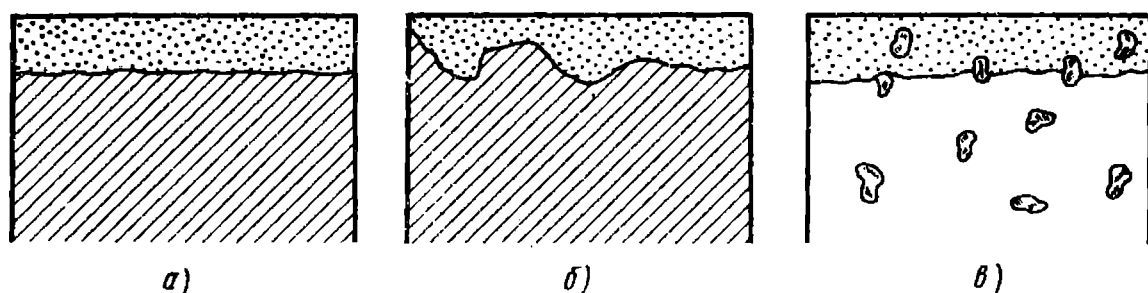


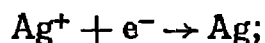
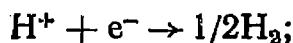
Рис. 1. Сплошная, или общая коррозия

с коррозионной средой — электролитом, при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают неодновременно и их скорости зависят от электродного потенциала металла, например, коррозия металла в электролите.

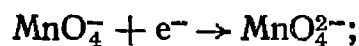
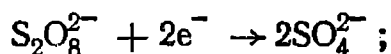
Анодный процесс электрохимической коррозии всегда сопровождается ионизацией металла.

В катодном процессе могут участвовать различные ионы или молекулы, окисляющие металл. Возможны следующие основные типы катодных реакций [7]:

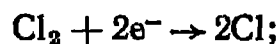
восстановление катионов



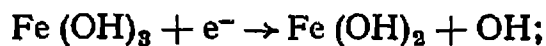
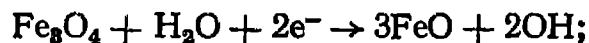
восстановление анионов



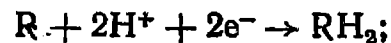
восстановление молекул газов, растворенных в электролите:



восстановление окисных и гидроокисных пленок:



восстановление органических соединений



По условиям протекания согласно ГОСТ 5272—68 различают следующие

виды коррозии: атмосферную, подводную, подземную, биокоррозию, контактную, щелевую, под напряжением, при трении, газовую коррозию и др.

А т м о с ф е р н а я — коррозия металлов в атмосфере воздуха, а также любого влажного газа.

П о д в о д н а я — коррозия металла, полностью погруженного в воду.

П о д з е м н а я — коррозия металла в почвах и грунтах.

Б и о к о р р о з и я — коррозия металла под влиянием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов.

К о р р о з и я **в** **н** **е** **ш** **н** **и** **м** **т** **о** **к** **о** **м** — электрохимическая коррозия металла под воздействием тока от внешнего источника.

К о р р о з и я **б** **л** **у** **ж** **д** **а** **ю** **щ** **и** **м** **и** **т** **о** **к** **а** **м** — электрохимическая коррозия под воздействием блуждающих токов в земле, создаваемых установками постоянного тока, использующими землю частично или полностью в качестве токопровода (электрические железные дороги, линии трамвая, метро и др.).

Щ е л е в а я — коррозия в щелях и зазорах между двумя металлами, а также в местах нежесткого контакта металла с неметаллическим коррозионно-инертным материалом, например, резьбовых и фланцевых соединений стальных конструкций.

К о р р о з и я **п** **о** **д** **н** **а** **п** **р** **я** **ж** **е** **н** **и** **е** **м** — коррозия металлов при одновременном воздействии коррозионной среды и механических напряжений.

К о н т а к т н а я — электрохимическая коррозия, вызванная контактом металлов, имеющих разные стадио-

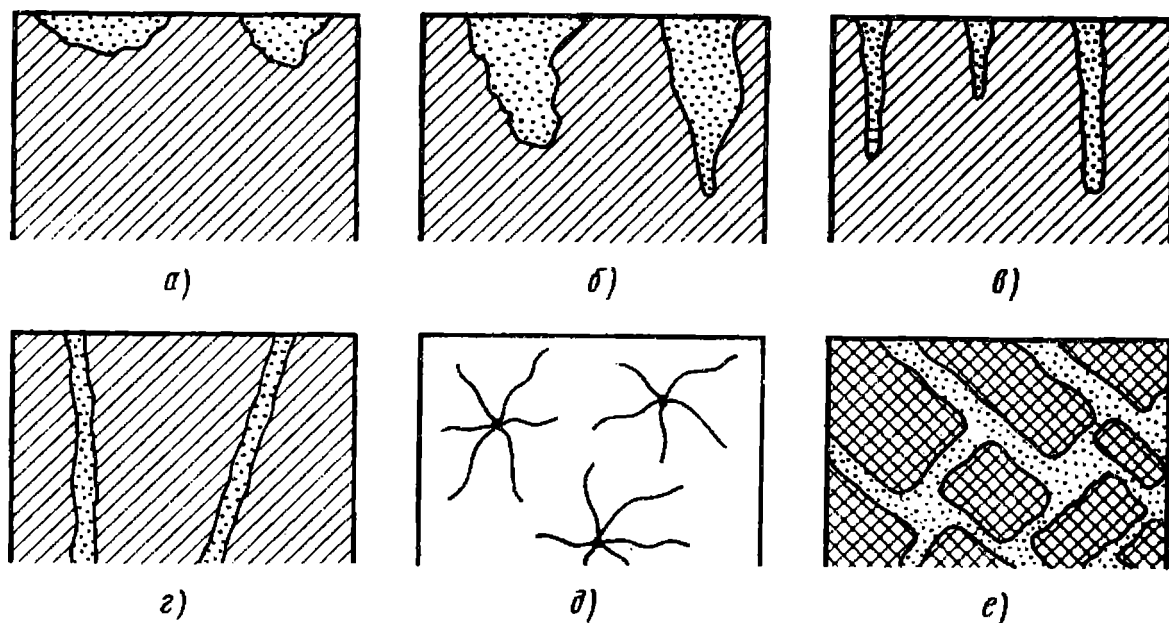


Рис. 2. Местная коррозия

нарные потенциалы в данном электролите.

Газовая — коррозия, протекающая при высоких температурах.

По характеру коррозионного разрушения различают сплошную (или общую) и местную коррозию. Сплошная коррозия охватывает всю поверхность металла, находящуюся под воздействием данной коррозионной среды. Сплошная коррозия бывает: равномерная (рис. 1, а), протекающая с примерно одинаковой скоростью по всей поверхности металла; неравномерная (рис. 1, б), протекающая с неодинаковой скоростью на различных участках поверхности металла; избирательная (рис. 1, в), при которой разрушается одна структурная составляющая сплава или один компонент сплава.

Местная коррозия (рис. 2) охватывает отдельные участки поверхности металла. Местная коррозия бывает: пятнами (рис. 2, а), т. е. коррозия в виде отдельных пятен; язвами (рис. 2, б), т. е. коррозионное разрушение в виде отдельной раковины; точечная (питтинг) (рис. 2, в) — коррозия в виде отдельных точечных поражений; сквозная (рис. 2, г) — коррозия, вызывающая разрушение металла насквозь; нитевидная (рис. 2, д) — коррозия, распростра-

няющаяся в виде нитей, преимущественно под неметаллическими защитными покрытиями; межкристаллитная (рис. 2, е) — коррозия, распространяющаяся по границам кристаллитов (зерен) металла.

2. ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ

Для успешного проектирования оборудования, процесса его изготовления или монтажа необходимо учесть влияние различных факторов и условий, способствующих возникновению и развитию коррозии.

Коррозия протекает при взаимодействии металла с коррозионной средой, под которой понимаются сухие газы и неэлектролиты (химическая коррозия) и электролиты (электрохимическая коррозия).

За исключением высокотемпературной коррозии, при которой металлы в условиях повышенных температур реагируют непосредственно с газовой фазой, для протекания процессов коррозии необходимо наличие воды или водного раствора. При этом совершенно не обязательно, чтобы образец был погружен в водный раствор или чтобы на поверхности металла находились капли воды. Достаточно тонкой пленки влаги, адсорбированной на

1. Градация загрязненности атмосферы двуокисью серы и хлоридами

Вид загрязнения	Выпадение, мг·м ⁻² ·сут ⁻¹	Обозначение градации загрязненности	
		русское	латинское
Двуокись серы	До 20 вкл.	P_1	P_1
	От 20 до 60	P_2	P_2
	Св. 60 » 110	P_3	P_3
	» 110 » 250	P_4	P_4
Хлориды	До 0,3 вкл.	C_1	S_1
	От 0,3 до 40	C_2	S_2
	Св. 4,0 » 30,0	C_3	S_3
	» 30,0 » 300,0	C_4	S_4

Примечания: 1. P_1 (P_1) — фоновая загрязненность двуокисью серы.
2. C_1 (S_1) — фоновая загрязненность хлоридами.

поверхности металла, как это может происходить при относительной влажности более 60—70%.

Коррозионная агрессивность среды не является постоянной величиной. Большое влияние имеет состав среды и особенно содержание в ней коррозионно-активных компонентов.

Различают эксплуатацию объектов и оборудования в атмосфере, гидросфере и под землей.

Коррозионная агрессивность атмосферы. При эксплуатации металлических изделий в атмосферных условиях наблюдается значительная коррозия вследствие воздействия на металл коррозионно-активных агентов атмосферы.

Скорость коррозии металлов в атмосфере определяется продолжительностью увлажнения их поверхности и концентрацией коррозионно-активных компонентов.

Чистый влажный воздух даже при относительной влажности, равной 100 %, слабо действует на железо и медь, однако при наличии в атмосфере всего лишь 0,01 % SO_2 скорость коррозии возрастает в 100 раз.

Высокая эффективность сернистого газа как катодного деполяризатора, способного конкурировать с кислородом, и в сочетании с хорошей растворимостью в воде обуславливает его высокую коррозионную активность.

С развитием промышленности и транспорта загрязненность сернистым газом приобретает глобальный характер, реальным становится его присутствие в опасных количествах на больших расстояниях от промышленных центров благодаря его переносу потоками воздуха. Например, сернистый газ обнаружен в количестве 1—3 мкг/м³ в Антарктиде. Максимальное содержание сернистого газа наблюдается между 10° ю. ш. и 60° с. ш. и возрастает от тропических широт к умеренным.

В морской атмосфере сернистый газ присутствует в количестве 0,01—0,02 мкг/м³.

Концентрация SO_2 в атмосфере городских и промышленных районов обычно находится в пределах 0,02—0,2 мг/м³.

Соли морского происхождения (большой частью хлориды натрия) в основном оказывают влияние на коррозионные разрушения наружных деталей объектов.

Высокая гигроскопичность хлористого натрия способствует наличию пленки электролита на поверхности даже при сравнительно низкой влажности воздуха.

Растворяясь в пленке влаги, хлористый натрий повышает ее электропроводность. Кроме того, ион хлора обладает способностью активно разрушать защитные окисные пленки про-

2. Типы атмосферы

Обозначение градации загрязнен- ности	Тип атмосферы				
	Дифференцированный			Укрупненный	
	Наименование	Обозначение		Наименование	Обо- зна- чение
		рус- ское	ла- тин- ское		
$P_1 + C_1$	Условно чистая	1	1	Условно чистая	1
$P_2 + C_2$	Городская	2а	2а	Промышленная	2
$P_3 + C_1$	Промышленная (I)	2б	2в		
$P_4 + C_1$	Промышленная (II)	3	3	Промышленная сильно загряз- ненная	3
$C_2 + P_1$	Приморская (I)	4а	4а	Приморская	4
$C_3 + P_1$	Приморская (II)	4б	4в		
$C_4 + P_1$	Морская	5	5	Морская	5
$C_2 + P_2$	Приморская (I) — го- родская	6а	6а	Приморско-про- мышленная	6
$C_3 + P_2$	Приморская (II) — го- родская	6б	6в		
$C_2 + P_3$	Приморская (I) — про- мышленная (I)	6в	6с		
$C_3 + P_3$	Приморская (II) — про- мышленная (I)	6г	6о		
$C_2 + P_4$	Приморская (I) — про- мышленная (II)	7а	7а	Приморско-про- мышленная (2)	7
$C_3 + P_4$	Приморская (II) — про- мышленная (II)	7б	7в		

дуктов коррозии, замещая кислород.

Для защиты металлических изделий от коррозии важно знать степень коррозионной агрессивности атмосферы и ее влияние на тот или иной металл. Степень коррозионной агрессивности атмосферы зависит от ее загрязненности. В табл. 1 приведена градация загрязненности атмосферы двуокисью серы и хлоридами по ГОСТ 9.039—74.

В зависимости от градации загрязненности атмосферы в ГОСТ 9.039—74 устанавливаются типы атмосферы (табл. 2).

Различные типы атмосфер неодинаково влияют на скорость коррозии металлов. Для оценки влияния типов атмосферы на скорость коррозии металлов устанавливают степени коррозионной агрессивности атмосферы:

незначительно агрессивная	1
малоагрессивная	2
среднеагрессивная	3
сильноагрессивная . . .	4
очень сильноагрессивная	5

Степени коррозионной агрессивности атмосферы устанавливают для конкретных групп металлов в зависи-

3. Оценка степени коррозионной агрессивности атмосферы для углеродистых конструкционных сталей

Тип атмосферы	Категория размещения поверхности по ГОСТ 15150—69	Степень коррозионной агрессивности атмосферы в макроклиматических районах по ГОСТ 15150—69			
		холодном	умеренном	тропическом	
				влажном	сухом
1	1	2—3	2—3	3	2—3
	2	2	2—3	3	2
	3	1	1	1—2	1
2а или 4а	1	2—3	3—4	3—4	2—3
	2	2	2—3	3	2
	3	1	1	1—2	1
2б или 4б	1	4	4	5	4
	2	3	4	4	3
	3	2	2—3	2—3	2
3	1	4	5	5	4
	2	4	4—5	5	4
	3	2—3	2—3	3	2—3

мости от их стойкости к воздействию комплексов климатических факторов. Оценка степени коррозионной агрессивности атмосферы для углеродистых сталей приведена в табл. 3.

Скорость коррозии металлов в атмосфере в значительной степени также определяется продолжительностью увлажнения.

Для открытого воздуха коррозионную агрессивность атмосферы, концентрация загрязнений в которой не превышает фоновых, оценивают в зависимости от продолжительности общего увлажнения по девятибалльной шкале (табл. 4).

В соответствии с табл. 4 коррозионная агрессивность атмосферы по продолжительности увлажнения в Москве соответствует пяти баллам, а самая высокая в СССР в Нарьян-Маре — семи баллам.

Коррозионная агрессивность гидросферы. Эксплуатация оборудования, приборов и материалов происходит не только в атмосфере, но и в гидросфере и под землей.

В гидросфере наибольшая скорость коррозии наблюдается в морской среде, под которой понимают совокупность физических условий — от насыщенного мельчайшей водяной пылью морского воздуха до ила на океанском дне. Необходимо также учитывать температуру, скорость ветра, солнечное излучение и концентрацию растворенного в воде кислорода.

Особенностями морской коррозии металлов являются [5]:

большая агрессивность морской воды и донных грунтов;

наличие дополнительного влияния механического фактора (эрозии и кавитации);

сильное проявление контактной коррозии вследствие низкого удельного сопротивления морской воды;

значительное влияние биологического фактора (морской растительности и животных организмов).

Коррозионная активность различных акваторий не одинакова. Средняя скорость коррозии стали составляет

от 0,08 до 0,20 мм/год, а максимальная глубина язв — от 0,4 до 1,0 мм/год.

Основными факторами, определяющими интенсивность морской коррозии, являются: общая соленость, движение морской воды, температура, второстепенные составляющие морской воды, биологическое воздействие, наличие контактных пар.

Общая соленость морской воды для различных бассейнов различна и находится в пределах от 1 до 4%. Количество солей, содержащихся в морской воде, мало влияет на скорость коррозии. Однако увеличение солености приводит к понижению удельного сопротивления воды и, как следствие, к интенсификации действия контактных гальванических пар.

Движение морской воды в значительной степени влияет на скорость диффузии кислорода, что приводит к увеличению скорости коррозии металла.

С понижением температуры скорость коррозии возрастает. Второстепенные составляющие морской воды оказывают на скорость протекания коррозионного процесса различное влияние. Так, кремнекислые соединения и углекислый кальций образуют на металле осадки, оказывающие защитное воздействие. Йод и бром даже при весьма малом содержании их в морской воде могут играть роль дополнительных катодных деполяризаторов и ускорять процессы коррозии металлов. В табл. 5 приведен состав морской воды.

Механический фактор вызывает явления коррозионной усталости, эрозии и кавитации металлических конструкций в морской воде.

Биологическое воздействие растительности и животных организмов значительно ускоряет коррозию металла в воде за счет разрушения защитных покрытий, неравномерной аэрации и щелевой коррозии. Некоторые организмы (например, диатомы) в результате фотосинтеза выделяют кислород, что ускоряет коррозию, другие, наоборот, за счет его потребления (мидии) и снижения концентрации его у поверхности корродирующего металла замедляют скорость коррозии.

Контактная коррозия протекает

4. Коррозионная агрессивность атмосферы в зависимости от продолжительности увлажнения

Продолжительность общего увлажнения, ч/год	Оценка, балл
От 500 до 1000	1
Св. 1000 » 1500	2
» 1500 » 2000	3
» 2000 » 2500	4
» 2500 » 3000	5
» 3000 » 3500	6
» 3500 » 4000	7
» 4000 » 4500	8
Св. 4500	9

5. Состав морской воды с соленостью 3,5%

Компонент	Содержание в воде, г/кг
Хлор	19,353
Натрий	10,76
Сульфат-ион	2,712
Магний	1,294
Кальций	0,413
Калий	0,387
Бикарбонат-ион	0,142
Бром	0,067
Стронций	0,008
Бор	0,044
Фтор	0,001

весьма интенсивно вследствие малого удельного сопротивления пар на значительные расстояния при наличии неблагоприятных контактов.

В табл. 6 приведена скорость коррозии некоторых металлов в морской воде.

Бактерии также оказывают влияние на скорость коррозии. Сульфатвосстанавливающие бактерии, встречающиеся в донных отложениях и в иле, вырабатывают сульфиды, агрессивные по отношению к таким металлам, как сталь и медь.

В то же время биологическое обрастание может способствовать защите

6. Скорость коррозии некоторых металлов в морской воде

Металл	Условия экспозиции	Скорость коррозии, мкм/год
Медь	Полное погружение	10—50
Никель	То же	31—61
Олово	Погружение на глубину 1,5 м	211
Свинец	То же	30
Цинк (с различным содержанием железа)	»	20—36

металла от коррозии. Сплошное покрытие из морских организмов на стали может уменьшать скорость ее коррозии, препятствуя доставке кислорода к поверхности металла.

Коррозионная агрессивность подземной среды. Процессы коррозии металлов в подземных условиях определяются структурой и гранулометрическим составом грунтов и почв, влажностью, минерализацией грунтовых вод, концентрацией водородных ионов (рН среды), окислительно-восстановительным потенциалом.

Почва и грунт являются многофазными средами, состоящими из твердой, жидкой и газообразной фаз. Твердая часть образует основу этих сред. Всякая почва и грунт обладают пористостью.

Подземная коррозия возможна лишь в присутствии воды. Однако опасность коррозии определяется не абсолютным содержанием воды, а насыщенностью ее.

В большинстве почв наиболее интенсивно коррозия протекает в том случае, когда содержание воды достигает примерно $\frac{1}{3}$ того количества, которое может быть поглощено почвой или грунтом до момента насыщения. Это обусловлено более быстрой диффузией кислорода в рыхлые и пористые почвы, не насыщенные водой, в то время как в почвах, насыщенных водой, имеющийся кислород быстро потребляется, а скорость диффузии его замедляется.

Минерализация грунтовых вод также определяет скорость коррозии. Грунтовые воды в зависимости от содержа-

ния растворимых солей подразделяют на пресные (до 0,1%), солоноватые (от 0,1 до 1%), соленые (от 1 до 5%) и рассолы (от 5 до 40%).

По своему характеру и происхождению содержащиеся в воде соли могут быть весьма разнообразными. В качестве анионов следует указать на хлориды, карбонаты, различные органические кислоты. Некоторые почвы содержат сульфат кальция в виде гипса. При накоплении микроорганизмами азота и разложении органических веществ в почве образуются соли аммония, нитраты и нитриты. Последние особо благоприятствуют протеканию процессов коррозии.

В илистых и болотистых почвах встречается сера, которая в первоначальном состоянии находится в органических соединениях. В результате минерализации этих органических соединений образуется сернистое железо, которое под действием кислорода и воды легко превращается в свободную серную кислоту.

Концентрация водородных ионов рН является необходимым, но недостаточным критерием коррозионной активности почвы, так как не определяет общее количество кислоты, находящейся в почве, т. е. концентрация ионов водорода относится только к части кислоты.

Коррозионную активность грунтов и естественных вод относительно стали оценивают в зависимости от химического состава по данным табл. 7 [9].

Коррозия металла в значительной степени зависит от окислительно-вос-

7. Коррозионная активность грунтов и грунтовых вод по отношению к углеродистой стали в зависимости от химического состава

Коррозионная активность среды	Значение pH	Содержание			
		серы, %	хлора, %	SO ₄ ²⁻ +Cl ⁻ в воде, мг/л	CO ₂ , мг/л
Низкая	6,5—8,5	0,1	0,02	100	0
Средняя	8,5—14	0,1—0,2	0,02—0,05	100—200	0
Повышенная	6,0—6,5	0,2—0,3	0,05—0,1	200—300	5
Высокая	6	0,3	0,1	300	5

8. Коррозионная активность грунта по отношению к углеродистой стали в зависимости от E_h

E _h , В	Состояние грунта	pH	Коррозионная активность
0,5—0,4	Аэробный	>6,5 <6,5	Слабоагрессивный Агрессивный
0,4—0,1 0,1—0		Не ограничивается	Среднеагрессивный Повышенно-агрессивный
Отрицательные величины	Анаэробный		Весьма агрессивный

становительного процесса, происходящего в грунтах.

Оценку коррозионной активности грунтов по окислительно-восстановительному потенциалу E_h можно проводить по табл. 8 [9].

Согласно работе [9] с ростом удельного сопротивления грунта скорость образования питтингов на малой стальной поверхности в общем сокращается.

В соответствии с ГОСТ 9.015—74 коррозионная активность грунтов по отношению к стали в зависимости от их удельного сопротивления, Ом·м, классифицируется следующим образом: низкая — $\rho > 100$; средняя — от 20 до 100; высокая — < 20 . Однако удельное сопротивление грунта не всегда отражает однозначно степень его агрессивности. Например, в водонасыщенных грунтах удельное сопротивле-

ние невелико, но и скорость коррозионных процессов может оказаться небольшой.

В работе [12] показано, что со временем процесс коррозии стали в различных грунтах протекает по-разному (рис. 3).

Для зависимости глубины коррозии от времени Эвингом С. П. предложено уравнение [12]

$$\rho = k\tau^n,$$

где ρ — наибольшая глубина коррозии через время τ ; k , n — константы, которые зависят от характеристик почвы и устанавливаются опытным путем.

В хорошо аэрируемых почвах (в грубом песке, глинистом песке, пористой глине) и почвах с глубоким уровнем грунтовых вод $n = 0,19$, в умеренно аэрированных почвах (в илстой глине)

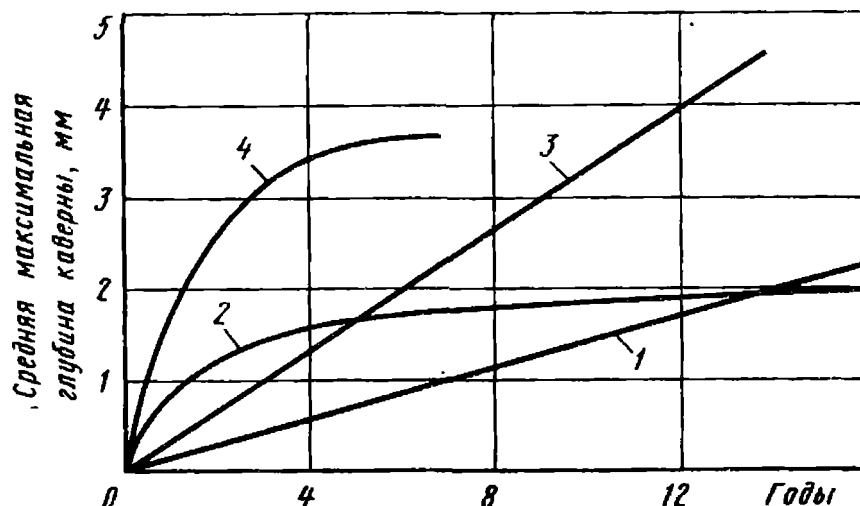


Рис. 3. Процесс развития коррозии стали в грунтах:

1 — торфяной грунт, $pH = 2,6$; $\rho = 2,18$ Ом·м; влажность 43,4%; 2 — суглинистый грунт, $pH = 4,8$; $\rho = 0,17$ Ом·м; влажность 37,7%; 3 — глинистый грунт, $pH = 7,1$; $\rho = 4,06$ Ом·м; влажность 28,7%; 4 — глинистый грунт, $pH = 7,5$; $\rho = 0,62$ Ом·м; влажность 41,1%

$n = 0,35$, в слабо аэрированных почвах (глины) и в почвах при высоком уровне грунтовых вод $n = 0,48$, в очень малоаэрируемых почвах (болота, тяжелые глины) и в почвах при уровне грунтовых вод на уровне пробы $n = 0,68 \div 0,74$.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИИ

Важной народнохозяйственной задачей является целенаправленное исследование процессов коррозии и разработка эффективных средств защиты металлов.

Одним из направлений исследования процессов коррозии являются испытания металлов.

Коррозионные испытания металлов и сплавов согласно ГОСТ 5272—68 и [10] делят на полевые, ускоренные и лабораторные. При полевых испытаниях специально изготовленные образцы подвергаются коррозионному воздействию в естественных условиях эксплуатации. При этих испытаниях требуются длительные экспозиции для определения количественных показателей коррозионной стойкости материалов.

Ускоренные испытания проводят в условиях, близких к эксплуатационным, результаты получают в более короткий срок по сравнению с полевыми испытаниями.

Лабораторные испытания проводят в искусственно созданных и контролируемых условиях. Для этих испытаний используют специально

изготовленные образцы, которые перед испытаниями подвергают однотипной термической и поверхностной обработке с таким расчетом, чтобы они имели идентичную структуру, одинаковые параметры шероховатости и были тщательно обезжирены.

Лабораторные испытания позволяют определять степень влияния отдельных факторов среды на развитие коррозионного процесса.

По мнению ученых-коррозионистов наиболее достоверные характеристики коррозионного поведения металлов в атмосфере могут быть получены лишь при испытаниях в естественных условиях [1].

В СССР и за рубежом имеется большая сеть коррозионных станций, на которых проводятся коррозионные испытания различных конструкционных материалов.

Проведенные испытания на этих станциях показали [1], что скорость коррозии металлов может изменяться в зависимости от географического положения коррозионной станции и от степени загрязненности воздуха промышленными газами и хлоридами.

При ускоренных испытаниях в камерах не удается достаточно правильно и точно воспроизвести весь комплекс внешних условий, определяющих скорость атмосферной коррозии металлов.

В то же время результаты таких испытаний позволяют в сжатые сроки дать приближенную оценку скорости коррозии материалов и изделий и предпринять меры для их противокоррозионной защиты. Для правильного

выбора режима и длительности ускоренных лабораторных испытаний материалов и изделий необходимо учитывать положения, перечисленные ниже [8].

1. При ускорении коррозионного процесса не должен изменяться его механизм.

2. При выборе метода испытаний нужно исходить из состава и свойств коррозионной среды, в которой будет эксплуатироваться изделие. Например, изделия, которые будут эксплуатироваться в тропическом климате, необходимо испытывать при относительно высокой температуре и влажности в присутствии частичек хлористого натрия.

3. Методы испытаний должны учитывать условия эксплуатации изделия.

Например, при выборе стали для свай оснований морских нефтепромысловых сооружений необходимо исходить из того, что наибольшей коррозии сваи подвергаются в зоне периодического смачивания. Участки свай, полностью погруженные в морскую воду, корродируют медленнее, в связи с чем испытания следует проводить методом переменного погружения.

4. Методы и режимы испытаний должны обеспечивать протекание коррозионного процесса с большой скоростью.

Например, в атмосферных условиях время воздействия электролита на металл ограничено и поэтому увеличение этого времени может повысить суммарный эффект и тем самым сократить время испытаний. Поэтому для испытаний, имитирующих атмосферные условия, одним из путей ускорения испытаний является более длительный контакт электролита с поверхностью металла.

Ускорение испытаний достигается также ужесточением режима испытаний. Так, при испытаниях, имитирующих атмосферные условия, можно вводить агрессивные компоненты атмосферы. Например, для имитации промышленной атмосферы в камеру вводят сернистый газ. Скорость коррозионного процесса при этом можно увеличить в десятки раз.

5. В случае использования темпе-

ратуры в качестве фактора, ускоряющего скорость коррозии, необходимо учитывать характер протекающего процесса. С повышением температуры скорость электродных реакций увеличивается, однако температура влияет и на ряд других факторов — растворимость кислорода, свойства защитных пленок на металлах и др. В открытых системах скорость кислородной деполяризации возрастает при увеличении температуры лишь до определенного предела (~ 333 K). Дальнейшее ее повышение резко уменьшает растворимость кислорода, что приводит к уменьшению скорости коррозии.

6. При выборе метода ускорения необходимо также учитывать контролирующий фактор. Известно, что скорость любого коррозионного процесса, протекающего по электрохимическому механизму, зависит от скорости течения двух сопряженных электрохимических реакций — анодной и катодной. Скорость коррозионного процесса обычно определяется наиболее замедленной реакцией, которая и является контролирующей. Поэтому, в первую очередь, влияют на тот фактор, который является контролирующим.

7. При испытаниях не следует чрезмерно ускорять процессы коррозии. Сильное сокращение времени испытаний вследствие увеличения агрессивности среды приводит к изменению состава и структуры образующихся продуктов коррозии.

8. Методы испытаний для каждой группы сплавов необходимо разрабатывать и выбирать в отдельности.

Например, магниевые сплавы согласно ГОСТ 9.020—74 испытывают во влажной камере или при полном погружении в 0,001—3%-ные растворы хлористого натрия. Алюминиевые сплавы рекомендуется испытывать при полном погружении в 3%-ный раствор хлористого натрия, содержащий 0,1% H_2O_2 , при переменном погружении в 3%-ный раствор хлористого натрия — в камере соляного тумана или просто во влажной камере при повышенной температуре и периодической конденсации влаги.

9. При оценке коррозионной стойкости металлов и сплавов важно пра-

вильно выбрать показатель коррозии. Для некоторых сталей, меди, цинка величину коррозии достаточно точно можно определить по изменению массы образца. О степени коррозии магниевых сплавов судят по количеству выделившегося водорода, внешнему виду, механическим свойствам, результатам металлографического анализа или глубине коррозионных поражений.

Разноречивые оценки коррозионной стойкости металлов и сплавов, появляющиеся периодически в литературе, обусловлены использованием различных показателей коррозии или неправильным их выбором.

10. При ускоренных испытаниях новых сплавов целесообразно испытывать родственные сплавы, по которым имеются сведения о коррозионной стойкости.

Результаты ускоренных испытаний необходимо сопоставлять с данными по эксплуатации изделий, чтобы правильно определять коэффициенты пересчета.

Приближенную оценку скорости коррозии в атмосферных условиях можно также получить расчетным методом [1].

Скорость коррозии рассматривается как функция продолжительности смачивания металла капельно-жидкими пленками влаги (τ), температуры (t) и концентрации загрязнений в атмосферном воздухе (c):

$$k = f(\tau, t, c).$$

Общая продолжительность смачивания поверхности металла может быть выражена следующей формулой:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_1 + \left(\frac{\delta}{35,5 - 0,38r + 0,85t} \right) n,$$

где τ_1 — продолжительность дождя, фиксируемая пьювиографом, ч; δ — исходная толщина пленки, мкм; r — относительная влажность воздуха, % (средняя за срок); t — температура воздуха, °C (средняя за срок); n — число дней с дождем и росой.

Приближенно скорость коррозии k' в зависимости от температуры и концентрации загрязнений в воздухе с

может быть представлена в виде ряда Тейлора:

$$k'(t, c) = k'(t_0 c_0) + \left. \frac{dk'}{dt} \right|_{t_0 c_0} (t - t_0) + \left. \frac{dk'}{dc} \right|_{t_0 c_0} \times \\ \times (c - c_0) + \left. \frac{d^2 k'}{dt dc} \right|_{t_0 c_0} (t - t_0)(c - c_0),$$

где $k'(t_0 c_0)$ — скорость коррозии при $t = t_0$ и $c = c_0$; $\left. \frac{dk'}{dt} \right|_{t_0 c_0}$ — первая производная от скорости коррозии по температуре при $t = t_0$ и $c = c_0$.

После введения обозначений:

$$k'(t_0 c_0) = k'_0; \quad \left. \frac{dk'}{dt} \right|_{t_0 c_0} = \left(\frac{dk'}{dt} \right)_0;$$

$$\left. \frac{dk'}{dc} \right|_{t_0 c_0} = \left(\frac{dk'}{dc} \right)_0;$$

$$\left. \frac{d^2 k'}{dt dc} \right|_{t_0 c_0} = \left(\frac{d^2 k'}{dt dc} \right)_0$$

окончательная формула для определения скорости коррозии металла в единицу времени запишется в виде

$$k'(t, c) = k'_0 + \left(\frac{dk'}{dt} \right)_0 \Delta t + \\ + \left(\frac{dk'}{dc} \right)_0 \Delta c + \left(\frac{d^2 k}{dt dc} \right)_0 \Delta t \Delta c, \quad (5)$$

где $k'(t, c) = k/\tau_{\text{общ}}$ — коррозия за 1 ч смачивания.

Эта формула описывает начальные стадии коррозионного процесса.

Методика оценки значений коэффициентов, приведенных в формуле (5), и их численные значения для ряда металлов приведены в работе [1].

При проведении полевых, натурных и ускоренных коррозионных испытаний металлов и сплавов важно также правильно выбрать показатели коррозии, характеризующие исследуемые материалы.

Различают прямые и косвенные показатели коррозии.

Прямые показатели

1. Убыль или увеличение массы образца, г:

$$\Delta m = m_0 - m_1; \quad (6)$$

$$\Delta m = m_2 - m_0, \quad (7)$$

где m_0 — масса исходного образца; m_1 — масса образца после удаления продуктов коррозии; m_2 — масса образца вместе с продуктами коррозии.

В зависимости от убыли или увеличения массы образца скорость коррозии, $г/(м^2 \cdot ч)$, можно вычислять по формулам:

$$k_m = \frac{m_0 - m_1}{St}; \quad (8)$$

$$k_m = \frac{n(m_2 - m_1)}{St}, \quad (9)$$

где n — коэффициент, зависящий от состава продуктов коррозии; S — площадь образца, $м^2$; t — время испытания, $ч$.

По формуле (8) определять скорость коррозии легче, поскольку нет необходимости знать химический состав продуктов коррозии. В то же время недостатками данного метода является следующее: трудно полностью удалить все продукты коррозии, не затрагивая основной металл, и, кроме того, невозможно оценивать неравномерную коррозию и межкристаллитное разрушение.

Формула (9) применима только в тех случаях, когда известен химический состав продуктов коррозии, найденный с помощью химического или рентгенографического анализа. Последнее обстоятельство является существенным недостатком второго варианта. Он применим в основном для исследования газовой коррозии, при которой на поверхности металла образуется лишь негидратированная окись, так как при высокой температуре не может образоваться слой влаги.

Преимущество этого варианта состоит в том, что в случае его применения можно проследить за кинетикой процесса на одних и тех же образцах, поскольку ведется наблюдение за увеличением их массы.

2. Глубина коррозии.

Этот показатель применяют в случае, когда коррозия носит сильно неравномерный характер.

Среднее значение глубины коррозионного проникновения k_r можно вычислить с помощью скорости коррозии k_m по формуле

$$k_r = 8,76 \frac{k_m}{\gamma},$$

где k_m — скорость коррозии, $г/(м^2 \cdot ч)$, определенная по формулам (8) или (9); γ — плотность, $г/см^3$; 8,76 — переводной коэффициент.

Глубину коррозионного поражения можно определить и с помощью обычного микроскопа методом фокусирования оптической схемы сначала на плоскость, совпадающую с верхним краем язвы, а потом на плоскость дна язвы. По разности отсчетов на микрометрическом винте судят о глубине проникновения коррозии.

3. Доля поверхности, занятая продуктами коррозии.

В данном случае коррозия оценивается с помощью частотного показателя по формуле

$$c = \frac{n}{N} 100,$$

где n — число квадратов с одинаковой площадью, имеющих один коррозионный очаг или более; N — общее число этих квадратов на поверхности.

В ГОСТ 9.041—74 приведена десятибалльная шкала для оценки защитной способности ингибиторов с помощью доли поверхности, занятой продуктами коррозии.

4. Объем выделившегося с единицы поверхности водорода или поглощенного кислорода.

При переходе металла в продукты коррозии выделяется эквивалентное количество водорода или поглощается кислород. По объему выделенного водорода или поглощенного кислорода, измеренного с помощью установленного над образцом эвдиометра, можно вычислить потери массы металла.

Методы оценки выделившегося водорода и поглощенного кислорода даны в ГОСТ 9.041—74.

5. Время до появления первого очага коррозии.

Этот показатель однозначно не характеризует коррозионную стойкость материалов. Наиболее объективную оценку коррозионной стойкости материала по этому показателю можно получить путем построения кривых, выражающих зависимость скорости коррозии от времени.

Косвенные показатели:

1. Изменение физико-механических свойств изделия (временного сопротивления, относительного удлинения и т. д.).

Оценку коррозии по изменению временного сопротивления проводят по формуле

$$k_{\sigma_B} = \left[\frac{\sigma_{B0} - \sigma_{B1}}{\sigma_{B0}} \right] 100\%,$$

где σ_{B0} , σ_{B1} — временные сопротивления образца соответственно до и после испытания.

Таким же образом характеризуют коррозию по изменению относительного удлинения алюминиевых сплавов

$$k_{\delta} = [(\delta_0 - \delta_1)/\delta_0] 100\%,$$

где δ_0 , δ_1 — относительное удлинение образца соответственно до и после коррозии.

Показатели k_{σ_B} и k_{δ} служат для определения неравномерной и межкристаллитной коррозии.

По изменению механических свойств исследуют коррозию алюминиевых сплавов.

2. Измерение электрического сопротивления.

Измерение электрического сопротивления образцов до и после коррозии позволяет судить о коррозионной стойкости металлов в данных условиях.

Особенно сильное изменение электрического сопротивления наблюдается при межкристаллитной коррозии.

Изменение электрического сопротивления можно рассчитать по формуле

$$\Delta R = R_1 - R_0 = \frac{4\rho_0 l_0}{\pi} \left(\frac{1}{D_1^2} - \frac{1}{D_0^2} \right),$$

где ρ_0 — удельное сопротивление образца; l_0 , D_0 — исходные длина и диаметр образца; D_1 — диаметр образца после испытаний.

Таким образом, измерив сопротивление до и после протекания коррозии, определяют новый диаметр об-

разца, а следовательно, глубину проникновения коррозии.

3. Изменение отражательной способности поверхности металла.

По изменению отражательной способности металла до и после протекания коррозии можно судить о его стойкости в данных условиях.

Коэффициент отражения вычисляют по формуле

$$k = (F_2/F_1) 100\%,$$

где F_1 , F_2 — величины фототока металлического образца соответственно до и после испытаний, мкА.

Применение этого показателя предусматривается ГОСТ 9.041—74 для оценки действия ингибиторов атмосферной коррозии.

Рассмотренные выше показатели позволяют проводить оценку коррозионной стойкости образцов и изделий, имеющих относительно большие размеры. В области микроэлектроники, где толщина соединительных проводов, зазоров между соединительными элементами измеряется микронами, без современных физических методов исследования процессов коррозии обойтись практически невозможно. К таким методам относят растровую электронную микроскопию (РЭМ), рентгеноэлектронную спектроскопию, Оже-спектроскопию, вторичную ион-ионную масс-спектроскопию [2]. Физические основы методов подробно рассмотрены в работе [4]. Ниже приведены возможности исследования методов.

Метод РЭМ позволяет:

изучать топографию поверхности как отдельных образцов, так и изделия в целом. Метод позволяет получать картины с большей глубиной резкости, чем метод, использующий оптический микроскоп;

изучать фазовый состав на поверхности образца, используя то, что число вторичных электронов зависит от атомного номера вещества. Можно, например, изучать загрязнения на поверхности изделия, первичные процессы коррозии, если толщина образований соизмерима с пробегом электронов луча в исследуемом материале;

качественно и количественно определять элементный состав образцов;

изучать распределение того или иного элемента на поверхности;

исследовать концентрационные профили элементов при диффузии одного компонента в другой.

Основные характеристики современных сканирующих электронных микроскопов следующие: разрешающая способность 5 нм; диаметр электронного луча 5 нм; ускоряющее напряжение 30 кВ; вакуум $\sim 1,33 \times 10^{-3}$ — $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па.

Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии позволяет:

дать детальную информацию о химическом состоянии поверхности и адсорбированных на ее поверхности молекул, т. е. не только элементный состав, но и состав соединений тех или иных элементов;

наблюдать кинетику окисления металлических поверхностей с расшифровкой всех образующихся на поверхности промежуточных окислов;

изучать полимерные материалы и другие органические соединения.

Метод является основным для изучения поверхности вследствие малой глубины зоны возбуждения. Для металлов и окислов это 0,001—0,0025 мкм, для полимерных органических материалов 0,004—0,01 мкм.

Недостатки метода: требуется тщательная подготовка образцов, необходим сверхвысокий вакуум $1,33 \times 10^{-7}$ — $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па.

Метод электронной Оже-спектроскопии позволяет:

определять элементный состав поверхности образцов;

изучать профиль концентрации элементов по глубине;

изучать распределение элементов по поверхности сканирования так же, как и в сканирующем электронном микроскопе.

По чувствительности метод дает такие же результаты, что и метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Масс-спектрометрический метод вторичной ион-ионной эмиссии (ВИМС) позволяет:

анализировать химические соединения как на поверхности, так и в приповерхностном слое;

изучать распределение элементов и

их соединений на поверхности и в глубине;

проводить изотопный анализ элементов, находящихся на поверхности.

По сравнению с предыдущими методами ВИМС позволяет изучать монослой буквально от тысячных долей микрометра.

Пороговая чувствительность метода очень высока и в зависимости от анализируемого образца может достигать сотых и тысячных долей величины монослоя.

Для всестороннего исследования поверхности образцов, процессов развития коррозии необходимо применять несколько методов.

Если требуется изучить топографию поверхности, распределение элементов на поверхности, целесообразно применить растровую электронную микроскопию с микрозондом, толщина слоя элемента при этом должна быть 0,02—0,05 мкм.

При изучении поверхностных процессов, в которые вовлечены монослои, например, начальные стадии окисления, целесообразно использовать методы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, Оже-спектроскопии и ВИМС.

Если в изучаемых процессах на поверхности металлов присутствует водород, то пригоден метод ВИМС. Современные приборы для исследования поверхности образцов и изучения процессов коррозии часто объединяют несколько методов, которые дополняют друг друга.

4. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОВ ОТ КОРРОЗИИ

Для защиты металлов от коррозии применяют различные методы, учитывая особенности самого металла и условий его эксплуатации. Поэтому нет какой-либо системы выбора и применения методов защиты от коррозии. Все используемые в практике методы защиты от коррозии можно классифицировать по характеру их воздействия на три группы:

методы воздействия на металлы;

методы воздействия на среду;

методы воздействия на конструкцию.

Методы воздействия на металл. Эту группу методов применяют еще на стадии производства металла в процессе его металлургической и механической обработки.

Одним из методов является л е г и р о в а н и е металла различными присадками, понижающими эффективность катодного и анодного процесса.

Существует несколько способов понижения эффективности катодного процесса:

уменьшение площади макрокатонов путем повышения чистоты цинка, алюминия, железа, магния и других металлов при коррозии их в кислых средах с помощью закаливания с целью перевода катодных включений в твердый раствор;

повышение перенапряжения катодного процесса путем амальгамирования цинка, легирования его кадмием, легирования сталей мышьяком, сурьмой и висмутом.

Эффективность анодного процесса можно понизить различными способами:

введением легирующих элементов, повышающих термодинамическую устойчивость анодной фазы (легированием сталей никелем, никеля — медью, меди — золотом и т. д.);

добавлением легирующих элементов, содействующих пассивированию анодной фазы (например, легирование сталей хромом или кремнием, никеля — хромом), введением в состав коррозионно-стойких сталей небольших количеств титана, ниобия и тантала для стабилизации хрома в твердом растворе и т. д.;

добавлением легирующих элементов, способствующих катодному процессу и тем самым самопассивированию металла (например, легирование хромистых и хромоникелевых сталей малым количеством платины или палладия с целью повышения устойчивости этих сплавов к атмосферной коррозии и серого чугуна к действию азотной кислоты путем легирования медью и т. д.);

уменьшением площади анодной фазы путем устранения внутренних растягивающих усилий и повышения чистоты сплавов по границам зерен.

Скорость коррозии можно уменьшить путем создания сплавов, образующих на своей поверхности под действием агрессивной среды слой продуктов коррозии с высокими защитными качествами. Легирующие компоненты способствуют повышению защитных свойств поверхностного слоя, состоящего из продуктов коррозии, и устраняют возможность появления в нем внутренних напряжений (легирование конструкционных сталей молибденом, меди — никелем и алюминием).

Второй метод воздействия на металл основан на использовании защитных покрытий. Основное предназначение защитного покрытия состоит, с одной стороны, в создании барьерного слоя, препятствующего проникновению коррозионной среды к поверхности металла, а с другой — в ограничении или полном предотвращении образования новой фазы продуктов коррозии на границе металл—покрытие.

Защитные покрытия делят на две группы — неметаллические и металлические. В свою очередь металлические покрытия бывают органическими (лаковые, битумные, пластмассовые, эпоксидные, резиновые и др.) и неорганическими (цементные, асбоцементные, окисные, силикатные, фосфатные, сульфитные и др.).

Технические требования к металлическим и неметаллическим покрытиям приведены в ГОСТ 9.301—78, методы оценки их качества в ГОСТ 9.302—78, выбор покрытий осуществляют согласно ГОСТ 9.303—84.

В ряде случаев для повышения защитного действия покрытий используют комбинации органических и неорганических материалов, обеспечивающих, в частности, повышение адгезии покрытия к поверхности защищаемого металла.

Металлические покрытия в отличие от неметаллических практически непроницаемы для коррозионно-активных сред, но являются проводниками электрического тока. Однако в них могут быть дефекты — поры, царапины, посторонние включения и др., которые создают предпосылку для коррозионного воздействия на основной металл.

По способу защитного действия металлические покрытия делятся на катодные и анодные.

Катодные покрытия имеют более положительный, а анодные более электроотрицательный электродные потенциалы по сравнению с потенциалом металла, на который они нанесены. Вид покрытия зависит не только от природы металлов, но и от состава коррозионной среды. Например, олово по отношению к железу в растворах неорганических кислот и солей играет роль катодного покрытия, а в ряде органических кислот служит анодом. В обычных условиях катодные покрытия защищают металл изделия механически, изолируя его от окружающей среды. Основное требование к катодным покрытиям — беспористость. В противном случае при погружении изделия в электролит или при конденсации на его поверхности тонкой пленки влаги обнаженные в порах участки основного металла становятся анодами, а поверхность покрытия катодом. В этих местах начинается коррозия, которая может распространяться под покрытие (рис. 4, а).

Анодные покрытия защищают металл изделия, главным образом, электрохимически. В данном случае пористость анодных покрытий не играет существенной роли. В образовавшемся гальваническом элементе металл покрытия становится анодом и подвергается коррозии, а обнаженные в порах участки основного металла выполняют роль катодов и не разрушаются, пока сохраняется электрический контакт покрытия с защищаемым металлом, и через систему проходит достаточный ток (рис. 4, б).

В зависимости от природы металлов и их назначения для нанесения на них покрытий используют различные методы.

Так, для нанесения покрытий из цинка и алюминия и их сплавов на стали широко используют напыление. Наносимый металл в форме проволоки или порошка подается через пламя или вольтову дугу, распыляется струей воздуха, газов или пара и осаждается на подготовленную поверхность.

Для нанесения защитных металличе-

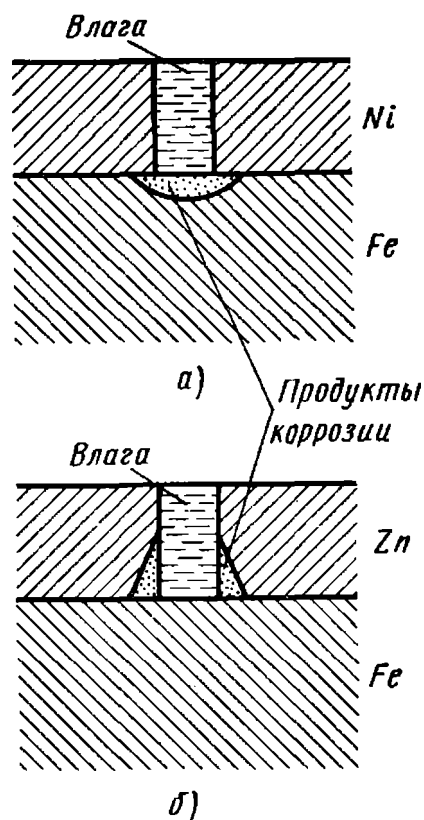


Рис. 4. Схема коррозии железа с пористым катодным (а) и анодным (б) покрытием

ских покрытий широко используют также метод окунания защищаемых изделий в ванну из расплавленного покрывающего металла, обычно цинка или алюминия. Образующееся при этом покрытие характеризуется, как правило, хорошей адгезией и равномерностью распределения покрывающего металла по всей поверхности. В случае, когда покрытие должно быть тонким, в современной технике применяют электрохимические методы осаждения одного металла на другой.

В широких масштабах этот метод используется для нанесения на изделия защитных покрытий из хрома, никеля, олова, цинка и кадмия.

Третий метод воздействия на металл включает обработку коррозионной среды путем введения ингибиторов, снижающих ее агрессивность. Ингибиторами называют химические вещества, которые при добавлении их в небольших количествах в коррозионную среду значительно уменьшают скорость коррозии. В зависимости от способа действия инги-

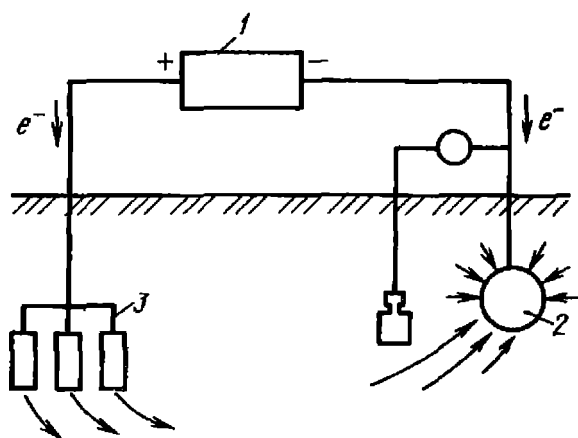


Рис. 5. Принципиальная схема катодной защиты

биторы делят на пленкообразующие (пассиваторы) и адсорбирующие.

В качестве пассиваторов используют вещества, которые образуют с ионами металлов нерастворимые продукты и формируют пленку. В общем случае — это пассиваторы металла. Определяющую роль в их ингибирующей способности играет величина pH раствора.

К пассиваторам относят кислород, гидроксильные ионы, нитрат-, нитрит-, фосфат-, молибдат-, бензоат-ионы и др. Они непосредственно или в виде продуктов реакции блокируют анодные и катодные участки поверхности металла, повышая ее потенциал.

Действие органических ингибиторов характеризуется, главным образом, их адсорбцией. Известны два типа адсорбции — химическая и физическая.

Физическая адсорбция обусловлена существованием вандерваальсовых сил между ингибиторами и металлами. Химическая адсорбция, или хемосорбция, возникает в результате известного химического сродства между металлом и ингибитором, приводящего иногда к образованию на поверхности металла химических соединений. Среди ингибиторов этого типа встречаются также неорганические ингибиторы, но основные их представители — это органические вещества, в молекулах которых содержатся определенные функциональные группы: амины и их производные, этаноламины, альдегиды, спирты, карбамиды и др.

Еще одним методом воздействия на металл является метод электрохимической защиты, заключающийся в том, что изделия, эксплуатирующиеся в морской воде или почве, подвергают внешней анодной или катодной поляризации, а также протекторной защите.

Уменьшение скорости электрохимической коррозии путем катодной поляризации или с помощью вспомогательных электродов (протекторов), являющихся анодами по отношению к корродирующей системе, принято за основу широко распространенной в настоящее время катодной защиты.

Катодная защита подводных и подземных изделий осуществляется с помощью внешних источников постоянного тока или «жертвенных» анодов-протекторов.

Принципиальная схема катодной защиты показана на рис. 5 [9]. Катодная поляризация осуществляется с помощью наложенного тока от выпрямителя 1, который преобразует переменный ток промышленной частоты в постоянный. Защищаемое изделие 2 соединяется с отрицательным полюсом выпрямителя, так что она действует в качестве катода. Второй электрод 3 (анодное заземление) соединяется с положительным полюсом источника тока и действует в качестве анода.

В СССР выпускают углеграфитовые электроды для анодных заземлений (ТУ 48-20-97—77).

Критерием электрохимической защиты металла от коррозии является защитный потенциал. Минимальная защитная разность потенциалов стальных сооружений, находящихся в суглинистых грунтах, составляет от —0,72 до 21,1 В по отношению к медно-сульфатному электроду сравнения.

Практически подземные стальные сооружения защищены до 90% при достижении разности потенциалов порядка —0,87 В. Большая разность потенциалов приводит к бесполезному расходу энергии.

Метод анодной электрохимической защиты металлов основан на переходе металла из активного состояния в пассивное вследствие смещения его по-

тенциала при анодной поляризации от внешнего источника тока.

Плотность тока, необходимая для перевода металла в пассивное состояние, велика, но, как только он запасирован, для поддержания его в этом состоянии требуется маленький ток, значительно меньший, чем в случае катодной защиты.

Метод нашел широкое применение при защите металлов от коррозии в агрессивных средах. На практике анодная защита применяется в автомобильных и железнодорожных цистернах, в которых перевозят серную кислоту.

Вопросы, связанные с расположением и количеством вспомогательных электродов — катодов и электродов сравнения, — решают опытным путем.

В системах анодной защиты применяют латунные стержни, покрытые слоем меди толщиной 600 мкм и платинированным слоем толщиной более 250 мкм. Размеры рабочей части этих катодов составляют: длина 6,25 см и диаметр 4 см.

Методы воздействия на среду. Специальные методы, понижающие агрессивность коррозионной среды, широко используют для решения многих практических задач, связанных с развитием коррозионного разрушения изделий.

Одним из таких методов является метод осушения атмосферы специальными адсорбентами в замкнутом пространстве, используемый при консервации изделий.

Консервация — это специальная защита изделий от коррозии на период их хранения или транспортирования.

Консервируют изделия на различные сроки: от нескольких часов или дней при межоперационной защите на предприятии до 15—25 лет при длительном хранении изделий. Законсервированные изделия можно хранить на открытом воздухе, в закрытом неотапливаемом помещении и в помещении с регулируемыми перепадами атмосфер.

Выбор средств и методов консервации определяется не только условием хранения и транспортирования, но и

конструктивными особенностями изделий.

Для консервации внутри барьерной упаковки для машин, станков, двигателей, изделий электронной техники и электротехники могут применяться осушители для снижения относительной влажности воздуха. В большинстве случаев достаточно снизить относительную влажность воздуха до 40—50%, когда конденсация влаги на поверхности изделий практически исключена. При длительном хранении изделий желательнее снизить относительную влажность до 20—30%.

В качестве осушителя обычно используют силикагель.

Для обеспечения сохранности изделий в течение трех лет в качестве норм закладки силикагеля в чехол из стабилизированной полиэтиленовой пленки берут примерно 1 кг на 1 м² чехла. При длительном хранении осуществляют периодическую замену силикагеля или динамическую осушку воздуха, которая проводится с помощью циркуляции специально осушенного воздуха в складских помещениях, внутри каждой упаковки или внутри крупногабаритных объектов.

Контроль за влажностью внутри упаковки проводится с помощью силикагеля-индикатора, пропитанного хлористым кобальтом. В сухом виде этот индикатор имеет синий или синефиолетовый цвет, при увлажнении приобретает розовый или фиолетово-розовый цвет.

Для консервации ответственных изделий, например, изделий авиационной техники применяют инертные атмосферы.

Для создания инертной атмосферы используют азот или гелий, прошедший глубокую осушку. При этом барьерная упаковка должна позволять создание внутри нее избыточного давления газа. Поэтому в качестве барьерной упаковки используют металлические герметичные контейнеры.

Для уменьшения электрохимической коррозии в коррозионную среду вводят летучие ингибиторы. Все летучие ингибиторы (нитрит дециклогексиламина, карбонат циклогексиламина, метанитробензоат гексаметиленамины и

9. Характеристики летучих ингибиторов атмосферной коррозии

Наименование ингибитора	Защитные свойства	Способ применения	Область применения
Нитрит децилгексиламина (НДА); карбонат циклогексиламина (КЦА)	Защищают черные металлы, никель, хром, чистый алюминий, оксидированные и фосфатированные детали. Не защищают цветные металлы — медь и медные сплавы, припой, свинец, цинк, кадмий, магний, бронзу	В порошке, нанесение на упаковочные материалы (бумагу, картон), спиртовый, водный раствор	Консервация деталей, инструмента, изделий, изготовленных из черных металлов
Мета-нитробензоат гексаметиленамины (Г-2)	Защищает черные и цветные металлы	В порошке, спиртовой, водный, водно-спиртовой	Консервация деталей, инструмента, изделий

др.) используют в виде ингибиторной бумаги, порошка или растворов.

В табл. 9 приведены по ГОСТ 9.014—78 данные по ингибиторам атмосферной коррозии, используемым для консервации изделий.

Приведенные летучие ингибиторы целесообразно использовать для консервации запасных частей, изделий и инструмента.

Методы воздействия на конструкцию. Конструктивные факторы могут оказывать существенное влияние на степень защищенности изделия, даже если оно состоит из наиболее стойких конструкционных материалов. Большое значение в этом плане имеет контакт с металлами и неметаллами. При конструировании следует учитывать опасность контактной коррозии, в связи с чем нельзя допускать контактирование металлов, существенно отличающихся по величине потенциалов. При контакте двух металлов А и В со стационарными потенциалами в определенной среде Φ_A и Φ_B сила тока коррозионного элемента (пары) в общем случае определяется сопротивлением катодного и анодного процессов и оптическим сопротивлением. С увеличением разности между стационарными потенциалами катода и анода, уменьшением омического сопротивле-

ния и сопротивления катодного и анодного процессов сила тока пары увеличивается и, следовательно, контактная коррозия также увеличивается.

В табл. 10 приведены стационарные потенциалы некоторых металлов и сплавов в морской воде.

В конструкциях изделий используются также неметаллические изоляционные материалы, которые могут впитывать влагу и таким образом быть очагами усиленной коррозии. К таким материалам относят войлок, асбест, древесину. Некоторые полимерные материалы при соприкосновении с водой могут выделять коррозионно-активные агенты, ускоряющие разрушение металлов. В связи с этим изоляционные материалы пропитывают каменноугольным дегтем или битумом, а полимерные материалы перед использованием подвергают специальным исследованиям с целью определения опасности выделяемых агрессивных компонентов. Опасным в коррозионном отношении является наличие в изделии щелей и зазоров, способствующих скоплению влаги. Поэтому при создании различных конструкций изделий предусматривают возможность проветривания полостей, наличие дренажных отверстий и др. Элементы конструкции должны быть по воз-

10. Стационарные потенциалы некоторых металлов и сплавов в морской воде по отношению к нормальному водородному электроду

Металл или сплав	Стационарный потенциал, В
Магний	—1,45
Магниевый сплав (6 % Al; 3 % Zn; 0,5 % Mn)	—1,20
Цинк	—0,80
Алюминиевый сплав (10% Mn)	—0,74
Алюминиевый сплав	—0,55
Алюминий	—0,52
Кадмий	—0,52
Дюралюминий	—0,50
Железо	—0,50
Сталь Ст4	—0,46
Серый чугун	—0,36
Сталь Х13 (активное состояние)	—0,32
Сталь Х17 (активное состояние)	—0,32
Никельмедистый чугун (12—15 % Ni; 5—7 % Cu)	—0,30
Свинец	—0,30
Олово	—0,25
Никель (активное состояние)	—0,12
Латунь (30 % Zn)	—0,11
Бронза (5—10 % Al)	—0,10
Медь	—0,08
Сталь Х13 (пассивное состояние)	+0,03
Никель (пассивное состояние)	+0,05
Титан технический	+0,10
Серебро	+0,12
Сталь 12Х18Н9 (пассивное состояние)	+0,17
Платина	+0,40

возможности обтекаемы, что облегчает испарение влаги.

Важную роль играет характер соединения элементов конструкции. Например, более предпочтительна сварка клепаных и болтовых соединений, так как при этом исключена возможность появления пор. Существует и ряд других требований, обеспечивающих создание коррозионно-стойких конструкций, например, требования к компоновке и расположению элементов, учет особенностей эксплуатации изделий и др.

Список литературы

1. Берукштис Г. К., Кларк Г. Б. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях. М.: Наука, 1971. 159 с.
2. Глазунов М. П. Методы исследования процессов коррозии//Обмен опытом в радиопромышленности. Вып. 2, 1984. С. 20—23.
3. Королев Ю. В., Путилов В. Е. Защита оборудования от коррозии. Л.: Машиностроение, 1973. 136 с.

4. Методы анализа поверхностей: Пер. с англ./Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. 581 с.
5. Морская коррозия. Справочник: Пер. с англ./Под ред. М. Шумажера. М.: Metallurgia, 1983. 512 с.
6. Никольский К. К. Коррозия и защита от нее подземных металлических сооружений связи. М.: Радио и связь, 1984. 208 с.
7. Рачев Х., Стефанова С. Справочник по коррозии: Пер. с англ. М.: Мир, 520 с.
8. Розенфельд И. Л., Жигалова К. А. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов. М.: Metallurgia, 1966. 347 с.
9. Стрижевский И. В. Подземная коррозия и методы защиты/Под ред. Я. М. Колотыркина. М.: Metallurgia, 1974. 111 с.
10. Фокин М. Н., Жигалова К. А. Методы коррозионных испытаний металлов. М.: Metallurgia, 1986. 77 с.
11. Шлугер И. А., Ажогин Ф. Ф., Ефимов Е. А. Коррозия и защита металлов. М.: Metallurgia, 1981. 216 с.
12. Logan K. H., Ewing S. P., Denison J. A. Symposium on corrosion testing procedures//Publ. by the American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1937. P. 95/125.

Глава 7 ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Надежность — это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации характеризуется безотказностью, долговечностью, сохраняемостью и ремонтопригодностью. Каждая из этих характеристик, в особенности первые три, зависит от качества исходных материалов, состояния технологии производства изделий, от уровня воздействующих внешних факторов (температуры, влажности, механических нагрузок, электрических и магнитных полей, агрессивных сред и т. п.), вызывающих изменение исходного состояния и отказы изделий.

Различают внезапные и постепенные отказы. Внезапные отказы носят характер случайного выброса. Постепенные отказы возникают в результате накопления в изделии необратимых усталостных повреждений, ведущих к изменению параметров изделий и развитию усталостных трещин.

Среди внешних факторов наибольшее влияние на надежность оказывает воздействие тепла и холода. Действие этих факторов на изделия определяется местами установки их на объектах техники (на самолете, корабле, автомашине) и расстоянием их от внешних источников тепловых воздействий.

Различают непрерывное (стационарное), периодическое и аperiodическое тепловые воздействия.

Повреждение изделий, вызванное стационарным тепловым воздействием, обусловлено в основном превышением при эксплуатации предельно допустимых значений температуры. Высокая скорость изменения температуры (тепловой удар) при аperiodи-

ческих воздействиях тепла может привести к возникновению повреждений. Этот фактор часто проявляется при недостаточном учете коэффициентов линейного расширения сопрягаемых материалов. В частности, при повышенных температурах заливочные материалы размягчаются, происходит расширение сопрягаемых с ними материалов, а при переходе к отрицательным температурам происходит сжатие заливочных материалов и растрескивание их в местах соприкосновения с металлами. При отрицательных температурах возможна значительная усадка заливочных материалов и, как следствие, образование объемов, незаполненных заливочными материалами, в результате повышается возможность электрических пробоев. Некоторые материалы под действием низкой температуры становятся хрупкими. Особенно опасным является воздействие холода, периодически чередующегося с воздействием тепла (зона пустынь, где дневная жара сменяется ночными заморозками).

Электроизоляционные свойства полярных пластических масс существенно зависят от температуры и влаги.

Влага, попадая на поверхность или проникая в объем электротехнических изделий и материалов, может вызвать снижение поверхностного или объемного сопротивления изоляции, снижение электрической прочности материалов, а также накапливание и миграцию объемных зарядов в биполярных полупроводниковых интегральных схемах и МОП-структурах; изменение физических свойств материалов, их плотности, температуры плавления, изменение размеров и коробление отдельных деталей; ускоренное старение, окисление и коррозию материалов,

снижение грибостойкости, повышение интенсивности износа деталей, покрытий, изоляции и пр.; увеличение уровня удельных электрических потерь в материалах и изделиях.

Более 50 % отказов интегральных схем и полупроводниковых приборов в пластмассовых корпусах связано с коррозией металлизации и другими дефектами, вызываемыми проникновением влаги в недостаточно герметичный корпус. Пластмасс, которые противостоят поглощению влаги, не существует. Влага проникает в изоляционный материал и ухудшает его свойства. Если в материале не имеется грубых микроскопических пор, трещин или других грубых дефектов, то влага проникает через капилляры. В радиоэлектронике применяют материалы, которые практически свободны от таких дефектов. Поэтому основное внимание при анализе качества этих материалов следует уделять диффузионным процессам увлажнения. Скорость проникновения влаги в электроизоляционные материалы является функцией поглощенной влаги, дефицита влаги и коэффициента влагопроницаемости.

Скорость протекания коррозионных процессов, а также развития трещины и ряда других процессов существенно зависит как от внешних условий, так и от качества примененных материалов, конструкции изделий, технологии их изготовления и средств противокоррозионной защиты. Поэтому зависимость времени наступления предельного состояния материалов (изменение физических, геометрических, химических и других параметров) от воздействия указанных факторов можно представить в виде

$$t = \frac{1}{k_0} \rho \exp \left\{ -\frac{E}{RT} \right\},$$

где k_0 — постоянный коэффициент; ρ — функция, зависящая от внутренних параметров материала изделий; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура внешней среды, К.

В этом уравнении существенным является наличие экспоненциального сомножителя, характеризующего функцию «усталости» материала. Располагая данными о параметрах матери-

алов, составляют физико-математические модели надежности комплектующих изделий.

Все разнообразие исходных материалов, применяемых для изготовления комплектующих изделий, условно можно разделить на изоляционные, проводниковые, контактные и конструкционные. В особую группу можно выделить полупроводниковые материалы, широко применяемые в изделиях электроники и электротехники.

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

При оценке надежности современных сложных изделий широко применяют методы, основанные на анализе физико-химических процессов, протекающих в материалах и вызывающих отказы изделий. Основные физико-химические процессы, протекающие в исходных материалах под воздействием внешней среды, представлены в табл. 1.

Представленные в табл. 1 процессы можно разделить на четыре группы: процессы теплового старения (табл. 2), коррозионные процессы, увлажнение изоляционных материалов, механическое разрушение твердых материалов.

Как следует из табл. 2, скорость теплового старения существенно и практически одинаково зависит от температуры внешней среды. Эта зависимость определяется множителем $\exp \{-E/RT\}$.

Отметим некоторые закономерности, присущие процессам теплового старения. В ходе протекания химических реакций изменяется во времени концентрация участвующих в них веществ. Отказ изделия наступает тогда, когда концентрация C одного из веществ достигает критического значения $C_{кр}$. Момент времени, когда это происходит, соответствует времени t_p работы изделия до отказа.

Для реакции 1-го порядка

$$C_{кр} = C_0 \exp \{-kt_p\};$$

для реакции n -го порядка

$$C_{кр} = \frac{C_0}{[1 + (n-1) C_0^{n-1} kt_p]^{1/(n-1)}}.$$

1. Основные виды процессов, протекающих в исходных материалах (на примере материалов, применяемых в электрорадиоизделиях)

Виды процессов в материалах	ЭВП		ППП			Конденсаторы		Резисторы		ИС			Соединители		Изоляционные материалы
	М	Д	М	Д	П/П	М	Д	М	Д	М	Д	П/П	М	Д	
Изменение состава (химические процессы)		+		+	+		+		+		+	+			
Коррозия	+		+			+		+		+			+		
Рекристаллизация		+		+			+		+		+			+	
Сублимация					+		+					+			
Адсорбция (хемосорбция)	+		+		+	+		+		+		+			
Диффузия		+		+			+		+		+				
Механические разрушения	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Увлажнение материала		+		+			+		+		+			+	+

Примечания: 1. Принятые обозначения: ЭВП электровакуумные приборы, ППП — полупроводниковые приборы, ИС — интегральные схемы, М — металл, Д — диэлектрик, П/П — полупроводник. 2. Знак «+» указывает на наличие процесса в материале.

В процессе диффузии происходит перенос вещества. Поэтому важным показателем является концентрация продиффундирующего вещества

$$\Delta C = C_0 - C = C_0 [1 - \exp(-Dx^2t_p)].$$

Отказ изделия наступит тогда, когда

$$\Delta C_{кр} = C_0 [1 - \exp(-Dx^2t_p)].$$

Например, диффузия металла в смазочный материал подшипниковых узлов является одной из причин его старения.

Скорость коррозионных процессов при отсутствии плотных пленок на поверхности металла определяется соотношением

$$\frac{dy}{dt} = C_p^n k = C_p^n k_0 \exp \{-E_k/RT\},$$

где y — толщина пленки; C_p — концентрация реагента (кислорода, влаги,

агрессивной среды) на поверхности материала на границе с газовой фазой; E_k — энергия активации коррозионного процесса.

Отказу изделий будут соответствовать толщины окисных пленок: для тонких пленок

$$y_{кр} = C_p^n t_p k_0 \exp \{-E_k/RT\};$$

для толстых пленок

$$y_{кр} = \frac{C_p^n k_0 t_p}{1 + \frac{k_0}{D_0} \left(-\frac{E_k - E_d}{RT} \right)} \times$$

$$\times \exp \{-E_k/RT\},$$

где E_d — энергия активации диффузионного процесса.

Процессы увлажнения материалов обусловлены проникновением влаги в результате диффузионных или ад-

2. Виды процессов теплового старения—

Вид процесса	Основные соотношения для скорости процесса
Рекристаллизация	$\frac{dx}{dt} = k (1 - x) e^{-E/RT}$
Диффузия	$\frac{dC}{dt} = -D \chi^2 C; \dot{D} = D_0 e^{-E/RT}$
Хемосорбция	$\frac{dC}{dt} = k_0 C (1 - S) e^{-E/RT}$
Химическая реакция	Гетерогенная 1-го порядка $-\frac{dC}{dt} = k_0 C e^{-E/RT}$
	Гетерогенная n -го порядка $-\frac{dC}{dt} = k_0 C^n e^{-E/RT}$

Обозначения: x — доля превращенного вещества; k , k_0 — коэффициенты, зависящие от материала изделия; D — коэффициент диффузии; χ — коэффициент, характеризующий размер структуры; C — концентрация вещества; S — доля поверхности, занятая хемосорбированными молекулами; n — число, указывающее порядок реакции.

сорбционных процессов. Наиболее подвержены увлажнению электроизоляционные материалы, у которых существенно снижается электрическая прочность изоляции. Если обозначить некоторый параметр изоляционных материалов через G , а количество проникшей в изоляционный материал влаги — через Q , то можно записать $G = f(Q)$.

Скорость увлажнения изоляционных материалов в зависимости от воздействующих внешних факторов можно представить в виде

$$\frac{dQ}{dt} = k_B(T) \varphi_1(M_B) \varphi_2(C_B) f_1(Q),$$

где k_B — коэффициент влагопроницаемости, $k_B(T) = k_{B0} \exp\left\{-\frac{E_B}{RT}\right\}$;

M_B — максимально возможное содержание влаги в воздухе при данной

температуре; C_B — относительная влажность воздуха.

Решив приведенное уравнение относительно $f_1(Q)$, получим уравнение, содержащее параметр G :

$$f_2(G) = k_{B0} \varphi_0(M_B) (C_B)^p \exp\{-E_B/RT\} t.$$

Отказ изоляционного материала наступит при некотором $G = G_{кр}$.

Процессы механического разрушения происходят в результате накопления остаточных напряжений в материалах под воздействием внешних факторов.

Скорость развития трещины в нагруженном материале представим в виде [15]

$$\frac{dl}{dN} = \delta \mu^m l,$$

где l — длина трещины; N — число циклов нагружения напряжением δ ;

δ — напряжение в материале; μ — относительное удлинение; m — постоянный для данного материала коэффициент.

Поскольку $\delta = \mu E$; $\mu = \alpha \Delta T$, где E — модуль упругости; α — коэффициент линейного расширения материала, ΔT — перепад температуры, то

$$\frac{dl}{dN} = El (\alpha \Delta T)^{m+1}.$$

Разделив в уравнении переменные и проинтегрировав, получим

$$l = \exp EN (\alpha \Delta T)^b,$$

где $b = m + 1$.

Отказ изделия произойдет тогда, когда длина трещины материала достигнет некоторого критического значения $l_{кр}$.

Поскольку одним из основных показателей надежности является время безотказной работы $t_{бр}$, рассмотрим зависимость безотказной работы изделия от внутренних параметров и внешних условий работы.

В процессах, протекание которых описывается химической реакцией 1-го порядка,

$$t_{бр} = \frac{1}{k_0} (\ln C_0 - \ln C_{кр}) \exp \{E/RT\};$$

в процессах, протекание которых описывается химической реакцией n -го порядка,

$$t_{бр} = \frac{C_0^{n-1} - C_{кр}^{n-1}}{(n-1) C_0^{n-1} C_{кр}^{n-1} k_0} \times$$

$$\times \exp \{E/RT\};$$

в диффузионных процессах

$$t_{бр} = \frac{\ln C_0 - \ln C_{кр}}{D_0 \kappa^2} \exp \{E/RT\};$$

в процессах увлажнения:
для тонких пленок

$$t_{бр} = \frac{y_{кр}}{k_0 C_p} \exp \{E_k/RT\};$$

для толстых пленок

$$t_{бр} = \frac{y_{кр} \left[1 + \frac{k_0}{D_0} \exp(-E_k E_d/RT) \right]}{C_p k_0} \times$$

$$\times \exp \{E_k/RT\}.$$

Приведенные формулы представляют собой детерминированные зависимости времени $t_{бр}$ от внутренних параметров и внешних условий. Для совокупности изделий и даже микроструктур одного материала вследствие случайного характера процессов производства $t_{бр}$ будет случайной величиной. Тогда средняя наработка на отказ изделий

$$t_{ср} = M \{t_{бр}\} = \int_0^{\infty} t \varphi(t) dt =$$

$$= - \int_0^{\infty} t P'(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt,$$

где вероятность безотказной работы изделий

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\};$$

здесь $\lambda(t)$ — интенсивность отказов.

В общем случае можно записать

$$P(t_{бр} > t) = \exp \left\{ - \int_0^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \times \right.$$

$$\left. \times \lambda_{ij}(\xi, e) d\xi \right\},$$

где $\lambda(\xi, e)$ — интенсивность отказов, обусловленных протеканием ij -го процесса во времени ξ и в условиях e .

Располагая данными о физических причинах, приводящих к отказам изделий, и характеристиками физико-химических процессов, протекающих в материалах изделий под воздействием внешних факторов, разрабатывают физико-математические модели надежности комплектующих изделий.

МОДЕЛЬ ПАРАМЕТР — ПОЛЕ ДОПУСКА

Изделие обладает определенными выходными параметрами $y_i(t)$, $i = 1, n$. Совокупность этих параметров определяет его качество и работоспособность.

Условие работоспособности изделий по любому из параметров имеет вид

$$y_{iн}(t) < y_i(t) < y_{iв}(t),$$

где y_{iH} , y_{iB} — соответственно нижний и верхний допуски на i -й параметр.

Задача состоит в определении надежности изделия, обусловленной отклонениями его рабочих параметров $y(t)$ (постепенными отказами) и полями допусков.

В случае постепенного изменения параметров изделий во времени по известной плотности распределения значений параметров $\varphi(y, t)$ может быть определена вероятность нахождения параметра в определенных пределах.

Связь плотности распределения $f(t)$ времени работы изделия до отказа с плотностью распределения $\varphi(y, t)$ параметров получают путем дифференцирования вероятности отказа $q(y, t)$. Например, для нормального закона распределения значений параметров изделия

$$\varphi(y, t) = \frac{1}{\sigma_y(t) \sqrt{2\pi}} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{[y - m_y(t)]^2}{2\sigma_y^2(t)} \right\}$$

функция $f(t)$ имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \\ \times \left[\exp \left\{ -\frac{[\beta - m_y(t)]^2}{2\sigma_y^2(t)} \right\} \times \right. \\ \times \left[\frac{\beta - m_y(t)}{\sigma_y(t)} \right]' - \exp \left\{ -\frac{[\alpha - m_y(t)]^2}{2\sigma_y^2(t)} \right\} \times \\ \times \left. \left[\frac{\alpha - m_y(t)}{\sigma_y(t)} \right]' \right].$$

Для экспоненциального закона

$$\varphi(y, t) = \lambda_y(t) \exp \{-\lambda_y(t) y\}$$

при двустороннем ограничении параметра

$$f(t) = \{\beta \exp [-\lambda_y(t) \beta] - \\ - \alpha \exp [-\lambda_y(t) \alpha]\} \left| \frac{d\lambda_y(t)}{dt} \right|;$$

при одностороннем ограничении параметра

$$f(t) = \alpha \exp \{-\lambda_y(t)\} \left| \frac{d\lambda_y(t)}{dt} \right|.$$

Из приведенных формул следует, что показатели надежности изделия могут быть получены в том случае, если будут известны так называемые моментные функции процесса:

$$m_y(t) = \xi_m(t) \text{ и } \sigma(t) = \xi_\sigma(t) \text{ или } \lambda_y(t).$$

В табл. 3 приведены аналитические выражения функции $f(t)$ для случая распределения параметров y по нормальному закону с нелинейным изменением числовых характеристик $m_y(t)$, $\sigma_y(t)$, а в табл. 4 — вероятности отказа.

Приведенные в табл. 4 вероятности отказа изделий получены, исходя из известного соотношения

$$q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau.$$

Подставляя в это уравнение функции $f(t)$, приведенные в табл. 3, получают функции вероятности отказа изделий $q(y, t)$, представляющие математическое описание модели «параметр—поле допуска».

В частности, в случае одностороннего ограничения выходного параметра изделия α :

для нормального закона распределения

$$q(y, t) = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left[\frac{\alpha - m_y(t)}{\sigma_y(t)} \right] - \right. \\ \left. - \Phi \left[\frac{\alpha - m_y(t=0)}{\sigma_y(t=0)} \right] \right\};$$

для закона Рэлея

$$q(l, t) = \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2(t)} \right] - \\ - \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2\sigma_y^2(t=0)} \right],$$

где $\Phi(z)$ — функция Лапласа.

Из приведенных в табл. 3, 4 формул следует, что на характеристики на-

3. Функция плотности $f(t)$ при нормальном законе распределения у с нелинейным изменением числовых характеристик

$m_y(t)$	$\sigma_y(t)$	Характеристики надежности — функция $f(t)$
$a_m t^{b_m}$	$a_\delta t^{b_\delta}$	$\frac{a_m b_m t^{b_\delta t^{b_m}-1} a_\delta - a_\delta b_\delta t^{b_\delta-1} - \alpha - a_m t^{b_m}}{\sqrt{2\pi} (a_\delta t^{b_\delta})^2} \exp \left[\frac{-(\alpha - a_m t^{b_m})^2}{2 (a_\delta t^{b_\delta})^2} \right]$
$a_m e^{b_m t}$	$a_\delta e^{b_\delta t}$	$\frac{a_m (b_\delta - b_m) e^{b_m t} - \alpha b_\delta}{\sqrt{2\pi} a_\delta e^{b_\delta t}} \exp \left[-\frac{(\alpha - a_m e^{b_m t})^2}{2 (a_\delta e^{b_\delta t})^2} \right]$
$a_m t^{b_m} + c_m$	$a_\delta t^{b_\delta} + c_\delta$	$\frac{-a_m b_m t^{b_m-1} (a_\delta t^{b_\delta} + c_\delta) - a_\delta b_\delta t^{b_\delta-1} (\alpha - a_m t^{b_m} - c_m)}{\sqrt{2\pi} (a_\delta t^{b_\delta} + c_\delta)^2} \times$ $\times \exp \left\{ \frac{-[\alpha - (a_m t^{b_m} + c_m)]^2}{2 (a_\delta t^{b_\delta} + c_\delta)^2} \right\}$
$a_m e^{b_m t} + c_m$	$a_\delta e^{b_\delta t} + c_\delta$	$\frac{-a_m b_m e^{b_m t} (a_\delta e^{b_\delta t} + c_\delta) - a_\delta b_\delta e^{b_\delta t} (\alpha - a_m e^{b_m t} - c_m)}{\sqrt{2\pi} (a_\delta e^{b_\delta t} + c_\delta)^2} \times$ $\times \exp \left\{ \frac{-[\alpha - (a_m e^{b_m t} + c_m)]^2}{2 (a_\delta e^{b_\delta t} + c_\delta)^2} \right\}$

$m_y(t)$	$\sigma_y(t)$	Характеристики надежности — функция $f(t)$.
$a_m t^{b_m}$	$a_\delta + b_\delta t$	$\frac{-a_m b_m t^{b_m-1} (a_\delta + b_\delta t) - b_\delta (\alpha - a_m t^{b_m})}{\sqrt{2\pi} (a_\delta + b_\delta t)^2} \exp \left[-\frac{(\alpha - a_m t^{b_m})^2}{2 (a_\delta + b_\delta t)^2} \right]$
$a_m e^{b_m t}$	$a_\delta + b_\delta t$	$\frac{-(a_\delta + b_\delta t) a_m e^{b_m t} b_m - (\alpha - a_m e^{b_m t}) b_\delta}{\sqrt{2\pi} (a_\delta + b_\delta t)^2} \exp \left[-\frac{(\alpha - a_m e^{b_m t})^2}{2 (a_\delta + b_\delta t)^2} \right]$
$a_m t^{b_m} + c_m$	$a_\delta + b_\delta t$	$\frac{-a_m b_m t^{b_m-1} (a_\delta + b_\delta t) - [\alpha - (a_m t^{b_m} + c_m)] b_\delta}{\sqrt{2\pi} (a_\delta + b_\delta t)^2} \exp \left\{ -\frac{[\alpha - (a_m t^{b_m} + c_m)]^2}{2 (a_\delta + b_\delta t)^2} \right\}$
$a_m e^{b_m t} + c_m$	$a_\delta + b_\delta t$	$\frac{-(a_\delta + b_\delta t) a_m b_m e^{b_m t} - (\alpha - a_m e^{b_m t} - c_m) b_\delta}{\sqrt{2\pi} (a_\delta + b_\delta t)^2} \exp \left\{ -\frac{[\alpha - (a_m e^{b_m t} + c_m)]^2}{2 (a_\delta + b_\delta t)^2} \right\}$
$a_m + b_m t$	$a_\delta + b_\delta t$	$\frac{-b_m (a_\delta + b_\delta t) - b_\delta (\alpha - a_m - b_m t)}{\sqrt{2\pi} (a_\delta + b_\delta t)} \exp \left\{ -\frac{[\alpha - (a_m + b_m t)]^2}{2 (a_\delta + b_\delta t)^2} \right\}$

Примечание. Через $a_m, b_m, c_m, a_\delta, b_\delta, c_\delta$ обозначены параметры моментных функций $m_y(t)$, $\xi_m(t)$ и $\sigma_y(t) = \sigma_\delta(t)$, определяемые по экспериментальным данным, например, по результатам многофакторных испытаний изделий.
В табл. 3 вместо индекса δ следует читать σ .

4. Формулы для определения вероятностей отказа изделия при распределении выходных параметров по нормальному закону и закону Рэлея

$m_y(t)$	$\sigma_y(t)$	$q(y, t)_{\text{норм}}$	$q(y, t)_{\text{Рэлея}}$
$a_m t^{b_m}$	$a_\sigma t^{b_\sigma}$	$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\alpha - a_m t^{b_m}}{a_\sigma t^{b_\sigma}} \right) - \lim_{t_0 \rightarrow 0} \Phi \left(\frac{\alpha - a_m t_0^{b_m}}{a_\sigma t_0^{b_\sigma}} \right) \right]$	$\exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma t^{b_\sigma})^2} \right] - \lim_{t_0 \rightarrow 0} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma t_0^{b_\sigma})^2} \right]$
$a_m e^{b_m t}$	$a_\sigma e^{b_\sigma t}$	$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\alpha - a_m e^{b_m t}}{a_\sigma e^{b_\sigma t}} \right) - \Phi \left(\frac{\alpha - a_m}{a_\sigma} \right) \right]$	$\exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma e^{b_\sigma t})^2} \right] - \exp \left(-\frac{\alpha^2}{2a_\sigma^2} \right)$
$a_m t^{b_m} + c_m$	$a_\sigma t^{b_\sigma} + c_\sigma$	$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\alpha - a_m t^{b_m} - c_m}{a_\sigma t^{b_\sigma} + c_\sigma} \right) - \right.$ $\left. - \lim_{t_0 \rightarrow 0} \Phi \left(\frac{\alpha - a_m t_0^{b_\sigma} - c_m}{a_\sigma t_0^{b_\sigma} + c_\sigma} \right) \right]$	$\exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma t^{b_\sigma} + c_\sigma)^2} \right] -$ $- \lim_{t_0 \rightarrow 0} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma t_0^{b_\sigma} + c_\sigma)^2} \right]$
$a_m e^{b_m t} + c_m$	$a_\sigma e^{b_\sigma t} + c_\sigma$	$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\alpha - a_m e^{b_m t} - c_m}{a_\sigma e^{b_\sigma t} + c_\sigma} \right) - \right.$ $\left. - \Phi \left(\frac{\alpha - a_m - c_m}{a_\sigma + c_\sigma} \right) \right]$	$\exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma e^{b_\sigma t} + c_\sigma)^2} \right] -$ $- \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma + c_\sigma)^2} \right]$
$a_m + b_m t$	$a_\sigma + b_\sigma t$	$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\alpha - a_m - b_m t}{a_\sigma + b_\sigma t} \right) - \Phi \left(\frac{\alpha - a_m}{a_\sigma} \right) \right]$	$\exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma + b_\sigma t)^2} \right] - \exp \left(-\frac{\alpha^2}{2a_\sigma^2} \right)$
$a_m e^{b_m t}$	$a_\sigma t^{b_\sigma} + c_\sigma$	$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\alpha - a_m e^{b_m t}}{a_\sigma t^{b_\sigma} + c_\sigma} \right) - \right.$ $\left. - \lim_{t_0 \rightarrow 0} \Phi \left(\frac{\alpha - a_m e^{b_m t_0}}{a_\sigma t_0^{b_\sigma} + c_\sigma} \right) \right]$	$\exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma t^{b_\sigma} + c_\sigma)^2} \right] -$ $- \lim_{t_0 \rightarrow 0} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2(a_\sigma t_0^{b_\sigma} + c_\sigma)^2} \right]$

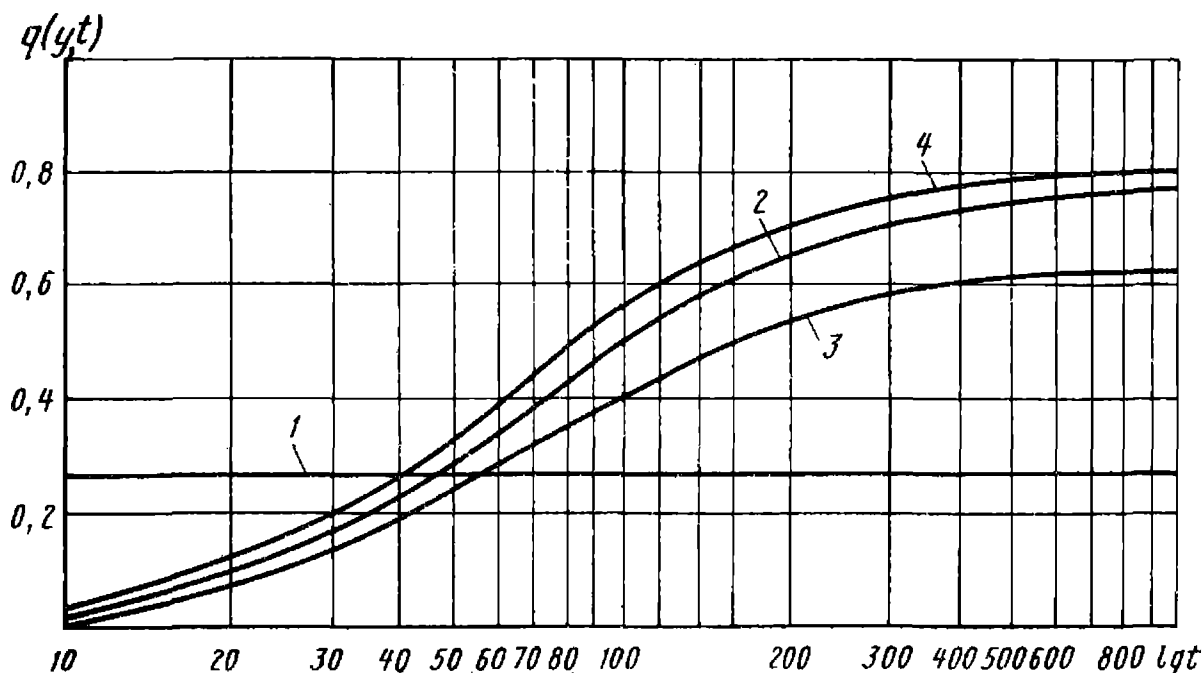


Рис. 1. Влияние вида аппроксимации моментных функций на вероятность отказа $q(y, t)$:

$$1 - \sigma_y(t) = a_\sigma t^{b_\sigma}; \quad 2 - a_\sigma + b_\sigma t; \quad 3 - a_\sigma e^{b_\sigma t} \quad 4 - a_\sigma e^{b_\sigma t}$$

дежности изделий оказывают существенное влияние вид и значения параметров моментных функций, а также коэффициент запаса $k_z = \frac{m_y(t=0)}{y_H}$, где y_H — нижнее значение выходного параметра изделия.

На рис. 1 приведены результаты расчета зависимости $q(y, t)$ в диапазоне изменения $t = 1 \div 1000$ ед. времени для закона Рэлея при различных значениях a_σ, b_σ . Особенно сильно на $q(y, t)$ сказывается влияние коэффициента b_σ . Так, при $t = 100$ увеличение b_σ от 0,001 до 0,005 приводит к возрастанию $q(y, t)$ на 0,2, а от 0,001 до 0,01 — на 0,55. Изменение коэффициента запаса в пределах 1,00—1,30 для рассмотренного случая не приводит к существенному изменению вероятности отказа [14].

Пример. Оценить вероятность работоспособного состояния одного из узлов радиоэлектронной аппаратуры — триггера, собранного на полупроводниковых приборах (рис. 2).

Решение. В общем случае вероятность нормальной работы триггера

$$P(t) = P_1(t) P_2(t),$$

где $P_1(t)$ — множитель, учитывающий внезапные отказы элементов триггера; $P_2(t)$ — множитель, учитывающий постепенные отказы триггера.

Рассмотрим особенности вычисления вероятности $P_2(t)$, используя модель «параметр — поле допуска».

Рабочие функции, определяющие работоспособность триггера, сводятся к следующему:

1. При отсутствии переключающих импульсов триггер должен сохранять каждое из двух своих устойчивых состояний.

2. При поступлении управляющих импульсов на входы триггера последний должен переключаться в заданном диапазоне частот повторения импульсов.

3. Находясь в устойчивом состоянии и при переключениях, триггер должен выдавать на выходные цепи напряжения определенной амплитуды и формы.

В соответствии с этим $P_2(t)$ равна вероятности совместного выполнения

для каждого из транзисторов триггера следующие неравенства:

$$\frac{E_K}{R_K + R_0} > \frac{E_{см}}{R_6};$$

$$\frac{\beta R_K}{R_K + R_0} > m_{\min}; \quad \frac{E_{см}}{R_6} > I_{к0},$$

где E_K и $E_{см}$ — напряжение питания соответственно коллекторной цепи и цепи смещения; R_K , R_6 и R_0 — сопротивление в цепях коллектора, базы и связи; β — коэффициент усиления транзистора в схеме с общим эмиттером; $m_{\min}$ — параметр, определяющий необходимый запас устойчивости триггера, зависящий от режима работы транзисторов (обычно $m_{\min} = 2,0 \div 1,5$); $I_{к0}$ — нулевой ток коллектора. Наибольшему относительному изменению при воздействии эксплуатационных факторов подвержен ток коллекторного перехода транзистора I_K .

Поэтому

$$P_2(t) \approx \left[P \left(\frac{E_c}{R_6} \geq I_{к0} \right) \right]^2$$

Ток коллектора изменяется в основном под воздействием внешней температуры и напряжения на коллекторе.

Изменение температуры внешней среды вызывает изменение нулевого тока транзистора по формуле

$$I_{к0} = I_0 \exp \{ (0,006 \div 0,09) \Delta t \},$$

зависимость $I_{к0}$ от напряжения на коллекторе транзистора определяется соотношением

$$I_{к0} = I_0 \exp \{ 1 + (0,11 \div 0,13) \Delta U_K \},$$

где $\Delta U_K = U_{K \text{ ном}} - |U_K|$, U_K — фактическое значение напряжения на коллекторе.

Так как изменение тока коллектора полупроводниковых приборов происходит в основном в первые часы работы, то при эксплуатации аппаратуры можно принять

$$I_{к0} \approx I_0 (1 + m_{ст}),$$

где $m_{ст}$ — коэффициент, учитывающий старение прибора ($m_{ст} \neq 0,6 \div 0,8$).

С учетом изложенного получим

$$I_{к0} = I_0 \exp [(0,06 \div 0,09) \Delta t] \times \\ \times [1 + (0,11 \div 0,13) \Delta U_K] (1 + m_{ст}),$$

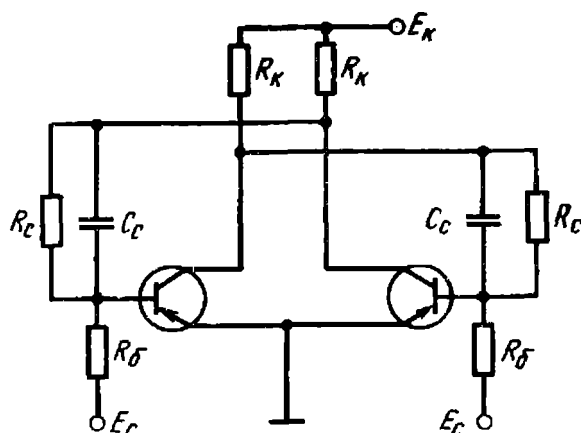


Рис. 2. Принципиальная схема триггера

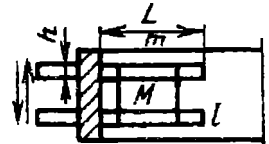
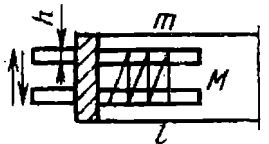
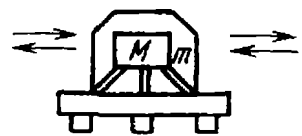
тогда

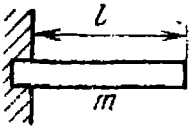
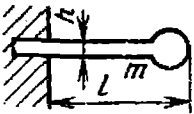
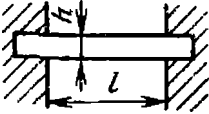
$$P_2(t) = \left(P \left\{ \frac{E_c}{R_6} \geq I_0 \exp [(0,06 \div 0,09) \Delta t] [1 + (0,11 \div 0,13) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \Delta U_K] (1 + m_{ст}) \right\} \right)^2$$

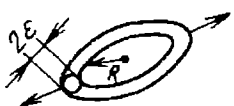
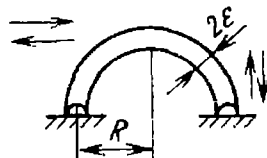
Модель «параметр—поле допуска» находит применение при оценке надежности изделий, подвергаемых воздействию механических нагрузок. При решении этих задач возникают большие трудности в отношении определения условий работоспособности изделий. Создавая надежную конструкцию, способную работать при воздействии механических нагрузок, необходимо учитывать динамические свойства конструкций и нагрузок. Это достигается в результате рационально построенных несущих силовых элементов: применение демпфирования и виброизоляции, исключение появления резонансных эффектов посредством ограничения внешнего диапазона частот вибраций частотой, равной половине резонансной частоты элементов.

Для колебательных систем достаточно малого (по сравнению с длиной волны вибраций) размера при решении рассматриваемых задач применимы модели с ограниченным числом степеней свободы. Чаще используют простые линейные и нелинейные колебательные системы с одной или двумя степенями свободы. Примерами линейных колебательных систем могут служить

5. Колебательные модели электрорадиоизделий

Радиодетали	Схематическое изображение радиодеталей	Основная частота собственных колебаний	Прочность δ	Обозначения
Конденсатор, резистор		$\sqrt{\frac{24EJ}{\left(M + \frac{26}{35}m\right)l^3}}$	$\delta = \frac{3Eh}{l^3} U$	J — момент инерции сечения провода; m — масса вывода изделия
Анод ЭВП		$\sqrt{\frac{12EJK}{l^3 \left[\bar{M} + Km \left(1 - \frac{22l}{25} \right) \right]}}$	$\delta = \frac{3Eh}{l^3} U$	K — число выводов
Сетка ЭВП		$\frac{1,875}{l^3} \sqrt{\frac{EJlK}{m^*}}$	$\delta = \frac{3Eh}{2l^3} U$	m — полная масса радиодетали
Полупроводниковый триод		$\sqrt{\frac{12EJK}{l^3 \left(M + \frac{13}{35} Km \right)}}$	$\delta = \frac{3Eh}{l^3} U$	K — число стоек; m — масса стоек; M — масса кристалла

Радиодетали	Схематическое изображение радиодеталей	Основная частота собственных колебаний	Прочность δ	Обозначения
Микро-модуль		$\sqrt{\frac{12EKJ}{l^2 \left(M + \frac{13}{35} Km \right)}}$	$\delta = \frac{3hE}{2l^2} U$	См. выше
Реле, контакторы		$\sqrt{\frac{12EJ}{l^2 \left(M + \frac{32}{140} m \right)}}$	$\delta = 3/2 Eh \frac{U}{l^2}$	То же
Проводник		$\left(\frac{4.73}{l} \right) \sqrt{\frac{EJl}{m}}$	$\delta = \frac{12Eh}{l^2} U$	,

Радиодетали	Схематическое изображение радиодеталей	Основная частота собственных колебаний	Прочность δ	Обозначения
Проводник с сильным натяжением		$\frac{\pi c}{l} \sqrt{1 + \alpha (12 + \pi)^2 \alpha + \dots}$	$\delta = \frac{Q}{s} + \frac{12Eh}{l^2} U;$ $c = \sqrt{\frac{Q}{\rho s}};$ $\alpha = \left(\frac{EJ}{\rho s c^2 l} \right)^{1/2}$	См. выше
Виток		$\sqrt{\frac{9}{5} \frac{E \epsilon^2}{\rho R^4}}$	$\delta = \frac{24E\epsilon}{\pi^2 R^2}$	То же
Виток		$\sqrt{\frac{14,4E\epsilon^2}{\rho R^4}}$		,

электроды электровакуумных приборов, конденсаторов, транзисторов. Колебательные модели отдельных элементов электрорадиоаппаратов приведены в табл. 5.

Система с одной степенью свободы является полезным аналогом при анализе отказов изделий. Реальные вибрации, воздействующие на изделия, можно также аппроксимировать гармонической вибрацией на фиксированной частоте, квазигармонической с непрерывным изменением частоты и узкополосной случайной вибрацией.

При использовании в качестве аналога системы с одной степенью свободы с вязким демпфированием реальное изделие представляется в виде модели, содержащей массу, пружину и демпфер. Этот аналог применяют в том случае, когда критерий отказа можно выразить через максимум перемещения, скорости или ускорения массы. Многие составные части технических изделий либо непосредственно подходят под эту модель, либо могут быть математически описаны как системы с одной степенью свободы.

В качестве аналога принимают безынерционную балку с сосредоточенной нагрузкой. Задачу решают с использованием результатов анализа системы, показанной на рис. 3, а, в предположении, что критерием отказа является смещение (Y) массы относительно опор или ускорения массы. Проводят пересчет смещения на напряжение или деформацию в балке. Для элементов конструкции, которые несут множество сравнительно малых нагрузок, в качестве аналога применяют балку с равномерно распределенной массой (рис. 3, б). Критерием отказа является значение напряжения или деформации в балке. В качестве аналога можно применять балку с равномерно распределенной массой вдоль ее оси и несущей еще сосредоточенную нагрузку (рис. 3, в).

Приведенные аналоги при малых смещениях Y можно рассматривать как линейные системы.

Исследование поврежденных конструкций изделий включает в себя выбор подходящего аналога, определение типа возбуждения и установление критерия отказа.

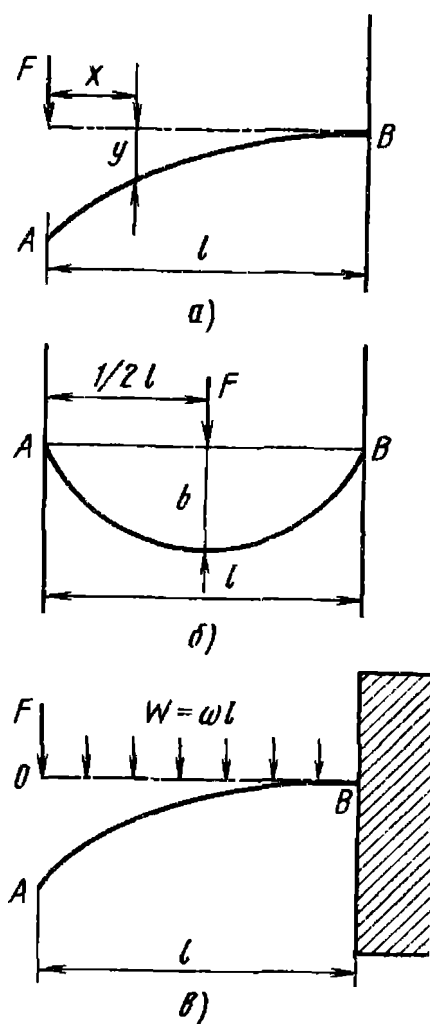


Рис. 3. Модели-аналоги отказов комплекующих изделий:

а — консольная балка с сосредоточенной нагрузкой F на конце; б — балка на опорах по концам; в — консольная балка с равномерно распределенной нагрузкой

Последовательность решения этой задачи проведем применительно к системе с одной степенью свободы с вязким демпфированием (рис. 4). В системе, изображенной на рис. 4, а, возмущение проявляется в смещении основания $S(t)$; в системе, изображенной на рис. 4, б, возмущающая сила $F(t)$ непосредственно приложена к массе m .

Для системы, изображенной на рис. 4, а, закон движения основания характеризуется заданием спектральной плотности ускорения основания $S_s(\omega)$. В системе, показанной на рис. 4, б, возмущение характеризуют спектральной плотностью силы на единицу жесткости пружины $S_{F/k}(\omega)$.

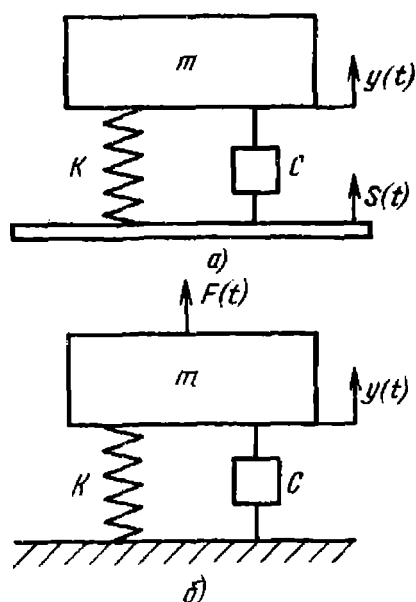


Рис. 4. Модели-аналоги отказов комплектующих изделий при воздействии механических нагрузок:

а — система свободных демпфированных колебаний (k — пружина, m — масса, c — демпфер); б — система вынужденных колебаний под действием возмущающей силы $F_0 \sin \omega t$

Критерий отказа изделий для этих двух случаев выбирается следующим образом.

1. Движение основания. Относительное перемещение массы и основания определяется из решения дифференциального уравнения движения массы

$$m(\ddot{y} + \ddot{s}) + c\dot{y} + ky = 0,$$

где точками указано дифференцирование по времени; $S(t)$ — перемещение основания. Собственная частота системы $\Omega^2 = k/m$; $2\Omega\xi = c/m$; $\xi = c/c_k$ — отношение демпфирования в системе к критическому демпфированию.

Спектральная плотность реакции $S_r(\omega)$ и спектральная плотность возмущения $S_l(\omega)$ связаны передаточной функцией $H(\omega)$:

$$S_r(\omega) = |H(\omega)| S_l'(\omega).$$

Среднее квадратическое значение реакции системы связано со спектральной плотностью следующим образом:

$$\bar{y}^2 = \int_0^\infty S_r(\omega) d\omega.$$

В случае, когда спектральная плотность — достаточно гладкая функция в области резонансной частоты $\Omega = \omega$, при вычислении полагают $S_l(\omega)$ постоянным и равным $S_l(\Omega)$. Тогда

$$\bar{y}^2 = \frac{S_s(\omega)}{\Omega} \frac{\pi\Omega}{4\xi}.$$

Выразив частоту в герцах, спектральную плотность $S_s(\omega)$ в $\text{см} \cdot \text{с}^{-2}$ и заменив $\Omega/2\pi = f_n$, получим следующее выражение для определения среднеквадратического относительного смещения (в см) основания:

$$\sqrt{\bar{y}^2} = 10^3 \sqrt{S_s(f_n)/64\pi^3 f_n^3 \xi}.$$

2. Возмущающая сила приложена непосредственно к массе. Дифференциальное уравнение движения массы m имеет вид

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t).$$

Средний квадрат смещения

$$\bar{y}^2 = S_{F/k}(\Omega) \frac{\pi}{4} \frac{\Omega}{\varphi}.$$

Среднее квадратическое значение смещения (в см) при условии, что частота выражена в герцах:

$$\sqrt{\bar{y}^2} = \sqrt{\frac{20,253 f_n S_{F/k}(f_n)}{4\xi}}.$$

Применение полученных критериев отказов особенно целесообразно для систем с малым демпфированием. В этом случае реакция системы на широкополосное возмущение представляет узкополосный случайный процесс (гармоника с частотой, медленно изменяющейся между наибольшим и наименьшим значениями). Отказ изделия произойдет тогда, когда пиковое значение перемещения $y_{\text{п}}$ превысит допустимое значение. В случае нормального случайного процесса распределение пиковых значений подчи-

няется рэлеевскому закону распределения

$$P\left(\frac{|y_{\Pi}|}{\sqrt{\bar{y}^2}}\right) = \exp\left\{-\frac{y_{\Pi}^2}{2\bar{y}^2}\right\}.$$

При решении рассматриваемых задач в качестве критерия отказа можно принимать напряжение в элементах конструкции. В этом случае напряжение в конструкции находят по относительному перемещению y массы m .

МОДЕЛЬ НАГРУЗКА — ПРОЧНОСТЬ

Состояние изделия характеризуется k -факторами. Один из этих факторов характеризуют несущую способность (сопротивляемость, прочность), другие — внешнюю нагрузку (тепловую, вибрационную, силовую, электрическую, радиационную и др.). В этом случае условие работоспособности изделия в течение времени t можно записать в виде неравенства

$$\begin{aligned} \psi(t, x_1, x_2, \dots, x_{k-1}) = \\ = [R(x_1, x_2, \dots, x_l, t) - \\ - W(x_{l+1}, \dots, x_{k-1}, t)] \geq 0, \end{aligned}$$

где $R(x_1, x_2, \dots, x_l, t)$ — случайная функция несущей способности изделия; $W(x_{l+1}, x_{l+2}, \dots, x_{k-1}, t)$ — случайная функция нагрузки.

Вероятность отказа

$$\begin{aligned} q(t) = \int \psi(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, t) \times \\ \times \int f(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, t) dx_1 dx_2, \\ \dots, dx_{k-1} dt. \end{aligned}$$

Общего решения этого интеграла не существует. Известен ряд приближенных методов:

1) группа методов, основанных на классической теории случайных событий (методы Н. С. Стрелецкого, А. Р. Ржаницына);

2) группа методов, основанных на теории выбросов нагрузки за заданный уровень (методы В. В. Болотина).

Методы Н. С. Стрелецкого. Известно, что исходные кривые распределения нагрузки и несущей способности изделия обладают достаточной точностью лишь в области наиболее ве-

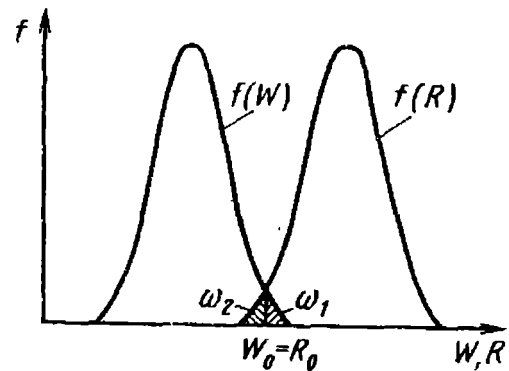


Рис. 5. Кривые распределения нагрузки и несущей способности $f(R)$, $f(W)$

роятных значений параметров, а при расчетах используют участки кривых, соответствующие малым значениям вероятностей отказов. Учитывая это положение, Н. С. Стрелецкий предложил вычисление точного значения вероятности отказа заменить грубой оценкой. Пояснением указанного предложения может служить рис. 5. Обрываем обе кривые в точке

$$W_0 = R_0. \text{ Обозначим } \omega_1 = \int_0^{\infty} W_0 \times \\ \times \varphi(W) dW, \omega_2 = \int_0^{R_0} \varphi(R) dR. \text{ Для}$$

малых значений вероятностей удовлетворяется условие

$$q(t) > \omega_1 \omega_2$$

при любом значении $W_0 = R_0$.

В этом случае вероятность неразрушения изделий будет равна некоторой величине $\Gamma = 1 - \omega_1 \omega_2$, которую Н. С. Стрелецкий назвал гарантией неразрушения.

Пример. Определить вероятность безотказной работы крепления блока аппаратуры, удерживаемого стальными болтами со средним значением предела текучести, равным $27 \cdot 10^7$ Па, средним квадратическим отклонением $\sigma = 1,48 \cdot 10^7$ Па и браковочным минимумом $22 \cdot 10^7$ Па.

Решение. Принимаем нормальный закон распределения несущей способности болтов. В этом случае кривую распределения предела те-

кучести можно оборвать на величине $22 \cdot 10^7$ Па. По экспериментальным данным находим $\omega_2 = 3 \cdot 10^{-4}$. По кривой распределения нагрузки W для случая $W > 22 \cdot 10^7$ Па находим $\omega_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$.

Тогда

$$\Gamma = 1 - \omega_1 \omega_2 =$$

$$= 1 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 1 - 7,5 \cdot 10^{-8}.$$

Методы А. Р. Ржаницына. При анализе зависимости $\psi(x_1, x_2, \dots, x_{k-1})$ предположим, что распределение определяющих параметров $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$ подчиняется нормальному закону, а функция ψ является линейной функцией определяющих параметров, т. е.

$$\psi = \sum_{i=1}^{k-1} a_i x_i.$$

В этом случае функция неразрушимости ψ имеет среднее значение и дисперсию:

$$\bar{\psi} = \bar{R} - \bar{W};$$

$$D_\psi = K_{RR} - 2K_{RW} + K_{WW},$$

где K_{RR}, K_{RW}, K_{WW} — элементы корреляционной матрицы.

Для оценки вероятности безотказной работы А. Р. Ржаницын ввел характеристику безопасности

$$\gamma = \frac{\bar{R} - \bar{W}}{\sqrt{D_\psi}} =$$

$$= \frac{\bar{R} - \bar{W}}{\sqrt{K_{RR} - 2K_{RW} + K_{WW}}}.$$

При указанных выше предположениях функция неразрушимости также распределена нормально. Тогда вероятность отказа

$$q(t) = \int_{-\infty}^0 \varphi(\psi) d\psi = 1/2 - \Phi(\gamma).$$

Соотношения между $q(t)$ и γ имеют вид:

Предполагая, что корреляционная связь между нагрузкой и несущей способностью изделия отсутствует, можно ввести коэффициенты изменчивости:

$$\omega_W = \frac{\sqrt{K_{WW}}}{\bar{W}}; \quad \omega_R = \frac{\sqrt{K_{RR}}}{\bar{R}}.$$

Тогда формулу для характеристики безопасности γ можно переписать в виде

$$\gamma = \frac{\kappa - 1}{\sqrt{\omega_R^2 \kappa^2 + \omega_W^2}},$$

$$\text{где } \kappa = \frac{\bar{R}}{\bar{W}}.$$

В строительной механике установлена зависимость коэффициентов изменчивости от коэффициентов перегрузки K_W и однородности K_R (значения этих коэффициентов приводятся в нормативных расчетах): $K_W = 1 + \gamma \omega_W$; $K_R = 1 - \gamma \omega_R$.

При условии линейности функции $\psi(x_1, x_2, \dots, x_{k-1})$ и справедливости распределения параметров $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$ по нормальному закону соотношение для характеристики безопасности можно записать в виде

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} a_i \bar{x}_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{k-1} a_i a_j K_{x_i x_j}}}.$$

Пример. Определить коэффициент безопасности крепления блока аппаратуры, расположенного на кронштейне, удерживаемом стальными болтами (сталь со средним значением предела текучести $\bar{R}_T = 26,5 \cdot 10^7$ Па, стандартным отклонением $\sigma_{R_T} = 2,84 \cdot 10^7$ Па и коэффициентом изменчивости $\omega_{R_T} = 0,106$). Нагрузка на болты $\bar{W} = 16 \cdot 10^7$ Па при коэффициенте изменчивости $\omega_W = 0,100$.

$q(t)$	0,1
γ	1,28

0,01	0,001	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
2,32	3,15	3,77	4,0

Решение. Определяем

$$= \frac{\bar{R}}{\bar{W}} = \frac{26,53}{16} = 1,66.$$

характеристика безопасности

$$\gamma = \frac{1,66 - 1,0}{\sqrt{0,106^2 \cdot 1,66^2 + 0,1^2}} = 3,3.$$

При этом значении коэффициента безопасности $\gamma q(t) = 0,00045$.

При изменении уровней нагрузки W будут изменяться значения γ и $q(t)$. Следовательно, рассмотренный критерий можно использовать для установления зависимости между нагрузкой и показателями надежности.

МОДЕЛЬ НАГРУЗКА — НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

По многим видам комплектующих изделий непосредственное определение показателей надежности с помощью рассмотренных выше методов затруднено из-за отсутствия экспериментальных данных. Поэтому при решении этой задачи обычно используют упрощенную модель нагрузка — несущая способность изделия.

Основные элементы этой модели сводятся к следующему. Изделие обладает несущей способностью $R(t)$, на него действует нагрузка $W(t)$. Отказ изделия не наступит до тех пор, пока удовлетворяется условие

$$\begin{aligned} \psi(x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, t) = \\ = [R(x_1, x_2, \dots, x_l, t) - \\ - W(x_{l+1}, x_{l+2}, \dots, x_{k-1}, t)] \geq 0. \end{aligned}$$

Для получения аналитических зависимостей вероятности отказа и других характеристик надежности изделий в рассматриваемой модели нестационарные случайные функции $R(t)$ и $W(t)$ заменяют более простыми случайными функциями. В частности, функцию $W(t)$ считают стационарной случайной функцией, а $R(t)$ — нестационарной случайной функцией с монотонно убывающим математическим ожиданием, т. е. $R(t) = R_0 e^{-kt}$, где e^{-kt} — функция «усталости» материала.

Большинство процессов, протекающих в исходных материалах, удовлетворяют принятому условию, например: зависимости диффузии от температуры $D(T^0) = D_0 \exp \{-E/R_1 T\}$,

где T^0 — абсолютная температура; D_0 — коэффициент формы; E — энергия активации; R_1 — газовая постоянная; скорость распада твердых растворов в материалах

$$\frac{N_1 - N_2}{N_3 - N_2} = \exp \{at\},$$

где N_1 — концентрация частиц в растворе; N_2, N_3 — концентрация примесей; a — коэффициент формы;

время разрушения твердых материалов

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{E_0 - \gamma \delta_p}{R_1 T} \right\},$$

где E_0 — энергия активации процесса разрушения; γ — постоянная, близкая к периоду колебаний атомов; δ_p — действующее напряжение;

изменение напряжения срабатывания реле

$$U_{ср} = U_{ср0} \exp \{-a_1 t^{b_1}\},$$

где $U_{ср0}$ — начальное значение напряжения срабатывания; a_1, b_1 — постоянные, характеризующие условия работы реле.

В табл. 6 приведено решение основного уравнения модели «нагрузка — несущая способность» для пяти сочетаний законов распределения нагрузки (W) и несущей способности (R) изделия. Вероятность отказа $q(t)$ и средняя наработка на отказ $t_{ср}$, как следует из таблицы, в значительной степени зависит от коэффициента нагрузки $\eta(t)$ и коэффициентов вариации нагрузки $A_W(t)$ и несущей способности $A_R(t)$. Существенное повышение надежности наблюдается при увеличении η от 1 до 4, а при малых значениях A_R и A_W (от 0 до 0,01) в интервале $4 < \eta < 7$. Изменение коэффициентов вариации A_R и A_W в пределах от 0 до 0,01 практически не влияет на q во всем диапазоне изменения коэффициента η . С увеличением коэффициентов вариации A_R и A_W возрастает вероятность отказа. Наиболее

6. Математические модели для оценки надежности

Закон распределения		Плотность вероятности		Вероятность отказа	Средняя наработка на отказ
R	W	$f(r)$	$f(w)$	$q = q(t, \eta, A_R, A_W)$	t_{cp} при $\varphi(t) = e^{-kt}$
Нормальный	Нормальный	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(r-m_R)^2}{2\sigma_R^2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_W} e^{-\frac{(w-m_W)^2}{2\sigma_W^2}}$	$\frac{1}{2} - \Phi\left[\frac{\eta(t) - 1}{\sqrt{A_R^2\eta^2(t) + A_W^2}}\right]$	$\frac{1}{2\pi k} \int_0^\infty e^{-\frac{r-1/A_R}{2}} dr \times$ $\times \int_0^\infty \ln \frac{A_R\eta r}{A_W w} e^{-\frac{w-1/A_W}{2}} dw$
Рэля	Рэля	$\frac{r}{\mu^2} e^{-r^2/2\mu^2}$ $m_R = 1,253\mu;$ $\sigma_R = 0,655\mu; A_R = 0,52$	$\frac{w}{c^2} e^{-w^2/2c^2};$ $m_W = 1,253c;$ $\sigma_W = 0,655c;$ $A_W = 0,52$	$\frac{1}{\eta^2(t) + 1}$	$\frac{1}{2k} \ln(\eta^2 + 1)$
Показательный	Показательный	$\lambda e^{-\lambda r};$ $m_R = \sigma_R = \frac{1}{\lambda}$	$l e^{-lw};$ $m_W = \sigma_W = \frac{1}{l}$	$\frac{1}{\eta(t) + 1}$	$\frac{1}{k} \ln(\eta^2 + 1)$

Продолжение табл. 6

Закон распределения		Плотность вероятности		Вероятность отказа	Средняя наработка на отказ
R	W	$f(r)$	$f(w)$	$q = q(t, \eta, A_R, A_W)$	t_{cp} при $\varphi(t) = e^{-kt}$
Нормальный	Рэля	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} e^{-\frac{(r-m_R)^2}{2\sigma_R^2}}$	$\frac{w}{c^2} e^{-w^2/2c^2};$ $m_W = 1,253c;$ $\sigma_W = 0,655c;$ $A_W = 0,52$	$\frac{1}{\sqrt{M}} e^{-1,253\eta^2(t) 2M} \times$ $\times \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{1}{A_R \sqrt{M}}\right) \right];$ $M = 1 + [1,253\eta(t) A_R]^2$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}k} \int_0^\infty e^{-\left(r-\frac{1}{A_R}\right)^2/2} \times$ $\times \ln(0,626 A_R \eta r) dr +$ $+ \frac{c}{k} \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{1}{A_R}\right) \right]$
Показательный	Нормальный	$\lambda e^{-\lambda r};$ $m_R = \sigma_R = \frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_W} e^{-\frac{(w-m_W)^2}{2\sigma_W^2}}$	$1 - \exp\left\{ \frac{A_W^2 - 2\eta(t)}{2\eta^2(t)} \right\} \times$ $\times \left[\frac{1}{2} - \right.$ $\left. - \Phi\left(\frac{A_W - \eta(t)}{A_W \eta(t)}\right) \right]$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}k} \times$ $\times \int_0^\infty \exp\left\{ -\frac{(w-1/A_W)^2}{2} \right\} \times$ $\times \ln \frac{1}{A_W \eta w} dw -$ $- \frac{c}{k} \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{1}{A_W}\right) \right]$

Обозначения: $m_R(t)$, $m_W(t)$ — математическое ожидание несущей способности и нагрузки; $\sigma_R(t)$, $\sigma_W(t)$ — средние, квадратические отклонения несущей способности и нагрузки; $A_R(t) = \frac{\sigma_R(t)}{m_R(t)}$, $A_W(t) = \frac{\sigma_W(t)}{m_W(t)}$ — коэффициенты вариации; $\eta(t) = \frac{m_R(t)}{m_W(t)}$ — коэффициент запаса прочности.

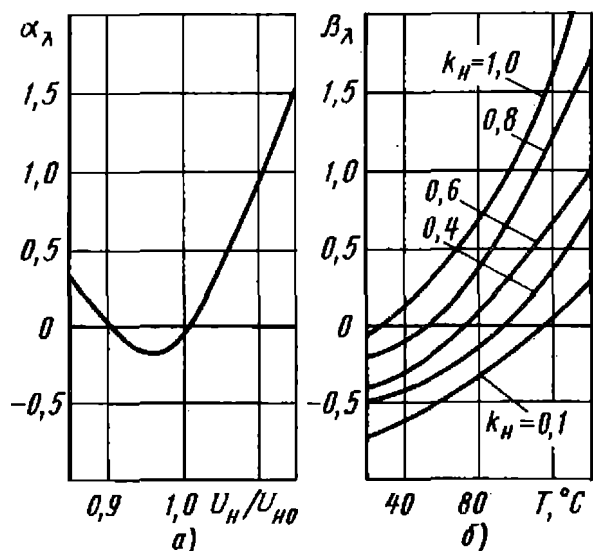


Рис. 6. Зависимость интенсивности отказов, радиоламп от электрического напряжения (а) и температуры (б)

заметно влияет на надежность изделий изменение коэффициентов вариации в пределах 0,01—0,2 в диапазоне малых значений коэффициента запаса прочности η (менее 1,5), а при коэффициентах 0,2—0,5 — при всех значениях коэффициента запаса.

При решении уравнения $q = q(\eta, A_R, A_W)$ на ЭВМ при малых значениях η рекомендуется интервал по A_R и A_W выбирать:

не более 0,01 в диапазоне A_R , A_W от 0,01 до 0,1;

не более 0,025 в диапазоне A_R , A_W от 0,1 до 0,2.

При $\eta = 1,5$ интервалы значений по A_R и A_W можно увеличивать.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Твердые материалы. Экспериментальными исследованиями установлено, что зависимость среднего времени до разрыва t от растягивающего напряжения σ и температуры T многих твердых тел (чистые сплавы, полимеры и др.) описывается формулой Журкова [9]

$$t(\sigma, T) = \tau \exp \left\{ \frac{U - \gamma \sigma}{KT} \right\},$$

где τ , U , σ — коэффициенты, определяющие свойства материалов; K — постоянная Больцмана.

При циклическом нагружении с амплитудой σ обычно применяют урав-

нение Одинга—Вейбулла

$$t(\sigma) = b(\sigma - \sigma_{-1})^m$$

или уравнение Муратова

$$\frac{t(\sigma_2)}{t(\sigma_1)} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_{-1})(\sigma_T - \sigma_2)}{(\sigma_T - \sigma_1)(\sigma_2 - \sigma_{-1})},$$

где σ_{-1} — предел выносливости; σ_T — предел текучести при растяжении; b и m — коэффициенты, постоянные для данного материала.

Изоляционные материалы. Для изоляционных материалов основной характеристикой является пробивное напряжение, зависимость которого от температуры имеет вид

$$U(\theta) = U(\theta_0) e^{\alpha(T - T_0)}.$$

Установлено, что повышение температуры T на каждые 10°C сокращает срок службы t изоляционных материалов на 50%, а уменьшение T на 15°C удваивает t . В этом случае

$$\frac{t(T)}{t(T_0)} = 2^{\frac{T - T_0}{20^\circ\text{C}}}$$

Электровakuумные приборы. Зависимость интенсивности отказов λ от компонентов режима ε имеет вид

$$\frac{\lambda(\varepsilon)}{\lambda(\varepsilon_0)} = 1 + \alpha_\lambda \left(\frac{U'_H}{U_H^0} \right) + \beta_\lambda(T, k_H),$$

где ε_0 соответствует номинальному режиму; ε — измененному режиму; α_λ , β_λ определяются напряжением накала U_H , окружающей температурой T , отношением k_H фактически рассеиваемой прибором мощности и номинальной

$$k_H = \frac{w_H + w_a + w_c}{w_{H0} + w_{a0}},$$

где w_H , w_a , w_c — мощности, рассеиваемые соответственно в цепях накала, на аноде и на сетке; w_{H0} — номинальная мощность в цепи накала; w_{a0} — максимально допустимая мощность на аноде.

Зависимости коэффициентов α_λ и β_λ от температуры $^\circ\text{C}$, напряжения накала и от коэффициента нагрузки приведены на рис. 6.

7. Значения коэффициентов k_{T_0} и k_g для стабилитронов и тиратронов

Тип прибора	$k_{T_0} \cdot 10^4, 1/(^\circ\text{C})$	$k_g \cdot 10^4, 1/(^\circ\text{C} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2)$
ТГ1Б-В	0,02	0
ТХ5Б	0,03	1,2
ТХ4Б	0,24	8,7
ТХ3Б	0,09	—
МТХ90	0,92	—
СТ16П	0,07	10,5

стабилитронов

Тиратроны и стабилитроны. Для этих приборов получены следующие зависимости интенсивности отказов λ от температуры окружающей среды T_p и амплитуды ускорения g [2]:

$$\lambda(T_p) = \lambda_0 + k_{T_0}(T_p - 20^\circ\text{C});$$

$$\lambda(g) = \lambda_0 + k_g g.$$

Значения коэффициентов k_{T_0} и k_g для газонаполненных приборов различных типов приведены в табл. 7.

Лампы бегущей волны (ЛБВ) — малопомнящие непакетированные десятисантиметрового диапазона. Зависимость среднего срока службы ЛБВ от входной высокочастотной мощности P имеет вид

$$t(P) = A e^{-\alpha \sqrt{P}};$$

$$\frac{t(P_1)}{t(P_2)} = \exp \{ \alpha (\sqrt{P_2} - \sqrt{P_1}) \},$$

где $A = 700$; $\alpha = 0,74$.

Срок службы ЛБВ связан с напряжением накала U_H зависимостями:

$$t(U_H) = C \cdot 10^{-\alpha (U_H)};$$

$$\frac{t(U_{H1}^2)}{t(U_{H2}^2)} = 10^{-\alpha (U_{H2} - U_{H1})}.$$

Отражательные клистроны. Зависимость срока службы клистронов трехсантиметрового диапазона от напряжения накала имеет вид (рис. 7)

$$t(U_H) = 10^{\frac{2,2}{\sqrt{U_H - 2}}}.$$

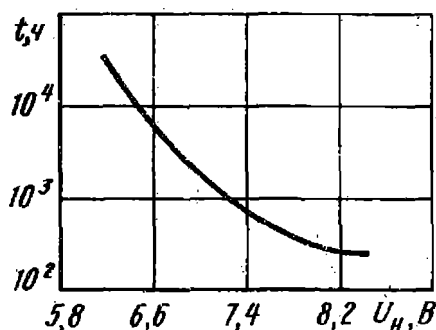


Рис. 7. Зависимость среднего срока службы клистронов от напряжения накала

Резонансные разрядники. Зависимость срока службы от температуры θ (рис. 8) имеет вид

$$t = -A + \frac{B}{T + C}.$$

Полупроводниковые диоды СВЧ. Зависимость срока службы от мощности СВЧ импульсов P имеет вид

$$t(P) = A \cdot 10^{-\alpha \sqrt{P}},$$

где $A = 2,8 \cdot 10^5$; $\alpha = 2,56$

Полупроводниковые приборы. Зависимость срока службы полупроводнико-

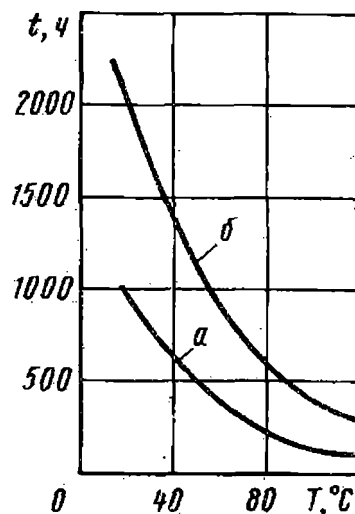


Рис. 8. Зависимость срока службы узкополосных (а) и широкополосных (б) резонансных разрядников от температуры окружающей среды

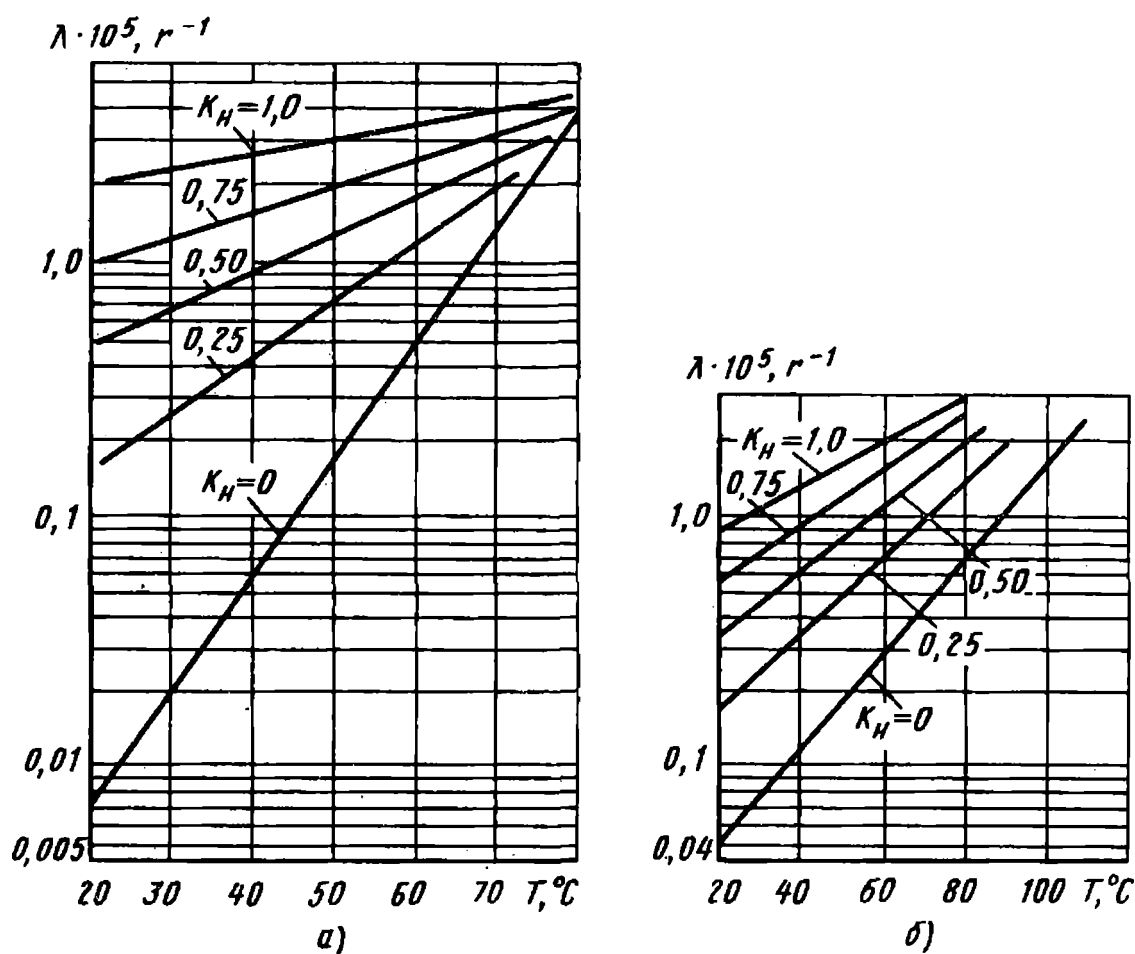


Рис. 9. Зависимость интенсивности отказов германиевых (а) и кремниевых (б) транзисторов от нагрузки и температуры

вых диодов и триодов от напряжения U , токов I и температуры T :

$$\frac{t(U_{px}, I_{px}, U_{px}T_1)}{t(U_{po}, I_{po}, U_{po}T_0)} = \exp \{ -\alpha [(T_1 - T_0) + R(U_{px}I_{px}k_1 + U_{ox}I_{ox}k_2) - R(U_{po}I_{po}k_{10})] - \gamma(U_{ox} - U_{00}) \},$$

где $U_{px}, I_{px}, U_{po}, I_{po}$ и $U_{ox}, I_{ox}, U_{00}, I_{00}$ — напряжение и ток соответственно в рабочем (со знаком х) и нерабочем (со знаком 0) состояниях; α — коэффициент, принимающий значения $(0,025-0,03)/1^\circ C$ для германиевых диодов и триодов и $(0,01)/1^\circ C$ для кремниевых; γ — коэффициент, равный $\frac{1,25}{U_0}$ и $\frac{0,008}{U_0}$ соответственно для германиевых и кремниевых диодов и триодов; R — тепловое сопротивление; k_1 и

k_{10} характеризуют относительное время работы; $k_2 = 1 - k_1$, $k_{20} = 1 - k_{10}$. При непрерывном режиме работы приборов $k_1 = 1$, $k_2 = 0$.

На рис. 9 показано изменение интенсивности отказов транзисторов от температуры T и коэффициента нагрузки K_H , представляющего собой отношение рассеиваемой мощности к номинальной. Эти кривые допускают аппроксимацию

$$\lambda(T) = \lambda(T_0) \exp \left\{ B \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\},$$

где $T_0 = 233^\circ C$; значения коэффициентов B , $\lambda_0 = \lambda(T_0)$, определяемые нагрузкой, указаны в табл. 8.

Для оценки интенсивности отказов транзисторов можно воспользоваться следующей физической моделью:

$$\lambda = \lambda_0 \exp \{ \alpha [(T_p - T_0) + R_{T\Sigma} [U_p I_p k_1 + U_t I_0 k_2 -$$

8. Значения коэффициентов B и λ_0 при различных нагрузках

Коэффици- енты	K_H				
	1	0,75	0,5	0,25	0
<i>Для германиевых транзисторов</i>					
B	1500	2930	4330	6360	13 300
$\lambda_0 \cdot 10^5$	2	1	0,5	0,15	0,001
<i>Для кремниевых транзисторов</i>					
B	3100	3200	4000	4670	6020
$\lambda_0 \cdot 10^5$	0,9	0,56	0,34	0,18	0,05

$$-(U_{p0}I_{p0}k_{10} + U_{c0}I_{c0}k_{20})) + \\ + \gamma (U_0 - U_{00});$$

$$k_{p1} = A_1 \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{1}{T_p + \alpha_1 \left(\frac{P_c}{P_{c \max}} \right) + 273} \right\}^{k_3};$$

$$k_{p2} = A_2 \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{1}{T_p + \alpha_2 \left(\frac{I_0}{I_{0 \max}} \right) + 273} \right\}^{k_4},$$

где α коэффициент: для германиевых приборов $\alpha = 0,025 + 0,03 \text{ } 1/^\circ\text{C}$; для кремниевых — $\alpha = 0,011 \text{ } 1/^\circ\text{C}$; γ — коэффициент: для германиевых приборов $\gamma = 1,25/U_0$, для кремниевых — $0,008/U_0$; $R_{T\Sigma}$ — тепловое сопротивление; U_p, I_p — напряжение и ток в рабочем режиме; U_0, I_0 — напряжение и ток в нерабочем режиме; $P_c, P_{c \max}$ — рассеиваемые мощности; A_1, A_2 — коэффициенты формы, зависящие от вида материала, из которого изготовлены полупроводниковые приборы: для германиевых маломощных приборов $\frac{A}{B} = \frac{86594,1}{-4150,7}$; для кремниевых

слаботочных приборов $\frac{A}{B} = \frac{95495,8}{-4823,4}$; k_3, k_4 — коэффициенты, характеризующие относительное время работы полупроводникового прибора.

Резисторы. В результате экспериментальных исследований получена сле-

дующая зависимость срока службы t от рассеиваемой мощности P :

$$t = (P_1)/t(P_0) = (P_1/P_0)^\gamma,$$

где γ — числовой коэффициент, численно равный (0,5 — 1).

При непрерывной работе непровольных резисторов используют формулу

$$\frac{t(P_1, T_1)}{t(P_0, T_0)} = \\ = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^\gamma [1 + k \sqrt{R P_1 (z_1 - z_0)}] \times$$

$$\times \exp \{ \alpha [(T_1 - T_0) + R_{T1} P_1 - R_{T0} P_0] \},$$

где R — сопротивление резистора; z — влажность; R_T — тепловое сопротивление для отвода тепла в окружающую среду.

Зависимости интенсивности отказов резисторов от температуры T окружающей среды и коэффициента нагрузки K_H приведены на рис. 10. Коэффициент нагрузки резисторов $K_H = P_p/P_0$, где P_p — мощность, рассеиваемая резистором; P_0 — номинальная мощность.

Интенсивность отказов λ резисторов при нагрузке P и температуре окружающей среды, отличных от номинальных P_0 и T_0 , рекомендуется рассчитывать по следующей эмпирической формуле:

$$\frac{\lambda(P_1, T_1)}{\lambda(P_0, T_0)} = \\ = \exp \left\{ \frac{B [T_1 - T_0 + R_T (P_1 - P_0)]}{(273 + T_1 + R_T P_1) \times (273 + T_0 + R_T P_0)} \right\},$$

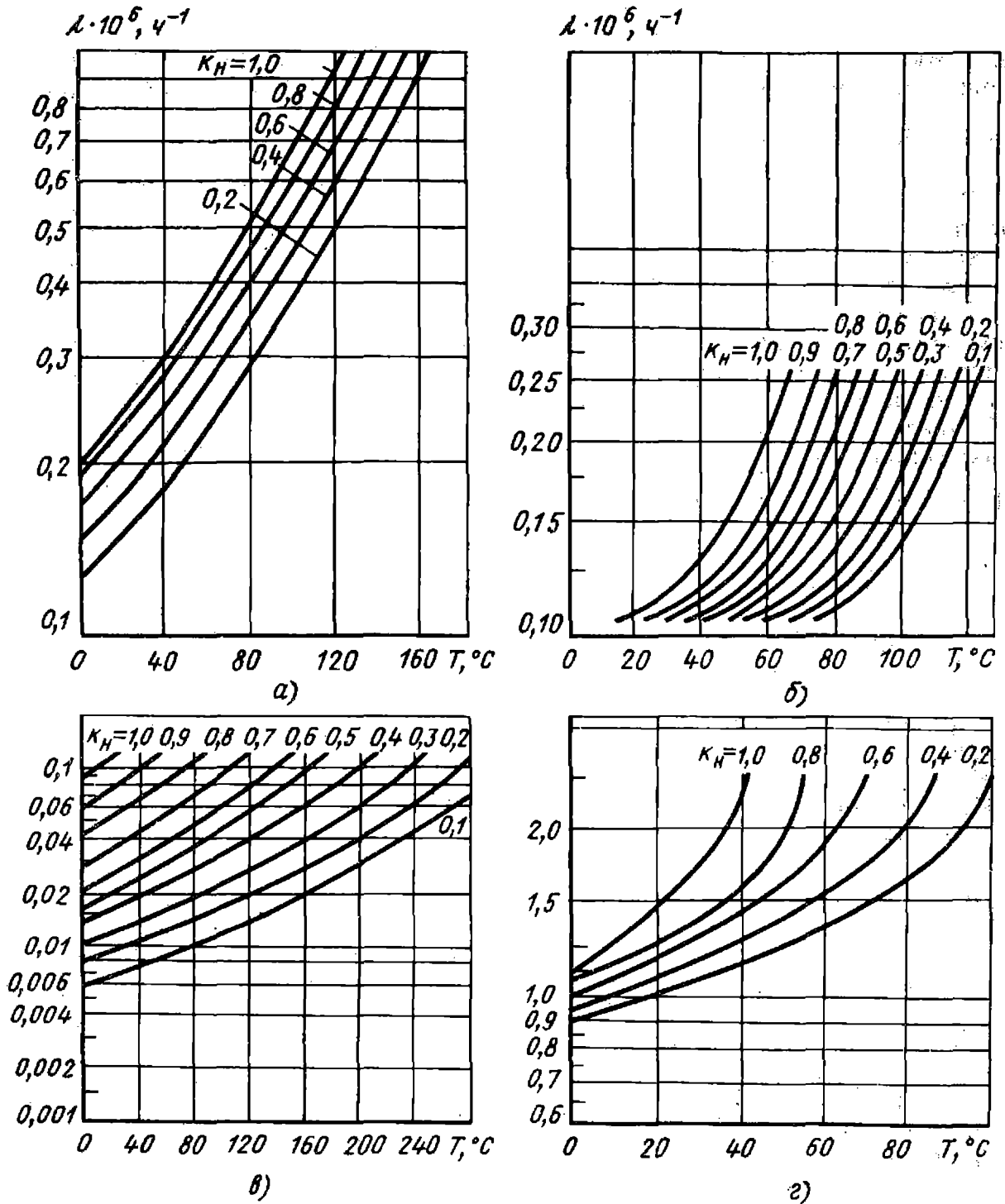


Рис. 10. Зависимость интенсивности отказов от температуры при различных коэффициентах электрической нагрузки для резисторов:

а — постоянных; б — переменных композиционных; в — мощных проволочных; г — переменных проволочных

где T_1 — максимально допустимая температура окружающей среды; B — коэффициент, зависящий от типа сопротивления; R_T — тепловое сопротивление.

На основе аппроксимации кривых $\lambda = f(K)$, приведенных на рис. 10, предложена более простая формула, описывающая зависимость λ от коэф-

фициента нагрузки резистора:

$$\lambda(K_H) = C_1 K_H [1 + (C_2 K_H)^2] C_3 K_H.$$

Параметры C_1 , C_2 и C_3 определяются типом резистора. Формула проверена экспериментально для резисторов МЛТ и ВС.

Параметрическая модель постепенных отказов тонкослойных металлопленочных резисторов — срок службы

$$t = (0,0025 \cdot 2d + 0,095d \sqrt{B} - 0,0975B)/A,$$

где d — толщина резистивного элемента; B — постоянная, зависящая от выбора начальной точки отсчета; A — постоянная, зависящая от температуры, пропорциональная коэффициенту диффузии металла через окисную пленку.

Интенсивность постепенных отказов тонкослойных резисторов [16]:

$$\lambda(T) = \lambda_0(T) \exp\{\alpha(T + R_T P)\};$$

$$\lambda_0(T) = \frac{A\gamma}{\sigma \sqrt{2\pi}} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{(d - h_0 - h_{кр} - \bar{h}_{кр})^2}{2\sigma^2}\right\} T^{\gamma-1},$$

где $h_{кр}$ и σ — параметры нормального закона распределения; γ — числовой коэффициент (0,5—1).

Конденсаторы. Теоретические и экспериментальные исследования приводят к степенной зависимости срока службы t конденсаторов от прикладываемого напряжения U :

$$\frac{t(U_1)}{t(U_0)} = \left(\frac{U_1}{U_0}\right)^n$$

Значения показателя степени n определяются типом конденсатора. Для низковольтных конденсаторов с диэлектриком из керамики, не содержащей титана, $n = 3$ при $T = 20^\circ\text{C}$ и, если керамика содержит титан, $n = 9$ при $T = 85^\circ\text{C}$.

Для бумажных конденсаторов $n = 4 \div 6$.

Влияние окружающей температуры T на срок службы конденсаторов описывается «законом десяти градусов»;

$$\frac{t(T_1)}{t(T_0)} = 2^{\frac{T_1 - T_0}{10}}$$

На рис. 11 изображены зависимости интенсивности отказов на 1000 ч работы различных конденсаторов от температуры и коэффициента нагрузки $K_H = U_p/U_H$, где U_p — рабочее на-

пряжение, приложенное к конденсатору; U_H — номинальное напряжение.

Аппроксимация кривых (рис. 11) позволяет записать

$$\lambda(T) = \lambda_{a1} \exp\left\{-\frac{1100(T_0 - T)}{T + T_0}\right\} + \lambda_{a2} \exp\left\{-\frac{9800(T_0 - T)}{T_0 + T}\right\},$$

где $T_0 = 293^\circ\text{C}$. Значения коэффициентов λ_{a1} и λ_{a2} приведены в табл. 9.

Реле. Экспериментально установлена следующая зависимость между сроком службы и напряжением питания реле U_H :

$$\frac{t(U)}{t(U_0)} = k_H = \exp\left\{\beta_U \left(\frac{U}{U_H} - 1\right)\right\}.$$

На рис. 12 показана зависимость вероятности безотказной работы реле типа РЭС-9 от числа срабатываний N при различных напряжениях питания. Влияние температуры окружающей среды T на надежность реле имеет вид

$$\frac{t(T)}{t(T_0)} = \exp\{\beta_T(T - T_0)\} = k_T.$$

На рис. 13 приведены зависимости коэффициентов k_H и k_T от напряжения питания обмотки реле U и от температуры окружающей среды.

Зависимость интенсивности отказов реле от плотности тока и числа срабатываний N_K имеет вид

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda_K \eta_K N_K,$$

где λ_0 — интенсивность отказов реле в номинальном режиме; $\Delta\lambda_K$ — дополнительная доля интенсивности отказов одной пары контактов, зависящая от числа срабатываний в час и от предельного числа срабатываний; η_K — коэффициент, учитывающий плотность тока контакта.

Провода и кабели. Для радиочастотных кабелей зависимость срока службы от температуры носит экспоненциальный характер:

$$\ln t = \frac{A}{T_0} + B,$$

где T — абсолютная температура; A и B — коэффициенты, определяемые материалами конструкции кабеля.

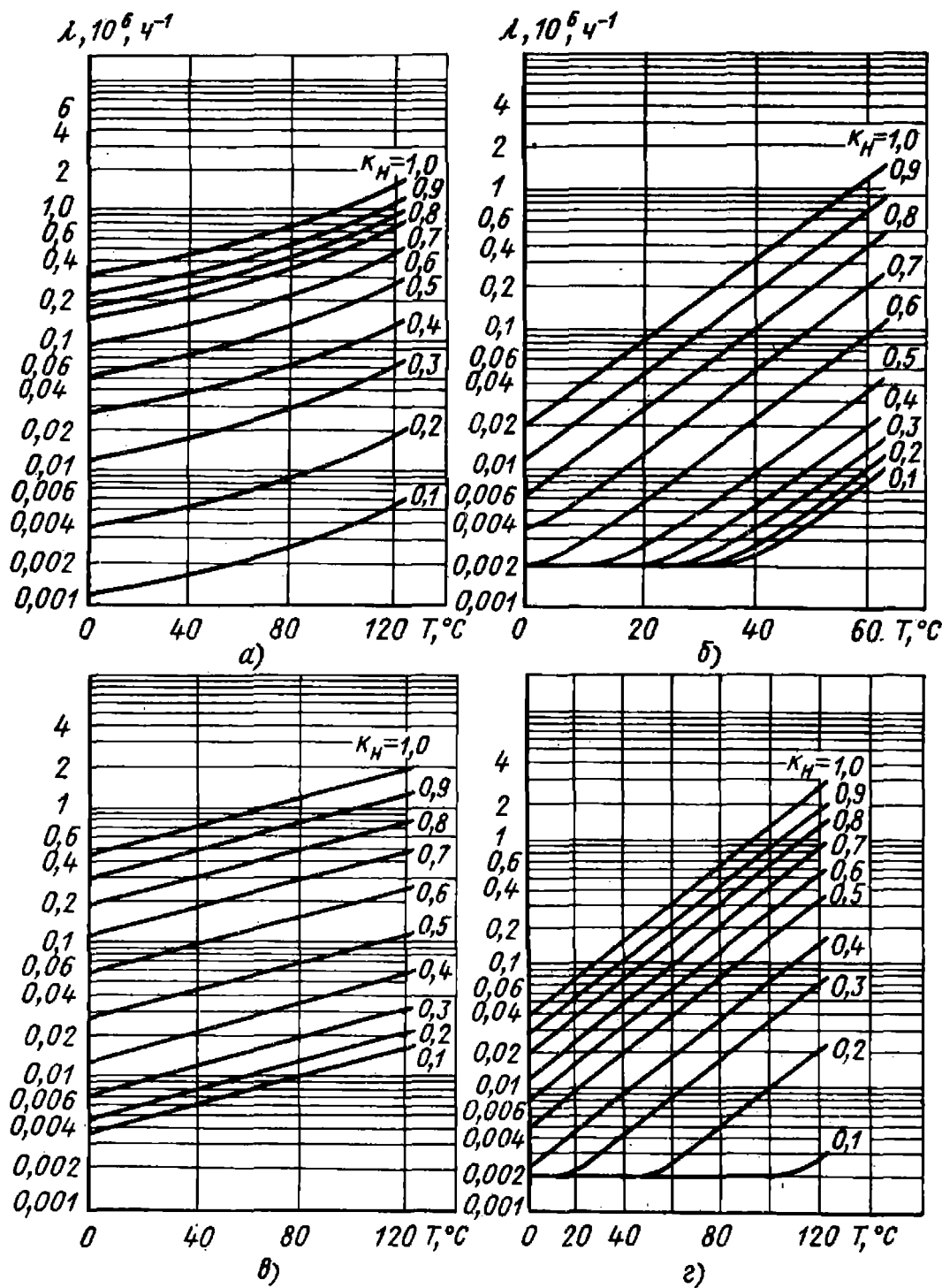


Рис. 11. Зависимость интенсивности отказов от температуры для конденсаторов при различных коэффициентах электрической нагрузки:
а — алюминиевые; б — полистирольные; в — слюдяные опрессованные; г — керамические для термокомпенсации

Это уравнение сходно с уравнением Аррениуса:

$$t(T) = t(T_0) \exp \left\{ \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\},$$

где R — универсальная газовая постоянная; E — энергия активации.

Вычисленные по результатам эксперимента значения параметров A , B и E приведены в табл. 10.

Зависимость срока службы монтажных проводов от температуры приведена на рис. 14.

9. Значения коэффициентов λ_{a1} и λ_{a2} при различных нагрузках K_H

K_H	$10^3 \lambda_{a1}$	$10^3 \lambda_{a2}$	K_H	$10^3 \lambda_{a1}$	$10^3 \lambda_{a2}$
1	0,53	0,6	0,4	0,04	0,08
0,9	0,4	0,5	0,3	0,03	0,05
0,8	0,25	0,3	0,2	0,02	0,02
0,7	0,15	0,2	0,10	0,015	0,015
0,6	0,1	0,15	0	0,01	0,01
0,5	0,08	0,1			

10. Значения коэффициентов A , B , E

Марка кабеля	Контролируемый параметр	A	B	E , Дж/(моль · К)
РК-50-2-11	Затухание	10 082	—18,96	20 030
РК-50-2-11	Холодоустойчивость	10 990	—20,67	21 835
РК-50-2-13	Затухание	10 200	—22,62	20 110
РК-50-2-13	Холодоустойчивость	12 516	—25,86	24 870
РК-75-3-11	Затухание	5 480	—6,50	10 890
РК-50-7-21	»	6 086	—3,72	12 090
РК-75-9-12	»	11 200	—23,53	22 250
РК-75-9-12	Холодоустойчивость	6 715	—10,9	13 340

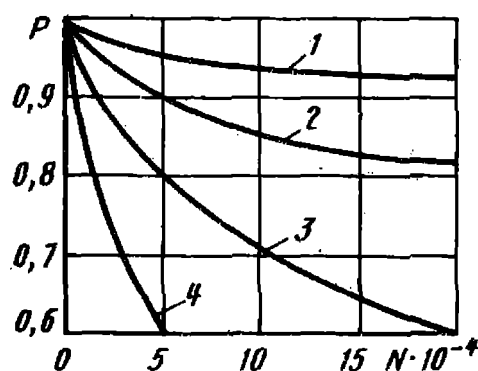


Рис. 12. Зависимость вероятности безотказной работы P реле типа РЭС-9 от числа срабатываний, N при напряжениях питания, превышающих номинальное U_N :

1 — $1,5 U_N$; 2 — $2 U_N$; 3 — $2,5 U_N$; 4 — $3 U_N$

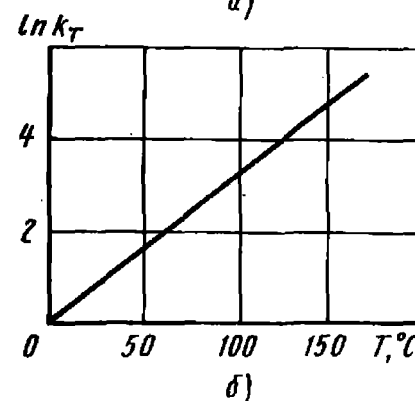
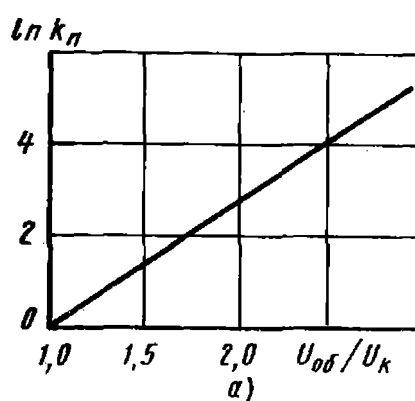


Рис. 13. Зависимости коэффициента k_n от напряжения питания обмотки реле типа РЭС-9 (а) и коэффициента k_T от температуры окружающей среды (б)

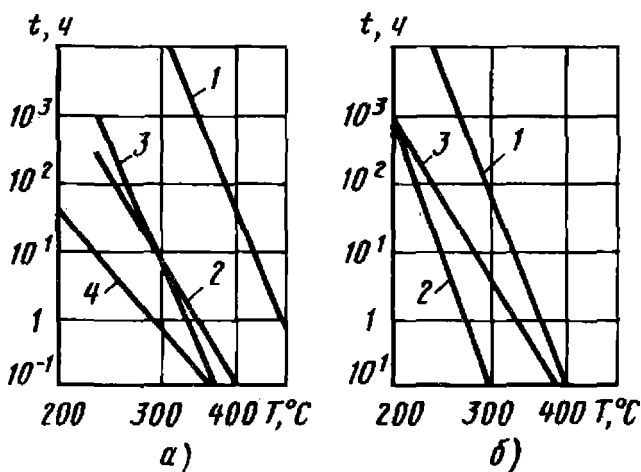


Рис. 14. Зависимость среднего срока службы монтажных проводов от температуры:

а — с разными типами изоляции: 1 — фторопласт; 2 — фторизованный этилен-пропилен; 3 — кремнийорганическая резина; 4 — фторопласт-3; б — с одновременным приложением механической нагрузки: 1 — провода с изоляцией из фторопласта-4; 2 — провода с изоляцией из фторированного этилен-пропилена; 3 — провода с изоляцией из органической резины

Интегральные схемы (ИС). Более полную оценку возможностей и трудностей применения приведенных физико-математических моделей можно получить при рассмотрении методологии определения показателей надежности сложных комплектующих изделий, например, интегральных схем, составляющих основу современной радиоэлектронной аппаратуры.

Физико-математическую модель надежности изделий составляют в два этапа. На первом этапе сложное изделие разделяют на простейшие компоненты. Для каждой компоненты составляют физическую модель надежности. На втором этапе, учитывая особенности

функционирования компонентов в изделии, составляют физико-математическую модель надежности изделия в целом.

При анализе надежности интегральных схем металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) разделяют их на следующие простейшие компоненты надежности (см. табл. 11).

Исходя из физики отказов каждой компоненты ИС, составляют модель отказов.

Рассмотрим методологию составления модели надежности для компоненты «окисел» (см. табл. 11).

Среднее время наработки на отказ тонкого окисла непосредственно связано с его площадью и уменьшается при ее увеличении (возрастает вероятность появления дефектов, приводящих к отказу). На процесс развития отказа тонкого окисла оказывают существенное влияние напряжение, температура и влажность. С учетом этих трех факторов модель для определения времени работы до отказа тонкого окисла имеет вид

$$\bar{\tau}_2' = \frac{L_{\text{нач}}^2}{D} \left\{ \frac{\Phi - b\sqrt{U}}{T} + \ln \left[\frac{U^2 R_T A S}{(T - T_0) L_{\text{нач}}} \right] \right\},$$

где $L_{\text{нач}}$ — начальная длина микроканала; D — коэффициент диффузии; Φ — высота потенциального барьера; b — постоянная величина; U — приложенное напряжение; T — температура кристалла; R_T — тепловое сопротивление; A — коэффициент; S — площадь поперечного сечения канала; T_0 — температура окружающей среды.

Известна несколько иная модель для определения времени работы до отказа диэлектрика:

$$\bar{\tau}_2'' = \frac{D}{v^2} \left[k_1 + \sqrt{\ln \frac{U_m^2 \frac{\theta N_0}{L} \sqrt{Dt}}{M(L - vt - 2c\sqrt{Dt} - U_{g0})}} \right],$$

где v — скорость диффузии ионов в учетном влиянии электрического поля; k_1 , θ , M , c — коэффициенты; U_m — максимальное напряжение, приложенное к окислу; N_0 — концентрация ио-

нов металла; t — время диффузии; L — длина микроканала; g_0 — первоначальная проводимость микроканала.

11. Структурные компоненты ненадежности ИС

Компоненты надежности	Доля отказов в суммарном числе отказов ИС	Основные причины отказов
p—n-переход (диффузионная область, активный элемент) ИС	10—25% отказов ИС, $\bar{\lambda} = 0,12 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$	Пробой p—n-перехода. Короткое замыкание. Микроплазма в работающем приборе. Инверсионные токи
Совокупность участков кристалла ИС, находящихся под разными потенциалами («поверхность»)	5—25% отказов ИС, $\bar{\lambda} = 0,206 \cdot 10^{-10} \text{ ч}^{-1}$	Токи утечки. Обрыв кристалла от ножки. Обрыв (расслоение) контактирующих поверхностей
Совокупность всех участков окисла на кристалле ИС («окисел»)	3—35% отказов ИС, $\bar{\lambda} = 0,95 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$	Пробой слоя окисла. Снижение диэлектрической прочности окисла. Короткое замыкание металлизации с подложкой
Пассивный (R, C, L) элемент ИС	3—5% отказов ИС, $\bar{\lambda} = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$	Трещины в кристалле (подложке). Проколы в изолирующем слое. Неравномерность толщины слоя диэлектрика конденсатора и др.
Металлизация — совокупность всех участков внутрисхемной металлизированной разводки ИС	10—15% отказов ИС, $\bar{\lambda} = 0,765 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$	Механические дефекты. Трещины. Плохая адгезия. Перегрев. Загрязнение. Коррозия
Контактное соединение — сварные или паяные проволочные контакты на кристалле и внутри корпуса ИС	10—30% отказов ИС, $\bar{\lambda} = 0,13 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$	Некачественная сварка. Сильное натяжение проводника. Плохая совместимость материалов. Коррозия. Эффект Киркендалла. Перегрев в местах сварки, электролиз
Корпус — элемент защиты от внешних воздействий	2—5% отказов ИС, $\bar{\lambda} = 0,11 \cdot 10^{-10} \text{ ч}^{-1}$	Плохая герметизация. Большие внутренние напряжения в герметизирующем покрытии корпуса ИС и др.

Для определения коэффициентов, приведенных в формулах для τ'_2 и τ''_2 , уравнение для τ'_2 представим в виде

$$\bar{\tau}'_2 = -B \ln \frac{G}{C},$$

где $B = \frac{L_{нач}^2}{2};$

$$C = \frac{T - T_0}{U^2 R_T} \exp \frac{\Phi - b \sqrt{U}}{T};$$

$$G = \frac{AS}{L_{нач}}.$$

Если учесть зависимость коэффициента диффузии D и теплового сопротивления вещества в микроканале

12. Значения коэффициента безотказности k_6

Характер нагрузки на подшипник	Коэффициент k_6
Спокойная нагрузка, толчок отсутствует	1
Легкие толчки, кратковременные нагрузки до 125 % от расчетной	1,2
Умеренные толчки, вибрация, кратковременная нагрузка до 150 %	1,3—1,8
Значительные толчки и вибрация, перегрузки до 200 %	1,8—2,5
Сильные удары, кратковременная перегрузка до 300 %	2,5—3,0

R_T от температуры, то

$$B = \frac{L_{\text{нач}}}{D} \exp \frac{W}{k} \left(\frac{1}{T + \Delta T} - \frac{1}{300} \right);$$

$$C = \frac{T}{U^2 R} \exp \frac{\Phi - b \sqrt{U}}{T + \Delta T},$$

где ΔT — разность температур в микроканале и окружающей среде;

$$\Delta T = \frac{T_0}{2} \left[\left(\frac{\Phi - b \sqrt{U}}{T_0} - 2 \right) - \sqrt{\left(\frac{\Phi - b \sqrt{U}}{T_0} \right)^2 - L \left(\frac{\Phi - b \sqrt{U}}{T_0} \right)} \right];$$

W — энергия активации процесса проводимости микроканала; k — постоянная Больцмана;

$$b = q / k \sqrt{\frac{q}{2\pi\epsilon_i\epsilon_0}};$$

q — заряд электрона; ϵ_i , ϵ_0 — относительная (диэлектрика) и абсолютная диэлектрическая проницаемость соответственно.

Величины D и V связаны с параметрами микроканала соотношениями:

$$D = \frac{kT}{q} \mu_0 \exp \left(-\frac{\Phi_0 - \Phi_1}{kT} \right);$$

$$V = \mu_0 E_{\text{эф}} \exp \left\{ -\frac{\Phi_0}{kT} \right\},$$

где μ_0 — подвижность ионов, дрейфующих в окисле; Φ_0 — высота барьера потенциального рельефа кристаллической решетки; Φ_1 — энергия дефектообразования; $E_{\text{эф}}$ — эффективная на-

пряженность электрического поля в окисле,

$$\mu_0 = \delta v_0 \left(g + \frac{g^2}{\delta} E_{\text{эф}}^2 \right);$$

здесь δ — длина свободного дрейфа иона (для SiO_2 $\delta = 2$); v_0 — частота подхода частицы к границе потенциального барьера (различна для каждого микроканала и определяет время до отказа окисла);

$$g = \frac{\sigma q}{2kT};$$

$$k_1 = \frac{U(g_0 - g_M)}{L - \Delta x};$$

здесь g_0 — объемная проводимость окисла; g_M — проводимость микроканала; $\Delta x = vt + 2c\sqrt{Dt}$ — величина, на которую уменьшается длина микроканала за время эксплуатации вследствие диффузии продуктов реакции в окисел.

Модели надежности для других компонентов МДП ИС приведены в работе [17].

Быстроизнашивающиеся комплектующие изделия. К быстроизнашивающимся комплектующим изделиям относятся подшипники, узлы уплотнения, элементы скольжения и другие изделия. В качестве основных показателей надежности указанных изделий применяются показатели долговечности — различные виды ресурса.

Ниже рассмотрены особенности определения долговечности подшипников качения.

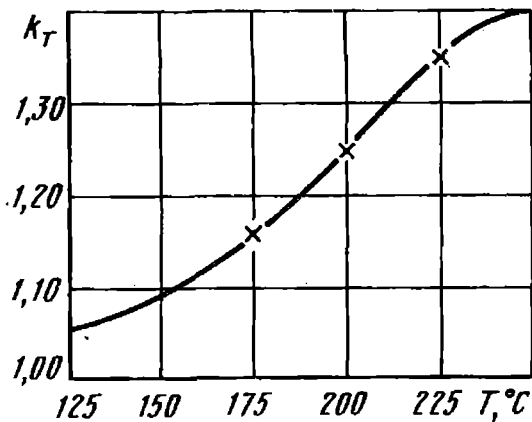


Рис. 15. Значения температурного коэффициента k_T в зависимости от температуры шарикоподшипника

Шарикоподшипники. Показатели долговечности шарикоподшипников определяются из условия усталостной прочности (при контактных напряжениях от 2000 до 4500 МПа). Критерием для расчета долговечности подшипника является его базовая динамическая грузоподъемность (C). Динамической грузоподъемностью (C) для радиального или радиально-упорного подшипника называют такую радиальную нагрузку, которую подшипник сможет воспринимать в течение расчетного срока службы, исчисляемого 1 млн. оборотов внутреннего кольца.

Динамическую грузоподъемность вычисляют по формуле

$$C = f_c (i \cos \alpha)^{0.7} z^{2/3} D_w^{1.8},$$

где f_c — коэффициент для динамической нагрузки, зависящий от геометрии деталей подшипников, точности их изготовления и материала; i — число рядов шариков; α — номинальный угол контакта, равный углу между линией действия результирующей нагрузки на тело качения и плоскостью, перпендикулярной оси подшипника; z — число шариков; D_w — диаметр шарика, мм.

Если подшипник должен воспринимать внешнюю нагрузку при частоте вращения подвижного кольца, меньшей 1 об/мин, то подшипник выбирают по статической грузоподъемности

$$C_0 = f_0 i z D_w^2 \cos \alpha_0,$$

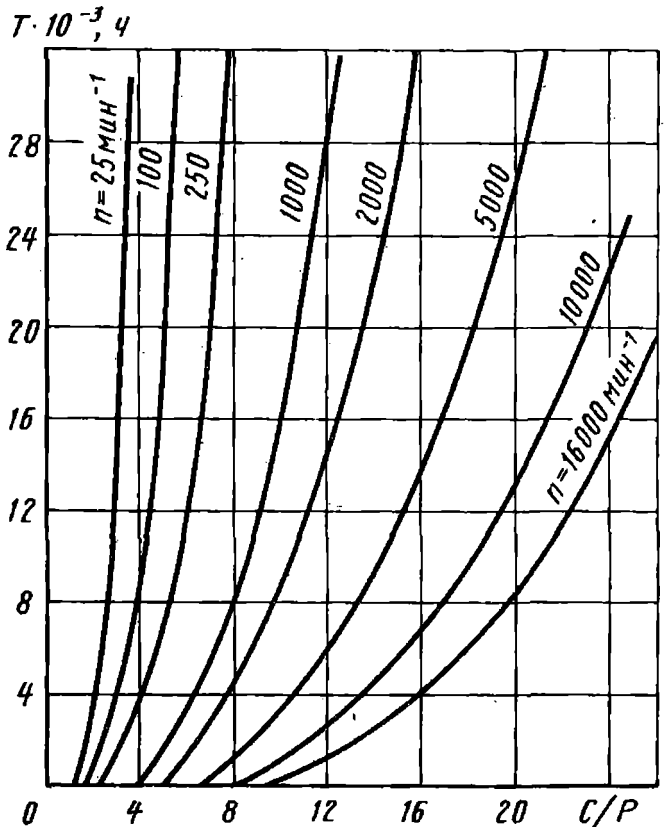


Рис. 16. Зависимость долговечности шарикоподшипников от величин C/P , n

где f_0 — коэффициент для статической нагрузки; $f_0 = 1,25$ для радиальных и радиально-упорных подшипников; $f_0 = 0,34$ для самоустанавливающихся подшипников.

Статическая грузоподъемность упорных и радиально-упорных подшипников

$$C_0 = 5z D_w \sin \alpha_0.$$

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника связана с номинальной долговечностью соотношениями:

$$t = \left(\frac{C}{P_a} \right)^3; \quad t_n = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P_a} \right)^3,$$

где t , t_n — долговечность соответственно в млн. оборотов и часах; P_a — эквивалентная динамическая нагрузка для радиально-упорных подшипников; n — частота вращения.

Эквивалентная динамическая нагрузка для однорядных радиальных продольно-упорных шарикоподшипников

$$P_r = (xy F_r + y F_a) k_b k_T;$$

13. Значение коэффициента k_p

Уровень надежности	0,9999	0,9995	0,999	0,995	0,99	0,98	0,97	0,9
Коэффициент k_p	0,2	0,206	0,21	0,25	0,29	0,38	0,46	0,6

14. Значение коэффициента k_T

Температура, °C	100	110	120	130	140	150	160
Коэффициент k_T	1	0,6	0,37	0,24	0,15	0,10	0,07

для радиально-упорных подшипников
 $P_a = (x F_r + y F_a) k_6 k_T$;

для упорных подшипников
 $P = F_a k_6 k_T$,

где F_r — составляющие от радиальных нагрузок; F_a — общая осевая нагрузка на подшипник; x — коэффициент радиальной нагрузки; y — коэффициент осевой нагрузки; k_6 — коэффициент безотказности.

Значения коэффициента безотказности k_6 приведены в табл. 12.

На рис. 15 приведена зависимость температурного коэффициента k_T от температуры. Зависимость долговечности шарикоподшипников от величины отношения C/P приведена на рис. 16.

При расчете ресурса высокоскоростных шарикоподшипников необходимо учитывать коэффициент частоты вращения f_n , определяемый по частоте вращения подшипника, мин⁻¹, и коэффициент долговечности f_h , ч. В рассматриваемом случае долговечность шариковых подшипников можно определить по формулам:

$t_n = 500 \left(\frac{C}{P} f_n \right)^3$;

$f_h = \frac{C}{P} f_n = \sqrt[3]{\frac{t}{500}}$;

$t_n = k_p k_T k_1 \left(\frac{C}{P} \right) k_2$.

где k_p — коэффициент, характеризующий уровень надежности (табл. 13), k_T — температурный коэффициент (табл. 14).

Значения коэффициентов k_1, k_2 приведены в табл. 15 в зависимости от величин P/D_w^2 и $\Phi = \frac{D_w^3 n^3 D_{pw}}{\cos^2 \alpha} 10^{-14}$,

где D_{pw} — диаметр окружности по центру шариков, мм.

Данные о динамической грузоподъемности C шарикоподшипников приведены в табл. 16.

Пример. Определить номинальную долговечность радиального шарикоподшипника 1 000 093, имеющего габаритные размеры 8×16×4 мм. По каталогу находим $C = 440$ Н, $C_0 = 200$ Н. При $F_a = 40$ Н, $F_r = 100$ Н, $n = 10^4$ мин⁻¹, $k_p = 1, k_T = 1, v = 1$ (v — коэффициент вращения) отношение $F_a/C_0 = 40/200 = 0,2$; этому значению соответствует значение вспомогательного коэффициента $e = 0,20$. Так как

$F_a/vF_r = \frac{40}{1 \cdot 100} = 0,4 > e$, то $X = 0,56$; $Y = 1,55$.

Эквивалентная динамическая нагрузка

$P = (XvF_r + YF_a) k_6 k_T = (0,56 \cdot 1 \cdot 100 + 1,55 \cdot 40) 1 \cdot 1 = 118$ Н.

15. Значения коэффициентов k_1, k_2

Φ , мм ⁴ (мин ⁻³)	k_1 и k_2 при давлении, МПа				Φ , мм ⁴ (мин ⁻³)	k_1 и k_2 при давлении, МПа			
	$\frac{p}{D^2_{\omega}} \leq 10$		$\frac{p}{D^2_{\omega}} = 10 \div 30$			$\frac{p}{D^2_{\omega}} \leq 10$		$\frac{p}{D^2_{\omega}} = 10 \div 30$	
	k_1	k_2	k_1	k_2		k_1	k_2	k_1	k_2
16	1,00	3,00	1,00	3,00	80	19,76	1,72	0,43	3,00
20	1,59	2,80	0,88		100	29,64	1,54	0,38	
30	3,32	2,48	0,71		150	61,96	1,22	0,31	
40	5,60	2,26	0,61		200	104,53	1,00	0,27	
50	8,41	2,08	0,55		300	218,47	0,68	0,22	
60	11,71	1,94	0,50		400	368,60	0,45	0,19	

16. Значение динамической грузоподъемности, Н (по ГОСТ 8338—75, ГОСТ 7242—81, ГОСТ 5721—75)

Тип подшипника	Грузоподъемность С	Тип подшипника	Грузоподъемность С	Тип подшипника	Грузоподъемность С	Тип подшипника	Грузоподъемность С
23	500	60302	8 900	13611	130 000	3508	25 400
24	920	60309	37 800	13616	270 000	3509	26 500
25	1 500	60310	48 500	13618	363 000	3516	102 000
29	3 570	13514	102 000	13620	459 000	3612	130 000
60026	9 210	13518	216 000	13622	530 000	3615	200 000
60220	95 800	13522	281 000			3622	459 000

17. Числовые значения долговечности шарикоподшипников t

$t, \text{ч}$	C/P при частоте вращения $n, \text{мин}^{-1}$							
	10	100	500	1000	2000	5000	10 000	16 000
1 000	—	1,96	3,11	3,91	4,93	6,70	8,43	9,83
10 000	1,82	3,91	6,70	8,43	10,6	14,5	18,2	21,2
16 000	2,12	4,56	7,81	9,83	12,4	16,8	21,2	24,7
20 000	2,29	4,93	8,43	10,6	13,4	18,2	22,9	26,7
25 000	2,47	5,75	9,11	11,5	14,5	19,6	24,7	28,8
40 000	2,88	6,20	10,6	13,4	16,8	22,9	28,8	—
50 000	3,11	6,70	11,5	14,5	18,2	24,7	31,1	—
80 000	3,63	7,81	13,4	16,8	21,2	28,8	—	—
100 000	3,91	8,43	14,5	18,2	22,9	31,1	—	—
200 000	4,93	10,6	18,2	22,9	28,8	—	—	—

18. Числовые значения долговечности роликоподшипников t

$t, \text{ч}$	C/P при частоте вращения $n, \text{мин}^{-1}$							
	10	100	500	1000	2000	5000	10 000	16 000
1 000	—	1,83	2,78	3,42	4,20	5,54	6,81	7,82
10 000	1,71	3,42	5,54	6,81	8,38	11,0	13,6	15,6
16 000	1,97	3,92	6,36	7,82	9,62	12,7	15,6	17,9
20 000	2,11	4,20	6,81	8,38	10,3	13,6	16,7	19,2
25 000	2,26	4,50	7,30	8,98	11,0	14,6	17,9	20,6
40 000	2,59	5,17	8,38	10,30	12,7	16,7	20,6	—
50 000	2,78	5,54	8,98	11,0	13,6	17,9	—	—
80 000	3,19	6,36	10,3	12,7	15,6	20,6	—	—
100 000	3,42	6,81	11,0	13,6	16,7	—	—	—
200 000	4,20	6,88	13,6	16,7	20,6	—	—	—

Номинальная долговечность

$$t = \left(\frac{C}{P} \right)^3 = 100 \text{ млн. оборот;}$$

$$t_n = \frac{100 \cdot 10^6}{60 \cdot 10^4} = 170 \text{ ч.}$$

Числовые значения долговечности подшипников качения в зависимости от величины C/P приведены в табл. 17 и 18.

Приведенные показатели долговечности определяют либо по результатам расчета ресурса машин и механизмов до капитального ремонта, либо по данным эксплуатации. Определяется средний ресурс до капитального ремонта, средний ресурс до списания и средний срок службы до списания механизмов с учетом условий эксплуатации. Разработчик должен располагать информацией о значениях амплитуд напряжений, возникающих в рассчитываемых элементах, и о законах распределения уровней нагрузок. При нормальном законе распределения нагрузок функция накопленных частот с некоторым допущением описывается уравнением прямой линии.

В общем виде функция накопленных частот, определяющая число циклов при различных уровнях нагружения, имеет вид

$$y = b_1 - \lg \alpha_1 N_{\text{ц}},$$

где y — уровень нагружения, приведенный к нагружениям, возникающим в опасном сечении; b_1 — коэффициент,

характеризующий предел прочности материала; α_1 — угол наклона кумулятивной прямой; $N_{\text{ц}}$ — число циклов нагружения.

Имея необходимые параметры прямой, характеризующей усталостную прочность самого материала, можно записать

$$y_2 = b_2 - \lg \alpha_2 N_{\text{ц}},$$

где b_2 — предел прочности материала; α_2 — угол наклона прямой.

Совместное решение приведенных уравнений позволяет найти точку, характеризующую предельное число циклов нагружения, при котором происходит усталостное повреждение:

$$b_1 - \lg \alpha_1 N_{\text{ц}} = b_2 - 0,43 \lg \alpha_2 N_{\text{ц}}.$$

Полученное число циклов нагружения $N_{\text{пр}}$ вызывает предельное состояние изделия, при котором дальнейшая его эксплуатация невозможна.

Это число циклов позволяет определить средний ресурс механизма, ч:

$$t_p = N_{\text{пр}} / k_{\text{ц.ч}},$$

где $k_{\text{ц.ч}}$ — число циклов изменения нагрузки в течение одного часа.

Средний срок службы до предельного состояния

$$t_{\text{сл}} = \frac{t_p}{365 \cdot 24 \cdot k_{\text{ж}}},$$

где $k_{\text{ж}}$ — коэффициент использования механизма в сутки.

19. Расчет интенсивности отказов элементов гидроцилиндра

Элемент	Число элементов m	λ^* , 1/ч	Коэффициенты			Уточненная интенсивность отказов, 1/ч	Интенсивность отказов элементов, 1/ч
			k_K	k_B	k_B		
Уплотнения:							
скольжение штока	3	0,3	1,3	1,5	1,0	0,525	1,575
неподвижное скольжение поршня	5	0,02	1,3	1,5	1,0	0,035	0,175
Штуперное соединение	2	0,3	1,3	1,5	1,0	0,525	1,05
Шток с поршнем	4	0,09	—	—	1,0	0,09	0,36
	1	0,2	1,3	1,5	1,0	0,35	0,35

Комплектуемые изделия судовых машин и механизмов. В судовых механизмах проявляются как внезапные, так и постепенные отказы. Вероятность безотказной работы судовых машин с учетом *внезапных отказов* определяется с помощью интенсивности отказов λ по известной формуле

$$P(t) = \exp \{-m\lambda(t) t_p\},$$

где m — число элементов, входящих в механизм; λ — интенсивность внезапных отказов; t_p — требуемое время безотказной работы механизма.

Характеристики внешних механических и климатических воздействий на интенсивность отказов элементов судовых механизмов учитывают с помощью введения ряда коэффициентов: $k_K = 1,2 \div 1,4$ — коэффициент, учитывающий климатические условия; $k_B = 1,4 \div 1,6$ — коэффициент, учитывающий воздействие вибрационных нагрузок; k_B — коэффициент, учитывающий временную зависимость работы элементов по отношению к заданному времени работы рулевой машины.

Тогда интенсивность внезапных отказов элементов гидравлических и механических узлов рулевых машин λ , 1/ч, определяется формулой

$$\lambda = \lambda^* k_K k_B k_B,$$

где λ^* — интенсивность отказов элемента при работе в номинальных условиях.

Расчеты интенсивности внезапных отказов элементов судовых машин удобно выполнять в табличной форме (табл. 19).

Рассмотрим расчет вероятности безотказной работы механизмов судовых машин с учетом *постепенных отказов*. Нарботка до отказа быстроизнашивающихся элементов судовых механизмов подчиняется в основном статистическим законам распределения, приведенным в табл. 6, в зависимости от конструкции элемента и характера износа. К быстроизнашивающимся элементам рулевых машин относят такие детали, как подшипники узла цапфы люльки аксиально-поршневого насоса для машин с переменной производительностью и узлов уплотнений скольжения насосов постоянной производительности. Нарботка до отказа подшипников качения распределяется по закону Вейбулла, а распределение времени износа узлов уплотнений — по нормальному закону.

Нарботка до отказа подшипников узла цапфы люльки работающего насоса, ч [19]:

$$t = \frac{0,1z_1(D_0 + d_1)}{MD_0n} \left(\frac{C}{R} \right)^{10/3},$$

где z_1 — число шариков подшипника; D_0 — диаметр окружности, проходящей через центры шариков, мм; d_1 — диаметр шариков, мм; M — число повторных контактных напряжений, испытываемых наиболее нагруженной

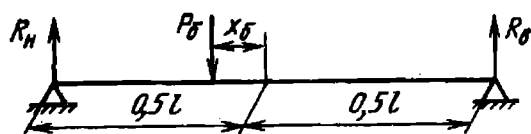


Рис. 17. Расчетная схема определения радиальной нагрузки на подшипники узла цапфы люльки насоса

точкой контакта в течение одного периода качения подшипника; n — число периодов качения подшипников; C — коэффициент работоспособности подшипника; R — радиальная статическая нагрузка на подшипник.

Для нахождения R необходимо принять допущения, что с полостью цилиндра соединена одна из полостей насоса, и блок цилиндров остановился в таком положении, при котором полость нагнетания сообщена с $(z + 1)/2$ цилиндров блока насоса. Расчетная схема определения R показана на рис. 17.

Реакции в подшипниках:

$$\text{верхнем } R_{\text{В}} = \frac{0,5l + x_6}{l} P_6;$$

$$\text{нижнем } R_{\text{Н}} = \frac{0,5l - x_6}{l} P_6,$$

где l — расстояние между осями подшипников; P_6 — равнодействующая сила вдоль оси блока цилиндров;

$$P_6 = \frac{zF(P - P_0)}{z} \left[1 \pm \frac{P - P_0}{z(P + P_0)} \right];$$

z — число цилиндров в блоке насоса; F — площадь сечения одного цилиндра; P — давление в нагнетательной полости; P_0 — давление во всасывающей полости; x_6 — координата равнодействующей силы вдоль оси блока цилиндров;

$$x_6 = \frac{D}{\pi} \frac{P_0 - P}{P_p + P_k};$$

D — диаметр осей цилиндров блока; P_p — результирующая сила в полости нагнетания,

$$P_p = P_0 F \frac{z + 1}{2};$$

P_k — результирующая сила в полости всасывания,

$$P_k = P_0 F \frac{z - 1}{2}.$$

Пример. Определение долговечности подшипников узла цапфы люльки насоса рулевых машин Р11—Р15. Основные геометрические размеры узла, необходимые для расчета: $d = 2$ см; $D = 6$ см; число цилиндров $z = 7$; $l = 12,4$ см.

Принимаем допущение, что блок цилиндров остановился в положении, при котором четыре цилиндра сообщены с верхней полостью (нагнетания), а три цилиндра — с нижней (всасывания).

Решение. Результирующие силы в полостях нагнетания и всасывания по формулам:

$$P_p = 4,5 \frac{\pi d^2}{4} \frac{(z + 1)}{2} = 5780 \text{ Н},$$

где $P_p = 4,5$ МПа;

$$P_k = 0,98 \frac{\pi d^2}{4} \frac{(z - 1)}{2} = 942 \text{ Н}.$$

$P_0 = 0,98$ МПа — давление шестеренного насоса подпитки. Координата равнодействующей силы относительно блока цилиндров

$$x_0 = \frac{6(5780 - 942)}{3,14(5780 + 942)} = 1,37 \text{ см}.$$

Равнодействующая сила

$$P_6 = \frac{3,5 \cdot 3,14(4,5 + 0,98)}{2} \times \left[1 \pm \frac{4,5 - 0,98}{7(4,5 + 0,98)} \right] = 6720 \text{ Н}.$$

Радиальные нагрузки $R_{\text{В}}$ и $R_{\text{Н}}$: для верхнего подшипника

$$R_{\text{В}} = \left(0,5 + \frac{1,37}{12,4} \right) 6720 = 4100 \text{ Н};$$

для нижнего —

$$R_{\text{Н}} = \left(0,5 - \frac{1,37}{12,4} \right) 6720 = 2617 \text{ Н}.$$

Наработка до отказа для верхнего подшипника

$$t_1 = \frac{0,1 \cdot 15(37,8 + 5,56)}{2 \cdot 37,8 \cdot 10} \times \left(\frac{120\,000}{4100} \right)^{10/3} = 5678 \text{ ч};$$

для нижнего подшипника

$$t_2 = \frac{0,1 \cdot 15 (37,8 - 5,56)}{2 \cdot 37,8 \cdot 10} \times$$

$$\times \left(\frac{120\,000}{2617} \right) = 18\,550 \text{ ч.}$$

Учитывая, что вероятность безотказной работы подшипника $P_{\Pi}(t)$ распределена по закону Вейбулла, определим параметр a этого закона по найденным величинам t_1 , t_2 . Параметр a связан с t_1 , t_2 уравнением

$$t = k_B a^{-1/b},$$

где $k_B = 0,911$; b — параметр закона Вейбулла, принят равным 1,4.

Отсюда

$$a = \left(\frac{k_B}{t} \right)^b = \left(\frac{0,911}{t} \right)^{1,4}$$

Тогда для верхнего подшипника $a_B = 4,87 \cdot 10^{-6}$ и для нижнего — $a_{\Pi} = 0,929 \cdot 10^{-6}$.

Вероятность безотказной работы в течение рейса (2500 ч) составит:

для верхнего подшипника

$$P_B(2500) = \exp \{ -4,87 \cdot 2500^{1,4} \cdot 10^{-6} \} = 0,76;$$

для нижнего подшипника

$$P_{\Pi}(2500) = \exp \{ -0,929 \cdot 2500^{1,4} \cdot 10^{-6} \} = 0,96.$$

Вероятность безотказной работы подшипниковых узлов рулевой машины за рейс

$$P_{\Pi}(t) = P_B(t_p) P_{\Pi}(t_p) = 0,76 \cdot 0,96 = 0,73.$$

Если в состав механизма входит n подшипников качения, их вероятность безотказной работы определяется произведением вероятностей

$$P_{\Pi}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

Вероятность безотказной работы рулевой машины за время рейса с учетом внезапных и износных отказов

$$P_{\text{рм}}(t_p) = P_{\text{рм}}^b(t_p) P_{\Pi}^n(t_p),$$

где $P_{\text{рм}}^b(t_p)$ — вероятность безотказной работы рулевой машины за время рейса с учетом внезапных отказов; $P_{\Pi}^n(t_p)$ — вероятность безотказной работы с учетом износных отказов.

Комплектуемые изделия авиационных двигателей и силовых установок. Наиболее частым проявлением отказов являются поломка, деформация и растрескивание отдельных элементов комплектующих изделий и узлов их крепления, вызванные неблагоприятным сочетанием действующих нагрузок W и фактической прочности R .

Для исключения случаев разрушения при конструировании обеспечивается запас прочности $k_B = R/W$.

Причинами разрушения изделий являются и внутренние изменения свойств нагруженного материала вследствие постепенного термоактивационного процесса, развивающегося при нагрузках меньше критической. Эти изменения являются основными причинами появления и развития постепенных отказов изделий. Для определения времени до разрушения t в зависимости от свойств материала механических изделий и условий его нагружения можно применять зависимость [11]

$$t = \tau_0 \exp \left\{ \frac{U_0 - \nu \sigma}{RT} \right\},$$

где τ_0 — параметр, совпадающий по величине с периодом собственных тепловых колебаний атомов в кристаллической решетке твердого тела, равный $10^{-12} - 10^{-14}$ с; U_0 — начальная энергия активации при напряжении $\sigma = 0$; $U_0 - \nu \sigma = U$ — энергия активации процесса разрушения; $R = kN$ — универсальная газовая постоянная; k — постоянная Больцмана; N — число молекул в грамм-молекуле; $\nu = \alpha RT$ — величина, характеризующая изменение прочностных свойств материалов при тепловой обработке; α — константа, равная тангенсу угла наклона прямой t в логарифмических координатах t , σ , U_0 (рис. 18).

Если зафиксировать температуру T и долговечность t , то из приведенного выше уравнения можно получить, что

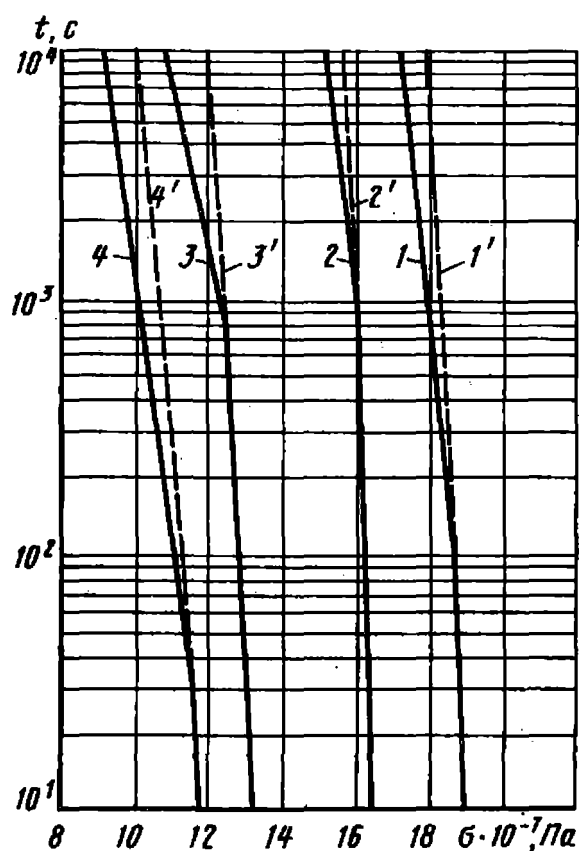


Рис. 18. Зависимость времени t от момента приложения нагрузки до разрушения образца из сплава $\text{Al} + 4\% \text{Cu}$ при различных температурах:

1 — $T = 100^\circ\text{C}$; 2 — $T = 250^\circ\text{C}$; 3 — $T = 200^\circ\text{C}$; 4 — $T = 250^\circ\text{C}$. 1, 2, 3, 4 — эксперимент; 1', 2', 3', 4' — расчет

v пропорциональна разрывному напряжению σ_r :

$$v = \left(U_0 - RT \ln \frac{t}{t_0} \right) \sigma_r^{-1} = \frac{A}{\sigma_r},$$

$$\text{где } A = U_0 - RT \ln \frac{t}{t_0}.$$

Для диффузионного механизма разрушения выполняется следующая температурно-временная зависимость прочности:

$$t_1 = C \frac{(kT)^2 E}{\sigma^3 a^4 D} \exp \left\{ - \frac{\sigma a^3 \sqrt{n}}{kT} \right\},$$

где C — константа, примерно равная единице; k — постоянная Больцмана; T — температура материала; E — модуль упругости; $D = D_0 \exp \left\{ \frac{U_D}{kT} \right\}$ —

20. Значения энергии активации U_0 и энергии сублимации E_M , кДж/моль

Металл	U_0	E_M
Ванадий	542	542
Платина	502	533
Титан	507	432
Железо	419	406
Никель	365	356—427
Медь	339	336
Серебро	268	285
Алюминий	222	230
Магний	142	147
Цинк	126	131
Кадмий	117	113

коэффициент объемной самодиффузии; U_D — энергия активации самодиффузии; n — число объединившихся вакансий; a — атомный размер; σ — действующее напряжение.

В табл. 20 приведены значения энергии активации и энергии сублимации для некоторых материалов.

В области больших напряжений и сравнительно низких температур (приблизительно в 2 раза ниже температуры плавления) действует механизм разрушения (время до разрушения определяют по формуле, приведенной на с. 291). В области малых температур действует диффузионный механизм разрушения, основанный на росте трещины. В этом случае время до разрушения образца определяется по формуле для t_1 .

Значительное число постепенных отказов связано с изнашиванием узлов и механизмов. Например, линейный износ U материала при абразивном изнашивании прямо пропорционален времени t , давлению p на поверхности трения и пути трения S , т. е. $U = k p S t$, где k — коэффициент, характеризующий износостойкость материалов и условия работы данной пары (смазочный материал, степень изоляции поверхностей от загрязнения).

Скорость изнашивания пропорциональна скорости относительного сколь-

жения трущихся поверхностей v_0 и давлению p :

$$v_{\text{нвн}} = k p^m v_0^n,$$

где m, n — опытные коэффициенты (для абразивного изнашивания $m = n = 1$).

КОЭФФИЦИЕНТНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Эти модели являются упрощенной совокупностью моделей, рассмотренных выше. Коэффициентные модели (табл. 21) строятся на сравнении проектируемого изделия с другим (базовым) изделием, характеристики модели которого известны. Кроме того, должна быть известна эмпирическая модель, связывающая параметры надежности с характеристиками условий производства и применения изделий (посредством коэффициентов, характеризующих влияние на показатели надежности особенностей технологии производства; уровня контроля качества; климатических факторов и факторов нагрузки: механические, электрические, ионизирующие и т. п.; сложности изделий; особенностей технического обслуживания и многих других факторов). Достоверность полученных оценок показателей надежности определяется достоверностью имеющихся данных о коэффициентах влияния и объективностью составленной коэффициентной модели.

Коэффициентные модели широко используют при оценке показателей надежности разрабатываемых изделий электронной техники, электротехники и радиоэлектроники.

В результате накопления экспериментальных данных и познания физико-химических процессов, протекающих в изделиях, происходит непрерывное уточнение коэффициентных моделей [3,4 — 18,21].

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКАЗОВ ИЗДЕЛИЙ ПО ПРИЧИНАМ ИХ ПОЯВЛЕНИЯ

Достижимая точность применяемых методов расчета надежности проектируемых современных механизмов, машин и систем в значительной степени зависит от содержания имеющейся

информации о надежности комплектующих изделий.

Из приведенной выше характеристики моделей надежности следует, что справочные данные должны содержать следующую информацию:

качественную и количественную характеристики распределения отказов изделий по причинам появления их; количественные значения показателей надежности изделий (показатели безотказности и долговечности внезапных и постепенных отказов);

количественную характеристику влияния условий эксплуатации и режимов применения комплектующих изделий; количественные значения показателей сложности изделий, особенностей производства и других подобных факторов.

Количественные соотношения между видами отказов изделий зависят от их конструктивного исполнения и от условий использования. Источниками появления отказов являются ошибки конструирования, нарушение технологических процессов, ошибки обслуживания.

Конструктивные недостатки обусловлены в основном отсутствием достаточной проработки вопросов применения комплектующих изделий, в особенности новых видов, и недостаточным вниманием к вопросам проектирования с учетом защиты элементов и узлов от воздействия внешних факторов.

Производственные отказы обусловлены недостаточным качеством выполнения технологических операций и ошибками при выполнении сборочных и монтажных работ.

В табл. 22 приведена характеристика отказов радиоэлектронной аппаратуры.

К эксплуатационным относят отказы, вызванные нарушением условий и режимов эксплуатации аппаратуры и изделий и несовершенством профилактического обслуживания. Характерными примерами появления отказов этой группы являются:

ошибки обслуживающего персонала при проведении различных ремонтно-восстановительных работ;

неправильная настройка, связанная с ошибками при выборе точек подключения приборов, несогласованность

21. Коэффициентные модели для расчета интенсивности отказов

Электрорадионизделия	Модель надежности (интенсивности отказов)	Обозначения
Интегральные схемы: монолитные цифровые биполярные МОП ИС (МИС, СИС) гибридные микросхемы (ГИС)	$\lambda_p = K_R [C_1 K_T K_H + K_{TH} (C_2 + C_3) K_\Theta]$ $\lambda_p = \left\{ \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i K_c + \right.$ $\left. + \left[N_R \lambda_R + \sum_{j=1}^m N_j \lambda_j + \lambda_R \right] K_\Phi K_\Theta \right\} K_R K_{\Pi\text{М}}$	K_R — уровень качества ИС; K_T — характеристика влияния температуры на ускорение процессов старения материалов; K_H — характеристика влияния приложенного напряжения; K_{TH} — уровень отработанности технологического процесса; C_1, C_2 — составляющие интенсивности отказов, учитывающие степень интеграции ИС (число вентилях); C_3 — составляющая, зависящая от типа корпуса ИС; K_Θ — характеристика жесткости условий эксплуатации $\sum_{i=1}^n N_i \lambda_i K_c$ — сумма скорректированных интенсивностей отказов компонентов и емкостей ГИС; N_i — число отдельных компонентов; λ_i — интенсивность отказов i-го компонента; λ_i — коэффициент, учитывающий свойства кристалла; N_R, λ_R — число и интенсивность отказов резисторов на кристалле или подложке; N_j, λ_j — вклад в общую интенсивность отказов j-го межсоединения; λ_R — составляющая интенсивности отказов ГИС в зависимости от особенностей корпуса; K_Φ — коэффициент, учитывающий функциональное назначение ГИС (1,0 — для цифровых; 1,25 — для линейных); K_Θ — коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды на пленочные резисторы; $K_{\Pi\text{М}}$ — коэффициент, учитывающий плотность монтажа; K_R — коэффициент, учитывающий качество ГИС

Транзисторы и диоды (общая модель)	$\lambda_p = \lambda_B (K_\Phi K_R K_C K_\Psi);$ $\lambda_B = A e^{(N_T/273 + T + \Delta T) S} \times$ $\times e^{(273 + T + \Delta T) (K_H/T_H)^P}$	λ_B — базовая интенсивность отказов; K_Φ — коэффициент, учитывающий назначение ППП; K_R — коэффициент размеров и типа корпуса; K_C — коэффициент количества контактов; K_Ψ — коэффициент, учитывающий вид материала; A — масштабный коэффициент интенсивности отказов; N_T, p — параметры формы; T — рабочая температура ($^{\circ}\text{C}$) окружающей среды или корпуса; $\Delta T = T_{\text{от}} - T_H$ — максимально допустимая температура без тока; T_H — допустимая температура при номинальном токе через переход; K_H — коэффициент нагрузки
Резисторы: постоянные переменные	$\lambda_p = \lambda_B (K_\Phi K_R K_H)$ $\lambda_p = \lambda_B (K_R K_H K_C K_\Psi)$	λ_B — базовая интенсивность отказов; K_R — коэффициент, характеризующий назначение резистора; K_H — коэффициент, характеризующий качество резистора; K_Ψ — коэффициент, характеризующий вид приложенного напряжения; K_C — коэффициент количества контактов
Конденсаторы	$\lambda_p = \lambda_B (K_\Phi K_{CH} K_{SR} K_H);$ $\lambda_B = A \left[\left(\frac{K_H}{N_{KH}} \right)^H + 1 \right] e^{B \left(\frac{T+273}{N_T} \right)^G}$ $K_H = \frac{U_p}{U_{\text{ном}}}; \quad (U_p = U_{=} + U_{\text{пик}})$	K_{CH} — коэффициент количества контактов по напряжению; K_{SR} — коэффициент, характеризующий качество исходного материала; A — поправочный коэффициент для конкретного типа конденсатора; K_H — коэффициент нагрузки; N_{KH} — характер нагрузки (постоянная); H, G — коэффициенты ускорения процесса старения; B — параметр формы; N_T — характеристика действующей температуры; U_p — рабочее напряжение; $U_{\text{ном}}$ — номинальное значение напряжения; $U_{=}$ — постоянное напряжение; $U_{\text{пик}}$ — пиковое значение напряжения

Электрорадиоизделия	Модель надежности (интенсивности отказов)	Обозначения
Индуктивные приборы	$\lambda_p = \lambda_B (K_\theta K_K)$ $\lambda_B = A e^{\frac{(T_{ТП} + 273)^G}{N_T}}$	A — фактор регулировки для различных классов изоляции; $T_{ТП}$ — температура точки перегрева ($^{\circ}\text{C}$); N_T — температурная постоянная; G — постоянная ускорения
Электрические машины	$\lambda_p = \frac{t^2}{\alpha_{1B}^3} + \frac{1}{\alpha_{2B}}$	t — заданная (выбранная) длительность эксплуатации, ч; α_{1B} — weibullовская оценка долговечности подшипников, ч; α_{2B} — weibullовская оценка долговечности обмоток
Сельсины и электромеханические СРУ	$\lambda_p = \lambda_B K_p K_{щ} K_\theta \dots;$ $\lambda_B = 0,00535 \exp \left\{ \frac{(T + 273)^{2,5}}{334} \right\}$	T — температура корпуса ($T = 40 + T_{\text{окр. ср}}$); K_p — коэффициент, учитывающий размер и тип корпуса; $K_{щ}$ — коэффициент, учитывающий число щеток в сельсине; K_θ — коэффициент, учитывающий условия применения
Реле	$\lambda_p = \lambda_B K_\theta K_c K_v K_p K_K$	K_c — коэффициент формы и числа контактов; K_v — коэффициент скорости переключения; K_p — тип реле и тип конструкции
Переключатели	$\lambda_p = \lambda_B K_\theta K_c K_v K_{HK}$	K_c — коэффициент формы и количества контактов; K_{HK} — коэффициент нагрузки на контакте
Печатные платы	$\lambda_p = \lambda_B N K_\theta$	N — число сквозных отверстий

22. Характеристика отказов радиоэлектронной аппаратуры

Отказы	Характеристика отказов	Причины отказов
Конструкционные	Критичность устройств к изменению параметров комплектующих изделий	Проектирование схем и узлов без достаточного учета изменения параметров изделий
	Отказы комплектующих изделий до отработки ими установленного технического ресурса	Применение комплектующих изделий в предельных электрических и тепловых режимах
	Коррозия контактных соединений. Разрушение покрытий изделий и узлов	Недостаточная защита элементов и узлов от воздействия климатических факторов
	Электрические пробой. Обрывы	Ошибки проектирования и расчета защитных устройств от электрических перегрузок
Производственные	Короткие замыкания. Пробой. Обрывы	Ошибки в монтаже. Недостаточная очистка поверхностей и объемов от попавших посторонних частиц, пыли и т. п.
	Коррозия контактных соединений. Разрушение покрытий изделий и узлов	Нарушение установленных технологических процессов покрытия изделий и узлов. Несоблюдение установленных правил пайки и монтажа узлов и блоков
	Отказы узлов и элементов аппаратуры после ее транспортирования	Низкое качество отдельных конструктивных материалов. Некачественное выполнение монтажных работ
Эксплуатационные	Окисление контактов соединений и узлов. Поломки разъемов. Износ трущихся поверхностей. Обрывы проводов и т. п.	Нарушение периодичности проведения и содержания профилактических работ
	Отказы элементов и узлов аппаратуры при ее включении и выключении	Нарушение правил включения и выключения аппаратуры, ее регулировки и настройки. Неисправности устройств и элементов защиты

23. Распределение отказавших электровакуумных приборов по видам отказов

Электровакуумные приборы	Количество отказов, %		Количество внезапных отказов, %	
	внезапных	параметрические	Обрыв	Короткое замыкание
Приемно-усилительные лампы	25	75	65	35
Генераторные лампы	75	25	68	32
Электронно-лучевые трубки (индикаторные)	20	80	63	37
Газоразрядные приборы	76	24	87	13

24. Основные причины отказов конденсаторов

Конденсаторы	Причины отказов	Факторы, увеличивающие механизм отказов
Керамические	Дефекты диэлектрика. Электрические пробой	Высокая температура. Высокое напряжение при переходных процессах. Перегрузки. Вибрации и удары
Слюдяные	Перенос серебра. Дефекты диэлектрика	Высокая влажность. Высокая температура. Вибрация и удар
Бумажные	Дефекты фольги. Плохое крепление проводов к фольге	Периодическое воздействие температуры и тепловой удар. Избыточное напряжение. Перегрузка
Танталовые электролитические	Утечка вследствие плохой изоляции. Дефекты диэлектрической вставки. Обратные напряжения	Изменение давления (высота). Высокие температуры. Обратная полярность при переходных процессах

входных сопротивлений приборов и настраиваемых схем;

коммутация необесточенных цепей, вследствие чего появляются переходные процессы, вызывающие преждевременное разрушение изделий (броски тока, перенапряжения, искрения, перегорание подогревателей и т. п.);

установка предохранителей несоответствующего номинала;

необоснованно частые включения и

выключения аппаратуры, ускоряющие износ элементов коммутации вращения.

Стекланные мощные и приемно-усилительные лампы. В табл. 23 дано распределение отказавших электронных ламп по видам отказов. Характерными дефектами стекланных генераторных ламп являются междуэлектродные замыкания, обрывы подогревателей и дефекты стекла. Характерной причиной внезапных отказов газоразрядных при-

25. Распределение отказов радиодеталей

Радиодетали	Отказ при эксплуатации, %		Отказ при испытаниях, %	
	внезапный	параметрический	внезапный	параметрический
Конденсаторы	60	40	71	29
Резисторы непроволочные:				
постоянные	76	24	80	20
переменные	92	8	—	—
Резисторы проволочные:				
постоянные	99	1	99	1
переменные	99	1	—	—

26. Распределение отказов конденсаторов

Причина отказа	Конденсаторы				
	бумажные	металлобумажные	электролитические	слюдяные	керамические
Пробой диэлектрика	55/60	33/35	46/48	44/90	33/9
Механические повреждения	10/10	10/10	14/15	20/—	33/—
Изменение параметров	12/20	40/45	25/25	36/10	34/10
Нарушение герметичности	23/10 ,	17/10	15/12	—/—	—/—

Примечание. В числителе указано количество отказов, %, при эксплуатации, в знаменателе — при испытаниях.

боров является пробой между электродами.

Значительное количество отказов электровакуумных приборов связано с появлением так называемых постепенных (параметрических) отказов. В общем количестве отказов приемно-усилительных ламп постепенные отказы составляют около 75%, электронно-лучевых приборов до 80% и до 25% отказов мощных стеклянных приборов.

Появление постепенных отказов, в особенности приемно-усилительных ламп, в большинстве случаев связано с отравлением оксидного катода вред-

ными примесями, с испарением оксидного слоя катода вследствие длительной работы, с увеличением токов утечки между электродами, с ухудшением изоляции между катодом и подогревателем, с изменением контактной разности потенциалов между сеткой и анодом.

Постепенные отказы электронно-лучевых приборов обусловлены ухудшением светотехнических характеристик. Основной причиной этих изменений являются дефекты катода и экрана. Окисление или отслаивание оксидного слоя катода и нарушение режима акти-

27. Причины отказов вращающихся устройств

Вращающиеся устройства	Характеристика	Причины отказов	Факторы, усиливающие механизм отказов
Сельсины	Обрывы в обмотках	Пробой изоляции обмотки. Обгорание проволоки обмотки	Ток при перегрузке. Перенапряжение. Перегрев
	Заклинивание подшипников	Деформация элементов подшипника. Износ	Перегрев. Дефекты в материале подшипника. Неправильное размещение вала
Генераторы, аналого-цифровые преобразователи	Заклинивание подшипников	Чрезмерный износ. Деформация элементов подшипника	Перегрев. Плохой материал подшипника. Неправильное размещение вала
	Шум щеток или контактов. Дрожание или размыкание контактов	Загрязнение скользящих поверхностей. Износ скользящих поверхностей	Плохая конструкция скользящих поверхностей. Сборка устройства в загрязненном помещении. Плохая схема устройства или неудачный подбор допусков. Дефекты материала. Перегрев

вирования приводит к преждевременной потере им эмиссионной способности.

Конденсаторы. Основными причинами отказов конденсаторов (табл. 24) являются короткие замыкания и электрический пробой (до 70 % всех отказов), снижение сопротивления изоляции и потеря емкости.

Значения интенсивности отказов конденсаторов (например, при температуре минус 60 °С и отношении рабочей мощности к номинальной 60 %) составляют ниже 0,02 % на 1000 ч работы для надежных бумажных конденсаторов и ниже 0,6 % на 1000 ч работы для электролитических конденсаторов. При низких коэффициентах нагрузки (ниже 50 %) интенсивность отказов конденсаторов меньше 0,005 % на 1000 ч работы.

В табл. 25, 26 приведено распределение отказов радиодеталей по видам и причинам.

Резисторы. Основные механизмы отказов — дефекты материала при высоких температурах или перегрузках элементов конструкции.

Интенсивность случайных отказов может быть уменьшена установлением оптимальных режимов использования (мощность рассеяния, температура), контролем влажности и температуры окружающей среды, соблюдением правил эксплуатации.

Вращающиеся устройства (табл. 27). При использовании вращающихся устройств опасно попадание их вместе с креплением в резонанс при любой частоте, на которой работает система.

Для всех вращающихся устройств должно тщательно исследоваться тепловыделение подшипников и обмоток.

При оценке надежности этих устройств необходимо учитывать динамические нагрузки при вращении всей системы.

Переключатели. Основными видами отказов этих изделий являются:

обрывы в цепи или периодические размыкания, возникающие в результате подгорания или (и) износа контактов;

короткие замыкания в результате обгорания контактов;

сбой переключающего механизма в результате износа его частей, а также вследствие дефектов материала.

Соединители. Причины отказов соединителей приведены в табл. 28.

Полупроводниковые приборы. 30—40 % отказов полупроводниковых приборов (табл. 29) относят к внезапным. Остальные 60—70 % обусловлены изменением электрических параметров. Большинство отказов обусловлены недостатками производства.

В табл. 30 и 31 даны характеристики распределения отказов интегральных схем. На надежность и распределение отказов микросхем влияет степень интеграции.

Механические изделия. К основным видам отказов изделий судового и авиационного оборудования относят отказы вследствие усталости, течи, износа, тепловой нагрузки, коррозии, эрозии, отсутствия смазочного материала, упругой деформации, коррозионного износа, расслаивания и вспучивания.

В соответствии с причинами возникновения отказы механических изделий классифицируют по следующим группам:

1. Конструкционные отказы. К этой группе относят отказы, возникающие вследствие нарушения установленных правил конструирования. Конструкционные отказы обычно проявляются при эксплуатации изделий.

2. Производственные отказы. Это отказы вследствие нарушения установленного процесса изготовления или ремонта изделий: дефекты поверхности и резьбовых соединений (царапины, недотянутые болты и гайки, отсутствие шплинтовки, т. е. отказы, не связанные с качеством комплектующих изделий, а с недостатками производства), щели, поры, вмятины, изгибы и т. п.

3. Эксплуатационные отказы. Отказы этой группы обусловлены нарушением правил эксплуатации. Они не характеризуют свойств надежности изделий.

Косвенными признаками отказов механических изделий являются: повышенные вибрации, различные заедания, заклинивания; повышенное искрение, оплавления, обрывы цепи, приваривания и другие явления; грязевые пробки, различные протечки, разрывы труб и др.

28. Причины отказов соединителей

Соединители		Характеристика отказов	Причины отказов	Факторы, усиливающие механизм отказа
Штыревые	Нормальная нагрузка	Обрыв в цепи	Сильное загрязнение. Разрыв контакта или штепселя	Высокая влажность. Вибрация и удары. Рассогласование между штырем и штепселем
	Пониженная нагрузка	Короткое замыкание. Обрывы в цепи	Повреждение штыря. Корона или пробой диэлектрика. Окисление поверхности штыря	Большая высота. Немеханизированные процессы. Возможность попадания пыли в соединитель
На панелях с печатными схемами.		Обрывы в цепи	Плохое покрытие (или окисление) поверхностей на панели с печатной схемой. Потеря эластичности ленточных контактов	Высокая влажность. Вибрация или удар. Многочисленные вставки

29. Причины отказов полупроводниковых приборов

Характеристика отказов	Причины отказов	Факторы, усиливающие механизм отказа
Обрывы выводов внутри корпусов приборов	Некачественная сварка или пайка. Коррозия и изменение. Состав материалов. Качество соединения электродов с внешними выводами	Нестабильность термических процессов изготовления спая стекла с металлом. Электрические перегрузки
Короткие замыкания между внутренними электродами	Микротрещины, сломы и другие дефекты кристалла. Неравномерность толщины базы перехода. Посторонние частицы в корпусе	Перепады температур
Дрейф параметров (постепенные отказы)	Изменение состояния поверхности полупроводников. Образование проводящих мостиков на поверхности полупроводника	Наличие влаги на поверхности полупроводника. Попадание влаги на $p-n$ -переход. Избыточный кислород внутри корпуса прибора

30. Распределение отказов интегральных схем

Отказы	Причины отказа	Количество отказов, %		
		сред- нее	мини- мальное	макси- мальное
Обрыв сварного соединения	Малая механическая прочность сварного соединения (малая прочность сварки, малая адгезия контактной площадки и подложке). Взаимная диффузия металлов и образование интерметаллических соединений в зоне сварки. Уменьшение поперечного сечения проволоки в «пятне». Превышение допустимых уровней механических нагрузок	20	5	57
Обрывы тонкопленочных резисторов и проводников	Механическое повреждение, подтравливание, неудовлетворительное запыление ступеней рельефа и т. п. Превышение допустимого уровня тока. Химическая и электрохимическая коррозия. Неудовлетворительное вскрытие окон под контакты	20	3	26
Повышенные токи утечки и короткие замыкания	Загрязнение поверхности диэлектрических пассивирующих пленок и корпуса. Загрязнения и дефекты диэлектрических пленок. Превышение допустимого уровня напряжения («выбросы», статическое электричество)	22	12	34
Вследствие дефектов фотолитографии	Паразитная (ложная) диффузия из-за дефектов фотолитографии. Недотравливание и перетравливание окислов и металлов. Неполное удаление фоторезиста	10	5	24
Вследствие объемных дефектов кристалла	«Смывания» в транзисторах с тонкой базой. Пробои в местах локальных дефектов структуры полупроводникового кристалла	10	2	24
Вследствие дефектов корпуса, сборки и герметизации	Малая герметичность корпуса. Коррозия деталей корпуса. Механические повреждения и чрезмерные натяжения гибких проволочных выводов. Малая механическая прочность и высокое тепловое сопротивление в местах «посадки» кристалла в основание корпуса. Загрязнения и инородные частицы в корпусе	15	2	31

31. Распределение отказов, %, интегральных схем в зависимости от степени интеграции

Причины отказов	Степень интеграции			
	ма- лая	сред- няя	большая	
			в бипо- лярных схемах	на МДП структурах
Тонкопленочные проводники (метал- лизация)	16	25	27	4
Дефекты фотолитографий и диффузии	14	12	25	6
Дефекты структуры и загрязнения окисла и полупроводникового кри- сталла	26	25	14	54
Дефекты сборки и герметизации (об- рывы сварных контактов, дефекты по- садки кристалла, нарушение герме- тичности и др.)	28	12	6	—
Попадание инородных частиц в кор- пус	8	12	14	12
Прочие (в том числе неустановленные)	8	14	14	24
Применение схем с нарушением тре- бований ТУ	36	17	5	15

Приведенные данные об отказах комплектующих изделий необходимо учитывать при оценке показателей надежности проектируемых схем и узлов машин и механизмов. В частности, выбор рационального вида резервирования в значительной степени зависит от вида отказов комплектующих изделий.

4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКА НАДЕЖНОСТИ
КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ

При выборе характеристик надежности комплектующих изделий примем следующие допущения:

- 1) потоки отказов комплектующих изделий в техническом устройстве независимы;
- 2) влияние отказа каждого комплектующего изделия на работоспособность технического устройства определено однозначно: отказ изделия либо влечет отказ устройства, либо нет; промежуточные состояния не рассматриваются;
- 3) различают основное соединение комплектующих изделий в устройстве

(отказ хотя бы одного комплектующего изделия приводит к отказу всего устройства) и резервное соединение (отказ устройства наступает только при отказе всех его изделий).

При установлении требований по надежности комплектующих изделий, как правило, исходят из основного соединения. В этом случае интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t) \Delta t},$$

где $N(t)$ — число изделий, годных к любому моменту времени t .

Средняя наработка изделия до первого отказа

$$t_0 = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} t_i,$$

где $N(0)$ — число изделий, годных в начальный момент времени $t = 0$; t_i — случайное время работы до первого отказа изделия.

Средняя наработка на отказ

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N t_i,$$

где N — число испытываемых изделий; m — число отказов всех изделий за время испытаний; t_i — наработка i -го изделия за время испытаний.

Показатели безотказности комплектующих изделий (ранга выше нулевого, модулей, плат, блоков) и технических устройств рассматривают на основе данных об интенсивности отказов комплектующих изделий нулевого ранга (ИНР — электрорадиоизделия, неразъемные модули, интегральные схемы, механические и конструктивные элементы).

Интенсивность отказов комплектующих изделий нулевого ранга можно представить в виде соотношения

$$\lambda = \lambda_0 \prod_{i=1}^n \alpha_i,$$

где λ_0 — интенсивность отказов изделий, полученная при испытаниях в режимах, соответствующих техническим условиям; α_i , $i = \overline{1, n}$ — коэффициенты условий применения и качества комплектующих изделий.

Если время работы ИНР меньше времени работы изделия более высокого ранга, то интенсивность отказов рассчитывают по формуле

$$\lambda = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \lambda_0 t_p + \lambda_n (t - t_p)}{t_p},$$

где λ_n — интенсивность отказов простейших комплектующих изделий нулевого ранга в нерабочем состоянии ($t - t_p$); $\lambda_n = (10^{-2} \div 10^{-3}) \lambda_0$.

При расчете ИНР в циклическом режиме интенсивность отказов должна рассчитываться с учетом частоты включений

$$\lambda_1 = \lambda + \lambda_{\text{ц}} f,$$

где f — частота включений, ч; $\lambda_{\text{ц}}$ — интенсивность отказов на цикл включено — выключено.

По статистическим данным $\lambda_{\text{ц}} = 1 \div 10$ отказов на тысячу включений.

Требования, предъявляемые к точности и достоверности данных о надежности комплектующих изделий нулевого ранга, зависят от вида расчета надежности технических устройств. Различают три вида расчетов надежности технических устройств: прикидочные, приближенные и уточненные.

Прикидочный расчет позволяет провести быструю ориентировочную оценку безотказности проектируемого технического устройства (системы). Для этого достаточно знать суммарное число ИНР N в проектируемом устройстве и интенсивность отказов λ_a ИНР эксплуатируемого технического устройства-аналога.

Интенсивность отказов проектируемого устройства будет

$$\lambda_{\text{п. у}} = \lambda_a N.$$

Показатель безотказности этого устройства t находят по номограмме (рис. 19). При расчетах достаточно иметь данные об интенсивности ИНР в устройстве-аналоге.

Приближенный расчет проводят в том случае, если известна номенклатура ИНР, но неизвестны режимы и условия их работы. При приближенном расчете используют интенсивности отказов ИНР, полученные из справочников, издающихся отраслями промышленности, выпускающими комплектующие изделия. Для ориентировочного учета влияния режима и условий можно ввести поправочный эмпирический коэффициент $k_y = 0,7 \div 0,85$. Тогда расчетная интенсивность проектируемого технического устройства

$$\lambda_{\text{п. у}} = \frac{1}{k_y} \sum_{i=1}^N \lambda_{\text{ИНР } i}.$$

Если известен состав комплектующих изделий (ИНР), входящих в проектируемое устройство, и условия его использования, то при определении интенсивности отказов используют зависимости, приведенные на рис. 11—18 и табл. 32, 33.

Рассмотрим пример приближенного расчета надежности проектируемого устройства.

Пример. Проектируется устройство, состоящее из 30 вращающихся транс-

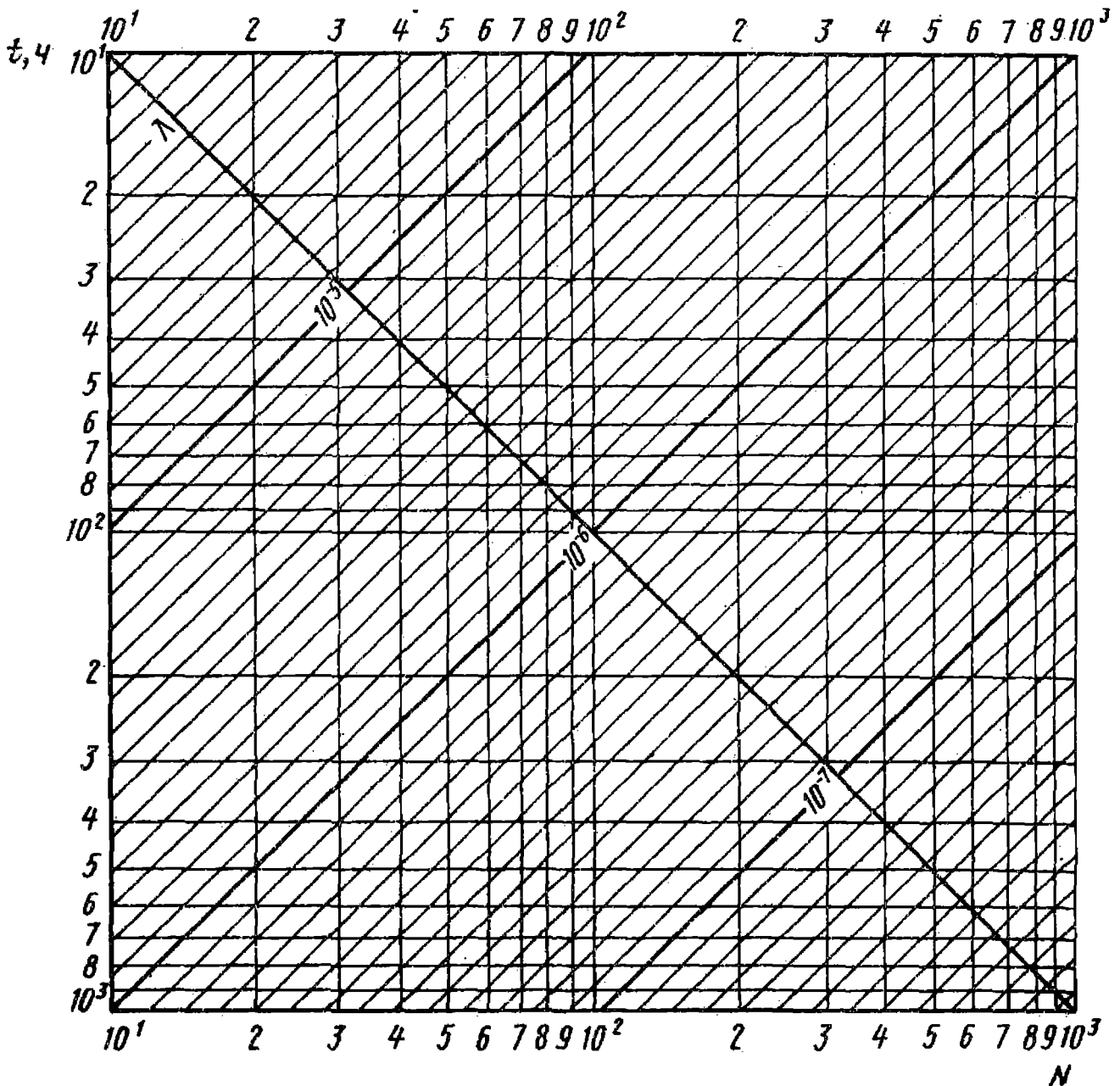


Рис. 19. Номограмма для определения зависимости средней наработки на отказ t от числа N и элементов системы и интенсивности отказов λ комплектующих изделий

форматоров, сельсинов и других электрических машин, 20 единиц различных коммутационных изделий, 10 реле, 20 выпрямителей, 10 трансформаторов, 15 штепсельных разъемов и 5 одиночных усилителей. Определить вероятность безотказной работы одного из усилителей $P_{yc}(t)$, если задана вероятность безотказной работы всего устройства $P(t) = 0,75$ в течение 10 ч непрерывной работы.

Решение. Вероятность безотказной работы усилителя

$$P(t) = P_{yc}^5(t) \exp \left\{ - \sum_{i=1}^k N_i \lambda_{инр i} t \right\},$$

где k — количество типов ИНР; N_i — число ИНР i -го типа; $\lambda_{инр i}$ — интенсивность отказов ИНР i -го типа. Решив относительно $P_{yc}(t)$, получим

$$P_{yc}(t) = \sqrt[5]{\frac{0,75}{\exp \left\{ - \sum_{i=1}^k N_i \lambda_{инр i} t \right\}}}.$$

32. Интенсивность отказов электрорадиоизделий

Наименование изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, 1/\text{ч}$	
	Среднее значение	Интервал изменения

Полупроводниковые приборы

Диоды:		
германиевые	0,157	0,678—0,002
кремниевые	0,2	0,452—0,021
кремниевые карбидные	0,1	0,55—0,002
селеновые	0,2	0,6—0,11
Триоды:		
Транзисторы германиевые:	0,9	1,91—0,6
с максимальной мощностью 2 МВт	0,4	—
с максимальной мощностью 20 МВт	0,7	—
с максимальной мощностью 200 МВт	0,6	1,4—0,33
мощные	1,91	—
Транзисторы германиевые в ключевом режиме	0,4	0,71—0,10
Транзисторы кремниевые:	0,5	1,44—0,27
маломощные с максимальной мощностью 150 МВт	0,84	1,44—0,45
с максимальной мощностью 1 Вт	0,5	1,67—0,16
с максимальной мощностью менее 4 Вт	0,74	0,84—0,21
Транзисторы кремниевые в ключевом режиме	0,7	0,84—0,25
Триоды электронные:		
субминиатюрные двойные	0,26	4,31—0,78
микроволновые	9,66	—

Электрорадиовакуумные приборы

Генераторные типа ГУ-29	0,9	—
Тетроды субминиатюрные	2,15	3,62—0,69
Пентоды-усилители	3,5	5,81—1,25
Гептоды-преобразователи типа 6АП2	0,6	1,4—0,4
Тиратроны маломощные	6,0	15,0—2,5
Тиратроны мощные	5,0	11,3—3,0
Тиратроны субминиатюрные	1,7	4,41—0,28
Тиратроны типа ТГ1-0,1/0,3	53,0	—
Тиратроны типа ТГИ1-85/3	14,0	20,1—6,71
Стабилизаторы напряжения	1,0	2,5—0,4
Индикаторы настройки типа 6Е5С	0,6	—
Неоновые лампы	0,1	1,52—0,019
Электронно-лучевые трубки с магнитным отклонением луча	1,65	3,1—0,94
Электронно-лучевые трубки с электрическим отклонением луча	1,02	2,0—0,96
Клистроны отражательные	3,0	6,0—1,2
Магнетроны	100	1000,0—8,0
Лампы накаливания	0,64	1,18—0,1

Продолжение табл. 32

Наименование изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, 1/\text{ч}$	
	Среднее значение	Интервал изменения
Резисторы		
Композиционные:	0,043	0,297—0,005
$1/4$ Вт	0,016	—
$1/2$ Вт	0,06	—
2 Вт	0,071	—
переменные	0,053	0,533—0,017
пленочные	0,63	0,058—0,017
металлопленочные	0,2	0,4—0,004
прецизионные	0,004	—
Постоянные	0,04	0,07—0,01
Постоянные многоваттные	0,028	0,065—0,009
Переменные (потенциометры)	0,26	0,5—0,02
Проволочные:	0,087	0,197—0,046
мощные	0,04	0,076—0,21
переменные	0,091	0,807—0,02
прецизионные	0,073	0,114—0,032
Угольные	0,045	0,888—0,005
Нелинейные	0,11	0,153—0,047
Конденсаторы		
Бумажные:	0,05	0,29—0,003
с обратным напряжением менее 600 В	0,0025	0,04—0,001
с обратным напряжением более 600 В	0,09	0,235—0,0083
Керамические	0,15	1,64—0,042
Керамические переменные	0,02	0,351—0,012
Слюдяные:	0,075	0,132—0,005
с обратным напряжением менее 600 В	0,0375	0,066—0,009
с посеребренными пластинами	0,083	0,41—0,025
фольговые	0,045	0,076—0,014
Стеклянные	0,06	0,87—0,0005
Танталовые	0,6	1,934—0,108
Фарфоровые	0,09	1,02—0,04
Фольговые	0,054	0,076—0,045
Пластиковые	0,135	0,178—0,003
Масляные	0,3	1,95—0,12
Нейлоновые	0,01	0,014—0,006
Воздушные переменные	0,034	0,082—0,01
Электролитические алюминиевые	0,135	—
Трансформаторы и дроссели		
Трансформаторы:		
входные	1,09	2,08—0,12
выходные	0,09	—
звуковой частоты	0,02	0,04—0,01
высокочастотные	0,045	0,062—0,019
импульсные	0,17	0,285—0,03
напряжения накала	0,027	0,06—0,03

Продолжение табл. 32

Наименование изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, 1/\text{ч}$	
	Среднее значение	Интервал изменения
Трансформаторы:		
анодные	0,5	1,69—0,012
силовые	0,025	0,052—0,012
развязывающие	0,03	0,093—0,011
регулируемые	0,1	0,31—0,035
Автотрансформаторы	0,06	—
Дроссели:	0,34	2,22—0,07
низкочастотные	0,175	—
высокочастотные	2,1	—
с насыщением	0,14	0,32—0,12
Катушки индуктивности	0,02	1,082—0,001
Катушки индуктивные настроечные	0,008	0,02—0,001
Катушки индуктивности фокусирующие	0,05	—
Катушки соленоидные	0,04	0,09—0,02
Обмотка электродвигателя	0,08	0,045—0,01
Реле, коммутационные и соединительные элементы		
Реле:	0,25/к. г.	
герметические закрытые	0,04/к. г.	
мощные	0,3/к. г.	
малогабаритные	0,25/к. г.	
на 300—600 В	0,23/к. г.	
Разъемы:		
штепсельные	0,062/ш	
с контрольным гнездом	0,0004/ш	—
штепсельные телефонные	0,002/ш	
Контакты	0,25/к. г.	
Переключатели:		
кнопочные	0,07/к. г.	
блокировочные	0,5/к. г.	
плунжерные	0,12/к. г.	
поворотные	0,175/к. г.	
мощные	0,07/к. г.	
миниатюрные	0,25/к. г.	
Переходные колодки	5,2	12,3—0,8
Гнезда	0,01/ш	0,02/ш—0,002/ш
Клеммы, зажимы	0,0005	—
Панели октальные ламповые	0,003/г	—
Тумблеры	0,06/к	1,123/к—0,015/к
Выключатели:		
магнитные	0,358	—
термические	0,3	0,5—0,028
быстродействующие	0,4/к	2,1/к—0,09/к
Провода соединительные	0,015	0,12—0,008
Кабели	0,475	2,2—0,002
Предохранители плавкие	0,5	0,82—0,30
Соединения пайкой	0,01	—
Изоляторы	0,05	1,54—0,03
Изолирующие шайбы, прокладки	0,001	—

Продолжение табл. 32

Наименование изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, 1/\text{ч}$	
	Среднее значение	Интервал изменения
Источники питания		
Аккумуляторы	7,2	19,0—0,35
Батареи однозарядные	30	300—5
Батареи заряжаемые	1,4	14,29—0,5
Электродвигатели и сельсины		
Электродвигатели:		
асинхронные	8,6	11,2—4,49
синхронные	0,359	6,25—0,159
вентиляторные	2,25	—
постоянного тока	9,36	—
Сельсины	0,35	0,61—0,09
Умфермеры	3,8	8,86—1,15
Волноводы:		
гибкие	2,64	4,54—1,33
жесткие	1,1	1,92—0,59
высокочастотные	2,63	4,22—1,131

Примечание. Для реле, коммутационных и соединительных изделий значения интенсивностей отказов приведены на один контакт «к», штырек «ш», гнездо «г», контактную группу «к. г.».

33. Интенсивность отказов механических и гидравлических комплектующих изделий судовых рулевых машин

Наименование изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, 1/\text{ч}$
Механические комплектующие изделия	
Передача:	
зубчатые секторы	0,9
зубчатая цилиндрическая (пара)	2,1
червячная (пара)	15,0
винтовая	1,2
цепная:	
быстроходная	40,0
тихоходная	10,0
рычажная	1,5
ременная	3,9
Соединения:	
шарнирное	2,4
гибкое	0,7
шпоночное	0,2
шарниры универсальные	2,5

Продолжение табл. 33

Наименование изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, 1/\text{ч}$
Оси	0,35
Пальцы, кулачки	0,02
Подшипники:	
качения для тяжелых режимов	1,8
качения для легких режимов	0,875
скольжения	0,3
игольчатые	0,5
с поступательным движением на валу	0,2
роликоподшипники вращающиеся	0,5
шарикоподшипники	1,8
Шплинты	0,02
Шплинты направляющие	1,5
Эксцентрики	0,002
Валы:	
быстроходные	2,8
тихоходные	1,2
Муфты:	
предохранительные	5,8
жесткие	4,6
Муфты:	
упругие	0,7
фрикционные	0,3
электромагнитные	14,0
Амортизаторы пружинные	1,0
Пружины:	
регулировочные и буферные	4,3
калибровочные, комбинированные	0,2
тарельчатые	0,22
Ролики	0,075
Устройство связи:	
направленное	1,52
поворотное	0,025
гибкое	0,039
жесткое	0,025
Гидравлические комплектующие изделия	
Насосы переменной производительности поршневые:	
НК-40	11,4
ПД-5	303,0
Насосы постоянной производительности:	
НШ-10	12,6
НШ-32	3,0
Гидроцилиндры силовые в сборе	3,0
Поршни	0,2
Втулки	0,03
Направляющий гидрораспределитель с управлением:	
гидравлическим	8,0
электрическим	4,5
электрогидравлическим	3,4

Продолжение табл. 33

Наименование изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^6, 1/ч$
Распределители трехпозиционные	2,0
Регуляторы расхода с предохранительным клапаном	2,8
Регулятор расхода с обратным клапаном	1,8
Делители потока:	
выпускные	4,0
впускные	1,3
обратные	3,3
перепускные	0,26
переключающие	0,3
предохранительные	2,2
регулирующие	1,0
шариковые	1,1
отсечные	2,2
разгрузочные	2,0
трехходовые	1,9
четырёхходовые	1,8
невозвратные	1,9
запорные	0,112
челночные	2,9
Реле давления	4,0
Регуляторы:	
давления	3,5
расхода	2,0
Соединения	0,6
Разъемы	0,5
Гидроэлектроманипуляторы	9,0
Гидрозамки	6,5
Фильтры:	
приемные сетчатые	4,0
пластинчатые	3,5
магнитно-сетчатые	5,6
Уплотнения:	
вращающиеся	0,7
скользящие	0,3
неподвижные	0,02
Шланги:	
высокого давления	4,0
низкого давления	2,0
Резервуары:	
высокого давления	0,7
нормального давления	0,2
Муфты соединительные	0,4
Трубопроводы высокого давления	1,0
	(на единицу длины)
Штуцера (штуцерные соединения)	0,09
Манометры	1,3
Манжеты	1,5

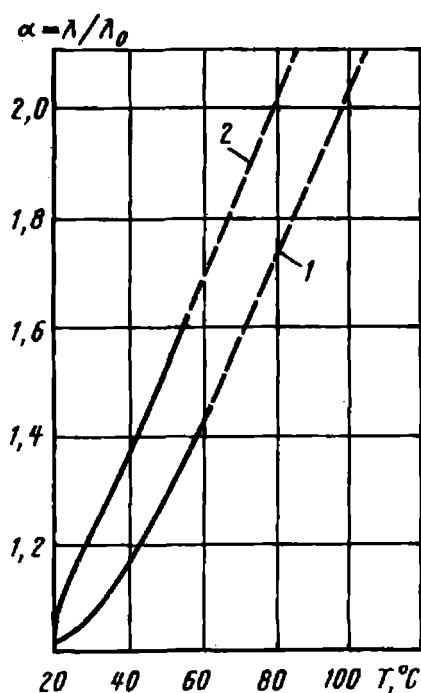


Рис. 20. Зависимость коэффициента α интенсивности отказов магнетронов (1) и резонансных разрядников (2) от температуры окружающей среды

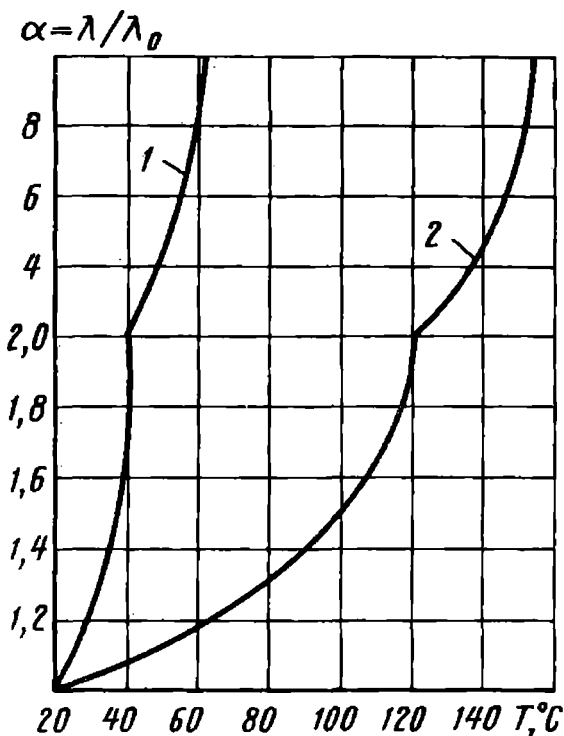


Рис. 21. Зависимость коэффициента α интенсивности отказов анодных 1 и нагревательных 2 трансформаторов от температуры окружающей среды при различной электрической нагрузке K_H

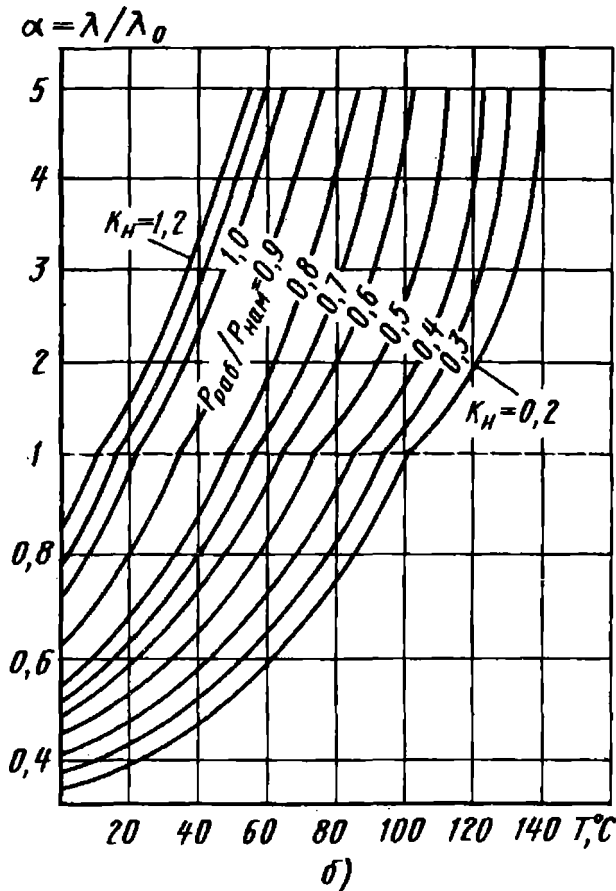
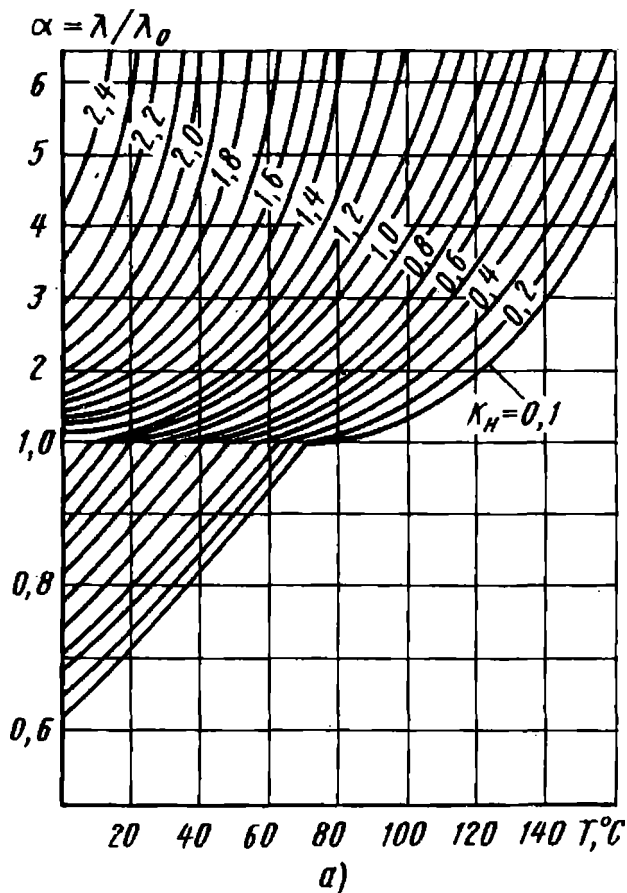


Рис. 22. Зависимость коэффициента α интенсивности отказов от температуры: а — объемных резисторов; б — пленочных резисторов (типа МЛТ и подобных)

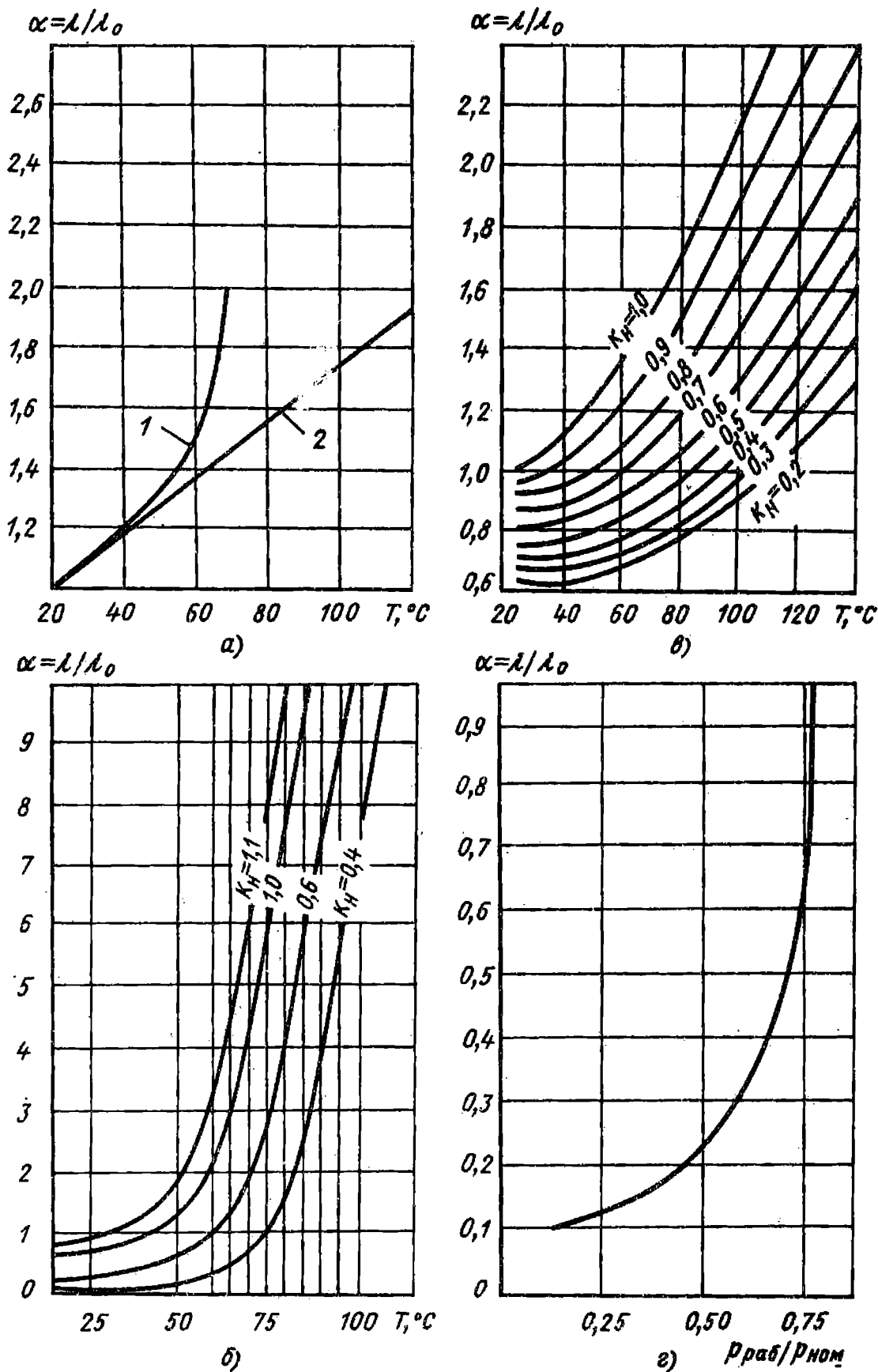


Рис. 23. Зависимость коэффициента α интенсивности отказов от температуры и нагрузки:
а — тиратронов 1; пентодов и тетродов 2; б — германиевых диодов; в — электровакуумных диодов и триодов; г — транзисторов

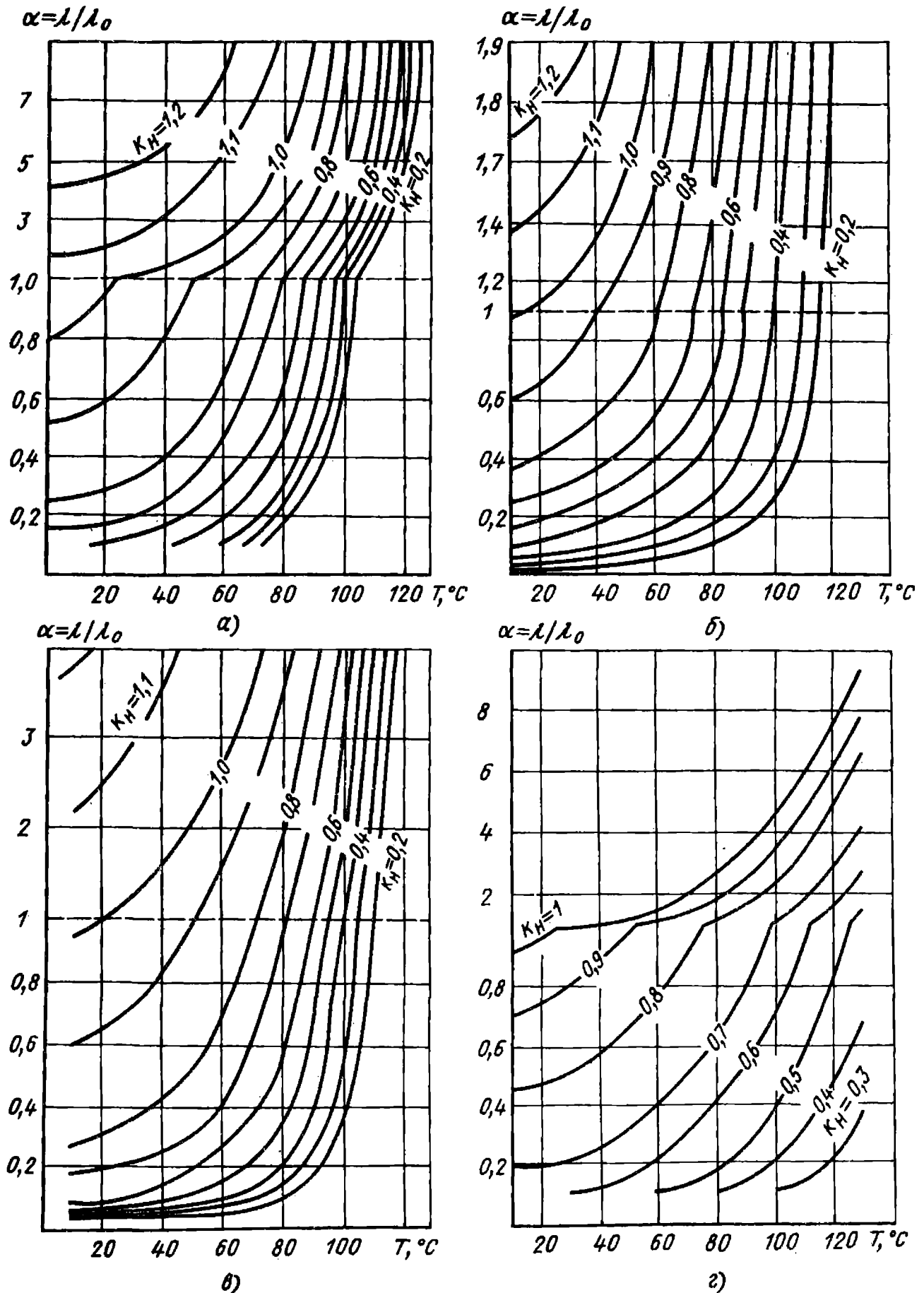


Рис. 24. Зависимость коэффициента α интенсивности отказов конденсаторов от температуры:

а — со слюдяной изоляцией и прокладками из фольги; б — с керамической изоляцией; в — с посеребренной изоляцией типа КСО; г — с бумажной изоляцией типа КБГ

Имея данные о λ_0 , с учетом графиков (рис. 20—24) определяем интенсив-

ности отказов ИНР проектируемого устройства:

вращающиеся трансформаторы
коммутационные изделия
реле
выпрямители .
трансформаторы . .
штепсельные разъемы

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 570 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч} \\ \lambda_2 &= 125 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч} \\ \lambda_3 &= 18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч} \\ \lambda_4 &= 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч} \\ \lambda_5 &= 150 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч} \\ \lambda_6 &= 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}\end{aligned}$$

Подставляя в формулу для $P_{yc}(t)$ указанные выше значения N_i и λ_i , получим

$$P_{yc}(t) = \sqrt[5]{\frac{\exp\{-(30 \cdot 570 + \frac{0,75}{+ 2 \cdot 125 + 10 \cdot 18 + 20 \cdot 50 + \frac{+ 10 \cdot 150 + 15 \cdot 50) \cdot 10^{-6}}{10}}\}}{0,988}}$$

Этот пример рассмотрен с целью демонстрации особенностей определения $\lambda_{инр i}$.

Уточненный расчет надежности предусматривает учет режимов и условий применения комплектующих изделий. Графики (рис. 20—24) позволяют учесть влияние условий применения изделий на показатели надежности.

Если известны условия и режимы применения всех комплектующих изделий нулевого ранга, входящих в состав проектируемого устройства, то можно приступить к расчету надежности.

Уточненный расчет рекомендуется проводить с помощью таблиц, включающих характеристику условий работы проектируемого устройства (табл. 34).

Коэффициент интенсивности отказов α определяют по графикам (см. рис. 20—32). Значение интенсивности отказов λ_0 в номинальных условиях берут из специальных справочников и другой нормативно-технической документации о надежности изделий. Зная λ_0 и α , находят интенсивность отказов λ . Дальнейший расчет не представляет трудностей.

Применяют и другие методы расчета надежности, в частности, коэффициентный метод расчета надежности.

Расчет надежности базируется на следующем допущении: интенсивность отказов всех ИНР изменяется в одинаковой степени в зависимости от условий эксплуатации технического устройства (системы). Это допущение означает, что при различных условиях эксплуатации

$$\lambda_i / \lambda_{об} = k_i = \text{const},$$

где λ_i — интенсивность отказов ИНР i -го типа; $\lambda_{об}$ — интенсивность отказов ИНР, названная основной (базовой), количественные характеристики надежности которой известны достоверно; k_i — относительный коэффициент надежности ИНР i -го типа. В этом случае для расчета достаточно знать зависимость интенсивности отказов от условий и режимов только для основных (базовых) ИНР. В табл. 35 приведены значения коэффициентов k_i [1, 4].

Количественные характеристики безотказности аппаратуры для различных условий эксплуатации вычисляют по формуле

$$P(t) = \exp \left\{ -t \lambda_{об} \sum_{i=1}^m k_i n_i \right\},$$

где $\lambda_{об} \sum_{i=1}^m k_i n_i$ — интенсивность отказов аппаратуры.

Важнейшей задачей, решаемой в расчете, является выбор основного ИНР и определение $\lambda_{об}$.

Производят анализ номенклатуры ИНР проектируемого устройства. В качестве базового выбирают ИНР из группы изделий, составляющих боль-

35. Значения коэффициентов

Наименование ИНР	k_I
Конденсаторы	0,33—0,61
Конденсаторы танталовые	10,7—15,3
Резисторы	1
Электровacuумные приборы	18,3—26,6
Генераторные	7,0—77
Электронно-лучевые приборы	70—77
Трансформаторы	1,13—2,78
Радиочастотные катушки	0,3—1
Моторы	9,5—20
Преобразователи	70—100
Диоды селеновые	26,6
Полупроводниковые приборы:	
диоды	11,7—15,4
триоды	1,5—17,5
Триоды:	
германиевые	2,9—5,7
кремниевые	1
Потенциометры	7,2—12
Микровыключатели	17,5
Мембраны	0,5
Соединения пайкой и провода	0,5
Гироскопы	97,5—100
Муфты	9,4
Реле	3,3—5,5
Электрические двигатели	1,7—2,2
Соленоиды	0,5
Вибраторы	6,4

Вероятность безотказной работы изделия можно записать в следующем виде:

$$P = P(s < S) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(S) dS \right] ds.$$

Для преобразования этого уравнения используем следующие соотношения:

$$M = \int_R^{\infty} f(S) dS = 1 - F(S);$$

$$L = \int_0^{\infty} f(s) ds = F(s),$$

где S — прочность изделия; s — нагрузка (напряжение).

Очевидно, что $dL = f(s) ds$. С учетом полученных соотношений вероятность безотказной работы изделия $P =$

$$= \int_0^1 M dL \text{ численно равна площади}$$

под кривой (рис. 25). Площадь заштрихованной области соответствует вероятности безотказной работы изделия.

Пример. Определить вероятность безотказной работы комплектующего изделия. Условия применения: прочность S изделия распределяется по закону Рэлея с параметром масштаба 15 000 МПа; напряжение в изделии s распределяется по закону Вейбулла с параметром формы 3 и параметром масштаба 12 000 МПа.

36. Поправочные коэффициенты для радиодеталей, применяемых в радиоэлектронных системах различного назначения [1]

Радииодегалы	Аппаратура				
	сгацно- нарная назем- ная	подвиж- ная на- земная	кора- бельная	самолет- ная	ракет- ная
Конденсаторы:					
слюдяные опрессован- ные	2	25	11,5	25	40
керамические постоян- ной емкости	1	5	16,8	5	15
керамические подстро- ечные	1	20	—	20	40
бумажные герметизи- рованные	1,3	6	12,5	6	20
пленочные и комбини- рованные негерметизи- рованные	1	5	—	5	25
пленочные негерметизи- рованные	2	10	—	10	25
танталовые фольговые	1	8	—	8	40
танталовые объемно- пористые	0,5	5	2,6	5	25
танталовые оксидно- полупроводниковые	3	30	—	30	50
стеклянные					
Резисторы:					
постоянные композици- онные	6	10	21,2	10	50
постоянные пленочные изолированные	0,3	3	1,38	3	8
постоянные пленочные мощные	1	3	0,34	3	5
постоянные пленочные высоковольтные	0,03	0,3	0,67	0,3	1,5
постоянные проволоч- ные мощные	10	50	28	50	100
переменные композици- онные	10	50	3	5	100
переменные проволоч- ные	1	10	0,73	10	20

Решение. Определяем плотности распределения прочности и напряжений по формулам

$$f(S) = \frac{2}{15\,000} \left(\frac{S}{15\,000} \right)^2 \times \\ \times \exp \left[- \left(\frac{S}{15\,000} \right)^2 \right];$$

$$f(s) = \frac{3}{12\,000} \left(\frac{s}{12\,000} \right)^2 \times \\ \times \exp \left[- \left(\frac{s}{12\,000} \right)^2 \right].$$

37. К расчету интенсивности отказов элементов гидроцилиндра

Элементы	Число элементов	Начальная интенсивность отказов, 1/ч	Коэффициенты			Интенсивность отказов, 1/ч	
			a_k	a_B	a_B	уточненная	суммарная
Уплотнения:							
скольжения штока	3	0,3	1,3	1,5	1,0	0,525	1,575
неподвижные скольжения поршня	5	0,02	1,3	1,5	1,0	0,035	0,175
Штуцерное соединение	2	0,3	1,3	1,5	1,0	0,525	1,05
Шток с поршнем	4	0,09	—	—	1,0	0,09	0,36
	1	0,2	1,3	1,5	1,0	0,35	0,35

По формулам
 $M = 1 - F(S) =$
 $= \exp \left[- \left(\frac{S}{15\,000} \right)^2 \right];$
 $L = F(s) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{s}{12\,000} \right)^2 \right]$
получены следующие числовые значения:

Напряжение, МПа	M	L
0	1	0
2 000	0,98	0,005
4 000	0,93	0,04
6 000	0,85	0,12
8 000	0,75	0,26
10 000	0,64	0,44
12 000	0,53	0,63
14 000	0,42	0,8
16 000	0,32	0,91
18 000	0,24	0,97
20 000	0,17	0,99
22 000	0,12	0,997

Значение вероятности безотказной работы вычисляем с помощью формулы Симпсона, позволяющей осуществить замену экспериментальной кривой параболой, проходящей через три точки $M_0(x_0, y_0)$, $M_1(x_1, y_1)$, $M_2(x_2, y_2)$:

$$\int_0^1 M dL = \frac{h}{3} [(M_0 + M_n) + 4\sigma_1 + 2\sigma_2],$$

где $h = \frac{M_0 - M_2}{2m} = \frac{1 - 0,17}{10} \approx 0,08;$
 $\sigma_1 = M_1 + M_3 + \dots + M_{2m-1};$
 $\sigma_2 = M_2 + M_4 + \dots + M_{2m}.$

Результаты вычислений приведены в табл. 38.

Подставив найденные значения M_i , получим

$$\int_0^1 M dL = \frac{0,08}{3} (1 + 0,17 + 0,17 + 4 \cdot 3,13 + 2 \cdot 2,7) = 0,51.$$

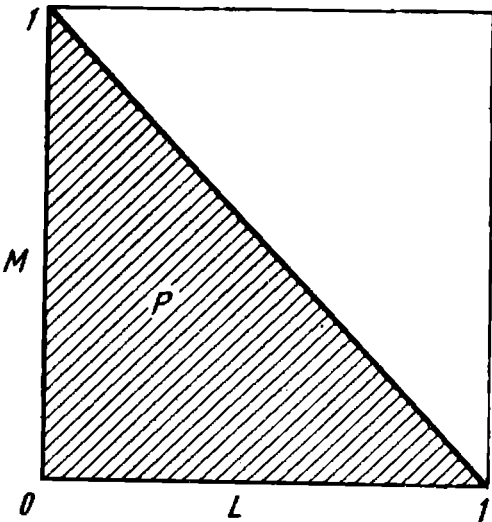


Рис. 25. Гипотетическая зависимость M от L

38. Вычисление интеграла по формуле Симпсона

i	L_i	M_{2i-1}	M_{2i}
0	0		$M_0 = 1,0$
1	0,005	0,98	
2	0,04		0
3	0,12	0,85	
4	0,26		0,75
5	0,44	0,64	
6	0,63		0,53
7	0,8	0,42	
8	0,91		0,32
9	0,97	0,24	
10	0,99		0,17

Погрешность результата вычисления
 $R_1 = n h \epsilon = (1 - 0,17) \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-5} =$

$$= 0,4 \cdot 10^{-5}$$

(погрешность действия); остаточный член $R_2 = (L_{10} - L_1)/(180 \cdot 24 \cdot h^4)$.

Подставив численные значения, получим $R_2 = (1 - 0,17)/(180 \cdot 24 \cdot 0,08^4) = 0,5 \cdot 10^{-5}$.

Полная погрешность

$$R = 0,4 \cdot 10^{-5} + 0,5 \cdot 10^{-5} = 0,9 \cdot 10^{-5}.$$

Тогда

$$P(M, L) = 0,51 \pm 0,9 \cdot 10^{-5}.$$

Список литературы

1. Вопросы качества радиодеталей/ Под ред. В. П. Балашова. М.: Советское радио, 1980. 325 с.

2. Груничев А. С., Кузнецов В. А., Шипов Е. В. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность. М.: Советское радио, 1969. 288 с.

3. Груничев А. С., Веденеев Ю. З., Елкин В. М. Надежность электро-радиоизделий при хранении. М.: Энергоиздат, 1983. 160 с.

4. Груничев А. С., Однодушнов А. В., Якимов П. Ф. Обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры и комплектующих изделий при эксплуатации. М.: Советское радио, 1976. 288 с.

5. Дудкевич А. Н. Экспериментальное определение долговечности радиочастотных кабелей//Провода и кабели (материалы, конструкция, технология). М.: Информстандартэлектро, 1967. Вып. 2.

6. Дружинин Г. В., Степанов С. В., Шихматова В. Л., Ярыгин Г. А. Теория надежности радиоэлектронных систем: В примерах и задачах. М.: Энергия, 1976. 448 с.

7. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ./Под ред. Е. К. Масловского. М.: Мир, 1984. 320 с.

8. Ефимов И. Е., Кальман И. Г., Мартынов В. И. Надежность твердых интегральных схем. М.: Изд-во стандартов, 1979. 216 с.

9. Журков С. Н. Кинетическая концентрация прочности твердых тел// Неорганические материалы. № 10, 1967. 152 с.

10. Коненков И. Ю., Ушаков И. А. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры при механических нагрузках. М.: Советское радио, 1975. 143 с.

11. Косточкин В. В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. М.: Машиностроение, 1976. 247 с.

12. Меламедов Н. М. Физические основы надежности: Введение в физику отказов. Л.: Энергия, 1970. 152 с.

13. Михайлов А. В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Советское радио, 1970. 216 с.

14. Острийковский В. А. Многофакторные испытания на надежность. М.: Энергия, 1978. 150 с.

15. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М.: Высшая школа, 1970. 271 с.

16. Стальбовский В. В. Определение надежности тонкослойных постоянных резисторов при параметрическом отказе//Электронная техника. Сер. 8. Вып. 4 (17). 1969. С. 57—63.

17. Садчиков П. И. Расчет надежности интегральных схем на основе коэффициентных методик и многокомпонентной физико-математической модели. М.: Знание, 1979. 148 с.

18. Сборник задач по теории надежности/Под ред. А. М. Половко и П. М. Маликова. М.: Советское радио, 1972. 407 с.

19. Трунин С. Ф., Промыслов Л. А., Смирнов О. Р. Надежность судовых машин и механизмов. Л.: Судостроение, 1980. 190 с.

20. Физические основы надежности интегральных схем/Под ред. Ю. Г. Миллера. М.: Советское радио, 1976. 319 с.

21. Широков А. М. Надежность радиоэлектронных устройств. М.: Высшая школа, 1972. 272 с.

Предметный указатель

А

Агенты коррозионные 29, 30
Агрессивность коррозионная атмосферы 234—237 — Зависимость от продолжительности увлажнения 237 — Оценка для углеродистых конструкционных сталей 236
— гидросферы 236—238 — Скорость коррозии некоторых металлов в морской воде 238 — Состав морской воды 237
— подземной среды 238—240
Активность коррозионная грунтов и грунтовых вод 239
Альbedo сферическое — Понятие 166, 167
— для различных участков земной поверхности и облаков 167
— Земли — Среднегодовые значения для различных широт и метеорологических условий 168
Алюминий — Стойкость к коррозии 40, 41
Аппаратура — Показатели стойкости к воздействию ионизирующих излучений 214—221
— Характеристика необратимых отказов типовых схем 211, 212
— Характеристика обратимых отказов схем 212, 213
— Характеристика радиационных эффектов в некоторых устройствах 213, 214
— Эффекты в типовых схемах и возможные виды отказов 210—214
Аппаратура радиоэлектронная — Характеристика отказов 297
Аппараты космические — Оценка радиационных условий 186—188
— Собственная атмосфера 171, 172
— Электризация 189—193 — см. также *Электризация космических аппаратов*
Атмосфера — Коррозионная агрессивность 234—237 — Типы 235
— Земли дневная — Схема образования 162 — Характеристики для высот

более 100 км 160, 161
— Земли ночная — Схема образования 162
Атмосферы инертные 249, 250

Б

Биокоррозия 232

В

Вакуум глубокий — Воздействие на материалы, агрегаты и системы космических аппаратов 160—165
— Изменение оптических характеристик 164
— Изменение поверхностных и объемных свойств материалов 165
— Изменение условий теплопередачи 164, 165
— Сублимация материалов 162—164
Вероятности отказа 258, 262, 263 — Формулы для определения 261
Ветер — Воздействие на изделия 47—50
— Значения коэффициентов для определения скорости ветра в зависимости от высоты 27
— Максимальная скорость 26
— Скорости ветра на высоте 3 м, действующие на технические устройства 26, 27
Ветер солнечный — Понятие 179
Вибрации неслучайные 79
— случайные 79, 80
Виброзащита изделий при транспортировании 109, 110 — Особенности характеристик виброизоляции 110
Виброизоляторы — Основные характеристики 114—122 — Резиновые шнуры и прокладки 118, 119 — Требования к виброизоляторам 111—114
— резинометаллические АКСС-М 115—118 — Характеристики 116
— резинометаллические типов АП и АЧ 114, 115

— сварные резинометаллические
АР 119
— тросовые 119—121 — Амплитудно-
частотная характеристика виброизо-
ляторов АТГ под нагрузкой 120 —
Зависимость числа циклов до разру-
шения виброизолятора АТЦ от индекса
витка 121 — Конструкция виброизо-
лятора типа АТЦ 121
Виброизоляция 108, 109
Влага — Действие на изделия и мате-
риалы 38—40
Влагопоглощение деталями из различ-
ных пластмасс 38
Влажность воздуха относительная —
Характеристика различных территорий
СССР, 24, 25
— средняя 24

Г

Гамма-излучение запаздывающее 134
Гидросфера — Коррозионная агрес-
сивность 236—238
Гидроцилиндр — Данные для расчета
интенсивности отказов 321
✓ Гололед — Воздействие на изделия
47—50
ГОСТ 8.033—84 152
8.105—80 152, 157
9.005—72 62
9.015—74 239
9.020—74 241
9.039—74 235
9.041—74 243, 244
9.074—77 65
9.407—84 65
9.703—79 67
4401—81 137
5272—68 232, 240
5721—75 287
7242—81 287
8338—75 287
15150—69 11, 53, 54, 56, 61,
67, 236
16019—78 130
16350—80 11, 30
24482—80 11

Градация загрязненности атмосферы
234, 235

Д

Давление атмосферное 25, 26 — Изме-
нение давления с высотой 25, 26
Детекторы импульсного фотонного из-
лучения — Основные технические па-
раметры 147
Диоды полупроводниковые СВЧ —
Оценка надежности 275

Дозиметры фотонного излучения —
Основные характеристики 144—146
Дроссели — Интенсивность отказов 310

З

Запыленность атмосферы и рабочих
помещений 29
Защита изделий — Изделия располо-
жены внутри объекта 70
— Изделия расположены на поверх-
ности объекта 68—70
— Расчет показателей защиты изделий
от тепловых воздействий 67—69
— Расчет теплопроводности 68
— Составные части (элементы) изделий
70, 71
Защита изделий авиационной техники
112, 113
— металлических 64
— морской техники 112
— наземной техники 111, 112
— от воздействия влажностно-тепло-
вого комплекса 63—67
— от воздействия механических на-
грузок 107—114
— от воздействия плесневых грибов
71, 72
— от климатических факторов 61—72
— от контактной коррозии 63
— ракетной техники 113, 114
— электрохимическая 63
Защита металлов от коррозии — Кон-
сервация 249
— Легирование металла 246
— Метод электрохимической защиты
248, 249
— Методы воздействия на конструк-
цию 250, 251
— Методы воздействия на металл 246—
249
— Методы воздействия на среду 249,
250
— Осушение атмосферы 249
Защита противометеорная 173

И

Изделия — Воздействие тепла и хо-
лода 33, 38 — Распределение отказов
по причинам их появления 293—305
Изделия комплектующие — Коли-
чественная характеристика надежности
305—322
— авиационных двигателей и силовых
установок — Оценка надежности 291—
293
— судовых машин и механизмов —
Оценка надежности 289—291

— судовых рулевых машин гидравлические — Интенсивность отказов 312, 313

— судовых рулевых машин механические — Интенсивность отказов 311, 312
Изделия механические — Виды отказов 301, 305

Излучение — см. *Факторы космического пространства*

Излучения ионизирующие — Виды радиационных эффектов в электрорадиоизделиях и материалах 195—199

— Воздействие на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы 199—207

— Воздействие на радиокомпоненты 207—210

— Источники — Основные показатели назначения 133

— Показатели стойкости электрорадиоизделий и аппаратуры 214—221

— Эффекты в типовых схемах и возможные типы отказов в аппаратуре 210—214

Излучения ионизирующие космические — Источники и состав 173—178 — Понятие 173, 174

Изотопы веществ, используемые в качестве детекторов тепловых нейтронов — Основные числовые характеристики 154, 155

Ингибиторы летучие 249, 250

Ионосфера — Электризация в ионосфере 190, 191

Источники питания — Интенсивность отказов 311

К

Кабели — Оценка надежности 279—282

Каспы полярные — Понятие 180

Климатические факторы — Воздействие ветра и гололеда 47—50

— Воздействие песка и пыли 44

— Воздействие солнечных лучей 45—47

— Воздействие сухого тепла и холода 43, 44

— Воздействие тепла и влаги 40—43

— Воздействие тепла и холода 33, 38

— Действие влаги 38—40

— Изменение свойств материалов 51—53

— Классификация внешних факторов 11—14

— Классификация групп внешних факторов и их уровней, действующих на изделие при транспортировании 36, 37

— Классификация групп климатических условий и их уровней, действующих на изделия, размещаемые на подвижных наземных объектах 34, 35
— Комплексное воздействие 30—37

— Комплексное воздействие механических нагрузок и климатических факторов 122—131

Клистроны отражательные — Оценка надежности 275

Компенсация базово-эмиттерная 225

— в коллекторной нагрузке 224

— в схемах с транзисторными парами 226

— в схемах с транзистором в режиме насыщения 226

— в схеме с шунтирующим транзистором 226

— фототоков в схеме на составном транзисторе 225

— фототоков транзистора с нагрузкой в цепи эмиттера 225

Конденсаторы — Интенсивность отказов 309

— Основные причины отказов 298, 301

— Оценка надежности 279

— Поправочные коэффициенты для расчета надежности 320

— Распределение отказов 299

Коррозия — Виды испытаний металлов и сплавов 240

— Классификация коррозионных процессов 220—233

— Косвенные показатели 244

— Методы защиты металлов от коррозии 245—251 — см. также *Защита металлов от коррозии*

— Методы исследования 240—245

— Прямые показатели 242, 243

Коррозия атмосферная 232, 234—237 — Характеристика летучих ингибиторов 250

— блуждающими токами 232

— внешним током 232

— газовая 233

— избирательная 232, 233

— контактная 232, 233

— местная 233

— неравномерная 232, 233

— подводная 232

— подземная 232, 238—240

— под напряжением 232

— равномерная 232, 233

— сплошная 232, 233

— щелевая 232

Коэффициент демпфирования 118

— диффузии 231

- модели надежности 293
- надежности относительный 317, 319

Л

- Лампы бегущей волны — Оценка надежности 275
- стеклянные мощные и приемно-усилительные 298, 301
- Линия Лайман-альфа 166
- Ловушка магнитная — Понятие 180
- Лучи космические 174
- галактические 174, 175
- солнечные 175—178 — Воздействие на изделия 45—47 — Пример определения воздействия 178

М

- Магнитосфера Земли 179, 180 — Хвост 180
- Материалы — Излучательные характеристики 170 — Изменение свойств от воздействия внешних факторов 51—53 — Основные физико-химические процессы, протекающие в материалах 255
- изоляционные — Оценка надежности 274
- твердые — Оценка надежности 274
- Медь — Стойкость к коррозии 41, 42
- Метод масс-спектрометрический вторичной ион-ионной эмиссии 245
- растровой электронной микроскопии 244, 245
- рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии 245
- электронной Оже-спектроскопии 245
- Метод определения вероятности безотказной работы Ржаницына А. Р. 270, 271
- Стрелецкого Н. С. 269, 270
- Методы измерений полей гамма-и нейтронного излучений — Измерение интегрального потока нейтронов 150—155, 157
- Измерение плотности потока нейтронов 157, 158
- Измерение экспозиционной дозы гамма- и рентгеновского излучения 144—146
- Измерение экспозиционной дозы фотонного излучения 146—150
- Микросхемы интегральные — Воздействие ионизирующих излучений 199—207
- Модели-аналоги отказов комплектующих изделий 267

- при воздействии механических нагрузок 268

- Модели коэффициентные для расчета интенсивности отказов 293—296
- Модель для оценки надежности изделий — Нагрузка — несущая способность 271—274 — Нагрузка — прочность 269—271 — Параметр — поле допуска 257—269
- математическая 272, 273
- экспериментальная — 274—293
- Модель математическая определения климатической обстановки 73—78

Н

- Нагрузки механические — Защита изделий от воздействия нагрузок 107—114
- Механизм воздействия второго типа 102—104
- Механизм воздействия первого типа 95—102
- Оценка усталостного разрушения при сложной зависимости напряжений от времени 104—107
- Нагрузки ударные 80, 82—84 — Амплитудный и фазовый спектры удара 83, 84 — Классификация 80 — Формы удара 82
- Надежность изделий — Выбор критерия отказа 268, 269
- Комплекс факторов, учитываемых при оценке надежности 124, 125
- Методы определения вероятности отказа 269—271
- Параметры для оценки комплексного воздействия механических нагрузок и климатических факторов 125
- Рекомендуемая форма таблиц для расчета надежности 318
- Физико-химические модели для оценки надежности — см. *Модель для оценки надежности изделий*
- Налепь 28, 29
- Нейтроны запаздывающие 134
- мгновенные 133, 134
- Никель — Стойкость к коррозии 42

О

- Олово — Стойкость к коррозии 42
- Осадки атмосферные — Виды 28, 29
- Осциллографы — Метрологические характеристики 147—149

П

- Переключатели — Основные виды отказов 301

Питч-угол — Понятие 181

Планеты — Собственное излучение 170

Покрытия защитные 246, 247

— лакокрасочные — Защита изделий от климатических воздействий 64—67

Поля ионизирующих излучений моделирующих установок 140—143 — Обобщенные параметры импульсных рентгеновских установок и ускорителей электронов 143 — Параметры гамма-установок 142 — Расчетные энергетические спектры и форма импульсов установок 142, 143 — Спектральные и временные характеристики реакторов 141, 142

— ядерного взрыва 136—140 — Источники излучений 136 — Плотности воздуха в атмосфере на различных высотах 137 — Распределение энергии в реакциях синтеза 138 — Характеристики радиационной обстановки 139, 140

— ядерных силовых и энергетических установок 132—136 — Данные о полях излучений ядерных реакторов 136 — Распределение полной энергии деления ядер тяжелых элементов 133, 134 — Среднее число нейтронов, образующихся при одном акте деления 133, 134 — Характеристика запаздывающих нейтронов деления 134, 135 — Энергетическое распределение гамма-излучения при делении ^{235}U 135

Поля гамма- и нейтронного излучений — Стандартизация в области метрологии нейтронных измерений на ядерно-физических установках 157 — Характеристика методов измерений 144—158 — см. также *Методы измерений полей гамма- и нейтронного излучений*

Потоки метеорные в космическом пространстве 172, 173

Пояса Земли радиационные 178—184

— искусственные 184—186

Приборы полупроводниковые — Воздействие ионизирующих излучений 199—207 — Интенсивность отказов 308 — Причины отказов 301—303 — Оценка надежности 275—277

— электровакуумные — Интенсивность отказов 308 — Оценка надежности 274 — Распределение по видам отказов 298

Примеси воздуха 27 — Параметры пыли при испытаниях на пылеустойчивость 27, 28 — Составные части 27,

28 — Характеристика песчаных бурь 27, 28

Провода — Оценка надежности 279—282

Процессы коррозионные — Классификация 230—233

Прочность электрическая воздуха — Изменение с высотой 25, 26

Пункты климатических районов представительные 16

— экстремальные 16

Р

Радияция солнечная — Воздействие на технические изделия 22—24 — суммарная — Изменение плотности теплового потока для различных высот 23 — Плотность теплового потока в различных районах поверхности Земли 23, 24 — Поверхностная плотность теплового потока 22, 23

Радиодетали — Распределение отказов 299

Радиокомпоненты — Воздействие ионизирующих излучений 207—210

Разрядники резонансные — Оценка надежности 275

Район макроклиматический — Характеристика 11

Районирование территории СССР по воздействию климата на изделия и материалы 17

Районы климатические — Обозначение 16 — Основные характеристики 15 — макроклиматические — Характеристика 11, 15—18

Резисторы — Интенсивность отказов 309

— Основные причины отказов 301

— Оценка надежности 277—279

— Поправочные коэффициенты для расчета надежности 320

Реле — Интенсивность отказов 310 — Оценка надежности 279

С

Сельсины — Интенсивность отказов 311

Сияния полярные 191

Снежный покров 28, 29

Соединители — Причины отказов 302

Составы пропиточные для древесины — Эффективность 71, 72

Среда коррозионная — Влияние 233—240

— окружающая 10, 11

Стабилитроны — Оценка надежности 275

Сталь — Стойкость к коррозии 43
Стойкость изделий — Требования по стойкости 123
 — изделий к климатическим факторам — Требования по стойкости 53—61 — Условия хранения изделий 59—61
 — металлов коррозионная 40—43
Сублимация материалов 162—164
Схемы интегральные — Оценка надежности 281—284 — Распределение отказов 301, 304, 305

Т

Температура атмосферы — Изменение в зависимости от высоты 69
Температура воздуха — Длительность воздействия непрерывных положительных температур в очень жарком сухом климатическом районе 18
 — Нормальные значения при эксплуатации изделий 56—58
 — Предельные значения годовых минимумов и максимумов по представительным пунктам с экстремальными параметрами 18, 19
 — Распределение ежемесячных минимумов и максимумов по климатическим районам 19
 — Статистические характеристики распределения 20
 — Формула изменения во времени 20, 22
Температура воздуха выше 30° С — Справочные данные 19—22
 — ниже —30 °С — Справочные данные 18, 19
 — средняя суточная — Число дней в году в различных районах СССР 21 — эквивалентная 56
Тиратроны — Оценка надежности 275
Ток фотоэлектронный — Понятие 189
Трансформаторы — Интенсивность отказов 309, 310
Триггер — Принципиальная схема 263
 — на транзисторах с компенсирующим переходом — Принципиальная схема 224

У

Ударно-вибрационные факторы — Виброускорения при движении автомобиля 88, 89
 — Группы неровностей и закономерности в их размещении на поверхности дороги 85, 87—89
 — Классификация и характеристики 79—84

— Колебания летательных аппаратов 90—95
 — Колебания судовых конструкций 89, 90
 — Комплексное воздействие механических нагрузок и климатических факторов 122—131
 — Оценка последствий воздействия механических нагрузок 95—107
 — Схематическая характеристика ровности дорожной поверхности 87
 — Характеристика качественного состояния дорожных поверхностей 86
 — Характеристика комплекса факторов, воздействующих на радиоэлектронную аппаратуру 126—131
Удары — Ослабление воздействия 110, 111 — см. также *Нагрузки ударные*
Умножители фотоэлектронные — Энергетические зависимости чувствительности 148
Уравнение Аррениуса 231
Устройства вращающиеся — Причины отказов 300, 301

Ф

Факторы биологические — Воздействие на изделия 44, 45
 — вибрационные — Классификация и параметры 81
 — внешние воздействующие 10
 — климатические — см. *Климатические факторы*
 — космического пространства — Излучение Земли, Луны и планет 166—169 — Излучение Солнца 165, 166 — Собственное тепловое излучение Земли 167, 168 — Температура лунной поверхности 168—171
 — ударно-вибрационные — см. *Ударно-вибрационные факторы*
Формула Симпсона 321, 322
Фунгициды — Рекомендации по применению 71, 72

Ц

Цинк — Стойкость к коррозии 42

Ч

Частицы микрометеорные — Понятие 172

Ш

Шарикоподшипники — Показатели надежности 285—288 — Пример определения долговечности 286—288

Э

Электризация космических аппаратов—

Способы защиты от электризации 193

— в ионосфере 190, 191

— на больших высотах 191, 193

Электродвигатели — Интенсивность отказов 311

Электроны вторичные 189

Электрорадиоизделия — Виды радиационных эффектов 195—199

— Интенсивность отказов 308—311

— Колебательные модели 264—266

— Общие принципы проектирования схем, обладающих максимальной чувствительностью к радиационным изменениям 221—228

— Показатели стойкости к воздействию ионизирующих излучений 214—221

— Сводная характеристика радиационных эффектов 222

Энергия Гиббса — Понятие 230

Эффект ионной тени 190