

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

## **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-38 01 01  
«Механические и электромеханические приборы и аппараты»

*Учебное электронное издание*

**М и н с к 20 1 2**

УДК 621.391.1 (075.8)

**А в т о р ы :**

*С.С. Савицкий*

**Рецензенты:**

*В.Г. Смирнов*, заместитель директора БелГИПК работников метрологии и стандартизации, кандидат технических наук, профессор;

*В.Г. Лысенко*, доцент кафедры «Стандартизация и метрология» БНТУ, кандидат технических наук, доцент;

Учебно-методическое пособие содержит методы и оборудования для капиллярных методов, радиоскопии, тепловых методов, оптического и радиационного метода оптического контроля.

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.(017) 293-91-97 факс (017) 292-91-37  
Регистрационный № БНТУ/ПСФ80-15.2012

© БНТУ, 2012

© Савицкий С.С., 2012

## Оглавление

1.	КАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД ДЕФЕКТОСКОПИИ .....	5
1.1.	Физические основы метода.....	5
1.2.	Технология и средства контроля.....	7
1.3.	Чувствительность капиллярного контроля и ее проверка.....	12
1.4.	Объекты контроля. ....	14
2.	ТЕЧЕИСКАНИЕ.....	16
2.1.	Физические основы методов течеискания.....	16
2.2.	Способы и схемы контроля.....	20
2.3.	Средства контроля.....	22
2.4.	Масс-спектрометрический метод.....	25
2.5.	Галогенный метод. ....	29
2.6.	Пузырьковый метод. ....	31
2.7.	Манометрический метод.....	34
3.	РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ.....	35
3.1.	Основные устройства для формирования и обработки СВЧ-сигналов и полей. ....	35
3.2.	Индикаторы и преобразователи радиоволнового излучения. ....	38
3.3.	Геометрический метод радиоволнового контроля.....	41
3.4.	Радиоволновой контроль по прошедшему излучению. ....	44
3.5.	Радиоволновая толщинометрия. ....	47
3.6.	Дефектоскопия радиоволновым методом. ....	50
3.7.	Параметрические методы контроля.....	55
3.8.	Многопараметровый радиоволновой контроль. ....	57
3.9.	Визуализация радиоволновых полей.....	59
4.	ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ.....	64
4.1.	Общие вопросы теплового неразрушающего контроля.....	64
4.2.	Индикаторы тепловых полей.....	65
4.3.	Первичные преобразователи тепловых величин. ....	67
4.4.	Аппаратура одноточечного теплового контроля.....	73
4.5.	Сканирующие радиационные пирометры. ....	78
4.6.	Контроль тепловым методом физических и геометрических параметров.....	81
4.7.	Дефектоскопия и интроскопия тепловыми методами.....	84
5.	ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ .....	89
5.1.	Общие вопросы оптического неразрушающего контроля.....	89
5.2.	Первичные преобразователи оптического излучения.....	90
5.3.	Визуальный контроль качества. ....	92
5.4.	Визуально-оптический контроль.....	95
5.5.	Применение оптических устройств для контроля качества. ....	99

5.6.	Эндоскопы.....	102
5.7.	Фотометрические методы.....	105
5.8.	Контроль телевизионными методами.....	108
5.9.	Интерференционные методы контроля качества.....	111
6.	РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА.....	113
6.1.	Общие вопросы радиационного контроля качества.....	113
6.2.	Источники корпускулярного излучения.....	117
6.3.	Источники рентгеновского излучения.....	123
6.4.	Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.....	130
6.5.	Индикаторы ионизирующего излучения.....	136
6.6.	Первичные преобразователи ионизирующего излучения в электрические сигналы.....	141
6.7.	Дефектоскопия и контроль внутреннего строения.....	145
6.8.	Рентгеновский контроль.....	153
6.9.	Гамма-дефектоскопы.....	161
6.10.	Радиационная толщинометрия в прошедшем излучении.....	165
6.11.	Толщиномеры многослойных изделий.....	168
6.12.	Контроль физических свойств материалов.....	173
7.	ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ДЕТАЛЕЙ АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ.....	175
7.1.	Ультразвуковые колебания и их основные свойства.....	175
7.2.	Акустические методы и средства неразрушающего контроля.....	176
7.3.	Пьезоэлектрические искатели.....	178
8.	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	179
8.1.	Электромагнитный метод неразрушающего контроля.....	179
8.2.	Физические основы электромагнитного метода измерений.....	180
	ЛИТЕРАТУРА.....	183

# 1. КАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

## 1.1. Физические основы метода

Капиллярный метод дефектоскопии основан на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных и сквозных несплошностей объекта контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуально или с помощью преобразователя. Он позволяет обнаруживать поверхностные дефекты значительно быстрее и чувствительнее, чем визуальный осмотр.

Основными документами, регламентирующими применение метода, являются ГОСТ 18442—80 «Контроль неразрушающий; Капиллярные методы контроля», ГОСТ 23349—78 «Дефектоскопы капиллярные. Общие технические требования и методы испытаний» и ГОСТ 24522—80 «Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения».

Процесс капиллярного контроля состоит из трех главных операций: пропитка контролируемого объекта проникающей жидкостью— *индикаторным пенетрантом* (в дальнейшем просто пенетрантом); удаление избытка пенетранта с поверхности; регистрация наличия его в полости дефектов с помощью проявителя либо датчиков.

Капиллярный метод основан прежде всего на явлении *смачивания*. Явление это вызывается взаимным притяжением атомов или молекул жидкости либо твердого тела (в газах тепловое движение частиц преодолевает это притяжение). В результате минимум свободной энергии достигается в жидкости или твердом теле, когда поверхность их минимальна. Таким образом поверхности стремятся сократиться и возникают силы поверхностного натяжения.

Рассмотрим каплю жидкости, лежащую на поверхности твердого тела (рис. 1.1).

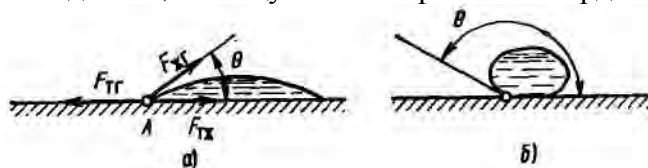


Рис. 1.1 Смачивание (а) и несмачивание (б) поверхности твердого тела жидкостью

Выделим элементарный цилиндр в тройной точке А, где соприкасаются твердое тело, жидкость и окружающий газ. На единицу длины этого цилиндра действуют три силы поверхностного натяжения: твердое тело — газ  $F_{TG}$ , твердое тело — жидкость  $F_{TJ}$  и жидкость — газ  $F_{JG}$ . Когда капля находится в состоянии покоя, равнодействующая проекций этих сил на поверхность твердого тела равна нулю:

$$F_{JG} \cos \alpha + F_{TJ} - F_{TG} = 0;$$
$$\cos \alpha = (F_{TG} - F_{TJ}) / F_{JG}.$$

Если  $F_{TG} > F_{TJ}$ , то угол  $\alpha$  острый. Это значит жидкость смачивает твердое тело (рис. 1.1, а): чем меньше  $\alpha$ , тем сильнее смачивание. В пределе  $F_{TG} > F_{TJ} + F_{JG}$  означает, что дробь  $(F_{TG} - F_{TJ}) / F_{JG}$  больше единицы, чего не может быть, так как косинус угла всегда по модулю меньше единицы. Предельный случай будет соответствовать полному смачиванию, т. е. растеканию жидкости по всей поверхности твердого тела.

Если  $F_{TJ} > F_{JG}$ , то  $\cos \alpha$  отрицателен, следовательно, угол  $\beta$  тупой (рис. 1.1, б). Это означает, что жидкость не смачивает твердое тело. В пределе  $F_{TG} > F_{TJ} + F_{JG}$ , что соответствует полному несмачиванию.

Рассмотрим капиллярную трубку диаметром  $2r$  погруженную в жидкость (рис. капиллярных сил 1.2).

Под действием капиллярных сил смачивания жидкость в трубке поднимется на высоту  $h$  над поверхностью. Оценим давление, создаваемое силами смачивания. Они действуют на единицу длины окружности мениска. Суммарная их величина  $F_{JG} \cos \alpha$ . Этой силе противодействует вес столба  $g r^2 h$ , где  $\rho$  — плотность,  $g$  — ускорение силы

тяжести. В состоянии равновесия  $F_{жг} \cos \theta = \rho g r^2 h$ . Капиллярные силы действуют по линии окружности мениска. Однако для жидкостей более привычное понятие — давление.

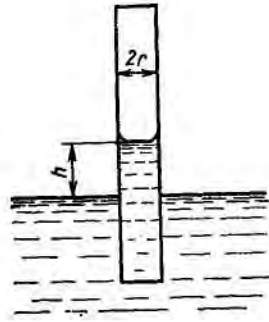


Рис. 1.2 Схема вычисления давления капиллярных сил

Для перехода к давлению поделим обе части равенства на площадь трубки:

$$P = \rho g h = 2 \cos \theta F_{жг} / r,$$

где  $P$  — давление столба. Отметим, что чем меньше радиус капилляра, тем больше капиллярное давление.

На рис. 1.3 показана смачивающая жидкость — пенетрант, попавшая в трещину. Размер трещины в месте, где расположен нижний мениск жидкости, обозначим  $r_2$ , а вблизи устья —  $r_1$ . Разность давлений, вызываемая различием  $r_1$  и  $r_2$ , составляет:

$$P_2 - P_1 = 2F_{жг} \cos \theta (1/r_2 - 1/r_1).$$

Она уравновешивается давлением воздуха в замкнутом объеме, собравшегося вблизи вершины трещины. Разность тем больше, чем больше сила поверхностного натяжения  $F_{жг}$ , меньше угол (зависящий от смачивающих свойств жидкости) и больше различие в размерах  $r_1$ ,  $r_2$ . Именно эти величины определяют чувствительность капиллярного метода. Из (1.2) следует, что им лучше будут выявляться глубокие, расширяющиеся к устью дефекты.

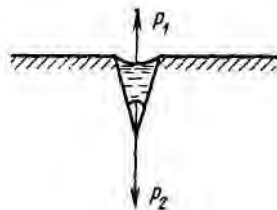


Рис 1.3. Заполнение трещины пенетрантом

Если на поверхность пенетранта поместить пористое вещество (порошкообразный проявитель), то образуется система из мелких капилляров с менисками малой кривизны. Возникнет добавочное давление в направлении  $P_1$ , жидкость выйдет из трещины и смочит частицы проявителя. Здесь действует явление *сорбции*, т. е. собирания. Собираание жидкости на поверхности частиц проявителя путем их смачивания — явление *физической адсорбции*. Реже используется химическое взаимодействие пенетранта с веществом снаружи и внутри частиц проявителя. Это явление *химической абсорбции*. Иногда применяют не порошкообразный, а пленочный или красящий проявитель. Принцип действия его другой — *диффузионный*, т. е. передача пенетранта на проявитель основывается на явлении диффузии. Скорость проявления определяется скоростью диффузии пенетранта.

Видимая в результате проявления индикация дефекта больше его реальных размеров. Разница между видимым и реальными размерами дефекта зависит от количества пенетранта, накопленного в полости дефекта, и времени проявления. Через несколько минут после начала проявления индикаторный след более точно соответствует реальным размерам дефекта, затем он расплывается. При этом индикация становится более

заметной.

## 1.2. Технология и средства контроля

Общая технология капиллярного контроля в виде схемы показана на рис. 1.4, приводим основные ее этапы.

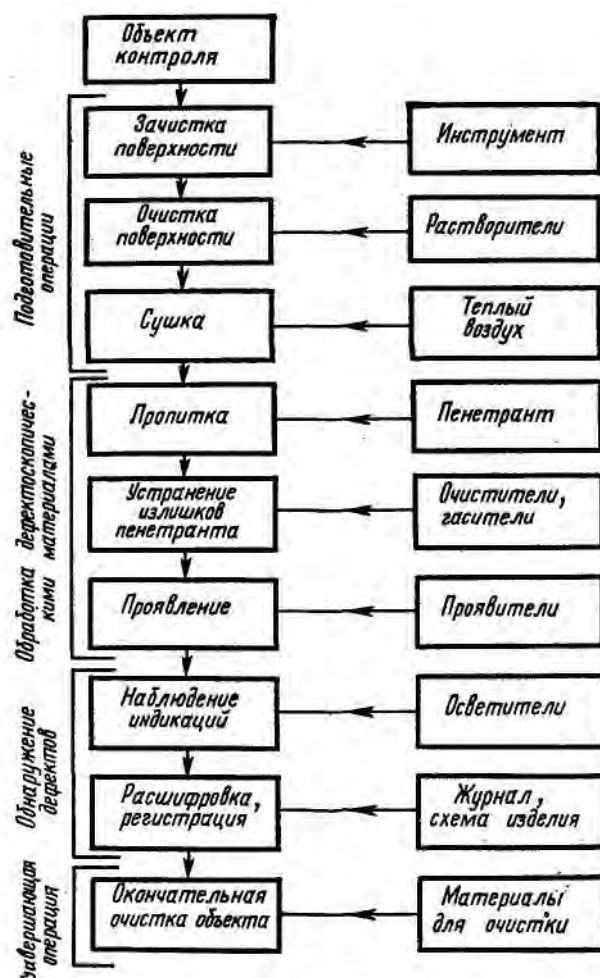


Рис. 1.4. Технологическая схема капиллярного контроля

**Подготовительные операции** имеют целью вывести на поверхность изделия устья дефектов, устранить возможность возникновения фона и ложных индикаций, очистить полость дефектов. Механическую зачистку производят, когда поверхность изделия покрыта окалиной, лаком, краской или силикатом. Например, поверхность некоторых сварных швов покрыта слоем твердого силикатного флюса типа «березовая кора». Такие покрытия закрывают устья дефектов. Зачистку производят абразивной шлифовкой, металлическими щетками, механообработкой. Шлифовку или механообработку производят, если поверхность очень неровная, что может вызвать появление светящегося или окрашенного фона и ложных индикаций. Окисную пленку на поверхности удаляют травлением, когда она плохо сцеплена с поверхностью контролируемого объекта. Если сцепление хорошее, то ее можно не удалять. Гальванические покрытия обычно не удаляют, контроль рекомендуют проводить до и после нанесения покрытия.

Очистка поверхности органическими растворителями (ацетоном, бензином, четыреххлористым углеродом) нужна для удаления с поверхности объекта контроля и из полости дефектов жира и загрязнений. Для ускорения высыхания растворителя изделие сушат при температуре более 100°C. Более сложные способы очистки применяют, чтобы полнее очистить полость дефекта.

Это химическая очистка (травление слабыми растворами кислот), электрохимиче-

ская очистка (травление под воздействием электрического поля), ультразвуковая очистка, (воздействие ультразвуком мощностью порядка 1 кВт).

**Обработка дефектоскопическими материалами** составляет основную часть процесса контроля. Пропитку пенетрантом выполняют погружением в ванну, намазыванием кистью. Очень удобный способ распыления из аэрозольного баллона. Во всех случаях пенетрант оставляют на поверхности на 10—20 мин для лучшего его проникновения в полость дефектов. Существуют способы интенсификации пропитки, например воздействие мощными ультразвуковыми колебаниями, повышенным давлением. Пропитка в вакууме способствует удалению воздуха из полости дефекта и более глубокому проникновению пенетранта.

К пенетрантам предъявляют целый ряд требований. Хорошая смачиваемость — главное из них. Низкая вязкость пенетранта нужна для сокращения времени пропитки. Требованиям смачиваемости и низкой вязкости удовлетворяют такие вещества, как керосин, бензин, жидкие масла, спирт, бензол, скипидар.

Третье важное требование к пенетранту — возможность и удобство обнаружения индикаций после проявления. *Цветные* пенетранты обладают цветовым контрастом в видимом свете, *люминесцентные* способны светиться под действием ультрафиолетового облучения. Для придания цветового контраста в названные выше вещества добавляют органические жирорастворимые темно-красные красители типа 5С, Ж, «Судан». Люминесцирующими свойствами обладают некоторые из смачивающих веществ: нориол, трансформаторное масло. Люминесценция вызывается или усиливается введением специальных добавок. Люминесцентный метод обеспечивает несколько более высокую чувствительность, чем цветной, но требует ультрафиолетовых облучателей, выполняется в условиях затемнения. Существуют *люминесцентно-цветные* пенетранты, которые можно обнаруживать обоими способами. Пример такого пенетранта — родамин С, растворимый в этиловом спирте.

Ранее находила широкое применение так называемая «керосиновая проба». Этот способ контроля состоит в использовании керосинового пенетранта, проявляемого порошком мела, на котором выступивший керосин оставляет темные следы. Такой пенетрант относят к классу *ахроматических* или *яркостных*.

Существуют также пенетранты, обнаружение которых в дефектах достигается с применением более сложных эффектов, чем визуальное наблюдение. Например, пенетрант в виде спирта с добавками радиоактивного хлористого цезия позволяет обнаруживать дефекты по радиоактивному излучению. Метод очень чувствителен, но опасен для персонала. Цезий применяют с учетом малого периода его полураспада. Применяют также пенетранты, обнаруживаемые по их электропроводности с помощью вихретокового датчика. Такие пенетранты (раствор олеиновой кислоты и окиси магния в керосине) применяют при контроле неэлектропроводящих материалов.

Специфическим видом пенетранта является *фильтрующаяся суспензия*. В жидкий пенетрант добавляют нерастворимый порошок

с диаметром частиц 0,01—0,1 мм, обладающий цветовым контрастом или люминесценцией. Порошок не проникает в дефект, а фильтруется и скапливается у его устья. Такой пенетрант не требует проявления.

Устранение излишков пенетранта с поверхности — следующая операция. Она необходима для того, чтобы исключить возможность появления ложных индикаций после проявления и увеличить контраст при обнаружении дефектов. Удаляя с поверхности пенетрант, важно не вымыть его из полостей дефектов. Способ устранения зависит от состава и свойств поверхности материала. Применяют протирку, промывку, обдувку опилками, песком и гашение. Чаще всего используют промывку веществами, которые называют *очистителями*. Очистителем может являться вода с добавками поверхностно-активных веществ (эмульгаторов), например стирального порошка, соды, ОП-7. В качестве очистителей также применяют органические растворители (ацетон, спирт с



ОП-7, керосин с жидким маслом), если пенетрант плохо растворяется в воде.

После промывки изделие сушат, для ускорения сушки обдувают теплым воздухом. Затем рекомендуется проверить путем осмотра, не осталось ли следов пенетранта на поверхности.

В некоторых случаях вместо промывки применяют операцию *гашения*. Это устранение люминесценции или цветового контраста индикаторного пенетранта в результате химического воздействия *веществ-гасителей*. Например, для нориола гасителем является ро-зерцин.

С помощью гасителей устраняют фон, возникающий, когда на поверхности изделия имеются неглубокие неровности, например, от механообработки. В этом случае поверхность покрывают 5%-ным раствором розерцина в воде с добавкой ацетона. Гаситель действует на тонкий поверхностный слой пенетранта, в частности на тот, который остался в неглубоких неровностях. На пенетрант, находящийся в полостях дефектов, более глубоких, чем неровности, гаситель не действует. После извлечения из дефектов проявителем такой пенетрант сохраняет свои контрастные свойства.

Проявление — это процесс образования рисунка индикаций в местах наличия дефектов. Проявление порошком, как отмечалось ранее, основано на явлении физической адсорбции. В качестве проявителя используют белый тонкодисперсный порошок окиси магния, углекислого магния, углекислого кальция, талька (сухой способ). Порошок обычно наносят распылением струей воздуха. Чаще применяют суспензию порошка углекислого магния или каолина в воде либо спирте (мокрый способ). Суспензию наносят погружением в нее объекта контроля, кистью или распылением из аэрозольного баллона.

Проявление лаком или краской основано на явлении диффузии. Например, применяют белый лак состава 30% нитроэмали, 40%

ацетона, 30% медицинского коллодия. Такой лак быстро сохнет и образует пленку, которую можно снять с изделия и использовать как документ по результатам контроля. Иногда в качестве проявителя используют пленку с проявляющим липким слоем.

Проявитель наносят тонким, но сплошным слоем. Тонкий слой проявителя (8—20 мкм) легче пропитывается малым количеством пенетранта, сохранившимся в полости дефекта, обеспечивает высокий контраст индикаций и чувствительность к слабо раскрытым неглубоким дефектам.

После нанесения проявителя дают выдержку в 10—20 мин. Для ускорения проявления иногда применяют подогрев до 40—50°C, вакуумирование, вибрацию (для выявления усталостных трещин).

Важное требование (ГОСТ 18442—80) к дефектоскопическим материалам — это их *совместимость*. Выбранный пенетрант должен хорошо смачивать поверхность контролируемого материала, смываться очистителем, проявляться рекомендуемым проявителем. Поэтому дефектоскопические материалы рекомендуются в ОСТах или инструкциях в виде наборов или комплектов.

**Осмотр объекта контроля** — ответственная операция. При цветном способе обязательное требование — хорошее освещение поверхности объекта контроля. При использовании люминесцентных ламп дневного света общая освещенность рабочего места должна быть 300—750 лк, а комбинированная (общая и местная) освещенность— 750—2500 лк. При использовании ламп накаливания освещенность соответственно 200—500 и 500—3000 лк, часто применяют бестеневую систему освещения из нескольких ламп. При использовании люминесцентных ламп принимают меры для устранения пульсаций. Требования по освещенности конкретизированы в 2.3.

При люминесцентном способе контроля осмотр проводят в затемненном помещении с подсветкой видимым светом не более 10 лк. Для люминесценции индикаций используют *ультрафиолетовое (УФ) облучение* ртутными лампами с длиной волны 315—400 нм. Применяют маломощные лампы типа ЛУФ-4-1 и более мощные типы ДРУФ.

Лампы имеют колбы из кварцевого стекла<sup>1</sup> пропускающего ультрафиолетовые лучи, и темные светофильтры, не пропускающие видимое излучение. Лучшие типы ламп имеют зеркальный рефлектор, концентрирующий облучение в направлении места осмотра объекта контроля.

Промышленностью освоен выпуск нескольких типов аппаратов для УФ-облучения. Для контроля мелких и средних деталей применяют стационарные установки. Например, установка КД-20Л имеет девять источников типа ДРУФ-125. Облучатель подвижен в трех направлениях, а контролируемое изделие располагают на столе переменной высоты. Для контроля крупногабаритных изделий применяют переносные установки. Например, установка типа КД-33Л с источником ДРУФ3-125 (зеркальным рефлектором) имеет массу 10 кг, а выносной осветитель — около 2 кг.

УФ-облученность объекта контроля должна лежать в пределах 750—3000 мкВт/см<sup>2</sup> (см. 1.3). Ее проверяют по схеме рис. 1.5, а.

В затемненном помещении под проверяемым УФ-облучателем 1 устанавливают люминесцентный экран, изготовленный по технологии, изложенной в ГОСТ 18442—80. Расстояние  $D$  должно быть равным расстоянию от облучателя до места контроля. Параллельно экрану устанавливают датчик люксметра 2 типа Ю-16 или Ю-116, перед входным окном которого располагают светофильтр 3 из стекла типа ЖС4 толщиной 5 мм. Светофильтр поглощает УФ и пропускает видимое излучение. Облученность определяют по показаниям лаксометра в относительных единицах, за относительную единицу принимают облученность, при которой люминесцирующий экран излучает световой поток, создающий освещенность в 1 лк.

Проверяют также подсветку объекта контроля видимым светом, излучаемым УФ-облучателем<sup>1</sup>. Для этого датчик 2 с фильтром 3 располагают на месте экрана (рис. 1.5, б). Подсветка не должна превышать 30 лк.

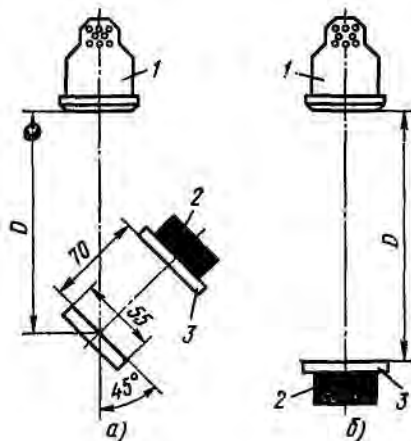


Рис. 1.5. Схема проверки:

а — УФ-облученности; б — освещенности видимым светом от УФ-облучателя.

Осмотр поверхности рекомендуют проводить в три этапа:

1. Оценка качества изображения. При этом смотрят, нет ли фона, не покрытых проявителем участков, отслаивания проявителя, следов пыли. Если такие недостатки обнаружены, обработку дефектоскопическими материалами повторяют после прогрева изделия до 40—50°C.

2. Оценка общего рисунка дефектов. Если имеются индикации, то по их характеру можно судить о природе дефектов. Волосовины, закаты, непровар и некоторые виды трещин представляются в виде четких, иногда прерывистых линий, при отношении длины к ширине линий, как правило, больше трех. Шлифование и межкристаллитные коррозионные трещины представляются в виде сетки. Поры, выкрашивания, язвенная коррозия — в виде точек, звездочек.

3. Детальное изучение отдельных индикаций часто проводят с помощью лупы. Важно отличить дефекты от ложных индикаций, вызываемых неровностями поверхно-

сти, заусенцами, глубокими рисками от механической обработки, следами краски или масла.

В сомнительных случаях участки, подозрительные на дефекты, подвергают ручной шлифовке или шабровке (если это допустимо) и дополнительно контролируют. Чем глубже дефект, тем быстрее появляется изображение, больше яркость и размер индикаций. С учетом этого полезно производить осмотр 2 раза: через 9—10 мин после начала проявления, когда глубокие дефекты дают четкие индикации, правильно отображающие форму дефекта, и в конце проявления, когда индикации от глубоких дефектов расплылись, но стали более заметными и появились индикации от неглубоких дефектов.

Результаты контроля заносят в журнал и составляют заключение по контролю. Изображение дефектов приводят на схеме изделия. Приняты следующие обозначения дефектов: А — единичные, Б — групповые, расположенные в ограниченных зонах, В — повсеместно распространенные. По ориентации относительно главных осей объекта контроля дефекты делят на || — параллельные,  $\perp$  — перпендикулярные, < — расположенные под углом, без знака — дефекты, не имеющие определенной ориентации. По допустимости: без знака — недопустимые, обведенные кружком — допустимые. Сквозные дефекты отмечают звездочкой. Например,  $\perp$  — групповые допустимые дефекты, расположенные перпендикулярно оси, А — единичный недопустимый дефект без преобладающей ориентации.

**Окончательную очистку** объекта после контроля осуществляют влажной протиркой, промывкой водой или растворителем, обдувкой песком или другим абразивным материалом. Пленочный проявитель отклеивают, иногда выжигают нагреванием. Если на эксплуатационные качества объекта контроля следы процесса капиллярной дефектоскопии не влияют, то операцию очистки не проводят.

**Расход дефектоскопических материалов** зависит от качества поверхности контролируемого объекта, ее расположения, консистенции материалов, способа их нанесения. Расход пенетранта 0,3—0,5 л/м<sup>2</sup>. Большее значение соответствует неровной поверхности объекта контроля, вертикальному расположению поверхности. Очистителя расходуется в 2—3 раза больше, чем пенетранта. Расход порошкообразного проявителя 40—50 г, а суспензии — 300 г на 1 л пенетранта. При использовании пенетранта и проявителя в аэрозольной упаковке расход их возрастает приблизительно в 1,5 раза.

**Требования техники безопасности** при проведении капиллярного контроля указаны в ГОСТ 18442—80. Некоторые легковолетучие и токсичные (хотя и слабо) дефектоскопические материалы требуют хорошей вентиляции помещения или участка, где проводят контроль, а также применения спецодежды, в частности резиновых перчаток, фартуков. Дефектоскопические материалы держат в плотно закрытой таре. Отходы производства регенерируют, сливают в сборники или сжигают. Соблюдают также противопожарные требования и меры безопасности при работе с электрооборудованием.

Дополнительные требования в соответствии с ГОСТ 23349—78 выполняют при работе с УФ-облучателями. Спецодежда должна закрывать лицо, грудь, руки. Глаза закрывают очками со стеклами из светофильтров ЖС4 или ТС3 толщиной не менее 3,5 мм. Сами облучатели снабжают устройствами, защищающими лицо работающих от прямых лучей. Установлены максимально допустимые облучение и дозы облучения за смену.

Биологическую активность УФ-облучения оценивают по покраснению (эритеме) кожи. Отсюда введены понятия максимальной эритемной облученности (измеряют в мэр/м<sup>2</sup>) и максимальной эри-темной дозы (мэр-ч/м<sup>2</sup>). При использовании специализированных ламп в черных колбах допустимые значения максимальных эри-темных облученности 100 мэр/м<sup>2</sup>, а дозы — 160 мэр-ч/м<sup>2</sup>. Если, например, максимальная облученность 50 мэр/м<sup>2</sup>, то работать при таком облучении можно не более 3 ч (3X50=150 > 160 мэр-ч/м<sup>2</sup>). При использовании неспециализированных источников УФ-облучения эти пределы выше.

**Классификацию методов** капиллярного контроля осуществляют по типам пенетрантов, прежде всего по способам их индикации после проявления. К основным методам относят люминесцентно-цветной, люминесцентный, цветной, яркостный (ахроматический), фильтрующейся суспензии. В этом перечне методы расположены по мере убывания их чувствительности к слабо раскрытым неглубоким дефектам. В отдельный класс выделяют методы, в которых для индикации пенетранта, оставшегося в полости дефекта, применяют приборные средства: измерители радиационного излучения, электропроводности. Их называют комбинированными, поскольку в них для обнаружения дефектов кроме капиллярного эффекта применяются также другие физические явления.

**Выбор метода** определяется прежде всего требуемой чувствительностью, однако учитывают также экономические и эргономические соображения. Например, для применения люминесцентного метода необходимо затемненное помещение, ультрафиолетовое излучение, оказывающее вредное действие на персонал. В связи с этим применение этого метода целесообразно только тогда, когда требуется достижение высокой чувствительности. В других случаях следует применять цветной или еще более простой и дешевый яркостный методы. Метод фильтрующейся суспензии самый высокопроизводительный, в нем отпадает операция проявления, однако он уступает другим по чувствительности.

Комбинированные методы в силу сложности их реализации применяют довольно редко, только в случае необходимости решения каких-либо специфических задач, например достижения очень высокой чувствительности, автоматизации поиска дефектов, контроля неметаллических материалов. Методы, имеющие низкую чувствительность, например метод керосиновой пробы, применяют, когда возникают трудности с подготовкой поверхности изделия к контролю более чувствительными методами (цветным или люминесцентным).

### **1.3. Чувствительность капиллярного контроля и ее проверка**

Чувствительность капиллярного контроля в большой степени зависит от качества и правильности подбора дефектоскопических материалов, поэтому они проходят предварительную проверку. Смачиваемость и вязкость пенетранта проверяют по диаметру и времени растекания капли на поверхности материала контролируемого объекта. Индикаторные способности проверяют по сравнению с некоторыми стандартными растворами. Для этого 10%-ный раствор пенетранта в растворителе набирают в пробирку и визуально сравнивают его цветовой, яркостный контраст или способность люминесцировать в ультрафиолетовых лучах со стандартным раствором в таких же пробирках. Кроме того, смотрят, не расслаивается ли пенетрант в пробирке, нет ли в нем взвешенных частиц, измеряют его плотность, температуру кипения и воспламенения.

Проявители проверяют на белизну по сравнению с баритовой пластиной как эталонном белизны. Дисперсность проверяют, просеивая через сито. Порошковый и красящий проявители для люминесцентного контроля проверяют визуально в ультрафиолетовых лучах на отсутствие посторонней люминесценции.

Совместную контрастность проявителя и пенетранта проверяют, сравнивая их смесь с чистым проявителем. Обычно начинают с концентрации пенетранта 0,05% по объему. Если контраст недостаточен, то увеличивают концентрацию пенетранта.

Для комплексной проверки чувствительности различных методов дефектоскопии, как правило, применяют стандартные образцы с искусственными дефектами. Для капиллярных методов были попытки создания образцов, в которых дефекты имитировались щелью между хорошо шлифованными плотно сжатыми цилиндрами. Однако даже такие щели оказались чрезмерно большими и плохо воспроизводили условия выявления реальных дефектов. Поэтому ГОСТ 23349—78 для оценки уровня чувствительности рекомендует применять специально отобранный или подготовленный натур-

ный образец объекта контроля или использовать образцы с инициированными трещинами. Технология изготовления таких образцов сводится к тому, чтобы вызвать появление поверхностных трещин заданной глубины.

Часто изготавливают образцы из листовой легированной стали в виде пластин толщиной 3—4 мм. Пластины рихтуют, шлифуют, азотируют с одной стороны на глубину 0,3—0,4 мм и эту поверхность еще раз шлифуют на глубину около 0,05 мм. Благодаря азотированию поверхностный слой становится хрупким. Образцы упруго деформируют либо растяжением, либо изгибом (путем вдавливания шарика или цилиндра со стороны, противоположной азотированной). Усилие деформации плавно увеличивают до появления характерного хруста. В результате в образце возникает несколько трещин, проникающих на всю глубину азотированного слоя. Протяженность и ширину трещин измеряют металлографическим микроскопом.

Изготовленные таким образом образцы аттестуют. Определяют ширину и длину отдельных трещин измерительным микроскопом и вносят их в формуляр образцов. К формуляру прилагают фотографию образца с индикациями дефектов, их хранят в футлярах, предохраняющих их от загрязнения. Обычно в лаборатории имеют образцы рабочие для повседневного использования и контрольные для решения арбитражных вопросов. Стандартные образцы используют не только для проверки дефектоскопических материалов на эффективность совместного применения, но также для определения правильной технологии (времени пропитки, проявления), аттестации дефектоскопистов и определения общей чувствительности контроля.

Таблица 1.1

Класс чувствительности	Минимальная ширина раскрытия дефекта, мкм
1	Менее 1
2	От 1 до 10
3	> 10 > 100
4	> 100 > 500
Технологический	Не нормируют

*Нижний порог чувствительности*, т. е. минимальная величина раскрытия выявленных дефектов, ограничивается тем, что весьма малое количество пенетранта, задержавшееся в полости небольшого дефекта, оказывается недостаточным, чтобы получить контрастную индикацию при данной толщине слоя проявляющего вещества. Существует также *верхний порог чувствительности*, который определяется тем, что из широких, но неглубоких дефектов пенетрант вымывается при устранении его излишков с поверхности.

ГОСТ 18442—80 установлено пять классов чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от размеров дефектов (табл. 1.1).

На выявляемость дефектов оказывает влияние не только раскрытие, но и глубина дефектов, не указанная в ГОСТе. Для достижения высокой чувствительности (низкого порога чувствительности) нужно применять хорошо смачивающие высококонтрастные пенетранты (люминесцентные вместо цветных), лакокрасочные проявители (вместо суспензий или порошков), увеличивать УФ-облученность или освещенность объекта. Оптимальное сочетание этих факторов позволяет обнаруживать дефекты раскрытием в десятые доли мкм, т. е. выше 1-го класса.

В табл. 1.2 приведены рекомендации по выбору способа и условий контроля, обеспечивающих требуемый класс чувствительности. Освещенность приведена комбинированная; первая цифра соответствует лампам накаливания, а вторая—люминесцентным.

Т а б л и ц а 1.2

Класс чувствительности	Способ и условия контроля				Минимальные размеры дефектов, мкм	
	Пенетрант	Проявитель	УФ-облученность, отн. ед.	Освещенность, лк	ширина	глубина
1	Люминесцентно-цветной	Краска	300—100	2000—2500	1	10
1	Люминесцентный	Лак	300—100	—	1—2	10—30
1	Цветной	Краска	—	2000—2500	1—2	10—30
2	Люминесцентный	Суспензия	300—100	—	2—10	20—40
2	Цветной	»	—	—	2—20	30—50
3	Люминесцентный	Порошок	150±50	—	10—30	100—300
3	Цветной	»	—	1500—2000	10—30	200—300
4	Фильтрующей суспензии	—	75±25	500—750	100—200	500

Не следует без необходимости стремиться к достижению более высоких классов чувствительности, поскольку это требует более дорогостоящих материалов, лучшей подготовки поверхности изделия, увеличивает время контроля.

Приведем примеры выпускаемых промышленностью наборов дефектоскопических материалов, обеспечивающих требуемый класс чувствительности. Чувствительность по классу 1 обеспечивает набор для люминесцентной дефектоскопии: пенетрант ЛЖ-6 на основе нориола, очиститель ОЖ-1 на основе спирта и эмульгатора, проявитель ПР-1 на основе белой нитроэмали, коллодия и ацетона. Поверхность изделия должна иметь шероховатость не более 5 мкм. Второй класс чувствительности обеспечивает набор для цветной дефектоскопии: пенетрант К на базе скипидара, бензина и темно-красного красителя, очиститель из маслосеросинового смеси и проявитель М в виде краски. Шероховатость поверхности— не более 10 мкм.

#### 1.4. Объекты контроля

Капиллярными методами контролируют изделия из металлов (преимущественно неферромагнитных), неметаллических материалов и композитные изделия любой конфигурации. Изделия из ферромагнитных материалов контролируют преимущественно магнито-порошковым методом, который более чувствителен, хотя иногда применяют капиллярный метод, если имеются трудности с намагничиванием материала или сложная конфигурация поверхности изделия создает большие градиенты магнитного поля, затрудняющие выявление дефектов.

Капиллярным методом обнаруживают только выходящие на поверхность дефекты, полость которых не заполнена окислами или другими веществами. Чтобы пенетрант не вымывался из дефекта, глубина его должна быть больше ширины раскрытия. К таким дефектам относят трещины, непровары сварных швов, глубокие поры.

подавляющее большинство дефектов, обнаруживаемых при контроле капиллярным методом, может выявляться при обычном визуальном осмотре, особенно если изделие предварительно протравить (дефекты при этом чернеют) и применить средства увеличения. Однако преимущество капиллярных методов состоит в том, что при их применении угол зрения на дефект возрастает в 10—20 раз, а яркостный контраст на 30—50%. Благодаря этому нет необходимости в тщательном осмотре поверхности и время контроля многократно уменьшается.

Капиллярные методы находят широкое применение в энергетике, авиации, судостроении, химической промышленности для контроля основного металла и сварных соединений из сталей аустенитного класса (нержавеющих), титана, алюминия, магния и других цветных металлов. С чувствительностью по 1-му классу контролируют лопатки

турбореактивных двигателей, уплотнительные поверхности клапанов и их гнезд, металлические уплотнительные прокладки фланцев и др. По 2-му классу проверяют корпуса и антикоррозионные накладки реакторов, основной металл и сварные соединения трубопроводов. По 3-му классу проверяют крепеж, по 4-му классу — толстостенное литье. Примеры ферромагнитных изделий, контролируемых капиллярными методами: сепараторы подшипников, резьбовые соединения.

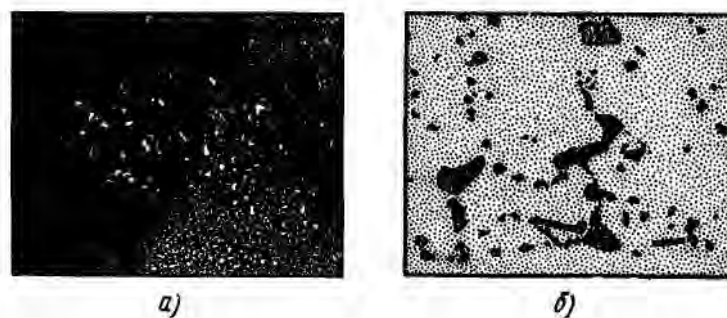


Рис. 1.6. Обнаружение пор методами: а — люминесцентным; б — оптическим.

На рис. 1.6 показана литая лопатка турбины, в которой люминесцентным методом (а) выявлены поры. Визуально (б) такие поры наблюдают лишь при увеличении в 10—50 раз. На рис. 1.7 показаны усталостные трещины и заков на пере лопатки, выявленные люминесцентным (а) и цветным (б) методами.

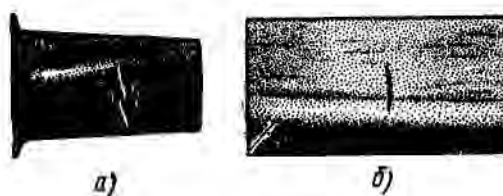


Рис 1.7. Обнаружение трещины в пере турбинной лопатки методами:  
а — люминесцентным; б — цветным.

Желательно, чтобы объект контроля имел гладкую, например, механически обработанную, поверхность. Однако для контроля по 1-му и 2-му классам пригодны также поверхности после холодной штамповки, прокатки, аргоно-дуговой сварки. Иногда для выравнивания поверхности проводят механическую обработку, например поверхности некоторых сварных или наплавленных соединений обрабатывают абразивным кругом для удаления застывшего сварочного флюса, шлаков между валиками шва.

Общее время, необходимое для контроля относительно небольшого объекта типа турбинной лопатки, 0,5—1,1 ч в зависимости от дефектоскопических материалов и требований по чувствительности. Затраты времени (мин) распределяются следующим образом: подготовка к контролю 5—20, пропитка 10—15, удаление избытка пенетранта 3—5, проявление 10—20, осмотр 2—5, окончательная очистка 0—5.

Обычно выдержку при пропитке или проявлении одного изделия совмещают с контролем другого изделия, в результате чего среднее время контроля изделия сокращается в 5—10 раз.

Достоинствами капиллярного метода являются:

1. Простота (для выполнения операций контроля не требуется высокой квалификации персонала).
2. Высокая чувствительность к трещинам, порам.
3. Универсальность (возможен контроль изделий разной формы из различных материалов).
4. Высокая достоверность (при правильной технологии проверки ошибки маловероятны).
5. Наглядность результатов проверки.

Основные недостатки метода:

1. Трудоемкость и длительность операций контроля единичных изделий по сравнению, например, с магнитопорошковым методом. По сравнению с визуально-оптическим контролем производительность повышается многократно.

2. Выявляются только выходящие на поверхность дефекты с открытой полостью.

3. Результаты зависят от таких субъективных качеств контролера, как добросовестность, внимательность.

4. Необходимость применения мероприятий техники безопасности для предотвращения вредного воздействия на организм некоторых дефектоскопических материалов и интенсивного УФ-облучения.

Перспективы развития капиллярных методов заключаются в механизации и автоматизации контроля. Для контроля поточной продукции создают участки механизированного контроля, на которых изделие проходит через ряд установок, осуществляющих последовательно весь технологический процесс. Очень перспективно в этом отношении применение промышленных манипуляторов (роботов) адаптивного типа.

При автоматизации контроля главное затруднение вызывает операция осмотра проконтролированной поверхности. Созданные для этой цели микропроцессорные системы распознавания дефектов недостаточно эффективны. Более простое решение проблемы — передача телевизионного изображения объекта контроля с рисунком индикаций. Это позволяет устранить облучение дефектоскописта ультрафиолетовым светом.

Значительные исследования проводят по повышению чувствительности и сокращения времени контроля. Например, применяют ультразвук или предварительное вакуумирование при пропитке пенетрантом; воздействуют теплом, вибрацией, ультразвуком и вакуумом для интенсификации процесса проявления, применяют более сильное освещение (в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах) для облегчения процесса осмотра поверхности.

## 2. ТЕЧЕИСКАНИЕ

### 2.1. Физические основы методов течеискания

*Течеисканием* называют вид неразрушающего контроля, обеспечивающий выявление сквозных дефектов в изделиях и конструкциях, основанный на проникновении через такие дефекты пробных веществ. Часто термин течеискание заменяют термином «контроль герметичности». *Герметичностью* называют свойство конструкций препятствовать проникновению через их стенки жидкости, газа или пара. Абсолютно герметичных конструкций не бывает, поэтому конструкцию называют герметичной, если проникновение газа или жидкости через нее настолько мало, что им можно пренебречь в рабочих условиях. В технике применяется также термин *непроницаемость* — способность конструкции не пропускать воду или другие жидкости.

Основными регламентирующими документами по применению методов течеискания являются ГОСТ 24054—80 «Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытания на герметичность. Общие требования», ГОСТ 3285—77 «Корпуса металлических судов. Методы испытания на непроницаемость и герметичность» и ГОСТ 2690—85 «Техника течеискания. Термины и определения».

Методы течеискания основаны на применении *пробных веществ*, проникающих через течи и индицируемых средствами течеискания. В качестве пробных веществ применяют жидкости, газы, пары легколетучих жидкостей. В зависимости от пробного вещества методы разделяют на жидкостные или газовые. Более широко используют газы, обеспечивающие более высокую чувствительность.

Методами течеискания выявляют течи, которые определяют как канал или пористый участок перегородки, нарушающие ее герметичность. Процесс проникновения газа через перегородку в объект контроля называют *натеканием*.



Помимо сквозных дефектов, которыми являются упомянутые каналы, пробные вещества могут проникать через перегородки в результате диффузии, например стекло или резина проницаемы для гелия.

Наиболее чувствительные методы течеискания основаны на применении *вакуумной техники* [13]. Повышение давления газа внутри откачанного объекта помимо натекания может быть связано с *газовыделением*, т. е. выделением газа, ранее адсорбированного внутренними поверхностями вакуумной системы. Для устранения газовыделения, мешающего контролю, применяют обезгаживание, обычно заключающееся в нагреве системы в процессе откачки. В большинстве случаев для контроля перегородки методами течеискания по сторонам ее создают разность давлений. Напомним, что *давление* измеряют с паскалях.  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ . Давление выше атмосферного ранее было принято измерять в атмосферах ( $\text{кгс/см}^2$ );  $1 \text{ Па} = 1,019 \cdot 10^{-5} \text{ ат}$ . Давление близкое к атмосферному или меньшее его ранее измеряли в миллиметрах ртутного столба:  $1 \text{ Па} = 7,5006 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$  *Количество газа* определяют по формуле:

$$q = PV,$$

где  $P$  — давление, Па;  $V$  — объем газа,  $\text{м}^3$ .

Поток газа  $Q$  определяют как количество газа, протекающее через некоторое сечение в единицу времени  $t$ :

$$Q = PV/t,$$

где  $Q$  — в единицах СИ измеряют в  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} = \text{Н} \cdot \text{м} / \text{с} = \text{Вт}$ . Таким образом, поток газа измеряют в ваттах.

В смеси газов концентрацию каждого компонента определяют отношением количества этого компонента к количеству  $q$  газа в целом:

$$\gamma_k = q_k/q.$$

Объем, занимаемый смесью и всеми ее компонентами, имеет постоянное значение, поэтому

$$\gamma_k = P_k/P; \quad P_k = \gamma_k P,$$

где величину  $P_k$  называют *парциальным давлением* компонента в смеси газов.

I — Рассмотрим течение газа по трубе, давления на концах которой равны  $P_1$  и  $P_2$ . Несмотря на внешнюю простоту, задача о расчете количества газа, протекающего через такую трубу, относится к одной из самых сложных в физике и не решена в полном объеме вплоть до настоящего времени.

Даже в простом случае прямого участка трубы поток очень сильно изменяется в зависимости от геометрических размеров сечения трубы, среднего значения давления и природы газа. При низких давлениях законы течения зависят от соотношения диаметра  $d$  трубы и средней длины свободного пробега молекул газа  $X$ . Напомним, что  $X$  обратно пропорциональна давлению. Для воздуха  $X = 0,0375 P^{-1}$  (здесь  $X$  — в м, а  $P$  — в Па).

Состояние газа, когда длина свободного пробега соизмерима с размерами сосуда или диаметром трубы, называют *средним вакуумом*. Приняв, что этот размер лежит в диапазоне 0,5—500 мм; найдем, что средний вакуум соответствует давлению от 0,1 до 100 Па. Большие значения давлений (вплоть до атмосферного) называют *низким вакуумом*, а меньшие значения давлений — *высоким вакуумом*.

Если диаметр трубы значительно меньше длины свободного пробега (высокий вакуум), то молекулы проходят через трубу, практически не сталкиваясь между собой. Такое течение называют молекулярным потоком газа и рассчитывают по формуле Кнудсена:

$$Q = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \frac{d^3}{l} (P_2 - P_1).$$

Здесь  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $m$  — масса молекулы газа;  $l$  — длина участка трубы.

Если вакуум низкий, то молекулы значительно чаще сталкиваются между собой, чем со стенками трубы. На хаотическое тепловое движение молекул накладывается направленное движение от высокого к низкому давлению. Газ у стенок трубы останется неподвижным, тормозящим движение соседнего слоя газа благодаря вязкому взаимодействию. Чем ближе к центру трубы, тем быстрее движутся слои газа. Каждый слой обладает своей скоростью (слоистое, *ламинарное* течение). Такое течение называют *вязким* и поток рассчитывают по формуле Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi d^4}{256 \eta l} (P_2^2 - P_1^2),$$

где  $\eta$  — постоянная вязкости (для воздуха при комнатной температуре она равна  $18,1 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ ).

В промежуточном случае, когда  $d$  соизмеримо с  $\lambda$ , течение называют *молекулярно-вязкостным*, формула для расчета потока более сложная (общая формула Кнудсена). Наконец, при больших давлениях, чем в вязком случае, при больших  $d$  и малых  $l$  течение из ламинарного (без завихрений) превращается в *турбулентное*. Расчет потока выполняют по номограммам. В технике испытаний на герметичность этот случай практически не встречается.

Для жидкостей возможно возникновение ламинарного (вязкого) и турбулентного течений. В каналах небольшого поперечного размера при небольшой разности давлений (условия, характерные для прохождения жидкости через течи) реализуется вязкое течение. Закономерности вязкого течения жидкости, так же как и газа, определяются формулой Пуазейля. Расход несжимаемой жидкости определяют ее объемом  $V$ , проходящим через сечение трубы за единицу времени. Величину  $Q$  записать как  $P_{cp} V/t$ . Отсюда получим:

$$V = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} (P_2 - P_1) t.$$

В течеискании в качестве пробного вещества часто используют жидкости, обладающие большой способностью к смачиванию. Проникновение таких жидкостей через тонкие каналы-течи происходит под действием капиллярных сил даже в отсутствие разности давлений. Если разность давлений имеется, то проникновение происходит в результате совместного действия двух сил.

Полученные соотношения позволяют дать количественное определение понятий «течь», «натекание». Откачаем до низкого давления предварительно обезгаженный контролируемый объем, например сосуд. Отключим его от системы откачки и будем следить за повышением давления в сосуде. О степени герметичности можно судить по повышению давления в сосуде, измеряемому манометром (условия соответствуют простейшему варианту манометрического метода контроля). Однако только скоростью изменения давления нельзя определить величину натекания, так как равные количества газа, проникшие в сосуд разного объема, дадут разное повышение давления. Поэтому натекание характеризуют количеством газа, проникшим в объект контроля в единицу времени, т. е. произведением объема сосуда  $V$  на повышение давления в нем  $\Delta P$  за единицу времени  $t$ , отсчитываемого с момента отключения откачки:

$$B = (V \Delta P) / t,$$

где  $B$  количественно определяет натекание, так же как поток, его измеряют в ваттах.

Однако с изменением внешнего давления, температуры или состава газовой смеси натекание будет меняться, хотя негерметичность как свойство сосуда останется неизменной. Отсюда следует необходимость стандартизации условий испытания для определения натекания как степени негерметичности некоторого контролируемого объекта. В качестве стандартного газа берут воздух, внешнее давление принимают равным  $760 \text{ ммрт.ст.} = 101325 \text{ Па}$ , а температуру —  $20^\circ\text{C} = 293 \text{ К}$ . Таким образом, потерю герметичности измеряют количеством воздуха, проникающим в единицу времени из атмосферы

в вакуум в нормальных условиях. Величину  $B$  называют *натеканием в стандартных условиях*.

Перейдем к характеристике отдельной течи. Реальная течь может быть каналом неопределенной формы. К течам также относят пористые участки перегородок. Таким образом, природа течей, а следовательно, характер проникания сквозь них газов могут быть различными. Естественно характеризовать каждую отдельную течь тем же способом, как натекание объекта контроля в целом. При соответствующих условиях эксперимента, обеспечивающих локализацию действия каждой отдельной течи, можно определить для нее величину натекания в стандартных условиях и количественно охарактеризовать ее соответствующей величиной  $B$ . Общее натекание будет равно суммарному натеканию от всех течей.

Размеры течей в виде отверстия диаметром  $d$  (модель вытянутой поры), соответствующие различному натеканию в стандартных условиях, приведены ниже:

Натекание $B_l$ , Вт·мм . . . . .	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3$
Диаметр канала $d$ , мм . . . . .	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$0,22$

Принималось, что длина отверстия  $l$  значительно больше диаметра и равна толщине перегородки (стенки) изделия. Расчет потока выполнен по общей формуле Кнудсена. Поскольку  $l$  входит в знаменатель общей формулы Кнудсена, приведена величина потока  $B$ , умноженная на  $l$ .

Иногда возникает задача по найденному экспериментально или путем расчета значению  $B$  определить натекание  $Q$  в произвольных условиях с помощью формулы вида  $Q = KB$ . Однако при этом возникает трудность, связанная с тем, что коэффициент  $K$  зависит от характера течения газа, который известен лишь предположительно.

Если контроль выполняют в условиях низкого вакуума, то натекание через канал-течь, соответствующее стандартным условиям  $P_2 = P_{ат}$ ,  $P_1 = 0$ , = (для воздуха), определяют по формуле для вязкого течения:

$$B_n = \frac{\pi d^4}{256 \eta_n l} P_{ат}^2.$$

Поток через течь в произвольных условиях, выраженный через поток в стандартных условиях, равен:

$$Q = B_n \frac{\eta_n}{\eta} \frac{P_2^2 - P_1^2}{P_{ат}^2}.$$

Например, найдем формулу связи стандартных испытаний с испытаниями опрессовкой, т. е. при давлении больше атмосферного. Стандартные испытания проводят в условиях натекания в вакуум, однако для их выполнения достаточно иметь средний вакуум, поэтому течение является вязким. При опрессовке давления еще выше, поэтому характер течения также вязкий. Подставим  $P_2 = P_{онп}$ ,  $P_1 = P_{ат}$  в результате получим:

$$Q = B_n \frac{\eta_n}{\eta} \left( \frac{P_{онп}^2}{P_{ат}^2} - 1 \right).$$

Если размеры канала очень малы, то течение через канал-течь может стать молекулярным. Тогда в стандартных условиях (масса молекулы воздуха —  $m_a$ ) поток равен

$$B_m = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi k}{m_a}} \frac{d^3}{l} P_{ат}.$$

Через  $B_m$  поток в произвольных условиях испытаний (но по-прежнему при молекулярных условиях течения) выражается так

$$Q = B_m \sqrt{\frac{M_n}{M}} \frac{P_2 - P_1}{P_{ат}},$$

где  $M$  и  $M_n$  — молекулярные веса произвольного газа и воздуха. Возможен случай, когда  $B$  измерялось в одних условиях, например молекулярных, а в произвольных (реальных) условиях возник другой характер течения — вязкий. Если не учесть этого об-

стоятельства, то, можно допустить ошибку в расчетах, определяемую при  $T=293\text{ К}$  соотношением:

$$B_n/B_m = 0,57d,$$

где  $d$ — диаметр канала-течи измеряется в мкм.

Вообще желательно, чтобы экспериментальное измерение  $B$  осуществлялось в тех же условиях течения газа, как и при эксплуатации конструкции. Однако с помощью формул для потока возможен пересчет для разных законов течения газа в условиях испытания и эксплуатации. В случае применения жидкостей в качестве пробных веществ их способность к обнаружению течей сопоставляют с чувствительностью газовых методов чаще всего экспериментальным путем. В результате чувствительность жидкостных способов выражают в тех же единицах стандартного натекания, что и для газовых способов.

## 2.2. Способы и схемы контроля

Объекты контроля методами течеискания делят на два класса: *замкнутые*, доступ к которым имеется только с одной внешней поверхности, и *незамкнутые*, у которых помимо наружной поверхности доступна воздействию также внутренняя полость. Примерами замкнутых объектов могут служить электронно-лучевые трубки, банки с консервированными продуктами.

Основные схемы контроля незамкнутых объектов показаны на рис. 2.1.

По способу создания разности давлений различают схемы с *внутренним* (а, б) и *внешним* (в, г) избыточными давлениями. В первом случае давление внутри объекта контроля выше, чем снаружи, а во втором — наоборот. Если избыточное давление выше атмосферного, то такой способ называют *опрессовкой* или *компрессионным* способом. Если для создания разности давлений объект контроля или камеру, в которую он помещен, откачивают, то способ контроля называют *вакуумным*. Не обязательно создавать по разные стороны стенок объекта контроля разности абсолютных давлений пробного газа. Достаточно, чтобы существовала разность парциальных давлений этого газа.

Для каждой из двух схем создания разности давлений возможны две схемы поиска течений: *интегральная* (а, б), когда течи обнаруживают одновременно во всем объекте контроля, и *локальная*, когда каждую течь обнаруживают отдельно. При интегральной схеме обычно анализируют газ, натекающий в объект контроля из камеры либо наоборот. Интегральную схему контроля в камере называют *камерным* способом. Если в камере вакуум (рис. 2.1, а), то способом *вакуумной камеры*, если в камере пробный газ, например гелий,— способом *газовой* или *гелиевой камеры*.

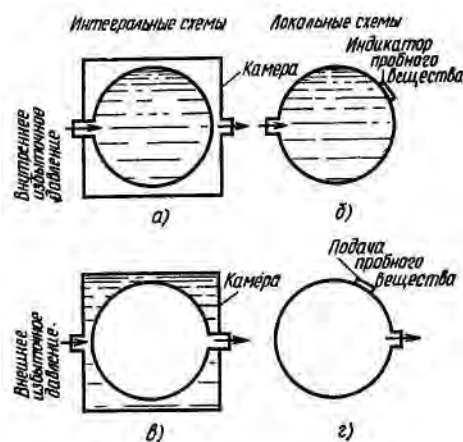


Рис. 2.1. Схемы контроля незамкнутых объектов.

Камеру из мягкого газонепроницаемого материала называют *чехлом* и соответственно способ контроля — *способом чехла*. В чехол иногда помещают не весь объект

контроля, а лишь часть его.

Интегральную вакуумную схему контроля реализуют в двух режимах: динамическом и статическом. Испытание в *динамическом* режиме проводят при непрерывной откачке пробного газа в процессе его натекания. *Статический* режим, или *режим накопления*, предусматривает длительное натекание пробного газа из камеры в изделие или наоборот, а затем регистрацию всего накопленного количества пробного газа. Такой режим повышает чувствительность к течам пропорционально времени накопления.

При компрессионной локальной схеме контроля около объекта контроля перемещают индикатор пробного вещества. Им часто служит *щуп*, улавливающий появление пробного газа. По этому признаку такую схему называют *способом щупа*. Вместо щупа может быть использована локальная *вакуумная камера-присоска*. Средством локального контроля вытекания пробного вещества может быть визуальное наблюдение за появлением струек воды, цветных пятен и т. д.

При контроле по вакуумной локальной схеме пробное вещество в виде газа часто подают из *сопла-обдувателя*. Такой способ называют *способом обдува*. Однако вместо обдува может быть применено нанесение на поверхность легколетучей жидкости, попадание паров которой в объект фиксируют прибором. Вместо пробного вещества может использоваться электрический разряд, который формируется в искровой шнур, указывающий на место течи в стеклянных стенках объекта контроля (способ разряда). Таким образом, имеется ряд способов реализации четырех основных схем контроля, причем многие из этих способов имеют специфические названия.

Замкнутые объекты, содержащие внутри себя какой-либо газ или легко испаряющееся вещество, обычно контролируют с использованием этого вещества как пробного. Иногда в них даже специально нагнетают инертный газ — гелий. Если же в замкнутом объекте вакуум или содержится вещество, вытекание которого трудно индицировать, то применяют схему контроля, называемую *опрессовкой замкнутых оболочек*. Объект на некоторое время помещают в камеру с избыточным давлением пробного газа. Затем извлекают, удаляют остатки пробного газа с поверхности и либо в вакуумной камере, либо с помощью щупа определяют наличие и места течей. Иногда при этом объект подгревают для лучшего выделения попавшего в него при опрессовке пробного газа.

## 2.3. Средства контроля

Таблица 2.1

Метод	Принцип действия	Пробное вещество	Способ воздействия	Способ индикации	Порог чувствительности, Вт	
Масс-спектрометрический (см. § 3.4)	Регистрация пробного газа путем разделения ионов разных газов по отношению массы к заряду	Гелий	Опрессовка в гелиевой камере или чехле	Анализ газа, откачиваемого из объекта	10 <sup>-12</sup>	
			Обдувание вакуумированного объекта	То же	10 <sup>-11</sup>	
			Опрессовка объекта	Анализ газа в вакуумной камере	10 <sup>-12</sup>	
			То же	Анализ газа в локальной камере	10 <sup>-11</sup>	
			Опрессовка объекта	Щуп	10 <sup>-11</sup>	
				Накопление в вакуумной камере	10 <sup>-12</sup>	
				Накопление в объекте	10 <sup>-13</sup>	
Галогенный (см. § 3.5)	Регистрация пробного вещества по увеличению эмиссии ионов с накаливаемой поверхности платины или никеля	Фреоны-12, -13, -22, -133	Опрессовка замкнутых объектов	Анализ газа в вакуумной камере	10 <sup>-12</sup>	
			Опрессовка объекта	Щуп	10 <sup>-7</sup>	
			Обдувание вакуумированного объекта	Анализ газа из объекта	10 <sup>-9</sup>	
Пузырьковый (см. § 3.6)	Регистрация пробного газа по образованию пузырьков. Объект погружен в жидкость	Воздух	Опрессовка объекта давлением 2·10 <sup>5</sup> Па	Наблюдение пузырьков в жидкости	10 <sup>-7</sup>	
			Воздух	Опрессовка объекта давлением 2·10 <sup>5</sup> Па	Наблюдение пузырьков в жидкости	10 <sup>-8</sup>
				То же	То же	10 <sup>-7</sup>
	Погружение замкнутого объекта в горячую жидкость	»				

Для выполнения контроля методами течеискания необходимы следующие средства: пробное вещество, устройства для создания и измерения разности давлений, средства обнаружения пробного вещества или измерения его количества, а также средства и технология подготовки объекта к контролю. Эффективность контроля течеисканием зависит от всей системы контроля, т. е. сочетания определенного способа, средства, режима контроля и способа подготовки объекта к контролю. Пороговую чувствительность системы контроля определяют величиной минимального натекания в стандартных условиях, обнаруживаемого этой системой. Чем выше чувствительность системы контроля, тем ниже порог чувствительности.

**Пробные вещества** должны хорошо проникать через течи и хорошо обнаруживаться средствами течеискания. Они должны быть недорогими, не оказывать вредного

действия на людей и объект контроля.

Как отмечалось в 2.1, в качестве пробных веществ применяют газы (чаще) и жидкости. Чем меньше вязкость и молекулярный вес газа, тем лучше он проникает через течи. Главное требование к пробным газам, как и ко всем пробным веществам, — существование высокочувствительных методов их обнаружения. Наиболее распространенные пробные газы указаны в табл. 2.1.

Продолжение табл. 3.1

Метод	Принцип действия	Пробное вещество	Способ воздействия	Способ индикации	Порог чувствительности, Вт
	Поверхность объекта обмыливают	Воздух, водород	Опрессовка объекта давлением $2 \cdot 10^5$ Па	Наблюдение пузырьков в покрытии	$10^{-8}$
	Обмыливание в вакуумной камере	То же	То же	То же	$10^{-9}$
Манометрический (см. § 3.7)	Изменение давления в объекте	Воздух	Опрессовка или откачка объекта	Регистрация показаний манометра	$10^{-5}$
Химической реакции	Реакция пробного газа с индикаторным веществом	Аммиак	Опрессовка объекта	Изменение цвета нанесенного фенолфталеина	$10^{-9}$
Ультразвукового течеискателя	Регистрация акустических волн, возбуждаемых при вытекании пробных веществ через течи	Воздух, вода и др.	То же	Прием волн акустическим преобразователем	$10^{-4}$
Люминесцентно-гидравлический (см. § 3.8)	Прохождение жидкости через течи при гидроспытаниях	Вода, вода с флуоресцином	Опрессовка объекта	Наблюдение люминесценции в ультрафиолетовом свете	$10^{-9}$
Капиллярный (см. § 3.8)	Прохождение пенетранта через течи под действием капиллярных сил	Керосин, нориол с керосином	Длительная выдержка пенетранта на поверхности объекта	Люминесценция в ультрафиолете или изменение цвета проявителя или адсорбента	$10^{-8}$ — $10^{-7}$

В некоторых случаях в качестве пробных веществ применяют легколетучие жидкости: спирт, ацетон, бензин, эфир. Обычно индикаторы улавливают пары этих жидкостей, тогда способы контроля такими жидкостями относят к газовым.

К жидким пробным веществам относят воду, применяемую при гидроспытаниях (гидроопрессовке), воду с люминесцирующими добавками, облегчающими индикацию течей, смачивающие жидкости — пенетранты.

**Средства для создания разности давлений** включают жидкостные или газовые (компрессоры) насосы, вакуумные насосы, баллоны с пробными газом или жидкостью, трубопроводы, арматуру (клапаны, штуцера, патрубки), манометры и т. д.

При вакуумных испытаниях обычно остаточное давление воздуха составляет 0,1—1 Па. Такое давление достигают с помощью механического форвакуумного насоса. Более глубокий вакуум ( $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Па) достигают с помощью паромасляных насосов. Однако эти насосы не могут откачивать воздух в атмосферу. Для них наибольшее выпускное давление 10—500 Па, которое обеспечивают форвакуумным насосом. Чтобы масло паромасляных насосов не попадало в вакуумную систему, между ними ставят отражатели и ловушки, охлаждаемые водой или жидким воздухом, заполненные сорбирующими веществами. В этом случае достигают вакуум в  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  Па.

Важной характеристикой насоса является быстрота действия: объем откачиваемого газа при определенном давлении на входном патрубке насоса. Часто используют поня-

тие *эффективной быстроты откачки*  $S_a$ . Оно определяет объем откачиваемого насосом газа с учетом ограниченной проводимости патрубков и вентилей, соединяющих насос с откачиваемым объемом.

При опрессовке газом давление должно быть ниже допустимого расчетного для данного объекта. Обычно применяют давление опрессовки не более  $2 \cdot 10^5$  Па (около 2 ат) и только в отдельных случаях до  $5 \cdot 10^6$  Па. Ограничение связано с катастрофическими последствиями от разрыва объекта контроля, опрессовываемого газом.

При гидроопрессовке разрыв объекта значительно менее опасен, поскольку жидкости практически несжимаемы. В этом случае возможно применение значительно больших давлений. Например, гидроиспытания на прочность объекта контроля обычно проводят при давлениях, на 25—50% превышающих расчетное. Если паровой котел предназначен для работы под давлением  $3 \cdot 10^7$  Па (300 ат), то давление при гидроиспытаниях доводят до  $3,75 \cdot 10^7$  Па и при этом же давлении проводят контроль люминесцентно-гидравлическим методом.

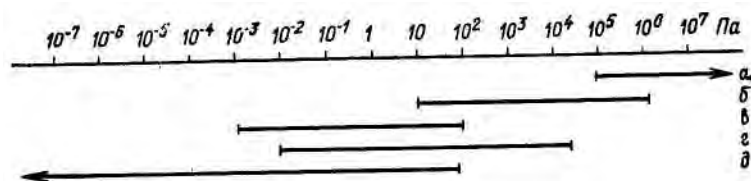


Рис. 2.2. Пределы измерения манометрами различных типов:

а — трубчато-деформационными; б — жидкостными; в — компрессионными; г — тепловыми; д — ионизационными.

При гидроопрессовке важно, чтобы не возникали «воздушные подушки». Поэтому объект контроля перед заполнением жидкостью откачивают или выпускают сжимаемый воздух через вентиль, который располагают в верхней части объекта.

**Манометры** служат для измерения давления.

Давление выше  $10^4$  Па измеряют с помощью механических деформационных, пьезоэлектрических и некоторых других типов манометров. Меньшие давления измеряют с помощью термоэлектрических, ионизационных и других вакуумных манометров (вакуумметров). Градуировку этих манометров выполняют с помощью жидкостных (масляных или ртутных) U-образного и компрессионного манометров, которые, однако, редко используют для непосредственных измерений, поскольку они неудобны в эксплуатации. Каждый тип манометра имеет предел измерений (рис. 2.2), определяемый принципом его действия. Например, предварительный вакуум измеряют тепловым манометром, а высокий — ионизационным манометром.

**Средства обнаружения течей.** Для обнаружения течей используют специальные приборы — течеискатели и неприборные способы течеискания. Важнейшая характеристика средства обнаружения течей — *порог чувствительности*. Это наименьший регистрируемый течеискателем поток газообразного или расхода жидкого пробного вещества. Путем экспериментов и расчетов его переводят на течение в стандартных условиях. Средства обнаружения течей характеризуют также диапазоном давлений, при которых они работают, временем подготовки к работе и испытаний, возможностью количественных отсчетов, массой и т. д.

По применяемому средству разделяют методы течеискания. В табл. 2.1 перечислены различные методы обнаружения течей, указан принцип, на котором они основаны. Методы расположены по мере увеличения порога чувствительности, т. е. ухудшения возможности выявления небольших течей. Указан ориентировочный порог чувствительности системы контроля по потоку воздуха в стандартных условиях, который зависит не только от средства течеискания, но и от способа применения этого средства. Например, применение масс-спектрометрического метода с накоплением дает, наиболее низкий порог чувствительности, а в динамическом режиме он в 100 раз выше.



## 2.4. Масс-спектрометрический метод

Масс-спектрометрический течеискатель — наиболее чувствительный прибор этого типа. Он универсален, позволяет контролировать изделия любых габаритов, реализовать все схемы контроля, рассмотренные в 2.2. Эти обстоятельства способствуют его широкому применению. В то же время масс-спектрометр довольно сложный и громоздкий прибор, требует вакуума для своей работы. Если нет необходимости в достижении высокой чувствительности, масс-спектрометрический метод течеискания заменяют другими более простыми. Его работа основана на разделении ионов различных газов по массовому числу (отношению их массы к заряду). Масс-спектрометр (рис. 2.3) содержит следующие основные узлы:

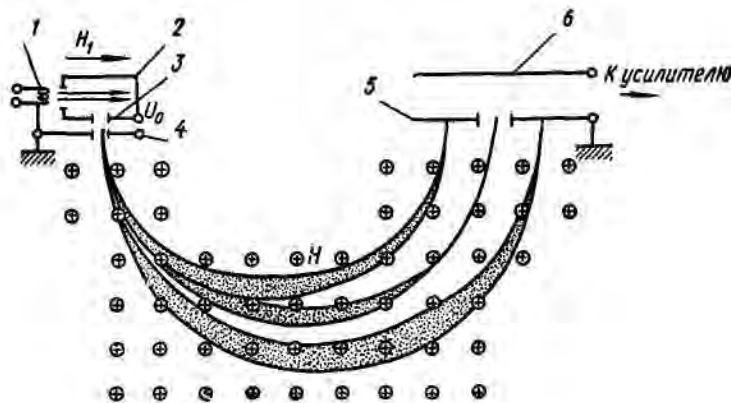


Рис. 2.3. Принцип работы масс-спектрометрического течеискателя

Ионный источник, где молекулы анализируемого газа превращаются в ионы с массой  $m$ , зарядом  $e$  и создается пучок ионов с постоянной энергией; анализатор, где ионный пучок разделяется на составляющие по значениям  $m/e$ ; коллектор, которым эти составляющие регистрируются и измеряются их пиковые значения.

Ионный источник состоит из камеры 2, в которую попадает анализируемый газ. От накаливаемого катода 1 в камеру, находящуюся относительно катода под положительным напряжением, идет пучок электронов, который ионизирует газ. Для фокусировки электронов вдоль направления их движения создают магнитное поле  $H_1$  вдоль линий которого электроны распространяются по спирали. Две диафрагмы 3 и 4 формируют направленный пучок ионов и разгоняют его благодаря разности потенциалов  $U_0$ . Заряд ионов положительный, поэтому диафрагма 3 заряжена положительно относительно диафрагмы 4. Ионы разгоняются до одинаковой энергии, которая определяется формулой:

$$mv^2/2 = eU_0,$$

где  $v$  — скорость ионов. Из-за разности масс ионов скорость эта разная для ионов разных элементов.

Далее ионы попадают в анализатор, которым служит магнитное поле  $H$ , перпендикулярное движению ионов. Под действием лоренцевой силы  $eH$  ионы движутся по траекториям в виде окружностей радиуса  $R$ . Из второго закона Ньютона  $\frac{mv^2}{R} = eHv$ , подставляя  $v$ , находим радиус траектории:

$$R = vm/eH = \sqrt{2U_0 m/(eH^2)}.$$

Таким образом, радиус траектории зависит от отношения  $m/e$ . В анализаторе ионы отклоняются на угол  $180^\circ$ . При этом возникает эффект фокусировки: ионы, выходящие из источника в виде пучка, расходящегося под некоторым углом, отклонившись на  $180^\circ$ , вновь собираются в полосу. Перед коллектором 2 имеется диафрагма 5 с входной

щелью в месте фокуса пучка ионов с заданным значением массового числа, соответствующим однозарядным ионам пробного газа. Ионный ток снимают с коллектора и усиливают. Его значение указывает выходной измерительный прибор. Появление пробного газа в газовой смеси, подаваемой в камеру 2, резко увеличивает ионный ток.

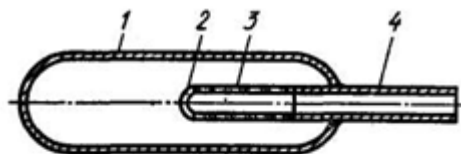


Рис. 2.4. Калиброванная течь типа «Гелит»:

1 — металлический баллон с гелием, 2 — кварцевый пузырек, 3 — трубка из молибденового стекла, 4 — металлическая трубка

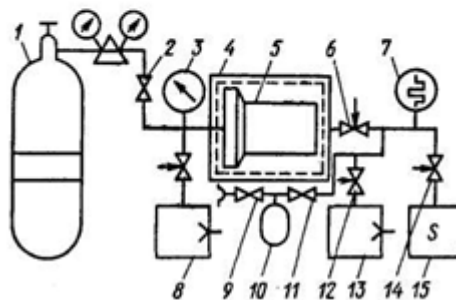


Рис. 2.5. Схема контроля способом вакуумной камеры масс-спектрометрическим течеискателем

В качестве пробного газа для масс-спектрометра обычно используют гелий. Он обладает рядом достоинств. По  $m/e$  он очень сильно (на 25%) отличается от ближайших ионов других газов. Это допускает применение широкой щели в диафрагме 6. Малое  $m/e$  для гелия способствует уменьшению радиуса траектории, а следовательно размеров всего течеискателя. Гелий обладает малой молекулярной массой и, следовательно, хорошо проникает через малые течи. Содержание гелия в воздухе очень невелико ( $10^{-4}\%$ ) поэтому фоновое значение показаний течеискателя мало. Гелий стоит недорого, он химически инертен. Серийно выпускаемый масс-спектрометрический течеискатель СТИ-11 имеет порог чувствительности к потоку пробного газа  $5 \cdot 10^{-15}$  Вт. Его масса — 260 кг. Последняя модель переносного течеискателя ТИ1-14 имеет порог чувствительности  $5 \cdot 10^{-13}$  Вт (в оптимальном режиме), он состоит из двух блоков — вакуумного и регистрационного — общей массой 72 кг. В конструкции этого течеискателя минимальная длина вакуумных коммуникаций, очень мало фланцевых соединений, уплотнения выполнены из фторкаучуковой резины, так как обычная резина адсорбирует гелий и проницаема для него. Течеискатели имеют собственные механические насосы со стабильной быстротой откачки, что важно для стабильности измерений. Масс-спектрометр позволяет проводить количественную оценку течей. Для его настройки в комплект входят калиброванные течи типа «Гелит», обеспечивающие заданный поток газа за счет диффузии гелия через кварцевый пузырек 2.

Настройку прибора выполняют с помощью калиброванной течи при отключении системы измерения вентилем 6 от остальной части системы контроля, показанной на рис. 2.5. При закрытом вентиле 14 насосом масс-спектрометра 15 откачивают его камеру до рабочего давления, включают масс-спектрометр и фиксируют фоновый сигнал, определяемый наличием гелия в атмосфере и нестабильностью работы прибора. Фоновый сигнал наблюдают в течение 5 мин и регистрируют его среднее значение, максимальное и минимальное значения. Эти величины фиксируют также в процессе дальнейших испытаний в отсутствие пробного газа.

При закрытом вентиле 9 (вентиль 11 открыт) откачивают вспомогательным насосом 13 систему трубопроводов, соединенную с течью 10 до давления порядка 1 Па и пере-

крывают откачку вентилем 12. Открывают вентиль 14, соединяющий течеискатель с калиброванной течью, дают выдержку до стабилизации показаний выходного прибора течеискателя. Цену деления шкалы измерительного прибора течеискателя рассчитывают в ваттах на деление шкалы по формуле:

$$S = Q_K / (\alpha_K - \alpha_0),$$

где  $Q_K$  — поток от калиброванной течи. После этого калиброванную течь отсекают вентилем 11.

Пороговую чувствительность способа контроля определяют по формуле:

$$Q_{m'n} = S (\alpha_{max} - \alpha_{min}).$$

Она не должна быть хуже  $10^{-10}$  Вт для способов вакуумной (гелиевой) камеры и  $10^{-9}$  при контроле способами щупа и обдувания. При контроле фиксируют показание течеискателя  $\alpha$  и определяют поток гелия через течь:

$$Q_r = S (\alpha - \alpha_0).$$

Калиброванные течи выпускают с разным значением  $Q_K$ . Для повышения точности измерения рекомендуется выбирать  $Q_K$  одного порядка с  $Q_r$ .

Считают, что течь надежно обнаруживается, если показание выходного прибора вдвое ( $\alpha$  при контроле способом щупа в 4—5 раз) превышает флуктуации фонового сигнала, т. е.  $\alpha - \alpha_0 \geq 2(\alpha_{max} - \alpha_0)$ . Флуктуации фонового сигнала не должны превышать 2,5% от полного значения шкалы выходного прибора течеискателя. Таким образом, признаком наличия течи является показание в 5% шкалы (для способа щупа — 10%).

Пересчет с потока гелия на поток воздуха в стандартных условиях выполняют по формулам, приведенным в 3.1. Молекулярный вес гелия меньше, чем воздуха, а вязкости их примерно равны, поэтому как при вязкостном, так и при молекулярном характера течения натекание воздуха будет не меньше, чем гелия. Например, если в объекте контроля высокий вакуум как при стандартных, так и при реальных испытаниях, течи каналы малого диаметра, а  $P_2 - P_1 = P_{amb}$ , то получим:

$$B = Q_{m'n} \sqrt{M/M_n} = Q_{m'n} \sqrt{4/28,7} = 0,37 Q_{m'n}.$$

Однако при масс-спектрометрическом контроле характер течения может измениться от вязкого до молекулярного. Также трудно предсказуем характер натекания в стандартных условиях. По этой причине порог чувствительности при масс-спектрометрических испытаниях часто указывают в натекании гелия, не переходя к натеканию в стандартных условиях. Результат, как отмечалось выше, будет завышенным, т. е. в стандартных условиях натекание будет меньше.

Масс-спектрометрический течеискатель позволяет проводить контроль всеми способами. Контроль способами вакуумной и гелиевой камеры выполняют по одинаковой методике, только в первом случае откачивают камеру и подают гелий в объект контроля, а во втором — наоборот.

Рассмотрим в качестве примера последовательность операций при контроле способом вакуумной камеры с термовакуумной обработкой объекта контроля (рис. 2.5). Поверхность контролируемого объекта 5 очищают и просушивают. Внутри камеры 4 установлено нагревательное устройство (это показано пунктиром на схеме). Объект помещают в камеру, уплотняют ее крышку и откачивают насосом 13 до остаточного давления не более 0,1 Па. Включают нагревательное устройство, нагревают объект до температуры около 400 °С и выдерживают при этой температуре от 5 мин до нескольких часов в зависимости от конструкции и назначения объекта контроля. Включают насос течеискателя 15 и постепенно открывают дроссельный вентиль 14. Одновременно отключают вентилем 12 насос 13. Фиксируют фоновые показания течеискателя. В дальнейшем откачку ведут только насосом течеискателя.

Изделие откачивают насосом 8 до давления не выше 1000 Па. Открывают вентиль 2 и подают гелий из баллона 1 в объект контроля. Подачу регулируют редуктором, расположенным рядом с баллоном, а давление порядка  $2 \cdot 10^4$  Па измеряют манометром 3.

Дают выдержку  $T$ , фиксируют показания течеискателя а и определяют поток пробного газа  $Q$ . Контроль выполнен. Закрывают вентили 12, 14, открывают 9, 11 и выпускают воздух в камеру 4.

Оценим необходимое время выдержки  $T$ . Масс-спектрометр реагирует собственно не на поток пробного газа, а на пропорциональную ему величину — парциальное давление гелия в камере течеискателя. Оно приблизительно равно полному давлению  $P$  в камере 4 установки, поскольку камера была предварительно откачана. Давление  $P$  увеличивается во времени благодаря натеканию  $Q$  гелия через течи при одновременной откачке насосом течеискателя. Поток откачиваемого газа насосом  $PS_3$ , где  $S_3$  — эффективная быстрота откачки. Таким образом, изменение количества пробного газа в камерах 4 масс-спектрометра и ионного источника масс-спектрометра определяется так:

$$d(PV)/dt = Q - PS_3.$$

Его решение имеет вид

$$P = \frac{Q}{S_3} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{S_3 t}{V}\right) \right],$$

где  $t$  — время от начала испытаний. Видно, что чем больше объем камеры  $V$ , тем медленнее повышается давление.

На рис. 2.6 кривая 1 соответствует малому, а 2 — большому значению  $S_3/V$  при постоянном  $S_3$ . Увеличение быстроты откачки ускоряет процесс повышения давления, но одновременно уменьшает максимальное значение давления:  $P_m = Q/S_3$ .

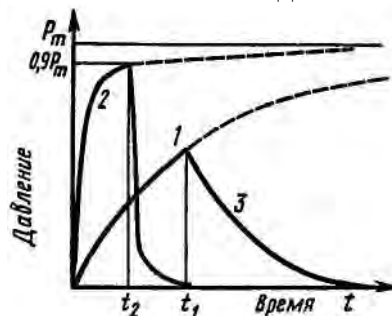


Рис. 2.6 - Изменение давления пробного газа в камере ионного источника масс-спектрометра при контроле способами вакуумной камеры и обдува

Величина, соответствующая 90% от максимального значения давления  $P = 0,9P_m$ , достигается через время  $t_2 = 2,3V/S_3$ . Если принять быстроту откачки  $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , то легко рассчитать, что при контроле объема в  $0,1 \text{ м}^3$  выдержка  $U$  должна быть не менее 3,8 мин. При объеме камеры  $4,7 \text{ м}^3$  нужна выдержка около 3 ч, однако выдержку дают 40 мин за счет снижения достигаемого давления до 0,4 Па от максимального значения.

При необходимости контроля отдельного участка изделия или сварного шва на этот участок накладывают локальную вакуумную камеру. Для контроля замыкающего сварного шва (после выполнения которого изделие становится замкнутым) изделие откачивают и заполняют гелием перед заваркой. Заварку ведут в потоке гелия.

Замкнутые изделия, в полость которых не удастся ввести гелий, контролируют способом опрессовки замкнутых оболочек. Изделие опрессовывают в гелиевой камере давлением 0,2—0,5 МПа. Чем больше давление, тем меньше время опрессовки, так что произведение давления измеренного в МПа, на время в часах должно равняться 0,1—1. Изделие вынимают из камеры и для очистки его поверхности от остатков гелия обдувают сжатым воздухом или азотом.

Одновременно готовят к контролю вакуумную камеру. Использовать одну и ту же

камеру для опрессовки и вакуумных испытаний нельзя, поскольку при этом будет большой фон в течеискателе от остатков гелия. Вакуумную камеру откачивают до давления порядка 5 Па и фиксируют фоновые показания течеискателя. Затем камеру открывают, устанавливая в нее изделие опрессованное гелием, опять откачивают ее, отсекают насос и накапливают натекающий из изделия гелий в камере без откачки в течение приблизительно 1 ч. Включают насос течеискателя и фиксируют показания выходного прибора. Накопленный газ будет действовать на течеискатель лишь короткий промежуток времени.

При контроле с помощью обдувателя к изделию присоединяют установку для течеискания, которая на рис. 2.5 присоединена к камере через вентиль б. Объект контроля подготавливают, как указано в 2.3, затем откачивают до давления 5 Па, отключают насос вспомогательной откачки 13 и обдувают поверхность гелием из баллона 1.

Обдувание начинают с мест подсоединения системы вспомогательной откачки к течеискателю, а затем обдувают сам объект контроля, начиная с его верхних участков и постепенно переходя к нижним. Это позволяет точнее обнаруживать места течей, поскольку гелий легче воздуха, то, вытекая из сопла, он поднимается кверху. Сначала устанавливают сильную струю гелия, схватывающую при обдувании большую площадь. При обнаружении течи струю гелия уменьшают и точно определяют место дефекта. Скорость перемещения обдувателя до контролируемой поверхности 2—5 мм/с. Способ обдува обладает меньшей чувствительностью, чем способ гелиевой камеры или чехла. Это объясняется кратковременностью воздействия гелия на контролируемый участок.

Когда обдуватель находится над течью, давление повышается, причем  $V$  равно объему изделия и вакуумной системы течеискателя (рис. 2.6, кривая 1). В момент времени  $t_1$  (отсчет ведется с момента поднесения обдувателя к течи) обдуватель сдвигают с места течи. Давление к этому моменту достигает:

$$P = \frac{Q}{S_3} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{S_3}{V} t_1 \right) \right].$$

После этого поток гелия в систему прекращается и в  $Q=0$ . В результате давление уменьшается (кривая 3) по закону:

$$P = \frac{Q}{S_3} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{S_3}{V} t_1 \right) \right] \exp \left[ -\frac{S_3}{V} (t - t_1) \right].$$

При контроле способом гелиевого щупа вместо вакуумной камеры (см. рис. 2.5) через вентиль б присоединяют к течеискателю щуп на гибком шланге. Контроль проводят в следующем порядке. Систему течеискания откачивают механическим насосом при закрытом вентиле б, затем его приоткрывают так, чтобы при совместной откачке насосами течеискателя и вспомогательным 13 давление на входе течеискателя было не более 30 Па. В изделие (которое находится вне камеры) подают гелий. Щуп перемещают со скоростью не более 2 мм/с в непосредственной близости от поверхности изделия, его снабжают насадками, повторяющими форму изделия. Контроль начинают с нижних участков поверхности изделия для более точного обнаружения мест течи.

Достижимая при контроле способом щупа чувствительность к течам ниже, чем при других способах масс-спектрометрического контроля. Это связано с тем, что щуп захватывает значительный поток воздуха, поэтому концентрация гелия снижается. Для обеспечения требуемого вакуума в камере масс-спектрометра приходится дросселировать поток смеси воздуха с гелием вентилем б и параллельно потоку через течеискатель создавать поток через насос 13. Для повышения чувствительности увеличивают давление опрессовки гелием, приблизительно в 10 раз по сравнению с другими рассмотренными способами.

## 2.5. Галогенный метод

Действие галогенного течеискателя основано на резком увеличении эмиссии поло-

жительных ионов щелочных металлов в чувствительном элементе при появлении в пробном газе галогенов, т. е. веществ, в состав которых входят элементы группы галоидов: фтор, хлор, бром, иод. Обычно в качестве пробных веществ используют пары соединений, содержащих фтор—фреоны (хладоны) различных марок: 12, 13, 22 или 133. Это легколетучие жидкости, давление насыщенного пара при комнатной температуре  $(6 \pm 30) \cdot 10^5$  Па. Вещества эти не имеют запаха, безвредны, неагрессивны, используются в качестве хладагентов в бытовых холодильниках.

Чувствительный элемент галогенного течеискателя (рис 2 7) состоит из анода 5 в виде платиновой (никелевой) спирали, навитой на керамическую трубку-основание 4.

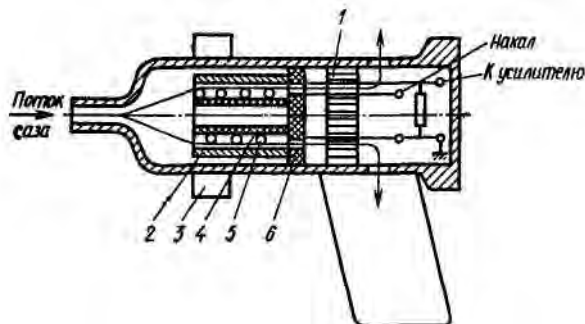


Рис. 2.7. Устройство выносного щупа галогенного течеискателя

Коаксиально с этой трубкой на керамической плате 6 укреплена платиновая (никелевая) трубка — коллектор 2. Через чувствительный элемент турбинкой 1 прогоняют анализируемый газ. Охлаждение корпуса ускоряет радиатор 3.

Анод нагревают до  $800\text{—}900$  °С, в результате этого с платины и основания испаряются имеющиеся в виде примесей атомы щелочных металлов (натрия, калия). Нагретая платина ионизирует испарившиеся атомы. Под действием разности потенциалов между анодом и коллектором (около 250 В) ионы движутся к коллектору. Галогены способствуют процессу ионизации атомов щелочных металлов. В результате этого поток ионов в промежутке анод-коллектор возрастает при появлении галогенов. Ток анод-коллектор является измеряемой величиной в галогенном течеискателе.

Промышленность выпускает галогенные течеискатели типов БГТИ-7 и ГТИ-6. Первый из них — портативный, он имеет массу 5,5 кг, питается от батареи, его порог чувствительности к потоку пробного газа  $5 \cdot 10^7$  Вт. Прибор ГТИ-6 имеет массу 10 кг, питается от сети и имеет преобразователи двух типов: атмосферный, подобный рассмотренному выше, порог чувствительности  $1 \cdot 10^7$ , а вакуумный —  $1 \cdot 10^9$ .

Перед началом работы с прибором его настраивают с помощью калиброванной течи «Галот», входящий в комплект. Оценивают ток, вызываемый калиброванной течью, и его флуктуации. Признаком течи является увеличение показаний в 2 раза по сравнению с фоном.

При попадании большого количества галогенов в преобразователь течеискателя его анод теряет чувствительность — «отравляется». «Отравление» происходит либо при длительном действии на чувствительный элемент малых концентраций галогенов, либо при кратковременном поступлении их больших количеств. «Отравление» тем более вероятно, чем выше температура нагрева анода. Восстановить чувствительность можно, пропуская несколько часов через чувствительный элемент поток воздуха без примесей галогенов, нагретый несколько выше рабочей температуры.

Используют два способа локального контроля галогенным течеискателем: щупа и обдувания. Чаще применяют атмосферный преобразователь, работающий по способу щупа, так как он проще в реализации, у него меньше вероятность отравления.

Установка для контроля способом щупа показана на рис. 2.8 объект контроля 6 откачивают механическим насосом 5 до остаточного давления  $500\text{—}1000$  Па. Закрывают вентиль 4 и через редуктор 2 подают в объект фреон из баллона /. Давление регулируют по манометру-вакуумметру 3 так, чтобы в изделии находился насыщенный пар фреона

или смесь фреона с воздухом. Иногда фреон подают в объект без его предварительной откачки.

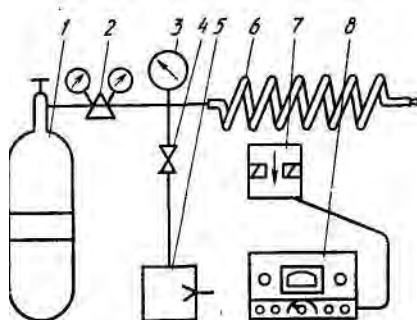


Рис. 2.8 Схема контроля способом галогенного щупа

Щуп 7 перемещают в непосредственной близости от поверхности объекта со скоростью 5—8 мм/с. Контроль начинают с верхних участков изделия и постепенно переходят к нижним. Пары фреона тяжелее воздуха, и такой порядок контроля позволяет более точно определять места течей. О появлении фреона судят по показаниям выходного прибора 8, световым и звуковым сигналам. В этом случае щуп нужно немедленно убрать от течи во избежание отравления чувствительного элемента. С этой же целью контроль часто выполняют в два этапа. На первом этапе испытания ведут при неполном нагреве анода, применяют в качестве пробного газа смесь фреона с воздухом, в результате этих мер чувствительность снижается. Второй этап испытаний проводят при максимальной чувствительности, соответствующей  $Q_{\min}=10^{-7}\div 10^{-6}$  Вт. После проведения контроля фреон удаляют из изделия откачкой до давления 100 Па, напуском воздуха и повторной откачкой.

Порог чувствительности можно понизить, применяя повышенное давление опрессовки  $P_0$  пр. В этом случае минимально обнаруживаемую течь, приведенную к стандартным условиям, определяют по формуле:

$$B = Q_{\min} \eta_{см} / \eta_{в} \gamma [(P_{опр} / P_{ат})^2 - 1].$$

Здесь  $\gamma$  — концентрация паров фреона в смеси, заполняющей объем;  $\eta_{в}$  — вязкость смеси. При использовании чистого фреона Ф-12 или Ф-22 давление опрессовки может достигать  $(5\div 10) \cdot 10^5$  Па, если позволяет прочность объекта контроля. Оно ограничивается упругостью пара фреона. В результате порог чувствительности метода при контроле способом щупа может быть снижен до  $10^{-7}$  Вт. Технология контроля галогенным течеискателем значительно проще, чем масс-спектрометрическим. Галогенный течеискатель сравнительно несложный, легкий прибор, не требует обязательного вакуума для своей работы. Воздух, захватываемый щупом, почти не снижает чувствительности. Галогенный метод, так же как масс-спектрометрический, позволяет вести контроль по различным схемам. Галогенный метод применяют довольно часто, когда не требуется высокая чувствительность. Недостатки этого метода — возможность «отравления» чувствительного элемента и повышенный фон, требующий тщательной вентиляции помещения.

## 2.6. Пузырьковый метод

Метод основан на наблюдении пузырьков пробного газа 4 (рис. 2.9), выделяемых из течи 3 при опрессовке газом объекта контроля 2, поверхность которого покрыта жидкостью. Для этого объект контроля погружают в резервуар / с жидкостью (водой, как на рис. 2.9) или наносят жидкую пленку.

Преимущества пузырькового метода заключаются в его простоте: он не требует приборного оснащения и специальных пробных газов, имеет высокую чувствительность, операции выявления и локализации течей совмещены.

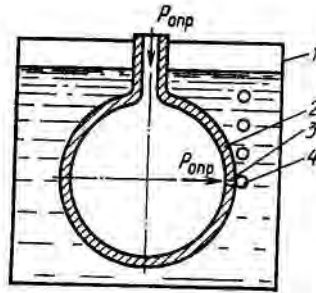


Рис. 2.9. Пузырьковый метод контроля

Его недостатком является необходимость погружения изделия в резервуар, что невозможно для крупногабаритных изделий. Покрытие поверхности жидкой пленкой — трудоемкая операция, имеется опасность коррозии поверхности в результате длительного действия на нее остатков жидкости (воды). Чувствительность метода иногда оказывается недостаточной. Результаты проверки в большой степени зависят от добросовестности контролера  $v$ .

На примере пузырькового метода удобно проследить влияние порога чувствительности средства течеискания и условий испытания на порог чувствительности способа течеискания в целом. Средством обнаружения течи собственно являются пузырьки пробного газа. Рассмотрим процесс образования пузырька для оценки порога чувствительности. Под влиянием давления опрессовки  $P_{опр}$ , создаваемого в объекте контроля, в устье течи образуется пузырек. Количество газа в нем определяется произведением объема пузырька  $V_n$  на давление внутри него  $P_n$ . Это давление меньше  $P_{опр}$  за счет дросселирования (снижения давления) течью. Определим  $P_n$  из условия равенства его сумме внешних давлений, действующих на пузырек: атмосферного давления на поверхность жидкости  $P_{ат}$ , гидростатического давления жидкости  $P_r$  и поверхностного натяжения  $P_u$ .

Величина  $P_r = gph$ , где  $p$  — плотность жидкости,  $ah$  — высота столба жидкости над пузырьком. Согласно (2.1) давление, вызываемое силами поверхностного натяжения:

$$P_u = (2F_{жг} \cos \theta) / r = 4F_{жг} / D.$$

Здесь  $F_{жг}$  — сила поверхностного натяжения жидкость—газ, отнесенная к единице длины на поверхности жидкости. Применительно к рассматриваемому случаю  $D = 2r$  — диаметр пузырька,  $\theta = 0$ . Таким образом:

$$Q = \frac{V_n P_n}{t} = \frac{\pi D^3}{6t} \left( P_{ат} + gph + \frac{4F_{жг}}{t} \right),$$

где  $t$  — время образования пузырька.

Поток газа через течь увеличивает диаметр пузырька до его отрыва. Этот момент наступает, когда действующая на пузырек архимедова сила  $gpV_n$  станет равной, а затем превзойдет силы сцепления пузырька с поверхностью, равные силе поверхностного натяжения жидкость — газ, умноженный на периметр течи:

$$F_{жг} d,$$

где  $d$  — диаметр течи. Таким образом, условие отрыва:

$$\pi D_0^3 gp / 6 = \pi d F_{жг}; \quad D_0 = \sqrt[3]{6 F_{жг} d / gp}.$$

Здесь  $D_0$  — диаметр пузырька в момент отрыва. Из формулы видно, что чем больше диаметр течи, тем крупнее пузырьки. Однако поскольку из  $di$  величин, характеризующих свойства жидкости —  $F_{жг}$  и  $p$ , извлекается корень кубический, диаметр отрывающегося пузырька меняется мало при изменении названных величин. Обычно диаметр отрывающегося пузырька принимают равным 0,5—1 мм. Пузырьки диаметром меньше 0,5 мм трудно заметить. Отсюда можно оценить минимальный диаметр течи  $d_{min} = 2,8$  мкм.

Минимальный поток газа, регистрируемый пузырьковым методом, можно оценить



из предположения, что время  $t_0$  от начала образования пузырька до его отрыва равно 30 с. Если это время больше, то слишком редко образующиеся пузырьки трудно заметить.

Обычно гидростатическое давление гораздо меньше атмосферного, оно даже стремится к нулю при уменьшении расстояния от течи до поверхности  $h$ . Давление сил поверхностного натяжения также существенно меньше атмосферного. В результате определяем минимально регистрируемый поток газа с помощью пузырькового метода:

$$Q_{\min} \approx \pi D_0^3 P_{\text{ат}} / 6t_0.$$

При  $D_0 = 0,5$  мм,  $t_0 = 30$  с,  $P_{\text{ат}} = 101\,325$  Па получим

$$Q_{\min} = \frac{3,14 \cdot 0,5^3 \cdot 10^{-9} \cdot 101\,325}{6 \cdot 30} = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ Вт.}$$

Это значение определяет порог чувствительности пузырькового способа как средства течеискания. Теперь рассмотрим чувствительность (нижний предел индикации) всей системы течеискания пузырьковым методом.

Подставим  $Q_{\min}$  вместо  $Q$ , т. е. будем считать, что поток известен и равен порогу чувствительности средства течеискания. Отсюда вычислим чувствительность всей системы течеискания  $B_{\min}$ , приведенную к стандартным условиям:

$$B_{\min} = Q_{\min} \eta / \eta_n [(P_{\text{опр}} / P_{\text{ат}})^2 - 1].$$

$P_{\text{опр}}/P_{\text{ат}}$	. . .	1,01	2	10
$B_{\min}$ , Вт	. . .	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$0,73 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$

Рассмотрим некоторые варианты пузырькового метода. Как отмечалось ранее, вместо погружения объекта контроля в резервуар его покрывают жидкой пленкой (*способ обмыливания*), в которой наблюдают образование пузырьков. Жидкость должна быть вязкой, медленно стекающей с малым поверхностным напряжением. Ее приготавливают из водного раствора мыла, глицерина и желатина (мыльная пленка) либо из водного раствора декстрина, глицерина, спирта и других добавок (полимерная пленка). Вязкость обеспечивает медленное стекание, а снижение сил поверхностного натяжения облегчает образование пузырей.

Пленку наносят на поверхность изделия мягкой кистью или распылителем. Наблюдение за образованием пузырьков начинают через 2—3 мин после нанесения мыльной пленки. При использовании полимерной пленки выявление больших дефектов наблюдают непосредственно после нанесения пленки, а малые дефекты — через 20 мин. Пузырьки в такой пленке не лопаются, а сохраняются в виде «коконов» в течение суток. Чувствительность определяют по той же приближенной формуле.

Наибольшей чувствительностью пузырькового метода удается добиться, если использовать способ обмыливания и наблюдения в локальной вакуумной камере с давлением около  $10^4$  Па. Такая камера (рис. 2.10) «присасывается» к поверхности объекта контроля под действием атмосферного давления. Наблюдение за появлением пузырьков, коконов или разрывов пленки ведут через смотровое окно. В этом случае атмосферное и гидростатическое давления равны нулю и формула с учетом двойной поверхности соприкосновения пленки с газом приобретает вид:

$$Q_{\min} = 2\pi D_0^3 F_{\text{жг}} / 3t_0.$$

Принимая прежние условия испытания и величину поверхностного натяжения для воды  $0,075$  Н/м, получим  $Q_{\min} = 1,3 \cdot 10^{-9}$  Вт, т. е. порог чувствительности метода как средства течеискания снижается в 170 раз по сравнению с испытанием в резервуаре с атмосферным давлением. При этом сохраняется отмеченная выше возможность повышения чувствительности способа контроля в целом за счет повышения давления опрессовки и применения водорода в качестве пробного газа вместо воздуха. В результате пузырьковый метод позволит выявлять течи, которые при вакуумных испытаниях в стандартных условиях будут соответствовать натеканию около  $10^{-11}$  Вт.

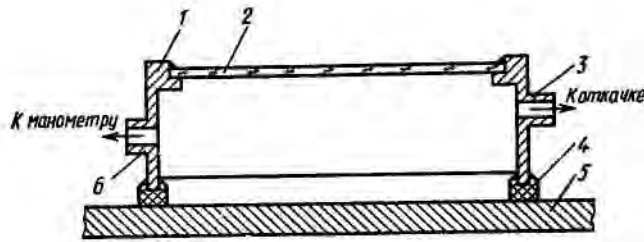


Рис. 2.10. Локальная вакуумная камера:

1 — корпус; 2 — стекло; 3 — штуцер откачки; 4 — уплотнение;  
 S — стенка объекта контроля; 6 — штуцер нанометра

Пузырьковый метод применяют также для испытания замкнутых объектов контроля, содержащих газ под атмосферным давлением. Избыточное давление газа внутри объекта контроля создают, погружая объект в горячую жидкость. Изменение давления при этом определяют из закона Шарля:

$$P_2/P_1 = T_2/T_1,$$

где  $P$  — давление;  $T$  — абсолютная температура, индексы «1» и «2» относятся к холодному и нагретому объекту.

В качестве исходных условий примем нормальные. Температура нагрева  $T_2$  ограничивается тем, что в жидкости начинают образовываться пузырьки. Для воды это  $80^\circ\text{C}$ . Отсюда легко найти, что

$$P_2/P_1 = P_{\text{опр}}/P_{\text{ат}} = (273 + 80)/273 = 1,3.$$

Подставляя это значение найдем, что чувствительность метода, приведенная к стандартным условиям, равна  $B = 33 \cdot 10^{-6}$  Вт.

## 2.7. Манометрический метод

Манометрический метод контроля основан на оценке герметичности объекта контроля по показаниям манометров, измеряющих давление пробного газа. Существует два варианта метода: абсолютный и дифференциальный. *Абсолютным* методом герметичность оценивают по показаниям одного или нескольких манометров, измеряющих давление в одном и том же объеме газа. При *дифференциальном* методе измеряют разность показаний двух манометров, на один из которых пробный газ не действует.

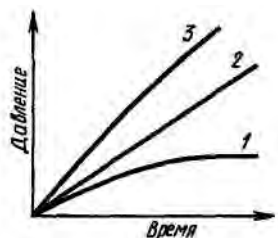
Наиболее просто метод реализуется через интегральную схему контроля, в которой измеряют давление опрессовки или вакуум в объекте контроля либо в камере, в которой помещен объект контроля. При этом объект или камера отсечены от насоса. Манометрические испытания с измерением вакуума соответствуют стандартным условиям измерения герметичности.

Поток газа в рассмотренных условиях определяют по формуле:

$$Q = (V \Delta P) / t = (q / t) (\Delta P / P),$$

где  $V$  — объем, в котором измеряют давление;  $q$  — количество газа в нем;  $t$  — время испытаний;  $\Delta P$  — измерение давления.

Манометрический метод с опрессовкой применяют при испытаниях морских судов на непроницаемость корпуса. Результаты считают удовлетворительными, если в течение 1 ч давление порядка  $1,25 \cdot 10^5$  Па изменилось не более чем на 5%. Расчет показывает, что таким способом можно выявлять лишь очень крупные течи, например при объеме  $100 \text{ м}^3$  поток составит  $Q = 1700$  Вт. При подстановке получим поток, приведенный к стандартным условиям:  $B = 3000$  Вт.



Ряс. 2.11. Изменение давления в вакуумной системе

Испытания дают обычно тем более высокую чувствительность, чем меньше оставшееся количество газа. Например, для объектов широкого профиля, приняв условия стандартных испытаний  $V=1\text{ м}^3$ ,  $P=0,1$  Па,  $P/P=0,05$ ,  $t=15$  с, получим  $Q=5\cdot 10^{-5}$  Вт. Однако такая чувствительность обычно недостаточна, и поэтому манометрический метод используют для поисков крупных течей, чтобы устранить их перед испытаниями более точными методами. Повышению чувствительности вакуумных манометрических испытаний мешает газовыделение с внутренних поверхностей объекта контроля или вакуумной камеры. На рис. 2.11 показаны характерные кривые изменения во времени давления в вакуумированном объекте. Кривая 1 соответствует газовыделению, кривая 2 — действию натекания, кривая 3 — совместному действию обоих факторов.

Таким образом, причину повышения давления можно определить по виду кривой. Однако этот способ определения наличия газовыделения мало эффективен. Порог чувствительности вакуумного манометрического метода не превышает значений  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  Вт.

### 3. РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ

#### 3.1. Основные устройства для формирования и обработки СВЧ-сигналов и полей

К таким устройствам относятся: излучающие и приемные устройства, аттенюаторы, вентили, фазовращатели, направленные ответвители, детекторные секции, тройники, резонаторы, согласованные нагрузки, отрезки волноводов специальной формы, измерительные линии и волномеры. Большинство этих СВЧ-устройств, используемых в неразрушающем контроле, построены на базе волноводов, что характерно для трехсантиметрового и восьмимиллиметрового диапазонов СВЧ.

**Излучающие и приемные устройства** (антенны), применяемые при радиоволновом контроле, могут быть выполнены в виде рупора (рис. 3.1, а, б), открытого среза волновода (рис. 3.1, в), щелей (рис. 3.1, г, д) или волновода с диэлектрической вставкой (рис. 3.1, е), что определяется необходимой локальностью контроля, требуемой чувствительностью аппаратуры и особенностями конкретной задачи. Так, например, излучатель и приемник в виде рупора (рис. 3.1, а) дает хорошее согласование волноводного тракта с внешним пространством и с контролируемым объектом, что обеспечивает большие амплитуды сигналов, но ведет к ухудшению локальности контроля.

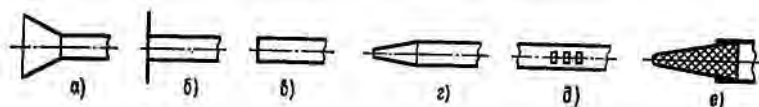


Рис. 3.1. Типы излучающих и приемных устройств, используемых в радиоволновом контроле:

- а — рупор; б — фланец волновода; в — срез волновода; г — суживающийся конец волновода; д — щели; е — волновод с диэлектрической вставкой

Применение щелевого устройства в виде суживающегося волновода (рис. 3.1, г), наоборот, повышает локальность контроля, если контролируемый объект находится

непосредственно у щели, но при этом возникают значительные отражения СВЧ-колебаний от узкого среза, что снижает чувствительность аппаратуры и ведет к маскировке полезного сигнала. Вблизи среза излучающего или принимающего устройства площадка, определяющая их взаимодействие с контролируемым объектом, примерно равна площади среза. При удалении объекта от антенны зона облучения расширяется в виде конуса, угол раскрытия которого тем больше, чем меньше размеры антенны, т. е. примерно соответствует ширине ее диаграммы направленности. Зона, где происходит излучение СВЧ-колебаний, у излучателей и приемников чаще всего заполняется диэлектрическими вставками, которые улучшают работу этих устройств, а также препятствуют проникновению в них посторонних предметов и различных загрязнений. На основе показанных на рис. 3.1 устройств могут создаваться и более сложные излучающие и принимающие устройства, например двухэлементные, реализующие метод само сравнения в дефектоскопии или в виде многоэлементных антенных решеток. Как следует из принципа взаимности, одно и то же устройство может использоваться в качестве излучающего или принимающего.

**Канализирующие устройства** волновода или отрезки коаксиальных линий, с различными поперечными сечениями передают энергию СВЧ-колебаний от генератора и излучателя или от приемного устройства к первичному измерительному преобразователю. Коаксиальные линии (рис. 3.2, а) используются при передаче СВЧ-энергии на короткие расстояния. Полосковые линии (рис. 3.2, б, в) хорошо сочетаются с современной печатной технологией производства радиоэлектронной техники. Чаще других в устройствах радио-волнового контроля применяют прямоугольные волноводы (рис. 3.2, г), а иногда — круглые (рис. 3.2, д). В области коротковолнового СВЧ-диапазона (восьмимиллиметрового и короче) могут быть использованы диэлектрические волноводы и устройства на их основе (рис. 3.2, е).

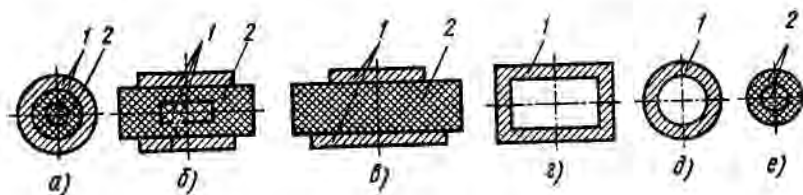


Рис. 3.2. Поперечные сечения основных типов канализирующих устройств:

а — коаксиальная линия; б — симметричная полосковая линия; в — несимметричная полосковая линия; г — прямоугольный волновод; д — круглый волновод; е — диэлектрический волновод (1 — металл; 2 — диэлектрик)

**Аттенюатор** (ослабитель) служит для дискретной или плавной регулировки амплитуды СВЧ-сигналов путем изменения размеров поперечного сечения волновода, введения вставок, в которых затухают СВЧ-колебания, или путем использования поляризационных особенностей СВЧ-колебаний.

**Вентиль** пропускает СВЧ-энергию только в одном направлении, т. е. только падающую волну, что необходимо для работы СВЧ-тракта в режиме бегущей волны и устранения влияния нагрузки на источник колебаний.

**Фазовращатель** дает возможность изменить фазу СВЧ-колебаний на фиксированное значение дискретно или плавно и представляет собой отрезок длинной линии регулируемой длины или с изменяемыми электрическими параметрами среды ( $\mu$  или  $\epsilon$ ), что позволяет регулировать электрическую длину отрезка и приводит к дополнительному набегу фазы, зависящему от отношения электрической длины отрезка к длине волны.

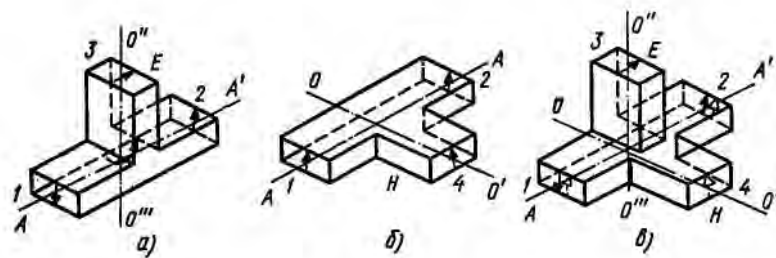


Рис. 3.3 Волноводные СВЧ-тройники: *а* — Е-тройник; *б* — Н-тройник; *в* — СВЧ-мост

**Направленный ответвитель** имеет один вход и два выхода, на которые передает определенную часть только падающей или отраженной волны в нужный волновод СВЧ-тракта. Он может использоваться как делитель мощности в определенной пропорции, а также для сложения или вычитания сигналов.

**Детекторная секция** (амплитудный детектор, выпрямитель) преобразует СВЧ-колебания в сигналы постоянного тока или в сигналы, пропорциональные огибающей СВЧ-колебаний. Она выполняется на базе СВЧ выпрямительного устройства с полупроводниковым диодом. Для увеличения значений выходных сигналов детекторная секция обычно содержит резонаторную часть, которая настраивается специальным поршнем в режим резонанса на рабочей частоте. В аппаратуре с аналоговой обработкой сигнала к детекторной секции обычно подключается чувствительный микроамперметр, усилитель или регистрирующий прибор.

Смесительная секция подобна детекторной, но имеет два входа, к которым подводятся СВЧ-колебания двух разных частот. В результате их наложения и выпрямления на выходе смесительной секции выделяется составляющая колебаний разностной частоты, которая много меньше частоты СВЧ-колебаний и обработка сигналов на которой производится гораздо проще.

**Тройники** [1] имеют три или более волноводных ответвлений и служат для разделения потока СВЧ-энергии или, наоборот,— для суммирования (вычитания) СВЧ-колебаний. В аппаратуре радиоволнового контроля используют Е-тройник (рис. 3.3, *а*), Н-тройник (рис. 3.3, *б*) и двойной тройник (рис. 3.3, *в*). Рассмотрим характерные случаи применения тройников в аппаратуре радиоволнового контроля (стрелками на рис. 3.3 показано направление вектора напряженности электрического поля).

Пусть в тройнике (рис. 3.3, *а, б*) к ответвлению 3 подводится СВЧ-энергия генератора. Тогда на ответвлениях 1 и 2 в поперечных сечениях, равноотстоящих от центра тройника, амплитуды напряженностей электрического поля будут одинаковы, а фазы — одинаковы для Н-тройника (рис. 3.3, *б*) и имеют сдвиг на  $180^\circ$  для Е-тройника (рис. 3.3, *а*). В этом случае СВЧ-энергия будет поделена поровну между двумя волноводами. Если же, наоборот, два потока СВЧ-энергии подводятся к ответвлениям 1 и 2, то в отрезках волновода 3 и 4 СВЧ-колебания будут складываться с учетом их фазы. В частности, равные по величине потоки энергии с одинаковыми фазами колебаний приведут к удвоению энергии колебаний в ответвлении 4 Н-тройника и к отсутствию колебаний в ответвлении 3 Е-тройника. Когда СВЧ-колебания в ответвлениях 1 и 2 будут противофазны, эффект по прохождению СВЧ-энергии будет обратным — отсутствие колебаний в ответвлении 4 для Н-тройника и удвоению энергии в ответвлении 3 для Е-тройника.

Двойной тройник (СВЧ-мост, двойной Т-мост), изображенный на рис. 3.3, *в*, обладает особенностями одновременно Е- и Н-тройника и, кроме того, позволяет вести обработку сигналов в диапазоне СВЧ. Нетрудно видеть, что СВЧ-энергия не проходит из Е-ответвления в Н-ответвление и наоборот. Одновременное появление СВЧ-колебаний в Е- и Н-ответвлениях возможно лишь при подаче СВЧ-колебаний на волноводы 1 и 2 с разными амплитудами или с фазой, отличающейся от 0 или  $180^\circ$ . Свойства

двойного тройника часто используются в радиоволновом контроле для получения двух каналов, необходимых для сравнения информации от объекта контроля и образца (эталонного объекта).

Качество работы двойного тройника характеризует *уровень прямого прохождения* сигналов из Е- в Н-плечо (или из Н- в Е-плечо), которое обычно составляет 40—70 дБ и происходит вследствие несимметричного расположения элементов двойного тройника. Чтобы снизить прямое прохождение СВЧ-энергии из-за несовершенства технологии, в области стыка Е- и Н-ответвлений устанавливают корректирующие пластины или регулировочные штыри.

При использовании поляризационных методов (для анализа поляризации колебаний, параметров эллиптической волны и т. д.) применяется *турникетное соединение* [1], реализуемое обычно в виде четырех крестообразно расположенных ответвлений и расположенного перпендикулярно и осе симметрично к ним круглого волновода.

**Резонаторы** [1] по существу являются резонансными контурами и с их помощью можно выполнять те же преобразования сигналов, что и с помощью резонансных контуров: выделять колебания требуемой частоты, согласовывать различные элементы между собой, изменять значения токов или напряжений и т. д. Резонаторы могут выполняться в виде объемных конструкций или отрезков волноводов и длинных линий. Перестройка СВЧ-резонаторов производится с помощью штырей, плунжеров, короткозамыкающих поршней, пластин и гибких диафрагм.

**Согласованные нагрузки** предназначены для подключения к СВЧ-тракту, чтобы поглотить падающую волну и устранить тем самым отражения СВЧ-колебаний. Они выполняются в виде глухого отрезка длинной линии, который имеет активное сопротивление, равное сопротивлению линии ( $Z_H = Z_{Л}$ ).

**Измерительные линии** представляют собой отрезок длинной линии с прорезью для введения зонда детекторной секции. В прорезь отрезка длинной линии вводится зонд, который может быть перемещен вдоль линии, что позволяет помещать его в место, где достигается необходимое соотношение между падающей и отраженной волнами и соответственно получают определенные значения СВЧ-колебаний (максимум, минимум, среднее). Измерительная линия имеет точную градуировку и позволяет измерять многие величины, характеризующие СВЧ-колебания.

**Волномеры** — устройства для определения частоты или длины волны СВЧ-колебаний (в простейшем случае — это короткозамкнутая измерительная линия с калиброванными размерами элементов). Например, для часто используемого прямоугольного волновода при возбуждении в нем волны типа ТЕ<sub>10</sub> длина волны равна:

$$\Lambda_n = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_n - (\lambda_0 / 2a)^2},$$
$$\lambda_0 = c / f,$$

где  $\Lambda_0$  — длина волны в вакууме;  $\epsilon_n$  — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего волновод;  $a$  — размер широкой стенки волновода.

### 3.2. Индикаторы и преобразователи радиоволнового излучения

Индикаторы СВЧ-излучения преобразуют распределение плотности СВЧ-энергии в видимое изображение, что позволяет оператору анализировать качество контролируемого объекта. При радиоволновом контроле в качестве индикаторов используются [1] люминофоры, жидкие кристаллы и фотоэмульсии, а индикация интенсивности СВЧ-излучения чаще всего основана на том, что вещество индикатора нагревается подающей на него СВЧ-энергией. Применение индикаторов позволяет производить контроль внутреннего строения объектов и осуществлять СВЧ-голографию.

**Люминофоры** — это вещества, обладающие свойством светиться при воздействии на них излучения, которое возбуждает люминофор и он переизлучает часть полученной

энергии в виде световой видимого диапазона. Это видимое излучение и воспринимает оператор. Однако энергия квантов СВЧ-излучения недостаточна для возбуждения люминофора, поэтому для его возбуждения производится дополнительное облучение вещества люминофора от специального источника с квантами, имеющими большую энергию, например лампой, излучающей ультрафиолетовый свет. Интенсивность излучения вспомогательного источника устанавливают таким образом, чтобы яркость свечения люминофора была средней. Тогда при воздействии СВЧ-излучения условия работы люминофора будут изменяться и яркость свечения будет зависеть от падающей на люминофор СВЧ-энергии, что позволит наблюдать ее распределение в пространстве.

**Жидкие кристаллы** имеют молекулярную структуру, промежуточную между жидкостью (обладают текучестью) и твердым телом (аномальные оптические свойства). Для целей неразрушающего контроля применяют холестерические жидкие кристаллы. Тонкий слой жидкого кристалла в зависимости от его температуры и угла наблюдения имеет наибольший коэффициент отражения для света определенной длины волны. Поэтому, если освещать пленку на основе жидкого кристалла белым светом и фиксировать угол наблюдения, при изменении температуры можно получить максимум интенсивности отражения для различных цветов — компонентов белого света. Чтобы улучшить условия наблюдения, жидкий кристалл наносится на пленку с зачерненной основой, что повышает контрастность изображения и устраняет помехи за счет вторичного отражения. При проведении контроля пленку накладывают на контролируемый объект и по цветной окраске оператор судит о температуре в той или иной части объекта, обусловленной нагревом его СВЧ-излучением. Чувствительность неразрушаемого контроля с помощью жидких кристаллов при прочих равных условиях определяется числом различаемых оператором градаций цвета. Для некоторых жидких кристаллов на основе холестерина окраска отраженного света изменяется по всему спектру от красного до фиолетового при изменении температуры на 1—3 К, что дает возможность оценивать разрешающую способность проведения контроля с их помощью 0,1—0,2 К. Тепловые переходы в жидких кристаллах обратимы, поэтому индикаторы на их основе можно использовать многократно. По сравнению с другими термоиндикаторами жидкие кристаллы особенно эффективны при необходимости отличать малые градиенты температур при невысоких температурах (10—120 °С).

**Фотоэмульсии** в стадии проявления (полупроявленная фотопленка или фотобумага) также чувствительны к теплоте. Если фотоэмульсия за счет СВЧ-излучения будет по-разному прогрета на соседних участках, то скорость проявления на этих участках также будет отличаться и после завершения процесса проявления и закрепления степень почернения фотоматериала будет больше, там, где падало больше СВЧ-энергии. Поэтому, наложив полупроявленную фотоэмульсию на облучаемый контролируемый объект, можно получить изображение распределения СВЧ-поля. В радиоволновом контроле фотоэмульсии применяются редко.

**Измерительные преобразователи** (первичные измерительные преобразователи, датчики) производят преобразование компонентов СВЧ-излучений и полей в электрические сигналы, удобные для последующей обработки. В качестве первичных измерительных преобразователей применяют: полупроводниковые и термоэлектрические приборы [1, 13]. Полупроводниковые приборы (СВЧ-диоды и транзисторы) построены на базе р-п-перехода и за счет его нелинейных свойств дают возможность преобразовать СВЧ-колебания в сигналы постоянного тока, видеосигналы или сигналы более низкой частоты (преобразование частоты). При выпрямлении СВЧ-колебаний получают видеосигналы или сигналы низкой частоты (выделение огибающей СВЧ-колебаний) и постоянную составляющую выпрямленного тока, что используется для непосредственной индикации сигналов магнитоэлектрическими микроамперметрами. Когда полупроводниковые диоды используются в качестве смесителя для преобразования частоты, огибающая СВЧ-колебаний и их фаза переносятся на пониженную несущую (разностную)

частоту, обработка сигнала на которой производится радиоэлектронной техникой, имеющей лучшие технические и метрологические показатели. Наибольшее применение в аппаратуре радиоволнового контроля получили СВЧ-диоды. Термоэлектрические приборы (терморезисторы, термисторы и болометры) используют тепловое действие СВЧ-энергии, поэтому их изготавливают из материалов, хорошо преобразующих тепловые изменения в электрические сигналы.

Т а б л и ц а 3.1

Показатели	Тип диода					
	Д606	2А201А	2А202А	Д405, Д405БП	2А104А, 2А104АР	2А105Б, 2А105БВ
Основное назначение	Видеодетектор			Смеситель		
Рабочая длина волны, см:						
минимальная	0,6	8	3	2,7	10	3
максимальная	3,2	60	8	4,5	30	8
Наибольший КБВ	0,83	0,83	0,83	0,50	0,67	0,67
Наименьшая чувствительность по току, А/Вт	14	5,5	2,5	—	—	—
Наибольшие потери преобразования, дБ	—	—	—	7,0	6,5	6,7
Сопротивление в рабочей точке, кОм	0,4	0,4	0,4	0,2—0,6	0,3—0,6	0,2—0,5
Наибольшая допустимая подводимая СВЧ-мощность, мВт (имп.)	200	1,5	1,5	300 (имп.)	20	20

**Полупроводниковый СВЧ-диод** [1] — это точечный диод, специально предназначенный для применения в СВЧ-диапазоне. Его конструкция чаще всего выполняется в виде коаксиальных форм с толстыми и короткими элементами — выводами, удобными для монтажа и электрического соединения с канализирующими СВЧ-устройствами (волноводами, длинными линиями). Основные параметры СВЧ-диодов даны в табл. 3.1. Учитывая, что СВЧ-диод и элементы секции (обычно параметры СВЧ-диодов задают вместе с волноводной секцией) имеют паразитные индуктивности и емкости, ограничивающие его возможности, для каждого диода указывают рабочий диапазон длин волн и наибольшее значение КБВ, получаемое при его использовании.

Высокая чувствительность диода за счет малых размеров р-л-перехода определяет его плохие перегрузочные способности и даже при кратковременных перегрузках СВЧ-диод может потерять выпрямительные свойства, а при незначительных перегрузках может произойти необратимое изменение вольт-амперной характеристики диода, что приведет к изменению его метрологических характеристик. Перегрузка может произойти также от наводок и стекающих статистических зарядов, поэтому хранят СВЧ-диоды в металлических патронах и из этих же соображений при установке СВЧ-диода надо обесточить установку путем заземления, чтобы полностью исключить возможность стечения по диоду статического электричества, накопленного на элементах установки или аппаратуры. Основной характеристикой СВЧ-диода является вольт-амперная характеристика  $U(I)$ , которая на прямом участке близка к параболе. Вольт-амперную характеристику снимают с помощью измерительной линии на рабочей частоте, поскольку на нее влияют паразитные параметры ( $L$ ,  $C$ ) диода и элементов конструкции детекторной секции.



Таблица 3.2

Показатели	Тип терморезистора			
	ТВЕ	ТВМ	Т9	ТШ2
Сопротивление $R_0$ в рабочей точке при 20°C, Ом	150	200	125	150
Температурный коэффициент сопротивления, %/К	1—6	1—6	1—6	—
Коэффициент энергетической чувствительности, Вт/%	20—50	18—33	30—120	—
Постоянная времени, с	0,5—2,5	0,5—2,5	0,5—2,5	—
Мощность в рабочей точке при 20°C, мВт	7—10	9—11	7—19	13—17

Полупроводниковые СВЧ-диоды часто выпускают парами с возможно более близкими параметрами, что позволяет получить наилучшие метрологические характеристики при установке в балансные или мостовые цепи. Для повышения чувствительности аппаратуры и согласования измерительной цепи с СВЧ-трактом диоды включают обычно к петле связи, установленной в подстраиваемом резонаторе. Полупроводниковые диоды по сравнению с другими первичными измерительными преобразователями СВЧ-энергии отличает высокое быстродействие, большая чувствительность и простота использования. Их недостаток — невысокие метрологические характеристики и плохая перегрузочная способность.

**Терморезистор** [1] — нелинейный полупроводниковый резистор, сопротивление которого сильно зависит от температуры. Терморезисторы выполняются из полупроводникового материала сложного состава с температурным коэффициентом до 6% на 1 К. Для работы в СВЧ-диапазоне применяют измерительные терморезисторы (термисторы), позволяющие проводить измерения мощности от долей микроватта до нескольких милливольт. Параметры некоторых измерительных терморезисторов даны в табл. 4.3. Свойства терморезистора описывают две характеристики: температурная  $R(T)$  — зависимость сопротивления от температуры и вольт-амперная  $U(I)$ . Поскольку СВЧ-энергия в терморезисторе преобразуется в тепловую, терморезистор характеризуют температурным коэффициентом и постоянной времени, которая по сравнению с диодами оказывается большой, что и ограничивает их области применения.

**Болометры** — специально выполненные резисторы из проводникового или полупроводникового материала, предназначенные для обнаружения и измерения чрезвычайно малых потоков мощности. По сравнению с другими терморезисторами болометры отличает более высокая стабильность характеристик (металлические болометры), но вместе с тем — пониженные температурные коэффициенты. Их так же, как СВЧ-диоды, изготавливают парами, причем располагают рядом и один из них экранируют от излучения. Болометры часто применяют с охлаждением до низких температур с целью увеличить их чувствительность и снизить погрешность измерений.

### 3.3. Геометрический метод радиоволнового контроля

Геометрический (лучевой) метод контроля основан на регистрации пространственного положения (смещения) максимума интенсивности радиоволнового пучка, прошедшего сквозь контролируемый объект или отраженного от его внутренней поверхности. С помощью геометрического метода производится контроль объектов или их частей в виде листа, пластины, стенки или слоев значительно больше . Смещение центрального луча, несущего максимум электромагнитной энергии прямо пропорционально толщине слоя, а величина электромагнитных параметров среды или слоев не влияет на положение максимума. Электромагнитные параметры объекта контроля и окру-

жающей среды влияют лишь на интенсивность сигналов, но не на относительное их распределение в пространстве. Это является

ценной особенностью геометрического метода, поскольку существенно уменьшает число мешающих контролю факторов. Угол падения целесообразно брать определенной величины, однако установить ее не всегда удается из-за особенностей внутреннего отражения. В реальных условиях радиоволнового контроля картина формирующегося СВЧ-поля получается гораздо сложнее, чем это следует из законов геометрической оптики, ввиду возможных отражений от различных неоднородностей в материале объекта контроля и его удаленных границ, не идеальности поверхностей раздела слоев контролируемого объекта и из-за отражений от посторонних предметов, попадающих в зону облучения СВЧ-колебаниями. Поверхности реальных объектов имеют значительные неровности, что ведет к отклонению и рассеянию пучка СВЧ-энергии. Практика радиоволнового контроля показывает, что неоднородности поверхности должны быть малы по сравнению с четвертью длины волны.

При радиоволновом контроле геометрическим методом определение положения максимума интенсивности СВЧ-излучения производится путем анализа распределения интенсивности излучения в пространстве. Наиболее надежным способом нахождения максимума является запись кривой распределения на бумагу, магнитофонную ленту или носитель информации аппаратуры с запоминающим устройством (например, на осциллоскоп с памятью или в ЭВМ), для чего необходим также механизм перемещения. При наличии острого максимума возможно использование и прямо показывающих приборов. В связи с этим по сравнению с другими методами контроля геометрический имеет большое время измерения, т. е. меньшую производительность, и его используют при больших значениях измеряемых толщин или сильных вариациях электромагнитных свойств, когда другие методы не позволяют производить контроль с требуемой достоверностью.

Примером аппаратурной реализации геометрического способа является толщиномер СТ-11Л, принцип действия которого поясняет функциональная схема (рис. 3.4).

На огнеупорную кладку *КЛ* печи в зоне, подвергаемой контролю, накладывается излучающий *ИР* и приемный *ПР* рупор с согласующими вставками *СВ<sub>1</sub>* и *СВ<sub>2</sub>*. Излучающий рупор *ИР* получает СВЧ-энергию от клистронного генератора *КГ* через аттенюатор *А* и волноводную секцию *ВС<sub>1</sub>* и располагается на огнеупорной кладке *КЛ* неподвижно. Часть энергии из волновода *ВС<sub>1</sub>* с помощью петли связи *П<sub>1</sub>* подводится к амплитудному детектору *АД<sub>1</sub>*, преобразующему СВЧ-сигнал с помощью диода в постоянный ток, который вызывает отклонение стрелки измерителя мощности *ИМ* (микроамперметра). С помощью прибора *ИМ* II аттенюатора *А* толщиномер в зависимости от величины СВЧ-сигналов перестраивают при контроле кладок *КЛ* из различных материалов.

Приемный рупор *ПР* может перемещаться вдоль кладки *КЛ* с помощью механизма перемещения *МП*, что необходимо для поиска максимальной напряженности электромагнитного поля, соответствующего приходу центрального луча, отраженного от границы огнеупорной кладки и горячей стекломассы *ГМ*. Положение приемного рупора *ПР* относительно излучающего рупора *ИР* может быть определено непосредственно или дистанционно по показанию указателя перемещения *УП*, выполненного на базе переменного резистора с выходом на стрелочный прибор, размещенный на передней панели толщиномера. Для снижения сигналов от прямого прохождения СВЧ-излучения, маскирующих имеющийся максимум, установлен электромагнитный экран *ЭК*. Энергия СВЧ-колебаний, принятая приемным рупором *ПР*, подводится через волноводную секцию *ВС<sub>2</sub>* и с помощью петли *П<sub>2</sub>* — в амплитудный детектор *АД<sub>2</sub>*, преобразующий СВЧ-колебания в постоянное напряжение, величина которого зависит от их интенсивности. Настройка приемного тракта толщиномера для получения больших СВЧ-сигналов производится короткозамыкающим настроечным поршнем *НП*. Выпрямлен-

ный сигнал увеличивается усилителем  $У$  и поступает на регистрирующий прибор  $РП$ , показывающий величину пришедшего СВЧ-сигнала или записывающий ее на диаграммной ленте  $ДЛ$ , которая двигается синхронно с перемещением приемного рупора  $ПР$ . Основные блоки толщиномера заключены в охлаждаемый кожух  $КЖ$ , между стенками которого протекает охлаждающая вода  $ОХЛ$ .

Контроль с помощью толщиномера СТ-11Л производится следующим образом. После включения и настройки толщиномера в соответствии с материалом кладки рупоры  $ПР$  и  $ИР$  устанавливаются рядом, а затем  $ПР$  перемещается в направлении от  $ИР$ . При этом обычно записывается кривая на диаграммной ленте  $ДЛ$ . На полученной диаграмме выделяют наибольший максимум (максимумов может быть несколько за счет многолепестковой диаграммы направленности рупора и отражений от посторонних предметов или неоднородностей в кладке) и измеряют расстояние, которому соответствует приход наибольшего сигнала. Зная электромагнитные свойства материала кладки, по вспомогательным градуировочным кривым находят толщину стенки из огнеупорной кладки. Если необходимо контролировать кладку на большой площади, проводят несколько замеров, разбив всю площадь стенки на участки и определив необходимое число замеров в пределах участка, поскольку область, где происходит отражение центрального луча, несущего основную информацию о толщине, ограничена.

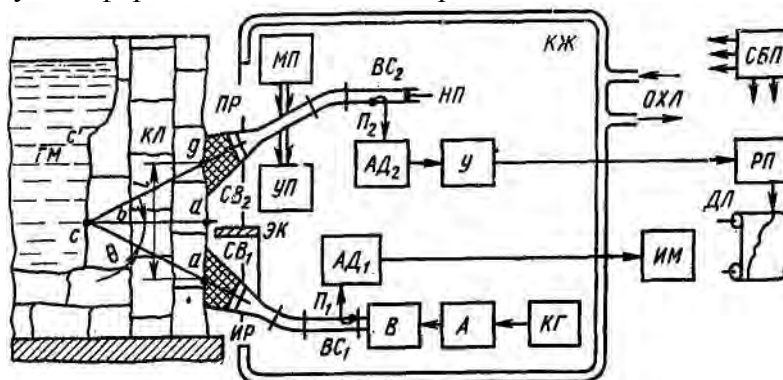


Рис. 3.4 Функциональная схема СВЧ-толщиномера типа СТ-11Л

Если параметры контролируемого слоя неизвестны, применение геометрического метода возможно двухпараметровым способом путем измерения смещения максимумов  $l_1$  и  $l_2$  при двух углах падения излучения  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Воспользовавшись выражением дважды и совместно решив полученные уравнения (при неизвестном  $N$ ), будем иметь выражение:

$$b = l_1 l_2 \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{(l_1^2 \sin^2 2\theta_2 - l_2^2 \sin^2 2\theta_1)}}$$

которое позволяет рассчитать толщину слоя покрытия.

Вариантом реализации геометрического метода является также устройство для контроля толщины горячих листов в процессе проката при двустороннем доступе. Для этого используют две излучающе-приемные антенны, расположенные по разные стороны относительно листа и фактически измеряющие расстояния до поверхностей листа. При фиксированном расстоянии между антеннами сумма зазоров будет непосредственно определять толщину листа. Такой контроль по сравнению с другими видами (вихретоковым, ультразвуковым, радиационным) имеет большие преимущества: бесконтактность, на результаты не влияют свойства металла, температура и скорость движения листа.

Погрешность измерений с помощью толщиномеров, реализующих геометрический метод, складывается из погрешности, которую создают электронные блоки толщиномера (около 5%), и от влияния мешающих факторов, связанных с контролируемым объектом и условиями контроля. Основными мешающими факторами являются: вариация электрических свойств материала кладки (влияет на смещение луча и величину отраженно-

го сигнала или воздушного промежутка), а также электрические и структурные свойства горячей массы (изменяет в основном отраженный сигнал), посторонние включения в материале кладки или на поверхности металла, неровность, непараллельность границ объекта контроля и неточность фиксации рупоров относительно него.

### 3.4. Радиоволновой контроль по прошедшему излучению

Приближенный анализ коэффициента передачи СВЧ-тракта «излучающее устройство — контролируемый объект — приемное устройство» показывает, что СВЧ-сигнал зависит от толщины слоев контролируемого объекта, диэлектрической и магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости. Причем при малых (по сравнению с  $\lambda/4$ ) толщинах и правильном выборе условий контроля эта зависимость носит монотонный характер. Ценной особенностью контроля по прошедшему излучению является слабая зависимость СВЧ-сигналов от смещений контролируемого объекта в направлении от излучающего к приемному устройству, если расстояние между ними фиксировано, а в тракте создан режим, близкий к режиму бегущей волны. Ослабление, вызванное контролируемым объектом типа листа толщиной  $b$  с параметрами  $\epsilon$  и  $\text{tg } \delta$ , может быть приближенно оценено:

$$A_n \approx 54 \frac{b}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon} \text{tg } \delta,$$

из которого следует, что по прошедшему излучению можно измерять любой из трех параметров  $b$ ,  $\epsilon$  или  $\text{tg } \delta$  при известном  $\lambda_0$ .

Радиоволновой контроль по прошедшему излучению дает хорошие результаты также при обнаружении четко выраженных дефектов, т. е. в случае большого перепада электромагнитных свойств. Например, обнаружение металлических включений и пустот в диэлектрических материалах со значительной диэлектрической проницаемостью участки с большим значением диэлектрической или магнитной проницаемости при общем малом их значении и т. д. Значение толщины, когда возможен радиоволновой контроль по прошедшему излучению, зависит от затухания СВЧ, глубины проникновения колебаний и коэффициента отражения от границ, который в значительной степени определяется перепадом электромагнитных свойств на границах.

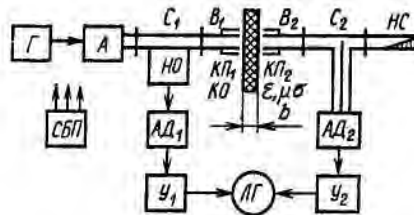


Рис. 3.4 Функциональная схема устройства для контроля листов

Радиоволновой контроль по прошедшему излучению применим в тех случаях, когда возможен двусторонний доступ к внешним границам контролируемого объекта. В простейшем варианте такого контроля в приемном тракте обеспечивают режим бегущей волны и измеряют амплитуду полученного СВЧ-сигнала. Недостатком такого метода контроля является сильная зависимость сигнала от уровня излучения и малая чувствительность. Поэтому аппаратура с лучшими метрологическими характеристиками выполняется с использованием балансных или мостовых схем. Ниже изображены различные применяемые варианты построения аппаратуры радиоволнового контроля, работающей на проход, на базе типовых блоков.

Измеритель, функциональная схема которого показана на рис. 3.4, может быть использован для однопараметрового контроля толщины или свойств тонких листовых материалов. В этом измерителе за счет измерения величины, связанной с отношением мощности прошедшей и падающей волн, результат контроля не зависит от небольших

вариаций выходной мощности генератора. Его преобразовательная часть выполнена на базе двух открытых концов волноводов  $B_1$  и  $B_2$ , защищенных четвертьволновыми кольцевыми прорезями  $KП_1$  и  $KП_2$ , в промежутке между которыми помещается контролируемый объект  $КО$ . Показание логометра ЛГ-прибора, измеряющего отношение токов, пропорциональных прошедшему излучению и ответвленной направленным ответвителем  $НО$ , не зависит, от подаваемой от генератора  $Г$  через аттенуатор  $А$  мощности и определяется только свойствами контролируемого объекта, что особенно существенно при радиоволновом контроле объектов с различными отражательными характеристиками и при изменении выходной мощности СВЧ-генератора.

Измеритель, построенный в соответствии со схемой рис. 3.4, имеет невысокую чувствительность из-за плохого согласования волноводов  $B_1$  и  $B_2$  и усиления сигналов по постоянному току, ограниченного дрейфом. Кроме того, этот измеритель не позволяет производить раздельный контроль параметров контролируемого объекта.

Повышенную чувствительность имеет двухканальное устройство с усилением по переменному току, функциональная схема которого изображена на рис. 3.5, а на рис. 3.6 приведены временные зависимости, характеризующие его работу при контроле толщины листа. Источником СВЧ-колебаний в нем является генератор  $Г$ , питаемый от блока питания  $СБП$  и модулятора  $МД$ , который создает прямоугольное напряжение с частотой 1 кГц и подает его на лавинно-пролетный диод или на клистрон, в результате чего СВЧ-колебания также имеют огибающую в виде прямоугольного радиоимпульса.

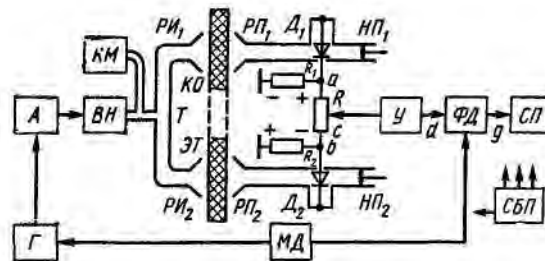


Рис. 3.5. Функциональная схема двухканального устройства для контроля листа

Радиоимпульсы через аттенуатор  $А$ , вентиль  $ВН$  и секцию контроля мощности  $КМ$  поступают к простому тройнику  $Т$ , разделяющему СВЧ-энергию на две равные части, направляемые в одинаковые излучающие рупоры  $РИ_1$  и  $РИ_2$ . Часть СВЧ-энергии отражается от внешней поверхности контролируемого объекта  $КО$  и эталона  $ЭТ$ , но затухает в вентиле и аттенуаторе и почти не влияет на работу генератора  $Г$ . Если свойства объекта контроля и эталона одинаковы, то напряженность электрического поля в 1- и 2-каналах (объекта контроля и эталона) одинакова (рис. 3.6, а, кривые  $E_1$  и  $E_2$ ). Поэтому после выпрямления диодами  $Д_1$  и  $Д_2$  СВЧ-сигналы напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  будут иметь вид одинаковых прямоугольных импульсов (рис. 3.6, а, кривые  $u_a$  и  $u_b$ ). Получить максимальный сигнал позволяет настройка с помощью короткозамыкающих настроечных поршней  $НП_1$  и  $НП_2$ . Учитывая разную полярность напряжений  $u_a$  и  $u_b$ , нетрудно видеть, что потенциал средней точки потенциометра при определенном положении его движка, достигаемый при настройке, будет равен нулю ( $u_c=0$ ). Вследствие этого напряжения на выходе усилителя  $У$  и фазового детектора  $ФД$  будут равны также нулю (рис. 3.6, а) и не вызовут отклонения стрелочного прибора  $СП$ .

Предположим, контролируемый лист имеет толщину меньше номинального значения. В этом случае напряженность поля  $E_2$  в приемном рупоре  $РП_2$  будет больше (рис. 3.6, б), чем при номинальном значении толщины листа (рис. 3.6, а), увеличится импульс напряжения ( $u_b$ ) на выходе детектора  $Д_2$ , что приведет к появлению напряжения ( $u_c$ ) на движке потенциометра  $Ри$  соответственно на выходе усилителя  $У$  ( $u_a$ ) при увеличении толщины (см. рис. 3.6, в). В результате работы фазового детектора  $ФД$  с учетом фазы опорного напряжения, создаваемого модулятором  $М$  и совпадающего, например, с напряжением  $u_a$ , на его выходе появится постоянное отрицательное выходное

напряжение (рис. 3.6, б), которое покажет стрелочный прибор СП.

Таким образом, двухканальное устройство, построенное в соответствии с функциональной схемой, изображенной на рис. 3.4, имеет повышенную чувствительность за счет сравнения сигналов эталонного и контролируемого объекта или за счет наличия усиления приращенных сигналов огибающей СВЧ-колебаний по переменному току. Использование модуляции прямоугольными импульсами и применение фазового детектора ФД является типичным и дает возможность повысить чувствительность и определить знак приращения контролируемого параметра.

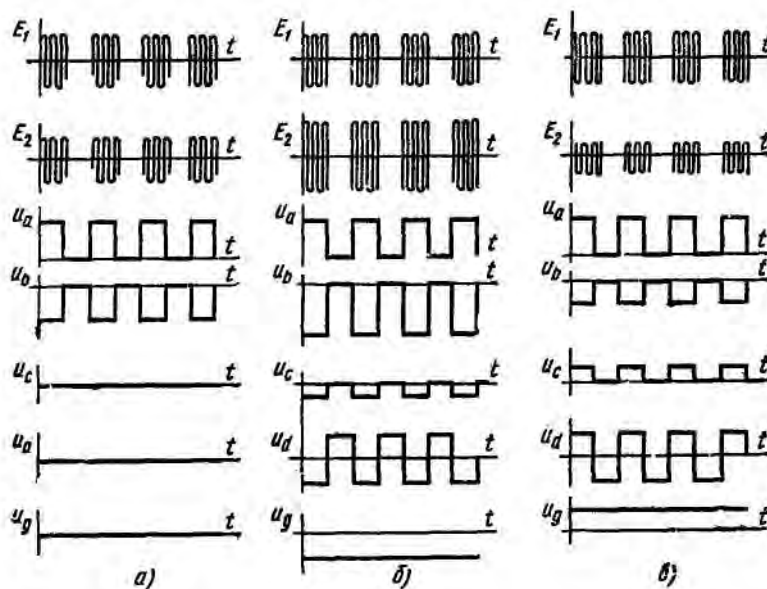


Рис. 3.6. Временные зависимости изменения электрических величин в двухканальном устройстве при различных толщинах:

*a* — номинальной, *б* — малой, *в* — большой

Устройство с двумя каналами (см. рис. 3.5) позволяет определить изменения толщины, магнитной и диэлектрической проницаемостей, удельной электрической проводимости, а также определять наличие неоднородностей в листе. Радиоволновой контроль с помощью этого устройства может производиться тремя различными способами: абсолютные измерения параметров контролируемого объекта, относительные измерения (контроль отклонения в поле допуска) путем сравнения с эталоном или образцовым объектом (этот режим был описан ранее) и путем самосравнения двух разных участков контролируемого объекта, что характеризует высокую универсальность этого устройства, а также обеспечивает высокую стабильность нуля и возможность реализации высокой чувствительности за счет усиления сигналов по переменному току. Однако такое устройство не дает возможности вести радиоволновой контроль с учетом фазы пришедших СВЧ-сигналов, что снижает его информационную способность. Такую обработку можно производить, если до выпрямления СВЧ-сигналов использовать тройник, где будет происходить их сложение с учетом фазы.

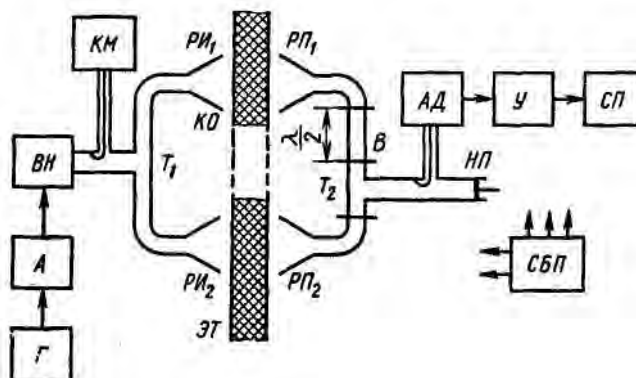


Рис. 3.7. Функциональная схема амплитудно-фазового СВЧ-прибора

Функциональная схема простейшего варианта устройства для радиоволнового контроля по прошедшему излучению с учетом амплитудных и фазовых характеристик СВЧ-сигналов, "используемая для дефектоскопии, приведена на рис. 3.7 (основные обозначения соответствуют рис. 3.5). Это устройство содержит два одинаковых простых  $T_1$  и  $T_2$  тройника, что позволяет разделить излучаемую энергию на два потока, а затем сложить полученные СВЧ-сигналы. Для создания СВЧ-сигналов, отличающихся на  $180^\circ$ , в одно из плеч сравнения тройника  $T_2$  приемной части введен фиксированный фазовращатель в виде отрезка волновода  $B$ . Несколько упростить конструкцию и улучшить частотные свойства СВЧ-тракта можно, используя в излучающей и приемной частях разные тройники ( $E$  и  $H$  или  $H$  и  $E$ ), что позволит получить набег фазы в  $180^\circ$ , сохраняя симметрию плеч в приемной части устройства. Если СВЧ-сигналы, полученные рупорами  $PP_1$  и  $PP_2$ , будут отличаться по амплитуде или по фазе, то на выходе тройника  $T_2$  появится разностный сигнал, который после выпрямления амплитудным детектором  $AD$  и усиления будет отмечаться прибором  $СП$ . Рассмотренные устройства позволяют решить большинство практических задач, доступных для контроля по прошедшему излучению.

### 3.5. Радиоволновая толщинометрия

Влияние геометрических размеров контролируемого объекта на характеристики СВЧ-сигналов определяется их отношением к длине волны в материале слоя, которая зависит от его электромагнитных параметров. При контроле геометрических размеров в режиме стоячей волны напряженность электрического поля в СВЧ-тракте будет периодически изменяться при увеличении толщины какого-либо слоя контролируемого объекта или расстояния между излучающим и приемным устройствами и внешней границей контролируемого объекта (зазорами), это делает однозначный их контроль с использованием одночастотных методов чрезвычайно затруднительным. В зависимости от конкретных условий контроля, информативного параметра (амплитуда, фаза и т. д.) и метода выделения полезной информации однозначный контроль толщины возможен в пределах четверти или половины длины волны в данном материале. СВЧ-сигналы зависят от перепада свойств слоя покрытия и основания. Если основания из металла или сплава, значения сигналов будут наибольшими.

Электромагнитные параметры слоя, толщина которого измеряется, также влияют на ход интерференционной кривой, и чтобы не возникало больших погрешностей, их отклонения от номинальных значений не должны выходить за допустимые пределы. Так как обобщенным параметром для зависимости СВЧ-сигналов от геометрических размеров к длине волны в материале, нетрудно видеть, что составляющая относительной погрешности измерения будет равна

$$\Delta b/b = \Delta f/f + 0,5(\Delta \epsilon/\epsilon + \Delta \mu/\mu).$$

При проведении анализа погрешностей прибора или установки обязательно должны быть учтены и другие составляющие погрешностей (от нестабильностей блоков, нелинейности влияния размера, изменений в окружающей среде, непостоянства питающих напряжений и т. д.). Чаще всего СВЧ-толщинометры работают, используя отраженное излучение, что позволяет производить радиоволновой контроль при одностороннем доступе к контролируемому объекту. Наиболее сильным мешающим фактором в этом случае является вариация зазора, что проявляется в нарушении фазовых соотношений между падающей и отраженной СВЧ-волнами или в уменьшении амплитуды проходящего отраженного сигнала, поскольку СВЧ-волна — не плоская. Большую погрешность могут вызывать также изменения взаимного положения излучающего или приемного устройства и контролируемого объекта, его формы, состояния поверхности наличия

неоднородностей, дефектов и т. д. Технические данные характерных СВЧ-толщиномеров приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Показатели	Тип толщиномера			
	СТ-21И	СТ-31И	СВП-4	СИТ-1
Диапазон измеряемых толщин покрытия, мм	1—20	1,5—7	0,001—0,1	0,001—0,1 (1—25) · 10 <sup>-5</sup> *
Погрешность измерения: мм	0,1—0,15	0,1	—	—
%	—	—	5	8
Диапазон перестройки по диэлектрической проницаемости	1,5—9	1,5—7	1,5—3	2—6
Удельное электрическое сопротивление: Ом·м	—	—	1—8	—
или tg δ	0,01	0,01	—	0,03
Материал основания	—	Металл	—	Металл или диэлектрик*
Форма поверхности объекта контроля	—	—	—	—
Рабочая частота, ГГц	Цилиндр R > 200 мм	—	Плоскость	—
	9,3	9,3	37,5	150

\* Возможен контроль толщины металлических пленок от 0,01 до 0,25 мкм на диэлектрическом основании.

При контроле больших размеров успешно применяются интерференционные методы, когда набег фазы от изменения контролируемого геометрического размера превышает 2 и определяется чаще всего с помощью фазовых измерений. Такой принцип, в частности, реализуется на базе интерферометра РМИ-01 [1], позволяющего контролировать слои диэлектрика толщиной до 0,1 м при вариации диэлектрической проницаемости 1—3% и tg δ —10% и выявлять зоны неравноплотности площадью более 25 мм<sup>2</sup>.

Рассмотрим принцип действия типичного СВЧ-толщиномера СТ-31И [1], функциональная схема которого дана на рис. 3.8 и который реализует амплитудно-фазовый способ. Основное его назначение— контроль толщины диэлектрических покрытий на любом металлическом основании.

Источником СВЧ-колебаний в толщиномере является клистронный генератор *КГ*, создающий с помощью модулятора *МД* радиоимпульсы прямоугольной формы. Через аттенуатор *А<sub>1</sub>* СВЧ-энергия поступает в детекторную секцию *ДС<sub>1</sub>* необходимую для калибровки мощности с помощью стрелочного прибора *СП*, подключаемого переключателем *ПР*. К выходу детекторной секции *ДС<sub>1</sub>* подключен вентиль *ВН<sub>1</sub>* стабилизирующий работу генератора и подводящий энергию к СВЧ-мосту *М*, разделяющему ее на два равных потока, идущих к измерительному рупору *ИР* и настроечной Цепи в виде аттенуатора *А<sub>2</sub>* (амплитуда) и закорачивающего поршня *НП* (фаза). Измерительный рупор *ИР* излучает СВЧ-энергию на контролируемый объект и принимает СВЧ-сигнал, отраженный от него. Рупор *ИР* устанавливается перпендикулярно поверхности контролируемого объекта ( $\theta = 0^\circ$ ). В результате наложения потока СВЧ-колебаний (*Л<sub>2</sub>* и *НП*) и потока, отраженного от контролируемого объекта, в симметричное ответвление СВЧ-моста *М* (плечо сравнения) поступает сигнал, определяемый их разностью и зависящий от амплитуды и фазы волны, идущей от контролируемого объекта. Чтобы не нарушать работу моста *М* из-за отражений в детекторной секции *ДС<sub>2</sub>*, последняя подключена через вентиль *ВН<sub>2</sub>*, задерживающий отраженную волну. Чтобы устранить влияние вторичных отражений, внешняя часть устройства воздействия на объект, обращенная к контролируемому объекту, покрыта поглощающим материалом *ПГ*. Рупор *ИР* механически скреплен с настроечной винтовой парой *НВ* и фиксирующими роликами <PP<sub>1</sub> и ФЯ<sub>2</sub>, контактирующими с поверхностью контролируемого объекта и перемещающимися по ней. Подпружиненная каретка, фиксирующие ролики <PP<sub>2</sub>, ФР<sub>2</sub> и настроечный



винт *НВ* позволяют устанавливать расстояние -от рупора *ИР* до поверхности контролируемого объекта и поддерживать его постоянным с погрешностью не более  $\pm 0,05$  мм.

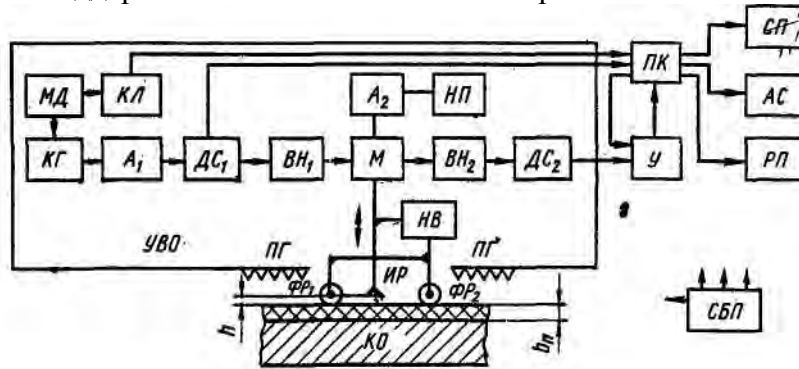


Рис. 3.8 Функциональная схема СВЧ-толщиномера типа СТ-31И

К выходу детекторной секции  $ДС_2$  подключен многокаскадный усилитель переменного тока  $У$ . Установка и проверка его коэффициента усиления производится -с помощью калибратора  $КЛ$ , создающего напряжение частоты 1 кГц стабильной амплитуды и подключаемого переключателем  $ПК$ . Толщина покрытия контролируемого объекта показывается регистрирующим прибором  $РП$  (Н-340) по сменным шкалам или определяется по стрелочному прибору  $СП$  с помощью (в случае необходимости) градуировочных кривых. Помимо индикации толщины покрытия стрелочный прибор  $СП$  используется для настроечных операций: установка режима работы клистронного генератора  $КГ$ , регулировка коэффициента передачи усилителя  $У$ , настройка толщиномера по контрольным точкам и др. На выход усилителя  $У$  могут быть включены блоки автоматики и сигнализации  $АС$ , создающие электрические, световые и звуковые сигналы при выходе толщины покрытия за установленные пределы.

Толщиномеры типа СТ-31И перед началом измерений настраивают в определенной последовательности. Прежде всего производится настройка генераторной части толщиномера по показанию прибора  $СП$ , чтобы обеспечить излучение определенной СВЧ-мощности. Затем производится настройка измерительно-преобразовательной части с помощью прибора  $СП$  или регистрирующего прибора Н-340 по контрольной точке на сменной шкале, соответствующей предполагаемым значениям толщины, а рупор  $ИР$  фиксируется роликами  $ФР_1$  и  $ФР_2$  относительно него на расстоянии 1, 3 или 7 мм в соответствии с диапазоном измерений. По сменной шкале, с помощью прилагаемых к толщиномеру контрольных образцов  $i$  производится его калибровка. В случае, если свойства контролируемого объекта (в первую очередь  $\epsilon$ ) отличаются от тех, для которых имеются сменные шкалы, следует изготовить комплект контрольных образцов из материала покрытия, проградировать по ним толщиномер и производить измерения с помощью этой градуировочной кривой.

Погрешность измерения толщины покрытия зависит от условий проведения контроля, контролируемого объекта, изменения зазора и электромагнитных свойств покрытия. Зазор может изменяться за счет эксцентриситета или износа фиксирующих роликов либо из-за неровности поверхности контролируемого объекта, так как рупор  $ИР$  и ролики  $ФР_1$  и  $ФР_2$  смещены друг относительно друга. Аналогично влияют перекосы и шероховатость поверхности контролируемого объекта, что в первую очередь изменяет также смещение роликов, причем неидеальность границы раздела «покрытие — основание» сказывается значительно меньше, чем шероховатость внешней границы объекта. Существенную погрешность может дать вариация диэлектрической или магнитной проницаемости покрытия относительно номинальной, что приводит к изменению длины волны в материале покрытия и, следовательно, к появлению дополнительного сдвига фазы отраженной волны. Аналогично, но в меньшей степени сказываются неоднородности диэлектрической проницаемости по глубине покрытия, однако это не исключает возможности контроля изделий с периодической достаточно мелкой структурой

(стеклопластики, гетинакс, волокнистые материалы и др.). Значительную погрешность может вызвать наличие в диэлектрическом покрытии металлических включений, полностью отражающих падающую СВЧ-энергию, или влаги и приближение края изделия.

Для измерения толщины тонких пленок также используют поляризационные методы. Примером такого устройства является толщиномер СИТ-1, построенный на базе гониометра ГС-5 и позволяющий контролировать толщину по эллиптичности отраженных СВЧ-колебаний.

Радиоволновые толщиномеры особенно эффективны при контроле диэлектрических покрытий на металлическом основании, свойства которого (магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость) могут изменяться в любых пределах, что является большим преимуществом по сравнению с вихретоковыми приборами. Возможность бесконтактного контроля покрытий из мелкоструктурного неоднородного материала (покрытия с наполнителем из пористых материалов и т. п.) является их большим преимуществом по сравнению с акустическими толщиномерами.

### 3.6. Дефектоскопия радиоволновым методом

Под дефектом в узком смысле слова понимают нарушение сплошности материала или неоднородности, характеризующееся резким изменением его свойств. Обнаружение несплошностей с помощью СВЧ-излучений, как правило, возможно при размерах дефектов, соизмеримых с длиной волны колебаний в основном материале и с раскрытием антенн, или дефектов большей величины. Для дефектоскопии можно использовать аппаратуру, построенную на тех же принципах, что и для толщинометрии и контроля электромагнитных свойств. Однако разрешающая способность при этом получается небольшой из-за того, что даже малые вариации толщины или электромагнитных свойств контролируемого объекта (как от партии к партии, так и на разных участках в пределах одного объекта) приводят к появлению СВЧ-сигналов, превышающих сигналы от дефектов минимальных размеров, а часть полезной информации, содержащаяся в изменении фазы, может быть потеряна. Поэтому, чтобы получить высокую разрешающую способность аппаратуры к дефектам, обычно используют *метод самосравнения*. Для его реализации необходимо иметь два комплекта излучающих и приемных устройств, размещаемых на близких участках контролируемого объекта. В этом случае выходной сигнал будет определяться разностью амплитуд и фаз сигналов почти от одинаковых участков объекта и при малом градиенте толщины и электромагнитных свойств по его длине, разрешающая способность аппаратуры существенно возрастает, так как дефект приводит к резкому изменению одного из сигналов. Выявляемый дефект с минимальными размерами при определенном режиме работы аппаратуры зависит от непостоянства толщины и электромагнитных свойств контролируемого объекта в направлении, в котором смещены комплекты излучательно-приемных устройств, с этой точки зрения необходимо располагать их максимально близко друг к другу, однако такое сближение затруднено затеканием СВЧ-токов из одного тракта в другой и взаимными наводками, а также касанием антенн. Кроме того, дефект или его края не должны одновременно попадать в зону контроля приемно-излучающих устройств.

Если считать, что на выходе приемного устройства появляется сигнал  $a$ , то для надежного выявления дефекта должны выполняться соотношения:

$$K_p \frac{\partial a}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial x} l_0 \leq K_{сш} K_d \frac{\partial a}{\partial V_d},$$

$$a_{рб} \leq K_{сш} K_{др} \frac{\partial a}{\partial V_d},$$

где  $K_k$  — коэффициент, характеризующий влияние параметра  $p$  ( $\epsilon$ ,  $f_i$ ,  $b$  или  $\gamma$ ), связанного с контролируемым объектом;  $1/C_a$ ,  $1/C_{др}$  — коэффициенты, характеризующие

влияние дефекта;  $l_0$  — расстояние между излучающе-приемными системами сравнения двух участков объекта в направлении сканирования — оси  $x$ ;  $K_{сш}$  — выбранное отношение сигнал/шум;  $U_d$  — объем дефектной области;  $a_{p6}$  — минимальный сигнал разбаланса, определяемый симметрией настройки каналов, передающих потоки СВЧ-энергии от сравниваемых участков контролируемого объекта и до сравнивающего устройства (обычно СВЧ-моста). Первое выражение позволяет оценивать влияние неконтролируемых факторов, а второе выражение — несовершенство блоков аппаратуры. Практически лучшие из таких СВЧ-систем обеспечивают симметрию настройки и балансировки СВЧ-моста до уровня 60—70 дБ относительно подводимого потока мощности, что соответствует обнаружению дефектов в виде воздушных включений с диаметром (0,05ч-0,01)Я. С увеличением толщины контролируемого слоя или глубины залегания дефектов размеры минимально выявляемых дефектов возрастают ввиду затухания электромагнитных волн в материале и их рассеяния.

Наилучшие результаты радиоволновая дефектоскопия дает в сочетании с анализом динамики изменения сигнала (*модуляционный анализ*). Такая возможность представляется особенно существенной при учете характера относительного перемещения контролируемого объекта и излучательно-приемного устройства, создаваемого сканирующим устройством или перемещающими механизмами (вращение, поступательное или колебательное движение и т. д.). При периодическом прохождении дефекта в зоне чувствительности излучательно-приемного устройства возможно использование спектральных методов анализа, существенно повышающих достоверность обнаружения дефектов. В случае одноразового прохождения дефекта сквозь зону контроля (когда контролируемый объект движется поступательно) целесообразно расположить комплекты излучающих и приемных устройств  $z$  направлении движения, что позволит получить сигнал о дефекте дважды — при прохождении первого комплекта и второго. С учетом скорости движения это позволит повысить достоверность контроля за счет корреляционного анализа огибающих СВЧ-сигналов. Радиоволновые дефектоскопы могут быть построены на базе одной антенны в качестве излучающей и приемной (однозондовая схема) или двух антенн (двухзондовая схема). В качестве антенны используют: рупоры, диэлектрические согласующие пластины, петлевые диэлектрические волноводы (поверхностные волны) и др. Для дефектоскопии эффективно применение двух антенн, повернутых относительно плоскости поляризации на  $90^\circ$  и реализующих поляризационный метод.

Помимо дефектоскопов, непосредственно предназначенных для обнаружения дефектов, для радиоволновой дефектоскопии можно с успехом применять *аппаратуру визуализации* СВЧ-полей, которая особенно эффективна для контроля крупногабаритных объектов, где основным типом дефектов являются дефекты конструктивного характера, т. е. отклонение от нормального положения элементов конструкции (арматура, крепежные детали, полости и т. п.), определение взаимного положения элементов, недоступны\* непосредственному контролю геометрических размеров, формы и др. Преимуществом применения аппаратуры для визуализации СВЧ-полей по сравнению с одноточечными дефектоскопами является высокая информативная способность, возможность непосредственного наблюдения формы, структуры, местоположения наблюдаемых дефектов и высокая производительность контроля, а недостатком — пониженная пространственная разрешающая способности. Технические данные по некоторым наиболее характерным типам радиоволновых дефектоскопов приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Показатели	Типы радиоволновых дефектоскопов			
	СД-12Д	СН-10АФ	ДВ-3М	ИМ-1-120
Минимальный размер обнаруживаемых дефектов, мм:	$0,1 \times 10 \times 15$	$0,05 \times 10 \times 10$	—	$0,1 \times 10 \times 20$
расслоений	1	—	0,4	1—3
сферы	1—30	0,5—10	0,5—10	До 10
Толщина материала, мм	1,1—4,5	1,1—4	1,3—3,5	1,5
Диэлектрическая проницаемость материала	0,01	0,01	0,02	0,01
Потери, $\text{tg } \delta$	10	10	5	5
Допустимый зазор, мм	0,1/50	0,1/50	0,1/30	—
Допустимый перекося, мм/мм	10,3	37,5	37,5	37,5
Рабочая частота, ГГц	—	На отражение	—	На прохождение
Режим контроля	Метод самосравнения	Поверхностная волна, диэлектрический волновод	—	Изделия $\varnothing 1$ м, высотой до 1 м, контроль по эталону
Особенности дефектоскопа	—	—	—	—

Типичным и выпущенным серийно наиболее крупной партией является дефектоскоп СД-12Д, построенный на принципе самосравнения участков контролируемого объекта. Он предназначен для бесконтактного обнаружения дефектов типа нарушения сплошности (расслоения, неоднородности материала, инородные включения, отсутствие материала или его компонентов и т. д.) в изделиях в виде листов или покрытий из диэлектрических монолитных и слоистых материалов (резины, пластмассы, керамики, стеклопластика и т. д.). Функциональная схема дефектоскопа СД-12Д приведена на рис. 3.9.

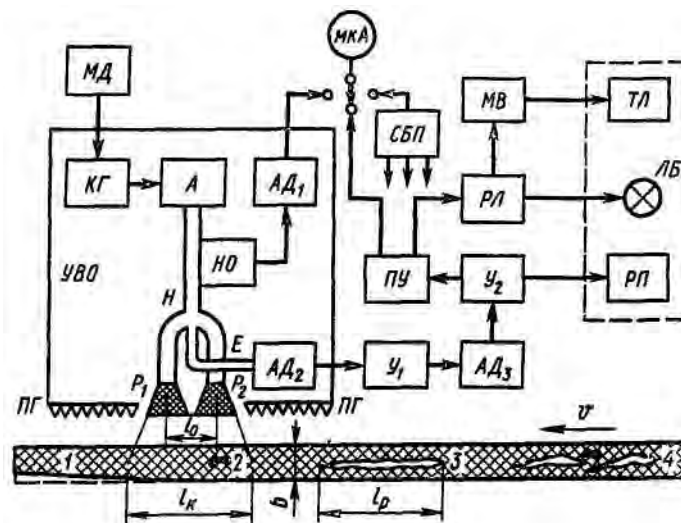


Рис. 3.9. Функциональная схема дефектоскопа типа СД-12Д

Клистронный генератор  $КГ$  создает СВЧ-радиоимпульсы (что обеспечивает модулятор  $МД$ ) и через аттенюатор  $А$  и секцию с направленным ответвителем  $НО$  передает энергию к СВЧ-мосту. Направленный ответвитель  $НО$  отводит часть СВЧ-энергии к детекторной секции  $АД_1$  для индикации уровня мощности с помощью стрелочного прибора—микроамперметра  $мкА$ . СВЧ-мост через Н-плечо разделяет СВЧ-энергию на два одинаковых потока, излучаемых одинаковыми рупорами  $P_1$  и  $P_2$ . Прием СВЧ-колебаний, отраженных от участков контролируемого объекта, также производится рупорами  $P_1$  и  $P_2$ . Если оба рупора находятся над одинаковыми бездефектными участками, то оба отраженных СВЧ-сигнала будут иметь одинаковую амплитуду, фазу и СВЧ-колебания в Е-плечо проходить не будут.

При наличии же под одним из рупоров дефекта изменится коэффициент отражения от этого участка, отраженные СВЧ-сигналы будут разные и в Е-ответвлении двойного СВЧ-моста появится сигнал разбаланса. Ввиду неидеальности конструкции двойного моста, несмотря на подстройку с помощью симметрирующих штырей, имеется остаточное прохождение СВЧ-колебаний из Н- в Е-ответвления (для моста в дефектоскопе СД-12Д этот уровень равен 50—55 дБ), которое в первую очередь определяет возможности электронной части прибора по реальному значению минимально выявляемого дефекта. Амплитудный детектор  $АД_2$  выпрямляет разностный СВЧ-сигнал и подает полученное напряжение частоты 1 кГц к усилителю  $У_1$  и позволяющему получить большую абсолютную чувствительность к дефектам. Усиленное напряжение частоты 1 кГц подводится к амплитудному детектору  $АД_3$  и далее к усилителю постоянного тока  $У_2$  и регистрирующему прибору  $РП$  типа Н340, фиксирующему сигналы от дефектов на бумаге /С усилителя  $У_1$  напряжение подводится также к пороговому устройству  $НУ$ , которое производит отсечку шумов и сигналов от структурных неоднородностей, и на его выход проходит только напряжение, большее уровня отсеки, устанавливаемого оператором в зависимости от целей контроля и конкретно решаемой задачи. К выходу порогового устройства подключено электромагнитное реле  $РЛ$ , включающее элементы сигнализации: световой с помощью лампы «Брак»  $ЛБ$  и звуковой в виде мультивибратора  $МБ$ , питающего телефон  $ТЛ$ .

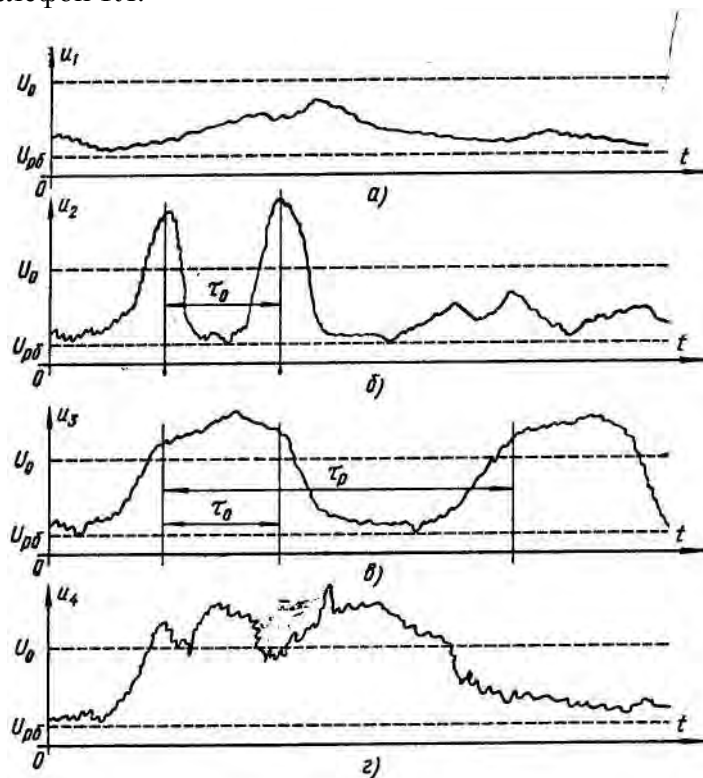


Рис. 3.10. Выходные напряжения дефектоскопа:  
 а — изменение толщины, свойств или зазора; б — точечный дефект;  
 в — расслоение; г — множественные дефекты

Сверхвысокочастотные блоки дефектоскопа выполнены в виде специального переносного устройства воздействия на объект  $УВО$ , которое можно устанавливать на контролируемый объект или вблизи него так же, как это сделано в толщиномере СТ-31И. Настройка дефектоскопа СД-12Д заключается в установке уровня мощности в зависимости от контролируемого объекта, коэффициента усиления усилителя и уровня отсеки порогового устройства  $U_0$ . Такие операции типичны для большинства радиоволновых дефектоскопов. На рис. 4.19 приведены зависимости напряжений во времени, полученных с выхода дефектоскопа СД-12Д, характерные для двухрупорных дефектоско-

пов, использующих метод самосравнения. Обозначенные уровни напряжения соответствуют:  $\mathcal{E}/\rho c$  — разбаланс СВЧ-моста,  $U_o$  — уровень отсечки, определяющий дефект минимально допустимых размеров. Зависимости на рис. 3.10 показывают влияние характерных дефектов (участки 2, 3, 4 на рис. 3.9) и изменений электромагнитных и геометрических параметров (участок 1 на рис. 3.9) при равномерном поступательном движении контролируемого объекта со скоростью  $v$ . Рис. 3.10, а изображает ход напряжения при плавном изменении толщины или электромагнитных свойств вдоль контролируемого объекта. Дефекты малых размеров (2 на рис. 3.9), приближающиеся к точечной модели дефектов (в виде шарообразных включений, коротких трещин), дают два импульса напряжения (рис. 3.10, б), форма которых связана с диаграммой направленности рупоров, а сдвиг их во времени определяется расстоянием между центрами рупоров  $U$  и скоростью движения  $vi$  равен  $xo = lo/v$ .

Протяженные дефекты (длинные трещины, расслоения, области с недостатком одного из компонентов материала сложного состава и т. п.) длиной больше зоны контроля  $I_K$  (3 на рис. 3.9) в данном случае за счет вычитания СВЧ-сигналов антенн приводят к появлению двух импульсов длительностью, примерно равной  $t_o$ , сдвинутых во времени на  $t_d$ , соответствующая длине дефекта  $l_o$  и равная  $t_d = l_o/v$ .

Большие дефекты, размеры которых соизмеримы с раскрытием рупора, сложной формы и скопление многих нарушений сплошности небольших размеров (участок 4 на рис. 3.9) приводят к появлению размытых изрезанных импульсов (рис. 3.10, в), четкий количественный анализ которых затруднен (определение числа дефектов или их протяженности).

Разрешающая способность дефектоскопа СД-12Д определяется степенью симметрии настройки моста, а также возможным непостоянством условий радиоволнового контроля и вариацией свойств контролируемого объекта. Всякое резкое изменение свойств контролируемого объекта (большое значение  $da/dp$ ) воспринимается так же, как дефект, что следует учитывать при организации неразрушающего контроля. Наиболее сильным мешающим фактором, связанным с условиями контроля дефектоскопом СД-12Д, является взаимный перекося контролируемого объекта и системы рупоров в плоскости их расположения (плоскость чертежа на рис. 3.9). Следует отметить, что перекося в плоскости, являющейся плоскостью симметрии для рупоров (перпендикулярно плоскости рис. 3.9), не приводит к появлению ложных сигналов, а лишь несколько снижает чувствительность к дефектам. К снижению чувствительности дефектов также приводит вариация зазора, увеличение толщины контролируемого объекта и его электромагнитных параметров и в первую очередь удельной электрической проводимости. Ложные сигналы могут создавать также металлические частицы, случайно попавшие на поверхность контролируемого объекта, и капли влаги, сконденсированные на ней.

Высокой разрешающей способностью обладают устройства, измеряющие поляризацию отраженных или рассеянных дефектами СВЧ-волн, причем для выравнивания чувствительности к дефектам разного расположения и формы контролируемый объект облучают волной с круговой поляризацией, а о наличии дефекта судят по эллиптичности вторичных волн. Для анализа эллиптически поляризованной волны используют балансную схему с турникетным соединением волноводов. Хорошие перспективы имеет поляризационный метод для контроля анизотропии материалов и полуфабрикатов.

При контроле полуфабрикатов и изделий, имеющих форму, удобную для организации сканирования по их поверхности, наилучшие результаты дает проведение дефектоскопии с помощью нескольких способов получения и обработки информации. Например, дефектоскоп СН-20П реализует дифференциальный метод с амплитудно-фазовой обработкой информации в сочетании с использованием поляризационных эффектов.

Для целей дефектоскопии можно использовать также эффекты ядерного и электронного резонансов и других подобных, что дает возможность обнаруживать очень малые количества инородных включений. Широкое внедрение устройств, построенных

на этих принципах, затрудняется сложностью аппаратуры для их реализации и дополнительными требованиями к контролируемым объектам.

Радиоволновые дефектоскопы являются весьма эффективным средством контроля новых современных конструкционных материалов, особенно композиционных типа армированных изделий, стеклопластиков, и их использование для неразрушающего контроля в области объектов из диэлектрических материалов является весьма перспективным.

### 3.7. Параметрические методы контроля

Параметрические (резонансные) методы радиоволнового контроля заключаются в том, что контролируемый объект помещается в резонатор, волновод или длинную линию и по изменению параметров этих элементов (резонансная частота, добротность, распределение поля и др.) определяют качество объекта. С помощью параметрического метода возможен контроль геометрических характеристик различных объектов, электромагнитных свойств их материалов и наличия неоднородностей в них. Параметрические методы позволяют испытывать вещества в любых агрегатных состояниях (твердые, жидкие, газообразные, плазма). Радиоволновой контроль геометрических размеров различных изделий из материалов с хорошей проводимостью возможен только относительно поверхностей, к которым возможен доступ, т. е. наружных и некоторых внутренних. Примеры такого контроля иллюстрируются на рис. 3.11. и 3.12.

Протяженные изделия в виде труб и прутков различного поперечного сечения можно помещать в полость объемного резонатора  $P$  или в волноводный тракт  $B$ . Если труба помещена в полость резонатора  $P$  (рис. 3.11, с), то она изменяет его рабочий объем (резонансную частоту) или создает дополнительные потери энергии (уменьшает добротность). Для металлических изделий основным является изменение частоты, что дает возможность производить контроль внешнего диаметра рис. 3.11. Контроль геометрии трубы  $D$ , прутка и т. п. В случае, коческих размеров и физико-химических свойств, когда труба изготовлена из диэлектрического материала, влияющими факторами являются все геометрические размеры трубы (внешний  $D$  и внутренний  $d$  диаметры, толщина) и электромагнитные параметры (диэлектрическая  $\epsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемости, удельная электрическая проводимость). По схеме рис. 4.20, а можно организовать радиоволновой контроль изделий в технологическом потоке.

Примером такого контроля является измеритель диаметра микропровода ОР-3, который дает возможность измерять диаметр жилы литого провода от 0,3 до 3 мкм или его сопротивление по мощности после открытого резонатора, сквозь который проходит провод.

При контроле изделий в виде коротких труб можно их включить непосредственно в СВЧ-тракт (рис. 3.11, б). В таком варианте труба может рассматриваться как отрезок волновода или длинной линии с определенными параметрами, приводящими к изменению характеристик отраженной волны. Для лучшего согласования волноводного тракта с отрезком трубы участки волноводов  $PВ$  и  $ОВ$  выполнены специальной формы, плавно сопрягаемой с поперечным сечением трубы  $КО$ , а на их краях для снижения затекания токов на внешнюю поверхность волноводов  $PВ$  и  $ОВ$  выполнены короткозамкнутые четвертьволновые участки  $КП_{\chi 1}$  и  $КП_2$ . Определенный режим работы измерительного участка волновода обеспечивает отрезок волновода  $ОВ$ , который нагружен на короткозамкнутую секцию с настроечным поршнем  $НП$  (рис. 3.11, б) или на согласованную нагрузку для получения режима бегущей волны. Крупногабаритные изделия можно контролировать по частям, как, например, показано на рис. 3.11, в, где производится радиоволновой контроль параметров диэлектрического покрытия на металлическом основании. Одной из стенок резонатора  $P$  в этом случае служит металлическое основание. Такой вариант контроля реализует резонансный радиотолщиномер РРТ-73, в кото-

ром использован СВЧ-генератор с частотной модуляцией (качающаяся частота). В качестве первичного преобразователя в нем применен измерительный резонатор, резонансная частота которого зависит от толщины покрытия и его диэлектрических параметров, а смещение ее определяется с помощью осциллографа. По смещению резонансной частоты находят контролируруемую величину. Довольно эффективно проведение контроля по схеме рис. 3.11, в расстояния (зазора)  $h$  до внешней поверхности металлического объекта.

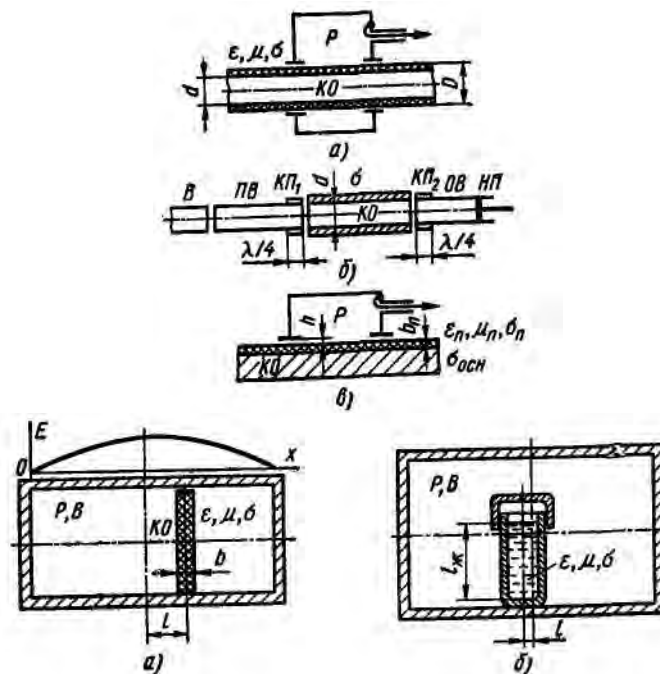


Рис. 3.12. Схема контроля физико-химических свойств: а — твердых тел; б — жидкостей волноводом; в — открытым резонатором

Успешно используются параметрические радиоволновые методы при контроле уровня и количестве жидкостей или летучих веществ. В этом случае отрезок волновода или длинной линии обычно запаивается с одного конца, с другого — подключается измерительная аппаратура, а жидкость или газ вводятся сбоку через специально предусмотренное отверстие, которое не должно существенно влиять на параметры СВЧ-тракта.

С помощью резонатора  $P$  или отрезков волноводов  $B$  (рис. 3.12) можно проводить контроль электромагнитных свойств различных веществ. При этом твердые тела непосредственно помещают в объем резонатора или волновода (рис. 3.12, а), а жидкие, сыпучие и газообразные вещества предварительно загружают в дозирующие ампулы (рис. 3.12, б) или пропускают по специально предусмотренным трубкам. При радиоволновом контроле свойств вещества размеры образцов обычно выбирают небольшими, чтобы напряженность электромагнитного поля в пределах занимаемого ими объема была постоянной, а место в волноводе или резонаторе выбирают из условия получения необходимой степени влияния вещества на параметры волновода или резонатора. Размеры образцов при проведении контроля электромагнитных свойств должны быть достаточно стабильными, поскольку их изменения в этом случае будут мешающим фактором.

Параметрические радиоволновые методы дают возможность обнаруживать лишь довольно грубые неоднородности (дефекты), такие, как, например, металлические включения в диэлектрике, и вследствие этого имеют ограниченную область применения, исключение составляют дефектоскопы, построенные на принципах ядерных магнитных резонансов.



### 3.8. Многопараметровый радиоволновой контроль

Контроль по одному параметру имеет довольно ограниченные возможности и часто не позволяет получить большую точность и достоверность. В связи с этим многопараметровый контроль применяется в двух случаях: требуется измерить один параметр независимо от других величин и необходимо определять несколько параметров у контролируемого объекта одновременно или поэтапно. Первый тип контрольно-измерительных задач решается методами, специфичными для радиоволнового контроля и допускает решение задачи, если надо производить контроль по нескольким параметрам. Второй тип контрольно-измерительных задач носит синтетический характер, а информация о параметрах контролируемого объекта может получаться последовательно применением методов одно- или двухпараметрового контроля и затем путем совместной обработки полученных данных (часто с применением ЭВМ) делается заключение о качестве контролируемого объекта. Например, при радиоволновом контроле толстой трубы из диэлектрического материала его можно выполнить трехпозиционным: 1 — определение отклонений в электромагнитных свойствах; 2 — измерение толщины стенки или диаметра; 3 — обнаружение дефектов. Для решения второй группы задач могут использоваться не только радиоволновой вид контроля, но и другие. Такой многопараметровый контроль типичен для автоматизированных линий контроля,строенных в технологический процесс, и рассмотрение его особенностей относится к общей теории неразрушающего контроля.

Многопараметровый радиоволновой контроль может быть реализован путем применения нескольких каналов, имеющих разные рабочие частоты, датчики, отличающиеся размерами, конструкций, расположением и др., различных углов падения, поляризации и сочетанием различных методов контроля. Особое место занимает двухпараметровый контроль, поскольку он легко осуществляется в одном канале при одной рабочей частоте и одном датчике, так как информация о двух параметрах несет любой электрический сигнал и она легко выделяется амплитудно-фазовым методом.

Наиболее важным и сравнительно простым методом решения многопараметровых задач первой группы является сведение ее к задаче с меньшим числом параметров путем соответствующего выбора условий контроля, конструкции измерительно-преобразовательного блока и функциональной схемы прибора. Например, при контроле электромагнитных свойств выбор большей рабочей частоты, где велико затухание СВЧ-колебаний, позволит устранить влияние толщины; при контроле малогабаритных объектов применение щелевого излучающе-приемного устройства малых размеров дает возможность устранить влияние краев изделия; при дефектоскопии использование двухканального устройства с самосравнением участков контролируемого объекта устранит мешающее влияние плавных изменений толщины или электромагнитных свойств материала.

Удачным примером решения двухпараметровой задачи служит универсальный прибор ПКП-2 [13], предназначенный для контроля слоистых полупроводниковых и диэлектрических структур. В нем реализован двухпараметровый метод по минимальному значению напряженности СВЧ-поля и по изменению его положения вдоль линии в зависимости от свойств полуфабриката или изделия.

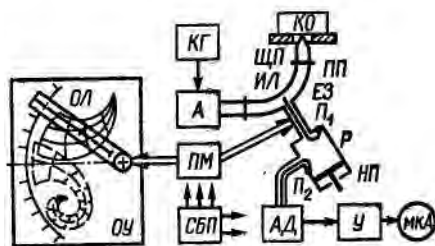


Рис. 3.13 Функциональная схема амплитудно-фазового контроля универсального

### прибора ПКП-2

Функциональная схема прибора ПКП-2 приведена на рис. 3.13. Клистронный генератор *КГ* создает СВЧ-колебания, которые через аттенюатор *А* возбуждают измерительную линию *ИЛ*, нагруженную на щелевой преобразователь *ЩП*. Измерительная линия *ИЛ* выполнена в виде четверти круглого кольца прямоугольного сечения и имеет прорезь для перемещения внутри нее емкостного зонда *ЕЗ*. Щелевой преобразователь *ЩП* является по существу плавным переходом от волновода измерительной линии *ИЛ* сечением  $3,7 \times 7,2 \text{ мм}^2$  к щели сечением  $0,2 \times 4 \text{ мм}^2$ , обеспечивающей взаимодействие СВЧ-энергии с контролируемым объектом *КО*. При поднесении его к щелевому преобразователю *ЩП* распределение электромагнитного поля вдоль измерительной линии *ИЛ* изменяется, что позволяет судить о свойствах контролируемого объекта *КО*. Емкостный зонд *ЕЗ* нагружен на петлю связи  $\Pi_1$ , с помощью которой возбуждается объемный резонатор *Р* в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами  $3,7 \cdot 7,2 \cdot 20 \text{ мм}^3$ . С помощью второй петли связи  $\Pi_2$  СВЧ-энергия выводится из резонатора *Р* и поступает на амплитудный детектор, *АД*. Усиление полученного сигнала по мощности осуществляет усилитель постоянного тока *У*, на выход которого включен стрелочный прибор — микроамперметр *мкА*. С емкостным зондом *ЕЗ* через передаточный механизм *ПМ* механически связана отсчетная линейка *ОЛ* отсчетного устройства *ОУ*, на котором нанесена шкала, указывающая смещение зонда или электрическое смещение узла напряженности поля вдоль измерительной линии *ИЛ* (фаза), и градуировочные графики, показывающие влияние параметров полупроводниковой заготовки или структуры *КО*. Линейка *ОЛ* выполнена прозрачной и имеет такие же деления, как и стрелочный микроамперметр М-24.

При однопараметровом неразрушающем контроле используется микроамперметр. Резонатор *Р* настраивается на резонансную частоту генератора *КГ*, а чувствительность прибора устанавливается максимальной. Затем путем перемещения зонда *ЕЗ* до достижения минимума показаний отсчетного прибора проводится его настройка по шлифованной металлической пластине или по специальному контрольному образцу, для которого минимум напряжения имеет наименьшее значение. Регулируя пропускание аттенюатора *А* и чувствительность прибора *мкА*, добиваются необходимой степени влияния измеряемого параметра. Затем, накладывая контролируемый объект *КО* на щелевой преобразователь *ЩП*, производят отсчет показаний прибора *мкА* и по градуировочной кривой или шкале отсчетного устройства *ОУ* определяют контролируемый параметр.

При двухпараметровом контроле настройка, в основном производится так же, как при однопараметровом. Если она выполнена правильно, передвижная отсчетная линейка *ОЛ* должна быть размещена на линии нулевой фазы, в противном случае необходимо подстроить частоту генератора *КГ* и более тщательно настроить резонатор *Р*.

В процессе измерения, когда на щелевой преобразователь *ЩП* помещен контролируемый объект *КО*, перемещением зонда *ЕЗ* также добиваются минимального показания прибора *мкА*. При этом за счет сдвига положения минимума напряженности поля вдоль линии линейка *ОЛ*, связанная механически с зондом *ЕЗ*, переместится в новое положение. Отложив на шкале линейки *ОЛ* показание прибора *мкА*, получим точку на плоскости отсчетного устройства *ОУ* и с помощью нанесенной на нем двухкоординатной градуировочной сетки, показывающей влияние измеряемого и мешающего факторов, произведем отсчет контролируемого параметра.

Таким образом, используя двухпараметровый способ, можно измерять различные параметры полупроводниковых полуфабрикатов независимо от влияния мешающих факторов. Например, можно измерять толщину покрытия диффузионного или эпитаксиального слоя полупроводниковой заготовки независимо от свойств основы; удельную электрическую проводимость или диэлектрическую проницаемость полупроводниковой пластины независимо от возможных изменений зазора; удельную электрическую проводимость полуфабриката независимо от его диэлектрической проницаемости или

наоборот; толщину одного слоя полупроводниковой структуры независимо от толщины другого.

Погрешности измерений определяются при конкретных вариантах контроля и зависят как от точности поиска положения минимума и его отсчета по прибору, так и от неучтенных факторов, что существенно зависит от решаемой контрольно-измерительной задачи, от диапазона колебаний измеряемого и подавляемого факторов. Из числа факторов, погрешность от измерения которых необходимо учитывать при решении большинства задач контроля, следует указать влияние взаимных перекосов щелевого преобразователя и объекта из-за его неровности и кривизны, попадания загрязнений на него или на преобразователь *ЩП*; наличие неоднородностей (дефектов) в полупроводниковой заготовке или структуре; влияние края и чистоты ее поверхности.

Прибор ПКП-2 и подобные ему позволяют успешно решать многие задачи радиоволнового контроля в области полупроводниковой техники, когда размеры контролируемого объекта превышают раскрыв преобразователя, в частности заготовки в виде германиевых или кремниевых монокристаллических пластин или слоистых структур для производства полупроводниковых приборов и микросхем, которые в дальнейшем определяют надежность и качество готового изделия.

### **3.9. Визуализация радиоволновых полей**

Визуализация (получение видимых изображений) распределения физических величин, характеризующих электромагнитное СВЧ-поле (плотности энергии, напряженности электрического или магнитного полей, их компонент и т. д.), необходима для изучения внутреннего строения сложных изделий (интроскопия, радиовидение) и для высокой производственной дефектоскопии объектов больших размеров (по сравнению с длиной волны и раскрывом антенн). В результате визуализации получают видимое радиоизображение, анализ которого дает возможность увеличить скорость контроля, облегчает расшифровку результатов для изделий различной формы и позволяет получить документ на весь контролируемый объект сразу. Основные технические данные на некоторые радиоинтроскопы приведены в табл. 3.5.

Радиоизображение можно получить путем развертки (последовательный поэлементный анализ) или сразу во всех точках двухмерной картины (анализ в реальном масштабе времени). При последовательном анализе необходимо сканирование, которое может быть механическим или электрическим. Механическое сканирование предполагает перемещение излучающего и приемного устройств в пространстве по двум координатам и синхронное перемещение точки, формирующей изображение на индикаторе. Электрическое сканирование осуществляется путем переключения ряда излучающих приемных устройств или путем изменения свойств излучающего или приемного устройства (управление диаграммой направленности сложной антенны).

Таблица 3.5

Показатели	Тип радионитроскопа					
	СС-10К	СС-30К	ДТМ-3	СК-10К	СК-30К	РВ-11
Рабочий диапазон длин волн, мм	8	32	1,8—2,2	2—100	8—150	0,001—30
Размеры контролируемого поля, см	60×60	80×80	15×35	10×10	150×150	12
Допустимое ослабление сигнала, дБ	До 50	До 55	—	20	20	До 40
Время получения кадра, с	30	30	300	32	32	0,8
Точность определения координат, %	2	5	0,5	2	2	2
Чувствительность интроскопа, Вт/м <sup>2</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	—	—	—	10—15
Чувствительность усилителя, мкВ	—	—	—	1	1	—
Пространственное разрешение, мм	1	4	0,01—0,5	0,2—2	1—5	0,3

Как правило, при работе в реальном масштабе времени радиоизображение формируется быстрее и производительность контроля выше, однако его труднее обрабатывать. Типичными устройствами, в которых используется последовательный анализ, являются [1] СВЧ-установки ДТМ-3, СС-10К, СС-30К, СК-ЮК, СК-30К. Радиовизор дает возможность получить радиоизображение на экране сразу в реальном масштабе времени. Радионитроскопы СС-10К и СС-30К — универсальные установки для радиоволнового контроля внутренней структуры полуфабрикатов и изделий с помощью СВЧ-излучения по изображению на экране осциллографического индикатора.

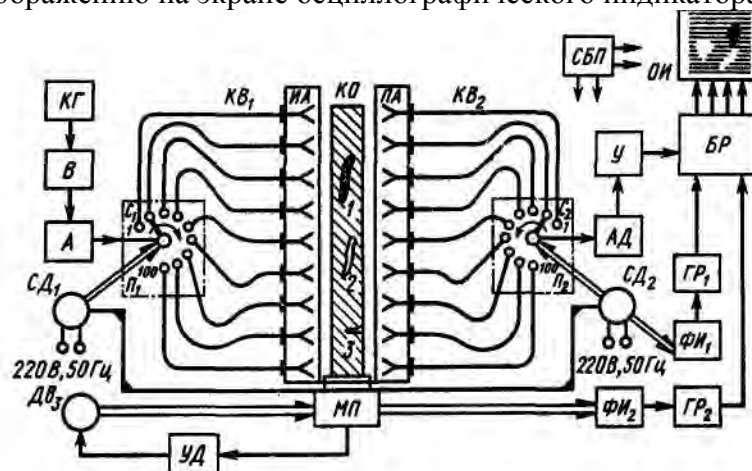
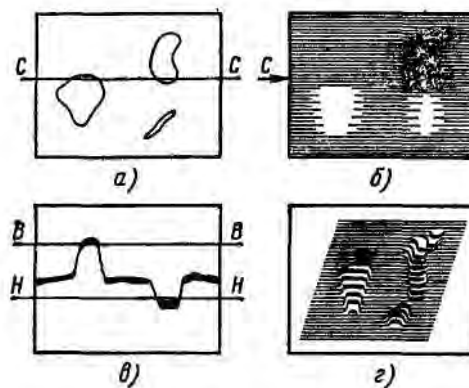


Рис. 3.14. Функциональная схема радионитроскопа типа СС-10К

Функциональная схема радионитроскопа СС-10К приведена на рис. 3.14. Возбуждающая часть установки состоит из клистронного генератора *КГ*, вентиля *В*, аттенюатора *А*, волноводного переключателя  $\Pi_1$ , комплекта волноводов *КВ* и излучающей антенны *ИА*. Аттенюатор *А* позволяет расширить область применения установки путем введения дополнительного затухания при испытаниях изделий с малыми значениями толщины или собственного затухания, что устраняет перегрузку диодов в приемной части установки. Переключатели  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , обеспечивающие сканирование контролируемого объекта *КО*, выполнены на базе вращающегося волноводного сочленения. Перемещение подвижных волноводных секций  $C_1$  и  $C_2$  производится синхронными двигателями  $C_{д1}$  и  $C_{д2}$ . Комплект волноводов *КВ* содержит 100 прямоугольных волноводов восьмимиллиметрового диапазона, имеющих одинаковую длину. Открытые концы волноводов комплекта *КВ* запаяны на одной пластине, к которой механически крепится накладная сменная излучающая антенна *ИА*, также содержащая 100 излучателей, выходные отверстия которых расположены строго напротив соответствующих входов волноводов *КВ*.

Излучение, прошедшее сквозь контролируемый объект  $KO$  или отраженное от него, попадает в приемную антенну  $ПА$ , причем точно в волноводную секцию, расположенную против включенной в тот же момент времени излучающей секции. Приемная антенна  $ПА$  выполнена подобно излучающей антенне, но излучатели могут быть иными в зависимости от того, по какой компоненте электромагнитного поля определяется внутреннее строение  $KO$ . Переключение волноводов приемной антенны  $ПА$  производится в той же последовательности, что и у излучающей антенны  $ИА$ . Комплект волноводов  $KB_2$ , переключатель  $Я_2$  с подвижной секцией  $C_2$  выполнены такими же, как  $KB_1$ ,  $77$ ,  $d$ , а секция  $C_2$  перемещается двигателем  $СД_2$ , идентичным с  $СД_1$  и питаемым от той же сети. Вследствие идентичности секций  $C_1$  и  $C_2$  и двигателей  $СД_1$ ,  $СД_2$  происходит синхронное Рис. 3.15. Вид с экрана устройства ви- переключение всего волноводного зуализации СВЧ-полей аттенюатора  $A$  до деквазиобъемное изображение сканирование контролируемого объекта  $KO$  по вертикали.

По горизонтали (в направлении, перпендикулярном плоскости рис. 3.16) сканирование осуществляется путем взаимного перемещения контролируемого объекта в высокочастотной части установки с помощью механизма  $МП$  от двигателя  $ДВ_3$ , управляемого блоком  $УД$ . СВЧ-сигнал, полученный на выходе переключателя  $Л_2$ , выпрямляется амплитудным детектором  $АД$  и после усилителя  $У$  поступает на блок выбора режима работы  $БР$ , обеспечивающий на экране осциллографического индикатора  $ОИ$  индикацию распределения интенсивности СВЧ-излучения или другой величины, характеризующей его.



Изображение на экране осциллографического индикатора  $ОИ$  может иметь разный вид: с яркостной отметкой, с разверткой одной строки или в виде аксонометрической проекции. Примерный вид изображения на экране  $ОИ$  в этих режимах дан на рис. 3.15 для объекта в виде диэлектрической плиты (см. рис. 3.14) с пустой полостью 2, трещиной 3 и включением 4, имеющим большое затухание для радиоволн.

Построение изображения на экране  $ОИ$  осуществляется через блок режимов работы  $БР$  с помощью генераторов развертки  $ГР_1$  (по вертикали) и  $ГР_2$  (по горизонтали). Генераторы развертки запускаются от формирователей импульсов  $ФИ_1$  и  $ФИ_2$ , выполняющих роль синхронизаторов и связанных с двигателем  $СД_2$  и механизмом перемещения  $МП$ . В такт с перемещениями переключающих секций  $C_1$  и  $C_2$  генератором развертки  $ГР_2$  создаются импульсы на вертикально отклоняющих пластинах, имеющие ступенчатый вид, причем каждая ступенька соответствует включению определенного волноводного тракта. Импульс на выходе  $ФИ_2$  запускает генератор  $ГР_2$ , работающий в ждущем режиме, а через блок  $БР$  напряжение развертки производит образование раstra по горизонтали. Если необходимо иметь постоянно радиоизображение  $KO$ , используют возвратно-поступательное движение путем реверса двигателя  $ДВ_3$  через устройство управления двигателем  $УД$ , содержащим концевые выключатели и другую необходимую коммутационную аппаратуру, а формирователь импульсов  $ФИ_2$  создает импульс на изменение направления развертки на обратное.

Полученные радиоизображения контролируемого объекта  $KO$  с яркостной отметкой

— основной режим работы установок визуализации, позволяющий получить и оценивать визуально большой объем информации, о контролируемом объекте, но часто бывает слишком груб для количественных оценок, которые сильно зависят от субъективных особенностей оператора.

Работа в режиме развертки по строке позволяет производить отсчеты с точностью, определяемой погрешностями осциллографического индикатора и блоков установки как по интенсивности полученного от контролируемого объекта СВЧ-излучения, так и по местонахождению аномалий этой величины в пространстве подобно аналогичным измерениям на экране обычного осциллографа. В качестве примера на рис. 3.15 изображена осциллограмма распределения интенсивности СВЧ-излучения по строке, помеченной на рис. 3.15, б стрелкой *С*, а на рис. 3.15, а сечением *С—С*. Установив уровни, соответствующие (уровни *В—В* и *Н—Я* на рис. 3.15, в) браковочному признаку, в режиме развертки по строке можно легко определять изделия с недопустимыми дефектами, их размеры, а также оценить возможность их устранения. Для получения режима развертки по строке с помощью блока режимов *БР* (см. рис. 3.14) сигналы от одного волноводного тракта выбираются стробирующим импульсом и подаются на вертикальные отклоняющие пластины *ЭЛТ*, а по горизонтали производится обычная развертка пилообразным напряжением, запускаемым от кадрового импульса формирователя *ФИ<sub>2</sub>*.

Режим работы с построением квазиобъемного изображения (рис. 3.15, г), близкого к аксонометрическому по информативной способности, является промежуточным. Чтобы получить такое изображение, производят развертку по строке по всем каналам и одновременно с помощью блока режимов работы *БР* формируют растр на экране индикатора *ОИ*, но начало развертки по горизонтали смещают на величину, пропорциональную номеру волноводного тракта.

Комплект антенн *ИА* и *ПА*, даваемых к установке, позволяет работать на прохождение и отражение, производить радиоволновой контроль по поляризации СВЧ-излучения от контролируемого объекта (в этом случае приемные волноводы повернуты на  $90^\circ$  в плоскости их поперечного сечения относительно излучающих) и производить дифференциальный контроль с помощью двухлепестковых излучателей.

Радиовизор *РВ-П* дает возможность непосредственного наблюдения распределения СВЧ- или тепловых излучений в плоскости его экрана в реальном масштабе времени. Положенный в его основу принцип преобразования интенсивности падающего на экран излучения в тепловую энергию, подогревающую люминофор, обеспечивает широкий спектральный диапазон его работы.

Основной элемент радиовизора (рис. 3.16) — люминесцирующий экран *ЛС* с нанесенным на него с внешней стороны тонким слоем металла *СМ*, который является неселективным преобразователем СВЧ- и инфракрасного излучения в тепловой рельеф. Экран *ЛС* с внутренней стороны равномерно освещается ультрафиолетовым светом лампы *УЛ*, интенсивность которого выбирается в зависимости от среднего уровня падающего излучения путем подбора мощности питания *УЛ* регулировочными элементами *РЭ*. Прошедшее или отраженное излучение от контролируемого объекта падает на слой *СМ*, в значительной степени *n* поглощается им и создает на поверхности люминесцентного слоя *ЛС* различную температуру в зависимости от энергии, попадающей на данный участок. Яркость свечения люминофора зависит от его температуры и по яркости свечения экрана радиовизора судят о свойствах контролируемого объекта *КО*, обуславливаемого от источника излучения *ИИ*.

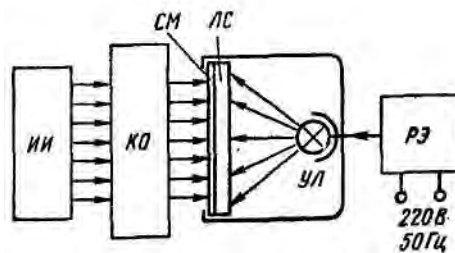


Рис. 3.16. Схема устройства радиовизора

Радиовизор является широкополосным устройством, дает наглядную картину распределения плотности энергии электромагнитного поля, прост в обращении и успешно используется для радиоволнового и теплового контроля. Неудобством при работе с ним является невысокая чувствительность, небольшие размеры изображения и то, что результаты контроля зависят от опыта оператора.

Получение изображения в реальном масштабе времени возможно также с помощью жидких кристаллов и фотоэмульсий (фотопленок), которые восприимчивы к тепловому действию СВЧ-излучения.

Жидкие кристаллы могут быть использованы для радиоволнового контроля так же, как радиовизор, однако они не требуют особого дополнительного освещения, кроме дневного, света. Жидкие кристаллы, если это допустимо по техническим условиям на контролируемый объект, могут быть нанесены непосредственно на его поверхность, и при облучении радиоволнами он будет изменять свою окраску в зависимости от нагрева поверхности контролируемого объекта, выявляя тем самым его внутреннее строение и дефекты.

Средства визуализации СВЧ-полей могут быть применены для получения и анализа интерференционных картин и голографических изображений.

Интерференционные методы позволяют контролировать объекты, размеры которых значительно превышают длину волны, путем сравнения с эталоном, подобно тому, как это делается в оптическом виде неразрушающего контроля (см. ниже). Следует вместе с тем заметить, что в СВЧ-диапазоне почти всегда накладываются прямая и отраженная волны, т. е. присутствует интерференция, и обычно под интерференционными методами подразумевают такие, когда контроль производится с использованием нескольких максимумов или минимумов интерференционной кривой. Существенным ограничением в таких вариантах контроля является трудность в обеспечении однозначного отсчета контролируемой величины, что и сдерживает широкое применение интерференционных методов.

Устройства визуализации полей СВЧ-диапазона дают возможность получить голографическое изображение объекта (физическая голограмма). Помимо этого голограмму можно получить и расчетным путем на ЭВМ и вывести ее на графопостроитель или передать по линиям связи на значительные расстояния (расчетная голограмма). В радиоволновом контроле голографические методы не имеют пока широкого применения, но могут оказаться эффективными там, где надо изучать объемное изображение или вести обработку информации оптическими методами. Особенностью голограмм радиоволнового контроля являются их большие размеры, что определяется длиной волны СВЧ-колебаний, и в соответствии с этим необходимость уменьшения полученных голограмм в тысячи раз для наблюдения их в видимом диапазоне. Это приводит к менее подробному, чем в диапазоне видимого света, изучению контролируемого объекта в радиодиапазоне. Вместе с тем радиоволновая голография имеет преимущество при контроле крупногабаритных объектов, когда важно оценить общую конфигурацию и отклонение от заданной формы или размеров. Примерами таких объектов, где применение голографических методов целесообразно, является контроль антенн большого размера, имеющих правильную форму тел вращения (сфера, параболоид, гиперболоид, плоскость или конус и т. п.), и различных крупногабаритных тел из диэлектрических мате-

риалов. Расчетные голограммы, масштабируемые до необходимого значения, в этих случаях могут выполнять роль эталона, с которым производится сравнение контролируемого объекта. В целом голографические методы могут оказаться необходимыми как при проведении контроля одиночных объектов уникального назначения с помощью расчетных голограмм, так и при контроле крупногабаритных изделий массового производства, поскольку в первом случае затраты не являются решающим фактором, а во втором — они окупаются за счет массовости продукции.

## 4. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

### 4.1. Общие вопросы теплового неразрушающего контроля

Тепловой неразрушающий контроль основан на регистрации тепловых полей, температуры или перепада тепловых характеристик контролируемого объекта. Тепловая энергия — это энергия движения молекул, а обобщенной величиной, характеризующей степень нагрева тела или вещества, является температура. Одно из проявлений тепловой энергии — ее передача, распространение в пространстве.

Распространение теплоты происходит в виде теплообмена между телами, имеющими различную температуру. Тело более нагретое отдает теплоту, а менее нагретое поглощает ее. Перенос теплоты — процесс самопроизвольный, необратимый и ведет к выравниванию температуры тел. Он происходит тремя способами: теплопроводность, конвекция и излучение (радиационный теплообмен), один из которых для конкретного случая теплообмена может быть преобладающим.

*Теплопроводность* — молекулярный перенос теплоты на микроуровне за счет передачи изменения интенсивности колебаний от молекулы к молекуле, причем их совокупность в целом занимает определенный постоянный объем, среднее положение которого неизменно в пространстве. Теплопроводность в чистом виде характерна для твердых тел, в меньшей степени — для жидкостей.

*Конвекция* — перенос теплоты перемещающимися в пространстве частицами вещества. Конвекция характерна для жидкостей и газов.

*Тепловое излучение* — передача теплоты путем испускания коротких электромагнитных волн. Тепловые излучения охватывают диапазон электромагнитных колебаний примерно от  $3 \cdot 10^{11}$  до  $4 \cdot 10^{14}$  Гц, что соответствует длинам волн 1 мм — 0,75 мкм. Нижняя граница по частоте определяется близостью к радиоволновым процессам (дальнее инфракрасное излучение), а верхняя — к видимому излучению (красный свет). Если теплопроводность и конвекция возможны только в среде из какого-то вещества, то тепловое излучение может распространяться и в вакууме, а скорость движения его равна скорости света.

На практике имеют место все виды передачи теплоты одновременно, но в различных количественных соотношениях в зависимости от конкретного вида контролируемого объекта и задачи неразрушающего контроля. Как правило, передача теплоты от источника к контролируемому объекту может производиться любым из этих способов, теплопередача в контролируемом объекте происходит как правило, в виде теплопроводности, а от контролируемого объекта к первичному измерительному преобразователю или индикатору обычно происходит в виде теплового (инфракрасного) излучения (бесконтактные методы) или за счет теплопроводности (контактные методы). Указанные обстоятельства определяют методика расчета поля температур по контролируемому объекту и сравнительно медленный процесс его становления. В то же время в силу электромагнитного характера теплового излучения процесс получения тепловых сигналов преобразователем и их обработка могут осуществляться с большой скоростью, определяемой быстродействием аппаратуры.

Температура является важнейшей величиной, определяющей получение полезной



информации при тепловом контроле. Ее измеряют косвенными методами по изменению других физических величин, связанных с ней, например объема, длины, электрического сопротивления, термоэлектродвижущей силы, энергии прошедшего излучения и др. В соответствии с Международной практической температурной шкалой, принятой в 1968 г. (МПТШ-68), основой является термодинамическая температура  $T$ , отсчитываемая от абсолютного нуля температуры и измеряемая в Кельвинах (К), которую рекомендовано всюду применять.

Температура  $t_c$ , измеренная по шкале Цельсия, определяется выражением:  $t_c = T - 273,15$ .

Методы теплового контроля могут быть пассивными и активными. Пассивный метод предусматривает использование теплоты самого контролируемого объекта, а активный — состоит в воздействии на контролируемый объект энергии от внешнего источника. *Пассивный* тепловой контроль позволяет определять тепловой режим и отклонения его физико-химических и геометрических параметров. *Активный* тепловой контроль имеет более широкие возможности ввиду использования различных динамических показателей. Поэтому активные методы помимо контроля физико-химических и геометрических параметров различных объектов дают возможность обнаруживать неоднородности в материале слоев или частей контролируемого объекта — дефекты типа нарушения сплошностей, инородных включений, изменений в структуре или физико-химических свойствах и т. д.

В зависимости от взаимного расположения источника теплоты контролируемого объекта и термочувствительной аппаратуры различают односторонний (подобный методу контроля по отраженному излучению), двусторонний (подобный контролю по прошедшему излучению) и комбинированный методы. Тепловой контроль может производиться в стационарном режиме при постоянном (установившемся) тепловом режиме и в нестационарном режиме, когда тепловой режим изменяется. Нестационарный режим теплового контроля сложнее в организации, но его информативная способность гораздо больше. Если области, где производится нагрев и измерение, практически совпадают, такой метод называется *синхронным*, а при несовпадении этих областей во времени или пространстве — *несинхронным*.

Нагрев контролируемых объектов при использовании источников нагрева требует соблюдения определенных правил техники безопасности. Однако при небольших уровнях температур, применяемых в тепловом неразрушающем контроле, и соблюдении элементарных мер предосторожности, основанных на имеющемся жизненном опыте оператора, проведение контроля не вызывает больших затруднений с позиций техники безопасности и санитарии. Особенностью теплового излучения является то, что человек чувствует его кожным покровом и может своевременно принять защитные меры или выйти из опасной зоны. Тепловые воздействия могут представлять опасность для человека при большой их интенсивности и быстронарастающих потоках теплоты. В связи с этим, если энергия источника теплоты велика, следует принимать соответствующие защитные меры: удалить рабочее место оператора от источника теплоты, обеспечить его теплозащитной одеждой или принять другие меры, исключающие сильное тепловое воздействие на него. Особенности работы с отдельными опасными источниками теплоты будут указаны при их рассмотрении ниже.

## 4.2. Индикаторы тепловых полей

Для получения точных, объективных показателей при тепловом неразрушающем контроле применяют индикаторы и первичные измерительные преобразователи теплового излучения, реализующие различные физические принципы. Для преобразования потока теплового излучения или распределения температур по поверхности контролируемого объекта в видимое изображение используют различные термоиндикаторы на

основе термочувствительных веществ и аппаратуру для визуализации тепловых полей. Чтобы получить объективную измерительную информацию в виде электрических сигналов или числовых данных, применяют следующие первичные измерительные преобразователи теплового излучения: термометры, термодары, термосопротивления, полупроводниковые приборы, электронно-вакуумные приборы, пирозлектрические элементы.

В качестве индикаторов тепловых полей применяют различные пластины, пленки и составы на основе термочувствительных веществ, изменяющих при достижении определенных температур свое состояние, яркость или цвет свечения. К таким веществам относятся: химические вещества, соединения и смеси, органические вещества (в том числе жидкие кристаллы), люминофоры и фотоэмульсии. Различают термоиндикаторы плавления, термоиндикаторы, меняющие цвет, и люминофоры.

**Термоиндикаторы** плавления изготавливают на основе материалов, имеющих четко различимое по яркости или цвету твердое или жидкое состояние (светло-салатный — зеленый, светло-розовый — малиновый, белый—бесцветный, белый — черный) и хорошо удерживающихся на поверхности разных материалов. Основным компонентом термоиндикаторов плавления "могут быть парафин, стеарин, воск, а для повышенных температур некоторые виды пластмасс, соединения серы, цинка, свинца и др. Они выпускаются в виде наборов термокарандашей, термолаков, термокрасок, термотаблеток и термopорошков, обеспечивающих определение температуры в необходимом диапазоне. Имеется набор термоиндикаторов, обеспечивающих контроль температур от 36 до 254°C с погрешностью измерения температуры 1—2°C.

Термокарандаши (мелки) выполняют в виде заостренных палочек из смеси различных веществ. Каждый карандаш предназначен для обнаружения определенной температуры. Карандашом касаются поверхности тела в области, где необходимо контролировать температуру, и по расплыванию карандаша судят о достижении этой температуры. При необходимости контроля за температурой всего объекта или значительной его части на поверхность наносят серию линий или точек и по плавлению их частей определяют распределение температур по контролируемому объекту в динамическом режиме.

Термолаки и термокраски имеют жидкое состояние и содержат термочувствительное вещество в растворе, в виде суспензии или эмульсии. Неразрушающий контроль производят, покрывая этими веществами поверхность контролируемого объекта и наблюдая за изменениями покрытия их термоиндикатора при нагреве. Как правило, термолаки и термокраски наносят на поверхность контролируемого объекта шпателями, кистью, распылением, а объекты небольших размеров путем погружения их в сосуд с термолаком или термокраской. Наиболее удобно наносить термолаки и термокраски, применяя аэрозоли, если нет серьезных ограничений по технике безопасности.

Термopорошки и термотаблетки можно использовать как непосредственно, так и путем приготовления из них растворов, суспензий или эмульсий.

Особое место занимают объединенные наборы термоиндикаторов — термосвидетели, которые могут быть выполнены, например, в виде основы из тугоплавкой проволоки и нескольких шайб из сплавов, которые плавятся при различных температурах. Термосвидетели размещаются на контролируемом объекте или вместе с ним в нагреваемом объеме.

**Термоиндикаторы, меняющие цвет** по принципу действия, используют различные физико-химические превращения. Среди таких принципов: химическое взаимодействие компонентов между собой, плавление отдельных компонентов, изменение физических свойств за счет перестройки структуры, изменение оптических свойств в жидких кристаллах и др. Эти термоиндикаторы, если возможно, наносят непосредственно на контролируемый объект или готовят из них термокраски. При достижении критической температуры цвет материала термоиндикатора резко изменяется, что дает воз-

возможность определить температуру с погрешностью 5—10°C. Термоиндикаторы, меняющие цвет, могут быть обратимыми, многократно изменяющими цвет при нагреве, и необратимыми, цветность которых фиксируется при максимально достигнутой температуре. Термоиндикаторы с необратимым изменением температуры особенно удобны, когда нет возможности оптического наблюдения за цветом в процессе нагрева объекта.

С помощью термоиндикаторов можно производить индикацию достижения определенной температуры. Если необходимо индцировать несколько значений температур, используют термоиндикаторы нескольких марок, нанося их в виде чередующихся полос или точек с частотой, обеспечивающей необходимую линейную разрешающую способность.

При недопустимости эксплуатации проконтролированных объектов со следами термоиндикатора его удаляют механически водой или специальными составами, а в некоторых случаях с помощью пескоструйных аппаратов.

Жидкие кристаллы (могут быть нанесены на контролируемый объект или на специальную темную подложку, поглощающую теплоту). Некоторые жидкие кристаллы на основе холестерина меняют окраску отраженного света по всему спектру от красного до фиолетового при изменении температуры на 1 К, что дает возможность оценить разрешающую способность по температуре с их помощью значением 0,1—0,2 К. Тепловые переходы в жидких кристаллах обратимы. По сравнению с другими термоиндикаторами они эффективны при малых градиентах сравнительно невысоких температур (10—120°C). Жидкокристаллические индикаторы в виде пленок имеют хорошие эксплуатационные характеристики и большой ресурс. При проведении измерений, когда требуется особая высокая точность пленки, могут быть проградуированы путем погружения в нагретую воду.

Фотоэмульсии, чувствительные к инфракрасному излучению, применяются так же, как фотопленки для видимого диапазона излучений. Они обеспечивают регистрацию изменения интенсивности инфракрасного излучения, причем в отличие от других термоиндикаторов имеют свойство накапливать (интегрировать) по времени воздействие излучения на потемнение фотоэмульсии.

Ценным качеством фотографирования является то, что в результате получается четкий документ, который может сохраняться длительное время.

**Люминофорные термоиндикаторы** используют свойства некоторых веществ (сульфидов цинка и кадмия) изменять интенсивность или цвет люминесценции в зависимости от их температуры. Для возбуждения люминесценции их необходимо облучать стабильным ультрафиолетовым светом. По сравнению с другими термоиндикаторами люминофоры позволяют получить высокое быстродействие (до 5—10 мс).

Преимуществом термоиндикаторов является простота и наглядность контроля распределения температуры. Недостатки — не всегда достаточная точность, сложность изучения динамических процессов, трудность вторичной обработки информации о температурном поле.

### 4.3. Первичные преобразователи тепловых величин

Первичные измерительные преобразователи могут формировать из поступающего теплового потока информацию для непосредственного использования ее оператором или для передачи ее в виде электрических сигналов ко вторичным преобразователям либо устройствам обработки информации. К первой группе преобразователей относятся термометры расширения, а ко второй — термпары, терморезистивные устройства, полупроводниковые приборы, электронно-вакуумные приборы и пироэлектрические преобразователи.

**Термометры расширения** основаны на свободном расширении термометрической жидкости (стеклянные жидкостные термометры) или на зависимости давления в замк-

нутом объеме термометрического вещества (жидкости, газа или пара) от температуры. Основные технические данные на термометры расширения приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Тип термометра расширения	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления шкалы, °С	Погрешность измерения, °С	Класс точности
	минимальный	максимальный			
Технические (ртутные)	-300	600	0,1—10	0,2—10	—
Жидкостные (нертутные)	-200	200	0,2—5	0,2—5	—
Ртутные образцовые	$T_0^*$	$T_0^* + (4 \div 50)$	0,01—0,1	$\pm (0,05 - 1,2)$	—
Манометрический жидкостный	-160	320	0,3—3	—	1; 1,5; 2,5; 4
Манометрический газовый	-267	600	0,5—5	—	1; 1,5; 2,5

\* Измерения производятся в узком диапазоне 4—50°С относительно начальной температуры  $T_0$ , для которой может быть нанесена грубая шкала.

Наибольшее распространение в силу простоты изготовления и хорошей точности измерения получили стеклянные жидкостные термометры, использующие в качестве рабочего тела ртуть или подкрашенный спирт. Для повышения точности измерений термометры имеют две системы — с широким и узким диапазоном измерений, причем точный отсчет производится по короткой растянутой шкале. Помимо стеклянных жидкостных термометров общего применения выпускаются и специальные, например термометры, позволяющие измерять минимальную или максимальную температуру. Стеклянные термометры являются одним из наиболее точных средств измерения температуры.

**Манометрические термометры** в зависимости от вида рабочего вещества бывают жидкостные, конденсационные и газовые. Термосистема манометрического термометра состоит из термобаллона, манометрической пружины необходимой жесткости, запаянной на конце, где закреплена указательная стрелка, и соединяющего их капилляра.

Манометрические термометры дают возможность дистанционно (путем удлинения капилляра до 60 м) измерять температуру, что позволяет применять их в самых сложных условиях;

Термометры расширения отличаются простотой устройства и применения, позволяют достаточно точно измерять непосредственно температуру жидких и газообразных сред. Постоянная времени термометров расширения определяется временем прогрева термометрического вещества и обычно составляет от десятков секунд до нескольких минут.

Термометры расширения могут быть непосредственно использованы для теплового контроля таких изделий, которые содержат жидкие или газообразные компоненты. Ввиду больших размеров и малой чувствительности к излучению термометры используют в тепловом неразрушающем контроле чаще всего при градуировке измерительной аппаратуры по температуре излучающего тела.

**Термоэлектрические преобразователи** (термопары, термоэлементы) содержат спай из двух разнородных материалов, при нагреве которого появляется термоЭДС, монотонно возрастающая при увеличении температуры спаивающихся материалов термопары. Таким образом, термопара преобразует тепловую энергию в энергию постоянного тока. Основные данные для термопар, часто применяемых на практике, приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Тип термопары	Рабочие температуры, °С			ТермоЭДС при указанных температурах относительно 0°, мВ		
	минимальная	максимальная	предельная			
Медь-медноникелевая Т	—200	+400	—	—5,6	+20,9	—
Железо-медноникелевая J	—200	+700	+900	—7,9	+39,1	+51,9
Хромель-копелевая	—50	+600	+800	—3,2	+49,1	+66,5
Никельхром-медноникелевая E	—100	+700	+900	—8,8	+53,1	+68,8
Платинородий (10%)-платиновая S	0	+1300	+1600	0	+13,2	+16,8
Платинородий (30%)-платинородиевая (6%) В	+300	+1600	+1800	+0,4	+11,3	+13,6
Вольфрамрений (5%)-вольфрамрениевая (20%)	0	+2200	+2500	0	+31,1	+33,6

ТермоЭДС в широком диапазоне температур нелинейно зависит от термопары, поэтому при измерениях следует пользоваться и поправочными коэффициентами. Чтобы получить большую термоЭДС, термопары соединяют последовательно (до нескольких сотен) и объединяют в батарею, но необходимо принять меры по стабилизации условий работы, в первую очередь температуры холодного спая. Инерционность термопар определяется временем прогрева спая, а их постоянная времени достигает десятков секунд.

Термопары для теплового неразрушающего контроля используются редко, в основном так же, как термометры для измерения мощных тепловых излучений и градуировки аппаратуры неразрушающего контроля по температуре, а также в случае необходимости записи приращений температуры, поскольку измерения с их помощью чаще всего производятся автоматическими потенциометрами.

**Термосопротивления** (терморезисторы) используют свойство различных материалов изменять электрическое сопротивление в зависимости от температуры.

Технические данные для различных видов термосопротивлений и терморезисторов приведены в табл. 4.3.

Термосопротивления из чистых металлов обычно изготавливают путем намотки тонкой калиброванной проволоки на керамический каркас и помещают в защитную оболочку. В настоящее время применяют проволоку из меди высокой чистоты, никеля и платины. Термосопротивления из металлов выпускаются 2-го и 3-го классов точности, что соответствует основной погрешности измерений в зависимости от измеряемой температуры от 0,2 до 20 К. Основные эксплуатационные показатели металлических термосопротивлений такие же, как у термопар, поэтому области применения их близки. Полупроводниковые термосопротивления изготавливают из различных материалов: германия, окислов меди, марганца, кобальта и др. Терморезисторы серий ММТ, К.МТ и подобные им применяются в случаях, когда необходимо измерять средние температуры с невысокой точностью.

Таблица 4.3

Тип термосопротивлений	Рабочие температуры, °С		Диапазон номинальных сопротивлений при 20°С, Ом	$\alpha_c$ при 20°С, 1/°С	Чувствительность	Длинноволновая граница, мкм
	минимальная	максимальная				
Медные	-200	+200	10, 50, 100	$4,28 \cdot 10^{-3}$	—	—
Никелевые	-60	+180	50, 100	$6,75 \cdot 10^{-3}$	—	—
Платиновые	-260	+1100	1, 5, 10, 50, 100, 500	Нелинейно зависит от T	—	—
ММТ-1,4	—	+120	$10^3 - 2 \cdot 10^5$	-0,24 -0,05	—	—
КМТ-1	—	+180	$22 \cdot 10^3 - 10^6$	-0,042 +0,084	—	—
ФСА	—	+25	$10^4 - 10^5$	—	0,5 мА/лМ	2,7
БКМ-2	—	+25	$1,5 \cdot 10^5$	—	150 В/Вт	30
InSb	-196	-196	$2 \cdot 10^3 - 10^4$	—	$2 \cdot 10^4$ В/Вт	5,5
Ge (Au)	-196	-196	$10^6$	—	—	9
Ge (Hg)	-243	-243	$0,5 \cdot 10^6$	—	—	14
Ge (Cu)	-269	-269	$2 \cdot 10^4$	—	—	40
Ge (Zn)	-269	-269	$3 \cdot 10^5$	—	—	40

Полупроводниковые резисторы, предназначенные для регистрации потоков излучения, часто называют также фоторезисторами. К этому типу относятся резисторы серии ФСА, изготовленные на основе сернистого свинца, и позволяют преобразовывать потоки излучений видимого и инфракрасного диапазонов в изменение сопротивления. Постоянная времени этих фоторезисторов равна 40 мкс. Поскольку создавать свободные заряды могут кванты излучений с достаточной энергией, для полупроводниковых терморезисторов, воспринимающих тепловое излучение, существует «красная граница» — наибольшая длина волны колебаний  $\lambda_k$ , выше которых падающее излучение не приводит к существенному изменению сопротивления. Терморезистор типа БКМ-2, являющийся болометром, предназначенным для регистрации малых потоков излучения, имеет большую длинноволновую границу за счет накопления энергии падающего излучения в виде теплоты и постоянную времени около 6 мс. Конструктивно в одном корпусе объединены два одинаковых терморезистора, включаемых в балансную или мостовую цепь, причем один из резисторов закрыт экраном от падающего излучения. Это существенно повышает стабильность работы аппаратуры.

Развитие полупроводниковой техники привело к созданию малогабаритных терморезисторов, которые в сочетании с глубокой охлаждением позволяют получить высокую чувствительность, быстрое действие и увеличить  $V/K$  таким преобразователям относятся фоторезисторы на основе антимонида индия и германия, легированного различными металлами, и полупроводник типа «кадмий — ртуть — теллур». Постоянная времени для этих фоторезисторов уменьшается при более глубоком охлаждении от 1 мкс (77 К) до 0,01 мкс (4,2 К).

Полупроводниковые приборы с p-n-переходом также могут при меняться для преобразования тепловых излучений в электрические сигналы. К таким приборам относятся [15] фотодиоды (ФД-3 ФДК-1 и др.) и фототранзисторы. Однако имеющиеся в настоящее время фотодиоды и фототранзисторы охватывают небольшую область инфракрасных излучений и эффективны в оптическом и прилегающем к нему диапазоне волн. Так, красная граница германиевого диода ФД-3  $\lambda_k = 1,8$  мкм, а у кремниевого диода ФДК-1  $\lambda_k = 1,1$  мкм, их постоянная времени составляет 10 мкс, а чувствительность 25 и 5 мА/лм соответственно. Метрологические характеристики фотодиодов и фототранзисторов невысоки, поэтому их применение ограничено обычно использованием в устройствах автоматики при достаточно большом значении плотности потока излучения.

Электронные вакуумные приборы используют внешний фотоэффект (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи) или внутренний фотоэффект (электронно-лучевые трубки). Электронно-вакуумные приборы

имеют малый диапазон спектральной чувствительности к тепловому излучению (до длин волн 1,5—3 мкм), что ограничивает их применение. Фотоэлементы не получили широкого применения из-за малой чувствительности.

Фотоэлектронные умножители содержат катод, испускающий под действием лучистой энергии электроны, ряд динодов (от 1 до 14) — вспомогательных электродов, имеющих большой коэффициент электронной эмиссии, и анод, собирающий выбитые электроны.

На диноды и анод подано положительное напряжение, причем тем больше тем дальше динод от катода (до нескольких тысяч вольт). Двигаясь от катода к диноду, электроны ускоряются и, встречаясь с ним, выбивают из него несколько вторичных электронов, которые снова ускоряются, выбивают также несколько электронов из следующего динода и т. д. Общий поток электронов попадает на анод. За счет многократной вторичной эмиссии от ускоренных электронов и динодов ток анода значительно больше (до  $10^6$  раз) первичного фототока но пропорционален его величине. Фотоэлектронные умножители имеют очень малую инерционность (частота до 100 МГц).

**Электронно-оптический преобразователь** является прибором, позволяющим перенести невидимое инфракрасное изображение на выходной экран, светящийся видимым светом. Инфракрасное излучение падает на фотокатод (например, кислородно-цезиевый) и вызывает эмиссию электронов, причем число вылетающих электронов тем больше, чем выше плотность потока падающего инфракрасного излучения. Свободные электроны ускоряются и фокусируются на соответствующую точку выходного флуоресцирующего экрана. За счет полученной электронами энергии электрического поля, создаваемого высоковольтным источником питания, сформированное видимое изображение на экране имеет яркость, достаточную для визуального наблюдения. При необходимости получить еще большую яркость используют каскадные и каналные электронно-оптические преобразователи.

Электронно-оптические преобразователи используются в тех случаях, когда необходимо оперативно получить видимое изображение в реальном масштабе времени непосредственно в зоне наличия инфракрасного излучения и обычно без облучения контролируемого объекта. Вместе с этим полученное изображение не может быть передано на значительное расстояние.

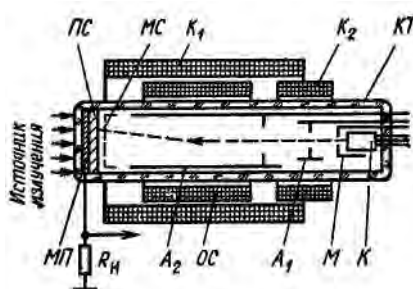


Рис. 4.1 Конструкция видеоконата

**Передающие электронно-лучевые трубки**, подобные применяемым в телевизионных системах, при использовании специальных материалов и элементов могут применяться для преобразования распределения плотности потока инфракрасного излучения в видеосигналы и затем — в видимое изображение на экране электроннолучевой трубки. Устройство типичной передающей электронно-лучевой трубки — видикона, применяемой для этих цепей, показано на рис. 4.1. Элементом видикона, чувствительным к инфракрасному излучению, является мишень, состоящая из полупрозрачной металлической пленки *МП* и полупроводникового слоя *ПС* с большим сопротивлением.

Металлическая пленка *МП* выполняет роль сигнальной пластины, подключаемой к резистору нагрузки *И*, с которого снимается выходное напряжение. Полупроводниковый слой *ПС* является элементом, чувствительным к падающему инфракрасному излу-

чению. Пленка *МП* и противоположная сторона полупроводникового слоя *ПС* служат обкладками элементарных конденсаторов мишени. При падении на мишень излучения и за счет ее появления в материале свободных носителей зарядов эти элементарные конденсаторы разряжаются и тем сильнее, чем больше интенсивность облучения. В результате мишень в разных местах будет иметь различные потенциалы (потенциальный рельеф) в зависимости от интенсивности падающего излучения. Таким образом, мишень трубки определяет основные показатели видикона и в первую очередь длинноволновую границу ее спектральной характеристики  $\lambda_k$ . Считывание потенциального рельефа на мишени производится электронным лучом, который формируется с помощью электронного прожектора *ЭП* (катод *K*, модулятор *M*, первый анод *At*) и магнитного поля, созданного катушками *K1* и *K2*. Отклонение электронного луча производится с помощью отклоняющей системы *ОС* в виде двух ортогональных пар катушек. Вдоль стенок колбы трубки *КТ* располагается второй анод *A2*, ускоряющий электроны, который заканчивается мелкоструйной сеткой *МС*, выравнивающей электрическое поле вблизи мишени и способствующий работе всех ее элементов в одинаковых условиях.

При последовательном перемещении луча по облученной мишени элементарные конденсаторы будут перезаряжаться до равновесного потенциала, одинакового для всех элементов мишени. Ток перезаряда, определяемый разностью бывшего ранее потенциала, зависящего от падающей энергии инфракрасного излучения, и достигаемого равновесного потенциала, создает на резисторе  $R_H$  напряжение, соответствующее сформированному потенциальному рельефу. После перемещения луча на соответствующие участки в данном месте начнется разряд элементов мишени за счет падающего инфракрасного излучения.

Чтобы снизить инерционность видикона, в качестве мишени используют более сложные структуры и, в частности, мозаику из большого количества (до  $5 \cdot 10^5$ ) кремниевых или германиевых фотодиодов.

Передающие электронно-лучевые трубки, несмотря на ограниченный диапазон по длине волны регистрируемых излучений (примерно до 1,5 мкм), обладают ценными качествами: они позволяют получать видимое изображение без механического сканирования и видеосигнал, пригодный для импульсной и логической обработки, имеют большое быстродействие, что позволяет вводить сигналы с видикона в ЭВМ.

**Пироэлектрические преобразователи** основаны на свойстве некоторых кристаллических диэлектриков (пироэлектриков) электризоваться при нагревании или охлаждении. Поверхностная плотность возникающих зарядов прямо пропорциональна градиенту температур на гранях пироэлектрика. На основе пироэлектриков созданы: преобразователь в виде пироэлектрического конденсатора с поглощающим инфракрасное излучение покрытием в качестве обкладок и передающая электронно-лучевая трубка (пирикон) с мишенью из пироэлектрического материала. Пироэлектрические преобразователи неселективны и работают в широком спектральном диапазоне ( $\lambda_k \gg 14$  мкм). Чувствительность пироэлектрического конденсатора высока и достигает 20 В/К независимо от его площади при постоянной времени 0,1—10 мкс. Поскольку пироэлектрик реагирует на перепад температур, его целесообразно применять для контроля в динамическом режиме. В случае необходимости использования его в статическом режиме или при медленных изменениях потока инфракрасного излучения перед пироэлектрическим преобразователем устанавливают прерыватель потока или модулятор.

Недостатком пироэлектрических преобразователей является большое выходное сопротивление, влияние вибраций и других внешних воздействий.



#### 4.4. Аппаратура одноточечного теплового контроля

Методы теплового неразрушающего контроля чаще всего связаны с изменением температуры в какой-то области контролируемого объекта или излучаемого с его поверхности теплового потока, связанного с температурой. Если качество объекта контроля может быть оценено путем измерения этих величин или их приращений в одной или нескольких небольших областях, решать такую контрольно-измерительную задачу можно с помощью приборов или устройств одноточечного контроля, фактически измеряющего температуру.

В случае возможности измерения температуры для целей теплового неразрушающего контроля *контактными* методами (термометры расширения, термоэлектрические устройства, термосопротивления и терморезисторы) им следует отдать предпочтение, поскольку они обеспечивают, как правило, более высокую точность измерения и, следовательно, более высокую достоверность контроля.

Крупным недостатком контактных методов измерения температуры в неразрушающем контроле является сильное влияние качества теплового контакта между преобразователем и контактируемым объектом из-за его шероховатости, загрязнений, наличия окислов и других причин.

В результате непостоянства этого контакта сигнал первичного измерительного преобразователя будет сильно изменяться при проведении контроля даже в пределах одного изделия, что резко снижает точность измерений температуры и достоверность неразрушающего контроля, несмотря на использование высокоточных измерителей температуры. Кроме того, диапазон применимости контактных методов ограничивается температурой около 2500°C, а также тем, что иногда контакт с контролируемым объектом вообще невозможен или нежелателен.

В связи с этим для целей неразрушающего контроля наибольшее применение получили *бесконтактные* методы измерения температуры по тепловому излучению с помощью пирометров, которые принципиально не имеют ограничений по верхнему значению измеряемых температур. В зависимости от принципа действия различают пирометры яркостные, цветковые и радиационные. Последние, особенно предназначенные для измерения малых температур, иногда называют радиометрами (измерителями радиационного потока). Некоторые данные по параметрам различного типа пирометров приведены в табл. 4.5.

Яркостные пирометры основаны на одновременном наблюдении за яркостью свечения контролируемого объекта в инфракрасном (при температуре менее 600°C) или видимом диапазоне электромагнитных волн и эталонного источника (обычно накаливаемой нити). Изменяя яркость свечения нити путем регулировки протекающего тока и сравнивая через монохроматический фильтр яркость нити на фоне контролируемого объекта (при низких температурах с помощью преобразователей), оператор добивается пропадания части изображения нити с наивысшей температурой. В этом случае температура участка нити и контролируемого объекта будут одинаковы, что позволяет по градуировке регулятора тока накала найти температуру контролируемого объекта.

Цветовые пирометры используют зависимость потока излучения от длины волны, пропускаемой спектральной составляющей, которая в области коротких длин волн (больших значений температур) близка к экспоненциальной. Поэтому, выделив с помощью полосовых (цветных) фильтров две составляющие в различных участках спектра и определив логарифмы их отношения, можно определить «цветовую» температуру контролируемого объекта. Для повышения точности измерений селективные фильтры монтируют на подвижном диске модулятора, который располагается на пути лучей перед первичным измерительным преобразователем потока излучения. Цветовые пирометры обычно используются при измерении высоких температур (1000—3000°C), где имеет место интенсивное излучение в видимом свете. Однако подобрав соответствующую

щую оптику, фильтры и преобразователь, можно проводить измерения температур, начиная с комнатных, в инфракрасном диапазоне, однако чувствительность и стабильность аппаратуры в этом случае невысоки.

Таблица 4.5

Параметры	ФЭП-8	«Инфра-пир»	ЦЭП-3	«РАПИР» (ТЭРА-201)	«Thermo-point-80»*	«Thermo-profil»**
Принцип действия Тип преобразователя	Яркостной ФЭУ	Цветовой	ФЭУ	Радиационный		
		—		Термопара	—	Охлаждаемый резистор
Диапазон измеряемых температур, °С	100—600	0—100	1400—2800	40—300	—30÷1270	InSb —20÷1000
Погрешность измерения: °С	—	—	—	—	1	(4 диапазона)
%	1	3	1	1	1	0,2 (при 30°С)
Поле зрения, град	1—3	9	0,5	7	2	80, 40, 20, 10
Разрешающая способность по углу, град	1—3	9	0,5	7	2	
Время отсчета показаний, с	1	4	—	5	0,25	0,3 0,7

\* Цифровой с микропроцессором.  
\*\* Сканирующий.

Радиационные пирометры используют зависимость потока теплового излучения контролируемого объекта от его температуры и выполняются на основе различных первичных преобразователей: батарей термопар, охлаждаемых полупроводниковых резисторов, пироэлектрических преобразователей, болометров и др. Они изготавливаются на современной элементной базе электроники и обладают большой чувствительностью, что позволяют измерять сравнительно низкие температуры. Помимо собственного излучения контролируемого объекта наиболее совершенные радиационные пирометры учитывают излучение посторонних нагретых тел или фона, отраженные контролируемым объектом, которое приблизительно пропорционально потоку:

$$Q_{\text{меш}} \approx (1 - \varepsilon_{\text{л}}) \varepsilon_{\text{меш}} T_{\text{меш}}^4$$

где  $\varepsilon_{\text{л}}$  и  $T_{\text{меш}}$  — коэффициенты лучеиспускания и температура предмета, создающего мешающее измерением излучение.

Радиационные пирометры строят по различным функциональным схемам (рис. 4.2, 4.3), общими частями которых являются: объектив *ОБ*, первичный измерительный преобразователь излучения *П* (приемник), блоки вторичной обработки информации *БОИ*, индикаторный блок *И*, устройство наведения *УН*, калибровочное устройство *КУ* и блок питания *БП*.

Радиационный пирометр по функциональной схеме рис. 4.2 обеспечивает повышенную точность измерений, поскольку реализует компенсационный метод. Тепловое излучение от контролируемого объекта через спектральный или нейтральный фильтр  $\Phi$  поступает на оптические элементы (зеркала  $Z_1, Z_2, Z_3$ ). Фильтр  $\Phi$  пропускает только нужную часть излучения, а также защищает оптическую часть и первичный преобразователь *П* от загрязнений пылью, брызгами и т. д.

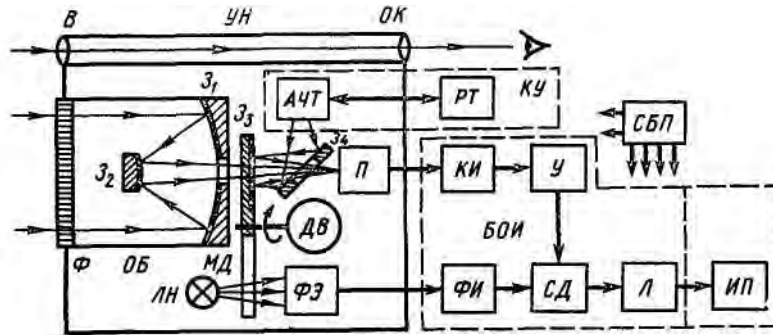


Рис. 4.2. Функциональная схема радиационного пирометра с модуляцией потока

После фильтра излучение попадает на собирающее зеркало  $Z_1$ , изготовленное в виде параболоида вращения, а затем на зеркало  $Z_2$ , поверхность которого представляет гиперболоид вращения. Зеркало  $Z_2$  направляет инфракрасное излучение на первичный измерительный преобразователь  $\Pi$  с прерыванием потока диском модулятора  $МД$ , вращаемого двигателем  $ДВ$ . Это облегчает усиление сигналов (оно будет производиться по переменному току) и, кроме того, дает возможность во время затенения контролируемого объекта вводить инфракрасное излучение от калиброванного устройства  $КУ$  (эталонного источника). Обратная сторона диска модулятора является отражающим зеркалом  $Z_3$ , для чего диск изготавливают из алюминия и полируют. Источник эталонного излучения  $АЧТ$  имеет постоянную температуру, устанавливаемую регулятором температуры  $РТ$  оператором в зависимости от решаемой контрольно-измерительной задачи. Тепловое излучение  $АЧТ$  попадает на кольцевое зеркало  $Z_4$ , отражающее его эталонное инфракрасное излучение на зеркало  $Z_3$  диска модулятора, после которого излучение попадает на преобразователь  $\Pi$ . Кольцевое зеркало  $Z_4$  не влияет

на прохождение излучения от контролируемого объекта. Таким образом на преобразователь  $\Pi$  поочередно попадает инфракрасное излучение от контролируемого объекта и от эталонного источника  $АЧТ$  (положение диска модулятора  $МД$  соответствует этому моменту времени). Если поток излучения от контролируемого объекта такой же, как от источника эталонного излучения  $АЧТ$ , то на выходе преобразователя  $\Pi$  выходной сигнал будет нулевым. При отличии потоков излучения, определяемых в первую очередь перепадом температур, на выходе преобразователя  $\Pi$  появится выходной сигнал, определяемый разностью потоков теплового излучения.

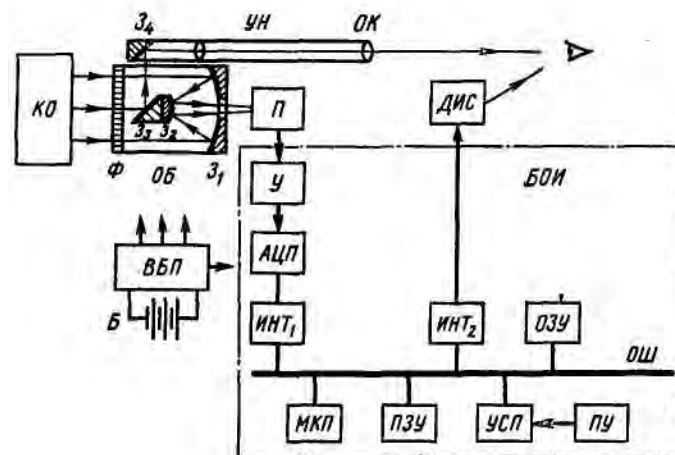


Рис. 4.3. Функциональная схема радиационного пирометра с микропроцессором

Преобразователь  $\Pi$  подключен к электрической цепи (мостовой, балансной или др.), из которой особо выделен корректор излучения  $КИ$ , выполненный обычно в виде потенциометра и позволяющий изменять коэффициент передачи в зависимости от коэффициента теплового излучения контролируемого объекта.

Сигналы после корректора излучения  $КИ$  поступают на усилитель  $У$ , а затем на синхронный детектор  $СД$ , который необходим для формирования на выходе постоянно-

го напряжения соответствующего знака в зависимости от того, какой из потоков излучения контролируемого объекта или абсолютно черного тела больше по значению. Для нормальной работы синхронного детектора *СД* необходимо подать на него опорное напряжение, характеризующее положение диска модулятора *МД* и показывающее, какой из потоков определяет в данный момент сигнал преобразователя *П*. С этой целью установлена лампа накаливания *ЛН*, освещающая фотоэлемент *ФЭ* потоком видимого света, который прерывается тем же диском модулятора *МД*. Напряжение от фотоэлемента *ФЭ* поступает на импульсное устройство *ФИ*, формирующее импульсы с амплитудой, обеспечивающей устойчивую работу синхронного детектора *СД*. Так как поток теплового излучения нелинейно зависит от температуры контролируемого объекта, для получения линейной шкалы устанавливают нелинейное корректирующее устройство — линейризатор *Л*. Температуру контролируемого объекта показывает измерительный прибор *ИП*, который может быть стрелочным, цифровым или регистрирующим. Высокая направленность объектива *ОБ* пирометра делает необходимым устройство визуального наведения *УН*, содержащего визир *В* (рамку) и окуляр *ОК*. Наблюдая через окуляр и визир область перед объективом *ОБ*, оператор может точно установить центр поля зрения пирометра на требуемую зону контроля.

По функциональной схеме рис. 4.3 выполняют достаточно чувствительные и точные радиационные пирометры. Часто для упрощения конструкции радиационного пирометра и улучшения его эксплуатационных показателей исключают систему модуляции, абсолютно черное тело и упрощают оптическую систему. Повышение погрешностей измерений (в 3—10 раз) компенсируется удобством работы с портативным прибором.

Одним из таких современных радиационных пирометров является «Thermopoint-80» укрупненная функциональная схема которого изображена на рис. 4.3. Основные блоки, формирующие сигналы о температуре контролируемого объекта, у него подобны блокам пирометра по схеме рис. 4.2, но выполнен он на базе цифровых логических электронных схем и микропроцессора МКЛ, имеет быстродействующую память, а взаимодействие всех блоков во времени и реализацию всех операций обеспечивает микропроцессор, причем оперативное запоминающее устройство ОЗУ прибора может накапливать до 10 значений единичных измерений. «Thermopoint-80» позволяет измерять в цифровом виде температуру по Цельсию и Фаренгейту, а также производить обработку полученной серии измерений. Весь диапазон измеряемых температур перекрывается без каких-либо переключений и температура индицируется 4 раза в секунду. Рабочий спектральный диапазон этого пирометра составляет от 8 до 14 мкм.

Тепловое излучение (рис. 4.3) от контролируемого объекта *КО* через фильтр *Ф* падает на собирающее параболическое зеркало *З<sub>1</sub>*, а затем — на гиперболическое зеркало *З<sub>2</sub>*, которое направляет сфокусированное излучение на преобразователь *П*. Оптическая система из двух зеркал *З<sub>1</sub>* и *З<sub>2</sub>* позволяет просто и надежно разместить преобразователь *П* с необходимыми элементами крепления и компоновать их с электронными блоками. Преобразователь *П* включен в специальную электрическую цепь балансного типа, выделяющую сигнал, который несет информацию о потоке теплового излучения. После усиления этого сигнала до необходимого значения усилителем *У* он подается на аналого-цифровой преобразователь *АЦП*, подключенный через интерфейс *ИИТ* общей шине *ОШ*, и дальнейшая обработка информации производится по согласованным командам с помощью микропроцессора *МКП* и программ, заложенных в постоянном запоминающем устройстве *ПЗУ*, с учетом накопленных в *ОЗУ* данных. Управление пирометром производится с пульта управления *ПУ* оператором через устройство связи с пультом *УСП*. Режим работы прибора задает оператор, а реализуются они с помощью заложенного математического обеспечения. Результаты ввода заданных режимов и измерений выводятся через параллельный интерфейс *ИИТ<sub>2</sub>* на многоэлементный дисплей *ДИС*, выполненный на жидкокристаллических элементах. Питание всех блоков радиа-

ционного пирометра обеспечивает стабилизированный вторичный блок питания ВВП, преобразующий энергию батареи В в необходимые постоянные напряжения.

Пирометр точно наводится на изучаемый участок контролируемого объекта КО с помощью устройства наведения УН, содержащего зеркала З<sub>3</sub>, З<sub>4</sub> и окуляр ОК.

После включения путем нажатия кнопки «Thermopoint-80» перед измерениями автоматически калибруется, т. е. производится установка точки начала отсчета и чувствительности. Наличие быстродействующей памяти ЗУ создает возможность ручного сканирования в пространстве по области контролируемого объекта с непостоянной температурой. С помощью математического обеспечения в виде предварительно запрограммированных операций обработки накопленных данных, производится вычисление следующих значений температуры: среднего, минимального, максимального и разностного между максимальным и минимальным, которые выводятся по желанию оператора. При измерениях может быть учтен коэффициент теплового излучения  $\epsilon_{\lambda}$  в пределах от 0,1 до 1,0, который вводится оператором. В случае необходимости вводится температура окружающей среды или наиболее нагретых предметов, что позволяет с учетом этого точно определить фактическую температуру контролируемого объекта.

**Настройка радиационных пирометров** заключается в выборе и установке режимов работы (выбор диапазона и режима проведения измерений: однократный, с запоминанием и обработкой результатов и т. д., установка нуля, чувствительности или шкалы); в введении коэффициента теплового излучения  $\epsilon_{\lambda}$  и температуры окружающей среды или сильно нагретых предметов. Коэффициент теплового излучения в зависимости от конкретных условий определяется по-разному: на базе имеющегося опыта работы с объектами данного типа, закрепленного в нормативно-технической документации; по таблицам для различных материалов или непосредственно измеряется, если в какой-либо зоне контролируемого объекта температура точно известна. В этом случае, направив пирометр на участок контролируемого объекта с известной температурой, регулируют показания пирометра ручкой установки коэффициента теплового излучения  $\epsilon_{\lambda}$  до значения, равного известной температуре, полагая при этом, что влияние окружающих предметов невелико. Таким образом, можно достаточно точно учитывать влияние коэффициента теплового излучения или, наоборот, производить его измерение с целью испытания качества различных объектов.

**Погрешность измерения** температуры радиационным пирометром определяется следующими составляющими: нестабильностью его блоков; погрешностью, с которой известен коэффициент теплового излучения; влиянием температуры окружающей среды, фона и нагретых предметов; динамическими погрешностями от взаимного перемещения контролируемого объекта, пирометра и других предметов; ограниченными размерами контролируемого объекта или большим полем зрения пирометра; непостоянством температуры по контролируемому объекту и другими второстепенными причинами. Чаще всего наиболее существенной является погрешность от того, что коэффициент теплового излучения известен неточно или изменяется от изделия к изделию из-за шероховатости или неровности поверхностей, наличия покрытий, окислов или загрязнений, взаимных перекосов и других производственных причин.

Погрешность, возникающая из-за неопределенности коэффициента теплового излучения, может быть существенно снижена для серых объектов, если производить измерения в других частотных диапазонах, т. е. регистрировать излучение в диапазоне с двумя средними длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , и совместно обработать полученные сигналы. Воспользовавшись формулой для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  будем иметь:

$$\frac{q_{\lambda_1}}{q_{\lambda_2}} = \frac{\frac{C_1 \epsilon_{\lambda_1}}{\lambda_1^5 \exp[(C_2/\lambda_1 T) - 1]}}{\frac{C_1 \epsilon_{\lambda_2}}{\lambda_2^5 \exp[(C_2/\lambda_2 T) - 1]}}$$

Учитывая, что для серого тела  $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}$ , упростим это выражение:

$$\frac{q_{\lambda_1}}{q_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp \left[ \frac{C_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right].$$

Прологарифмировав левую и правую части этого выражения и перегруппировав величины, получим:

$$T = C_3 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \ln \left[ \frac{q_{\lambda_1}}{q_{\lambda_2}} \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right].$$

Таким образом, для серых контролируемых объектов; выбрав подходящие длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , обработав полученные от преобразователей сигналы, пропорциональные  $e_{\lambda_1}$  и  $e_{\lambda_2}$  можно измерить истинную температуру объекта. Этот принцип работы реализуют некоторые пирометры, имеющие модулятор в виде набора светофильтров, пропускающих соответствующие излучения.

Неопределенность и непостоянство коэффициента теплового излучения  $e_{\lambda}$  приводят на практике к тому, что не всегда для целей неразрушающего контроля целесообразно применять радиационные пирометры высокой точности, а лучше использовать пирометр с несколько большей погрешностью, но имеющий лучшие эксплуатационные характеристики: габариты, масса, источники питания, простота, удобство в работе и т. д.

#### 4.5. Сканирующие радиационные пирометры

Пирометры позволяют производить одноточечный тепловой неразрушающий контроль по температуре, а лучшие из них, оснащенные быстродействующей памятью и микропроцессором, дают возможность делать простейший анализ при ручном сканировании и определять экстремальные, интегральные и дифференциальные показатели распределения температур. Вместе с тем они имеют малое быстродействие и не показывают, как изменяется температура, так как температуру измеряют в одном направлении пространства. Весьма часто (для целей дефектоскопии) достоверная информация о состоянии контролируемого объекта может быть получена путем анализа распределения температуры в пространстве, что возможно за счет использования различных способов сканирования. Так, если вращать или покачивать радиационный пирометр, можно получить информацию об изменениях температуры вокруг него. Однако применение радиационного пирометра для этой цели затруднено большой инерционностью процесса получения сигналов о температуре и необходимостью организации равномерного сканирования. В связи с этим были созданы приборы, позволяющие наблюдать распределение температуры по одной координате с высоким быстродействием, получившие название сканирующие радиометры, термографы, или приборы типа «термопрофиль».

Они предназначены для получения на экране осциллоскопа изображения распределения температуры по поверхности контролируемого объекта в одной плоскости (по линии развертки) и измерения температуры в любой из ее точек. Упрощенная функциональная схема сканирующего радиометра изображена на рис. 4.4.

Тепловой поток от контролируемого объекта проходит через фильтр  $\Phi$ , пропускающий инфракрасное излучение, и фокусируется объективом  $OB$  с помощью зеркала  $З$  на преобразователь  $П$ . Для расширения диапазона в области низких измеряемых температур и повышения разрешающей способности преобразователь  $П$  помещен в холодильник Хв виде сосуда Дьюара с залитым в него испаряющимся азотом, обеспечивающим постоянство температуры преобразователя  $П$ . Объектив  $OB$  создает высокую направленность приема излучения и высокую пространственную разрешающую способность. Сканирование в секторе  $80^\circ$  осуществляется путем вращения двигателем  $ДВ$  зеркала  $З$ . Одновременно от двигателя  $ДВ$  работает синхронизатор  $СХ$ , создающий импульсы для запуска генератора развертки  $ГР$ . Кроме перечисленных устройств в блоке сканирования  $БС$  находится устройство наведения  $УН$  в виде телескопа или осветителя, создающего узкий луч, направляемый на центр контролируемого участка. Блок скани-

рования *БС* устанавливается на механизм установки *МУ*, выполненный на базе штатива с механическими приспособлениями для поворота блока сканирования *БС* в двух плоскостях.

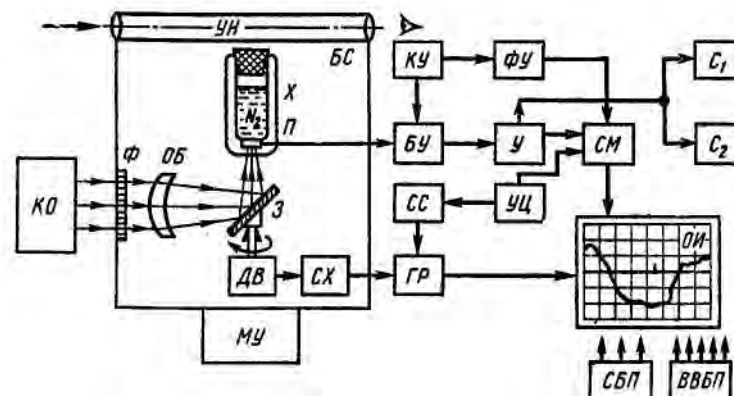


Рис. 4.4. Функциональная схема сканирующего радиометра

Преобразователь *П* в виде полупроводникового терморезистора из антимонида индия ( $\text{InSb}$ ) включен в балансно-преобразовательное устройство *БУ* на базе мостовой схемы с использованием усилительных элементов и линейризаторов. Характеристики линейризатора являются обратной зависимостью потока теплового излучения от температуры. Сигнал, вызванный пришедшим инфракрасным излучением, частично компенсируется с помощью калибратора уровня *КУ*, собранного на основе потенциометров. Напряжение, полученное на выходе балансно-преобразовательного устройства *БУ*, поступает на усилитель линейный *У*, а с его выхода — на сумматор *СМ*. Кроме того, на сумматор *СМ* поступает напряжение от формирователя уровня *ФУ* и импульсное напряжение от устройства указателя центра *УЦ*. Результирующее напряжение с сумматора *СМ* подводится к пластинам вертикального отклонения осциллографического индикатора *ОИ* и создает изображение на его экране.

Сигнализаторы *С<sub>1</sub>* и *С<sub>2</sub>*, включенные на выходе усилителя *У*, срабатывают при выходе температуры (полученного напряжения) за верхний или нижний из установленных пределов.

Равномерное движение луча по горизонтали на экране индикатора *ОИ* осуществляется с помощью генератора развертки *ГР*, подающего на пластины горизонтального отклонения осциллографического индикатора *ОИ* напряжение, линейно изменяющееся от времени. Генератор развертки *ГР* после подачи импульса от синхронизатора *СХ* за один оборот зеркала *З* формирует пилообразное напряжение развертки дважды: первый раз — во время сканирования *КО* и второй раз — в остающееся время для обозначения на экране индикатора *ОИ* линии уровня отсчета температуры. Этот уровень задается оператором от калибратора уровня *КУ* и отсчитывается на шкалах по положению ручек его установки. При более подробном изучении распределения температуры в узком секторе ( $40^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $10^\circ$ ) развертка основного цикла, когда изображается распределение температуры по *КО*, начинается с задержкой и идет с большей скоростью, что также задает оператор, регулируя ручками блоков указания центра *УЦ* и сектора сканирования *СС*. Блок указания центра *УЦ* создает импульс напряжения, соответствующий положению центра, выбранному оператором на контролируемом объекте и высвечиваемый на экране индикатора *ОИ*. Блок указания центра *УЦ* взаимодействует также с импульсным блоком сектора сканирования *СС* так, чтобы развертка осуществлялась симметрично относительно выбранного сектора сканирования.

Таким образом, изображение на экране индикатора *ОИ* сканирующего радиометра содержит: кривую распределения температур по выбранной плоскости сканирования *РТ*, импульс указания центра *ИЦ* и линию калиброванного уровня температуры *УТ*. На рис. 4.5 в качестве примера приведены диаграммы, характеризующие работу прибора. Рис. 4.5, *а* показывает взаимное расположение источника теплоты (*ИТ*) и объекта кон-

троля  $KO$  в виде листа с расслоением  $PC$ , заполненным воздухом, имеющим малую теплопроводность по сравнению с материалом  $KO$ . По линии  $AA'$  происходит сканирование. На рис. 4.5, б, в изображены осциллограммы с экрана прибора «Термопрофиль ТНР-1» при секторе обзора  $80^\circ$  (рис. 4.5, б) и  $10^\circ$  (рис. 4.5, в). Конструктивно приборы типа «Термопрофиль» выполняются в виде двух блоков: сканирования и индикатора.

При настройке прибора оператор наводит блок сканирования на наиболее интересный участок контролируемого объекта, выбирает диапазон измерений температуры, устанавливает калибровочный уровень температуры, если необходимо, устанавливает сектор меньших размеров, предварительно указав его центр, а при большом объеме неразрушающего контроля включает автоматическую сигнализацию и устанавливает уровень ее срабатывания.

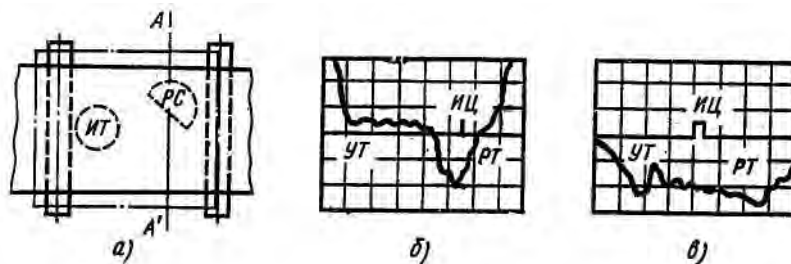


Рис. 4.5 Контроль с помощью сканирующего радиационного пирометра:  
а — схема контроля, б — изображение на экране при обходе в секторе  $80^\circ$ , в —  
в секторе  $10^\circ$

Отсчет температуры с помощью изображения на экране производится по формуле:  $T = T_y + S_T A l r$ , где  $T_y$  — температура калибровочного уровня, установленная оператором с помощью ручек переключателей прибора;  $S_i$  — установленная чувствительность к температуре;  $D_T$  — расстояние на экране осциллографического индикатора  $ИО$ , прибора от линии калибровки температуры до точки, в которой производится ее измерение.

Помимо расчета температуры по чувствительности с точностью до деления шкалы переключателя калибровочного уровня температуры она может быть измерена путем совмещения калибровочного уровня температуры с точкой, в которой производится измерение. Для реальных, не абсолютно черных объектов после проведения измерений надо вводить коррекцию на коэффициент теплового излучения  $\epsilon_d$ .

Погрешность измерений сканирующим радиометром определяется так же, как у радиационных пирометров аппаратурной погрешностью и степенью неизвестности параметров контролируемого объекта, в первую очередь коэффициента излучения  $\epsilon_d$ , и другими условиями проведения контроля.

Сканирующие радиометры особенно удобны при контроле линейно протяженных объектов, в том числе и движущихся в пространстве. Например, если разместить блок сканирования перпендикулярно направлению движения (по ширине) контролируемого изделия в виде листа, полотна и т. п., можно, таким образом, организовать 100%-ный неразрушающий контроль изделий в технологическом потоке. Применение для этих же целей встроенных сигнализаторов выхода температуры за пределы допуска дает возможность автоматизировать контроль таких изделий. Можно сказать, что сканирующие радиометры дают возможность решить большинство задач теплового неразрушающего контроля, связанных с анализом одномерного распределения температуры. В связи с развитием микропроцессорной техники и большими возможностями термовизоров, также позволяющих изучать термопрофили, применение сканирующих радиометров ограничено.



#### 4.6. Контроль тепловым методом физических и геометрических параметров

По сравнению с другими методами неразрушающего контроля тепловые методы дают возможность производить измерение физических и геометрических параметров контролируемого объекта бесконтактно на сравнительно больших расстояниях.

Измерение температуры поверхности различных изделий бесконтактным методом, активно развиваемое в неразрушающем контроле, само по себе часто представляет большой интерес при наблюдении за ходом технологического процесса. Например, распределение температур по поверхности нагретого изделия или полуфабриката (листа, проката и др.) определяет значения остаточных напряжений в них после охлаждения и, следовательно, их механические свойства. В частности, по распределению температур по поверхности стеклянного листа в полужидком состоянии можно прогнозировать внутреннее напряжение в готовом охлажденном листе. Другим примером является контроль бумажно-полиэтиленовых заготовок для пакетов, когда допустимый диапазон отклонения температуры при изготовлении не превышает 10°C, поскольку при нагреве начинается окисление и продукт приобретает затем запах полиэтилена, а при недогреве бумага и полиэтилен плохо соединяются.

Путем измерения температуры можно определить теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность и другие теплотехнические параметры материалов, а также величины, связанные с ними. Методика их измерения достаточно подробно разработана в теплотехнике. Аппаратура теплового неразрушающего контроля (радиационный пирометр, типа «Термопрофиль» и т. д.) дает возможность производить измерение многих теплотехнических величин бесконтактно и быстро, а также создает другие удобства, в частности широкое применение возможностей ЭВМ.

Тепловые методы позволяют оценивать свойства внешней поверхности контролируемых объектов по коэффициенту теплового излучения  $\epsilon_n$  [1], который зависит от шероховатости поверхности, ее химического состояния, наличия слоев покрытий или загрязнений и т. д.. Причем наличие на поверхности контролируемого объекта покрытия или загрязнений малой толщины по коэффициенту теплового излучения может быть обнаружено при малых толщинах даже в тех случаях, когда в видимом диапазоне они неразличимы. Так, например, слои воды толщиной от 0,1 мм излучают как абсолютно черное тело, что может быть обнаружено на «сером» контролируемом объекте при толщине слоя воды 0,1 мм и более, а иногда и меньших значений. Если коэффициент теплового излучения несет полезную информацию, контролируемый объект нагревают до определенной температуры, проводят предварительные эксперименты по влиянию измеряемого фактора, а затем разрабатывают методику неразрушающего контроля.

Применение тепловых методов целесообразно также для анализа состава материалов. Известно использование теплового излучения для контроля состава бумаги, в основе которой лежат три компонента: целлюлоза, коалин и вода.

Для получения необходимой информации лист бумаги просвечивается мощной электролампой и проводится анализ прошедшего излучения в четырех спектральных диапазонах с помощью вращающихся фильтров, закрепленных на одном диске и поочередно перекрывающих поле зрения преобразователя. Для обработки информации, содержащейся в прошедшем излучении, можно использовать устройство в виде термопрофиля или быстрodeйствующего радиационного пирометра с блоками для временного разделения сигналов (выделение спектральных полос) и функциональной их обработки (определение процентного состава компонент). Один из спектральных диапазонов используется для определения общего потока прошедшего излучения (этот фильтр пропускает излучение такой длины волны, на которой нет сильного поглощения ни одной компоненты бумаги и используется для нормировки по толщине листа), а три дру-

гих фильтра подбирают так, чтобы излучение в этом участке спектра интенсивно поглощалось одним из компонентов бумаги.

Толщинометрия тепловым методом возможна в том случае, если есть перепад по температуре или коэффициенту теплового излучения между контролируемым объектом и фоном либо имеется разница в тепловых свойствах между частями контролируемого объекта.

Тепловым методом можно измерять внешние геометрические размеры полуфабрикатов и изделий из самых разнообразных материалов. Особенно эффективен тепловой неразрушающий контроль

для диэлектрических материалов, а также в тех случаях, когда необходимо проводить контроль бесконтактно на значительном расстоянии и контролируемый объект прозрачен в видимом свете (определение размеров горячих стеклянных изделий). Один внешний линейный размер (ширину листа проката) удобно измерять с помощью сканирующего радиационного пирометра, а изделия сложной геометрической формы целесообразно контролировать с помощью термовизора. Тепловой метод также целесообразно использовать для дистанционного контроля уровня горячей (охлажденной) жидкости, помещенной в непрозрачный сосуд. Вариант построения установки для контроля диаметра металлической проволоки приведен на рис. 4.6. Если пропускать электрический ток через проволоку, в ней выделяется теплота, количество которой на единицу длины пропорционально удельному электрическому сопротивлению и обратно пропорционально площади поперечного сечения, т. е. квадрату диаметра проволоки. Устанавливая ток нагрева в соответствии с диаметром провода и его удельным электрическим сопротивлением, можно на одной установке производить контроль широкой номенклатуры проводов. Особенно эффективен тепловой контроль микропроводов диаметром менее 100 мкм.

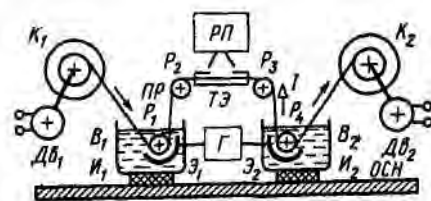


Рис. 4.6 Установка для контроля металлической проволоки

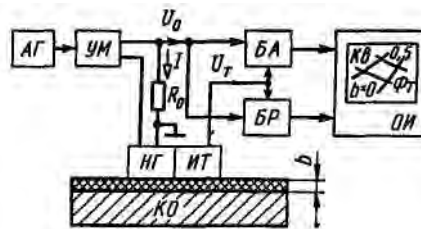
Контролируемая проволока или провод в изоляции *PP* перематывается с катушки *K1* на катушку *K2*, которые вращаются двигателями *Дв1* и *Дв2*. Проволока *PP* направляется роликами *P1*, *P2*, *P3* и *P4* и проходит через две ванны *V1*, *V2* и термоэкран *ТЭ*. Ванны *V1*, *V2* изолированы от металлического основания *ОСИ* с помощью изоляторов *И1*, *И2* и используются в качестве устройств, обеспечивающих емкостный подвод электрического тока / через контролируемый участок проволоки *PP*. В ванны *V1* и *V2*, наполненные водой, помещены электроды *Э1* и *Э2*, соединенные с генератором *Г* переменного тока с частотой = 3 МГц. Электроды *Э1*, *Э2* и металл проволоки *PP* являются обкладками конденсатора, а залитая вода и изоляция на проволоке—его диэлектриком.

Измерение температуры проволоки производится быстродействующим радиационным пирометром *РП* на участке проволоки *PP*, ограниченной тепловым экраном *ТЭ*, который, кроме того, защищает поле зрения пирометра *РП* от попадания излучений от предметов, располагаемых за проволокой, что может приводить к появлению дополнительной погрешности. Радиационный пирометр *РП* может быть соединен с устройствами сигнализации или регистрации его показаний. Многие виды электрической изоляции прозрачны для инфракрасного излучения, что облегчает проведение контроля, вместе с тем резкие изменения толщины или повреждения изоляции ухудшают теплоотвод и могут влиять на процесс контроля.

Производительность контроля данной установки лимитируется максимальной скоростью движения проволоки в ваннах *V1*, *V2* и быстродействием радиационного пиро-

метра *РП*. Если быстродействие последнего позволяет, производительность контроля может быть повышена путем замены емкостного подвода электроэнергии индукционным бесконтактным нагревом в мощном переменном магнитном поле.

Аналогично можно производить контроль диаметра проводов линий электропередачи в рабочем режиме, причем непосредственно земли или какого-то транспортного средства (вертолета, автомобиля) на расстояниях до 10—50 м. Причем в этом случае целесообразно использовать сканирующий радиационный пирометр или термовизор, которые имеют большое поле зрения и позволяют не производить точной наводки линии визирования на провод с помощью серийных одното-дансным методичечных или сканирующих радиационных пирометров можно организовать измерение толщины теплоизоляционных или теплозащитных покрытий на металлических основаниях. Весьма эффективен контроль теплоизоляции на трубах, по которым протекает горячий теплоноситель. В зависимости от температуры или мощности источника теплового потока можно контролировать толщину покрытий толщиной от 0,1 мм до 0,2 м и более. Таким же образом можно измерять небольшие толщины воздушных промежутков (расслоений или плохо проводящих теплоту слоев) между слоем металла и теплоизолирующим монолитным материалом. Радиационный пирометр позволяет измерять, например, воздушный зазор размером до 50 мкм при толщине высокотемпературной теплоизоляционной пленки 300 мкм.



. Рис. 4.7 Тепловой контроль импедансным методом

Толщинометрия покрытий возможна не только в стационарном, но и в динамическом режиме, что усложняет процесс контроля и требует применения более сложной аппаратуры ввиду необходимости стробирования или изменений по времени. Одним из вариантов такого контроля при периодическом нагреве является импедансный метод, который поясняет рис. 4.7.

Нагрев участка контролируемого объекта *КО* в виде двухслойного листа (покрытие фторпласта или стеклоэмали на стали) осуществляется переменным электрическим током / с помощью нагревателя *НГ*. Частота тока / задается автогенератором инфранизких частот *АГ* и составляет доли герца. Достаточно большой переменный ток / обеспечивает усилитель мощности *УМ*. С резистора *R<sub>0</sub>*, включенного последовательно с нагревателем *НГ*, снимается опорное напряжение, связанное с тепловым потоком  $q$  нагревателя *НГ*. Изменение тока / в нагревателе *НГ* приводит к периодическому изменению теплового потока и соответственно температуры на поверхности контролируемого объекта. Распространение теплоты внутрь двухслойного изделия, а, следовательно, и температура поверхности изделия зависят от теплотехнических параметров (в первую очередь — от температуропроводности материалов слоев) и геометрических размеров (Изменение температуры поверхности изделия будет запаздывать во времени  $m$  за счет распространения теплоты внутрь изделия будут иметь меньшие относительные перепады, чем у нагревателя *НГ*. При синусоидальном характере нагрева процесс может быть описан тепловым импедансом:  $Z_T = AJ/A_0$ , где  $\Delta T$  и  $\Delta \Phi$  — векторные (комплексные) значения синусоидальных приращений температуры и теплового потока. Нетрудно видеть, что тепловой импеданс определяется параметрами контролируемого объекта. Измеритель температуры *ИТ* создает электрический сигнал, изменяющийся в соответствии с температурой поверхности двухслойного изделия. Опорное напряжение  $U_a$  и сигнал о температуре  $V_j$  подаются на амплитудно-фазовый анализатор, состоящий из двух блоков *БА* и *БР*, выделяющих постоянные напряжения, пропорциональные синфазной и квадра-

турной составляющим напряжения  $U_t$ . Выходные напряжения амплитудно-фазового анализатора подаются на управляющие пластины осциллографического индикатора  $OИ$ , где отображаются в виде светящейся точки. На экране осциллографического индикатора для примера изображены точки, соответствующие двум значениям толщины покрытия (0 и 0,5 мм), из стекломали (кварца) и фторпласта на стали. В целом методика импедансного теплового контроля подобна соответствующим методикам вихретокового и радиоволнового двухпараметрового контроля по диаграммам, наносимым на экран осциллографа.

Импедансный метод имеет большое преимущество: независимый контроль двух сильно и нелинейно влияющих факторов.

С помощью одностороннего нагрева и регистрации температуры поверхности многослойного изделия можно измерять толщину гальванических покрытий из металлов. Организация такого контроля достаточно проста и эффективна.

Тепловые методы позволяют определять толщину огнеупорного слоя в доменных, мартеновских, стекловаренных и других печах. С помощью термовизора на каждую печь регулярно составляется тепловая карта, показывающая распределение температуры на внешней поверхности печи. Периодический анализ тепловых карт помогает вовремя обнаружить опасное уменьшение толщины конструкционного или теплоизоляционного слоя печи и провести ремонтные работы.

#### 4.7. Дефектоскопия и интроскопия тепловыми методами

Тепловые методы в целях дефектоскопии и контроля внутреннего строения наиболее эффективны, когда контролируемый объект уже нагрет или нагревается в процессе работы или испытаний, что в ряде случаев позволяет выявить дефекты и отклонения от нормы, не обнаруживаемые другими методами. Тепловые методы при соответствующем выборе условий контроля позволяют испытывать изделия из различных материалов (от металлов до пластмасс и керамики), причем как из однослойных, так и многослойных и композиционных материалов. При организации контроля тепловым методом в первую очередь необходимо проверить состояние поверхности контролируемого объекта и тщательно очистить ее от возможных загрязнений. Если есть вероятность появления резкой неоднородности коэффициента теплового излучения за счет инородных включений или разного качества поверхности, следует принять меры к выравниванию его путем покрытия; < специальными смазками, а если это невозможно, проводить дополнительный контроль другими методами (визуально).

Большинство изделий в процессе изготовления нагреваются и | охлаждаются, и именно в этих стадиях технологического цикла ; целесообразно проводить неразрушающий контроль тепловым ;методом, что особенно существенно '■ для массивных полуфабрикатов, так как их нагрев и охлаждение занимают значительное время и ограничивают производительность контроля.

Тепловые методы дают наилучшие результаты при выявлении протяженных дефектов, например типа < расслоений или областей из инородных материалов, которые представляют преграду тепловому потоку, и наименее эффективны для одиночных дефектов в виде сфер небольших размеров. Практика теплового контроля показывает, что предельная глубина обнаруживаемого дефекта в виде пустой полости ! примерно равна его удвоенному линейному размеру в направлении, j перпендикулярном распространению теплоты. С помощью теплово- 1 го метода можно обнаруживать дефекты любого направления, если I разместить источник теплоты и первичный измерительный преоб- 1 разователь так, чтобы тепловой поток в контролируемом объекте был направлен по нормали к площадке наибольшего ожидаемого поперечного сечения дефекта. На рис. 4.8 изображено несколько вариантов контроля при различном взаимном расположении источника нагрева  $НГ$ , дефектов /—5и приборов  $И_1, И_2, И_3$ , регистрирующих темпера-

туру или тепловой поток. В зависимости от минимальных размеров дефектов, которые надо выявлять, состояния поверхности контролируемого объекта, используемого нагревателя и других условий, а также требуемой производительности контроля применяют радиационные пирометры или термовизоры. Одноточечные пирометры эффективны при контроле полуфабрикатов и изделий простой формы: нити, проволока, прутки, трубы, пленка и т. п. Сканирующий пирометр удобен в тех случаях, когда полуфабрикат или изделие имеют значительную длину, например труба большого диаметра, лист, полоса, и организовано их движение.



Рис. 4.8 Варианты расположения аппаратуры при тепловой дефектоскопии

Наибольшую производительность контроля и удобство в расшифровке его результатов, особенно для сложных изделий, обеспечивают термовизоры. При их использовании режим работы можно выбрать так, что форма изотермы на поверхности контролируемого объекта от дефектов, располагаемых неглубоко, будет близка к его проекции на поверхность контролируемого объекта. По мере удаления дефекта от поверхности его изображение размывается. Применение термовизоров особенно эффективно при дистанционном контроле неподвижных изделий с большой поверхностью, таких, как корпуса крупногабаритных изделий, резервуары, трубы большого диаметра, энергетические агрегаты, строения и т. п. Такие изделия целесообразно контролировать по собственному излучению или в нестационарном режиме при самонагреве или локальном внешнем нагреве, что облегчает нагрев зоны контроля и повышает производительность неразрушающего контроля.

Контроль состояния линий электропередачи и наружных теплотехнических трасс является примером проведения дистанционного контроля. При уменьшении поперечного сечения провода линии электропередачи (чаще всего в результате коррозии) или утечках электроэнергии через поврежденный изолятор температура в этих местах возрастает, что может быть легко обнаружено с помощью термовизора, который может быть помещен, например, на автомобиле или в кабине вертолета. Это позволяет оператору весьма быстро проводить контроль линии значительной протяженности. Аналогично может производиться контроль слоя термоизоляции на надземных трубах теплоэлектроцентралей с помощью сканирующего радиационного пирометра (поперек длины трубы) или тепловизора, установленных на автомобиле.

Большие возможности открывают тепловые методы для контроля многослойных изделий со слоями из монолитных или композиционных материалов, где в ряде случаев они могут оказаться незаменимыми при контроле многослойных изделий из легких композиционных материалов. С их помощью выявляются дефекты, которые не обнаруживаются другими методами, например радиографическим, ультразвуковым и электромагнитным, поскольку применение ультразвуковых методов в этих случаях затрудняется волокнистой или мелкодисперсной структурой композиционных материалов, из-за чего создаются многократные отражения и происходит сильное затухание ультразвука, а применение рентгеновского излучения неэффективно, наоборот, из-за слабого взаимодействия его с материалом небольшой плотности. При тепловом контроле изделий из композиционных материалов в роли положительного фактора сказывается особенность тепловых процессов, заключающаяся в том, что на результаты контроля ока-

зывают влияние усредненные теплотехнические характеристики материала. Разная теплопроводность компонентов многослойного изделия и клеящих веществ дает возможность осуществлять их тепловой контроль как в стационарном, так и в переходном тепловом режимах.

На рис. 4.9 приведен вариант теплового контроля многослойного трубообразного изделия, нагреваемого снаружи (#Л) или изнутри (ЯГ) горячей жидкостью или специальным нагревателем. Температура внешней поверхности многослойного изделия *МИ* зависит от качества сцепления слоев между собой и особенно сильно изменяется в областях, где имеются расслоения и непроклеи между слоями (1, 2, 3) или участки материалов с низким качеством (4, 5, 6). В слоях из композиционных материалов помимо пустот (6) и расслоений надежно обнаруживаются дефекты в виде участков с избытком или недостатком какого-либо компонента материала (4), участки с не полностью полимеризовавшимся веществом, скопление пузырей и пор (5), раковины (6), трещины (7) и др. Тепловые методы дают хорошие результаты при контроле сложных изделий в виде сотовых конструкций, где обнаруживаются такие дефекты, как расслоение, непроклеи, избыток клея, а также дефекты в слоях наружных листов или дистанционирующего элемента и др.

Термовизор в этих случаях показывает области, где имеются указанные дефекты, причем особенно четко выделяются участки с непроклеенными ячейками при нагреве сотовых изделий с любой стороны. Контроль таких изделий возможен и в различных эксплуатационных устройствах, когда дополнительно можно обнаруживать наличие жидкости (воды) внутри сот.

Тепловыми методами можно определять качество сварки, особенно контактной (точечной или роликовой) электросварки листов. В месте соединения двух листов образуется литое ядро, обеспечивающее хорошую передачу теплоты от одного листа к другому. Если ядро не монолитно, а загрязнено шлаком или пузырьками воздуха, то прохождение теплоты будет затруднено и термограмма вдоль линии, проходящей через ядра, будет иметь участки с повышенной или пониженной температурой (кривая с всплеском или двугорбая кривая). Качество сварки можно определять в технологическом цикле при остывании сваренного изделия или импульсном нагреве движущегося объекта в нестационарном режиме, что позволяет четко выявлять пороки сварки по изменению формы кривой зависимости температуры от времени и подлине.

Листы, сваренные встык, должны иметь сварной шов, свойства которого мало отличаются от свойств свариваемых листов. Поэтому, нагревая один лист недалеко от сварного шва и поддерживая неизменной температуру другого листа, по распределению температуры в направлении, перпендикулярном к сварному шву, или по ее перепаду до шва и после него можно судить о качестве сварки. В качественно сваренной конструкции градиент температуры изменяется незначительно и монотонно, а в случае неполного проплавления, наличия множественных пор, шлаковых включений или трещиноватости из-за изменения теплотехнических свойств в зоне сварного шва будет происходить резкое изменение температуры с максимумом градиента температуры в районе сварного шва.

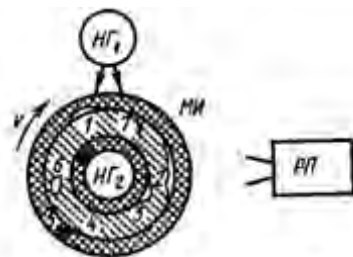


Рис. 4.9 Тепловой контроль многослойного изделия

Важной областью применения тепловых методов является контроль дорожных со-

оружений, например, с целью обнаружения пустот под покрытием аэродрома или в массе застывшего бетона, для чего может быть использован нагрев солнечной энергией и регистрация термографом или термовизором.

Для контроля материалов, полуфабрикатов и изделий, прозрачных в инфракрасном диапазоне, таких, как полимерные материалы, синтетические смолы, пластмассы, гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, пластины из германия или кремния, помимо упоминавшихся ранее методов могут быть использованы методы оптического контроля с облучением материала, полуфабриката или изделия инфракрасным светом от специального источника..

На рис. 4.10 приведено несколько термограмм для качественных и дефектных резисторов при их нагреве постоянным током. Разрешающую способность, получаемую при таком контроле, хорошо характеризует наличие зубчатости на термограмме проволочного резистора (рис. 4.10, *з*), которая определяется тем, что он намотан высокоомным проводом диаметра 0,02 мм. Дефекты в резисторах обнаруживаются под слоем лакового покрытия путем сравнения термограмм с эталонным распределением температур для качественного резистора. Изучая термограммы, можно легко определять (рис. 4.10) косые и поперечные дефекты в токопроводящем слое, неравномерность толщины этого слоя или диаметра провода, неплотности и напрессовке выводов и т. д.

Другим примером удачного применения сканирующего радиационного пирометра является испытание крупногабаритных изделий статоров мощных электрогенераторов. Их испытания осуществлялись при нагреве обмоток пропускаемым по ним электрическим током, а сканирующая часть термографа типа «Статор-1М»: размещалась в центре электрогенератора и перемещалась по его длине. На термограммах четко определяются пазы с дефектными проводами, а также провода, плохо соединенные с выводами, подключенными к источнику питания, что дает возможность устранить имеющиеся дефекты до выполнения окончательного монтажа электрогенератора.

Интроскопия предполагает для изучения строения контролируемых объектов визуализацию теплового поля и определение характерных особенностей или параметров внутри контролируемого объекта, недоступных непосредственному наблюдению или измерению. Использование тепловых методов возможно в тех случаях, когда наружные части контролируемого объекта достаточно прозрачны для теплового излучения, а интересующие детали или элементы конструкции полупрозрачны или непрозрачны. В таких случаях изучение внутреннего строения изделий производится с использованием средств оптического контроля с помощью индикаторов, преобразователей и в необходимых случаях с применением источников инфракрасного излучения. Если внешние слои контролируемого объекта непрозрачны для инфракрасного излучения, то приходится визуализировать отображения внутреннего теплового поля изделия на его внешнюю поверхность, что существенно снижает четкость выявления внутренних деталей и тем сильнее, чем больше толщина и теплопроводность внешнего слоя.

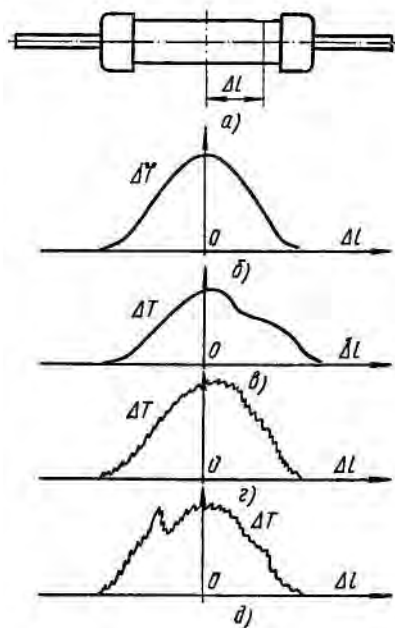


Рис. 4.10 Контроль резисторов по деталям, узлам или блокам. На- распределению температуры: а — резистор; б- нормальная термограм- пленочного резистора; в — утолщение  $\delta$  — компонентов, в частности от резисторов.

Успешно решаются задачи интроскопии, когда изучение строения в видимом диапазоне затрудняет или делает невозможным слои некоторых газов (дым, туман, пыль), жидкости (нефть, отдельные непрозрачные в видимом свете растворы) или твердые вещества, хорошо пропускающие инфракрасное излучение (синтетические смолы, полимерные материалы, германий, кремний, различные смеси). Частным случаем такого контроля является анализ качества непокрытых изделий, которые в видимом свете дают мало контрастное или неинформативное изображение. Для контроля строения различных изделий используют термочувствительные вещества, термовизор, микротермовизор, радиовизор и инфракрасные микроскопы. Тепловые методы интроскопии можно использовать для определения формы и расположения неоднородностей обработки различных протяженных объектов (листы, полотна, трубы и др.). Так, легко различаются области неполной полимеризации синтетических пленок, «горячие» пятна бумаги, зоны изменения состава композиционных материалов. Наличие такой информации не только дает сведения о качестве, сортности продукции, но и позволяет корректировать в необходимых случаях технологический процесс и улучшить экономические показатели, например, путем правильного раскроя заготовок из листов и труб.

Важной областью применения интроскопии является контроль сложных изделий и объектов радиоэлектроники и микроэлектроники. Известно применение тепловых методов для контроля многослойных печатных плат, где определяется утонение, подтравливание и отслаивание печатных проводников как на наружных, так и на внутренних слоях. В микроэлектронных изделиях с помощью микротермовизоров и инфракрасных микроскопов удастся изучать особенности различных областей в слоистом полупроводнике и даже изменение от значения электрического напряжения ширины зоны запирающего слоя p-n-перехода.

Тепловой контроль радиоэлектронной аппаратуры обычно производится в номинальном или в предельных электрических режимах. Типичным вариантом такого контроля может быть испытание радиоэлектронных блоков, смонтированных на печатных платах с помощью термовизора. Информация о распределении температур на экране термовизора изучается оператором и поступает на блок логической обработки информации, а затем вводится в ЭВМ, где заложена информация о нормальном изделии и о допустимых отклонениях температур на разных участках платы. Переработанная ин-



формация фиксируется в памяти ЭВМ и часть ее выдается на экран дисплея для оператора, который может оперативно ее использовать. Анализ результатов контроля с помощью ЭВМ повышает его надежность, позволяет всегда иметь в обработанном виде разнообразную информацию о проконтролированных изделиях и своевременно вносить коррективы в ход технологического процесса.

Помимо указанных областей большое значение имеет визуализация тепловых полей для изучения поля температур или распределения частиц в потоке при исследовании различных технологических процессов и в медицине. Тепловыми методами легко наблюдать распределение температур в потоке прозрачной в видимом диапазоне воды или другой жидкости при перепаде температур в ней на 3°C и менее.

Применение тепловых методов постоянно расширяется в связи с поступлением совершенных термовизоров, оснащенных микропроцессором или мини-ЭВМ, многоцелевым цветным дисплеем и другими устройствами запоминания и переработки информации.

## 5. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

### 5.1. Общие вопросы оптического неразрушающего контроля

Оптический неразрушающий контроль основан на взаимодействии светового излучения с контролируемым объектом и регистрации результатов этого взаимодействия. Методы, характерные для оптического контроля, используют электромагнитное излучение в диапазоне длин волн в вакууме от  $10^{-5}$  до  $10^3$  мкм ( $3 \cdot 10^{18}$ — $3 \cdot 10^{10}$  Гц), и охватывают диапазоны ультрафиолетового (УФ), видимого (ВИ) и инфракрасного (ИК) света. При этом объединяются они между собой общностью применяемых методик, способов и приемов проведения контроля. В большинстве вариантов контроля длина волны света мала по сравнению с геометрическими размерами деталей, элементов и дефектов контролируемых объектов, что позволяет использовать при анализе возможности неразрушающего контроля расчет взаимодействия с ним излучения методами геометрической оптики. Вместе с тем в ряде случаев (обнаружение дефектов малых размеров, контроль тонких пленок, испытания голографическими и интерференционными методами и др.) применяются методы, характерные для анализа волновых процессов. В этой части методы оптического контроля близки методам радиоволнового контроля, но при большем отношении геометрических размеров к длине волны аналогичны и величины, несущие полезную информацию.

Оптические методы контроля качества можно условно разделить на три группы: %

1. Визуальный и визуально-оптический методы характерны тем, что результаты контроля в наибольшей степени определяются личными качествами оператора: его зрением, умением и опытом. Визуальные методы контроля качества — наиболее доступны и просты, поэтому имеют наибольшее распространение.

2. Фотометрический, денситометрический, спектральный и телевизионный методы в основном строятся на результатах аппаратурных измерений и обеспечивают меньшую субъективность контроля, их применение по составу контрольно-измерительных операций ближе к работе с электронно-измерительными приборами.

3. Интерференционный, дифракционный, фазовоконтрастный, рефрактометрический, нефелометрический, поляризационный, стробоскопический, голографический используют волновые свойства света и позволяют производить неразрушающий контроль объектов с чувствительностью до десятых долей длины волны источника излучения.

С помощью оптических методов можно контролировать объекты из материалов, прозрачных и полупрозрачных для светового излучения. Если же материал объекта непрозрачен, у такого объекта можно проверять состояние внешних и внутренних поверхностей или размеров. В зависимости от свойств материала контролируемого объек-

та оптический контроль осуществляется в отраженном, прошедшем или рассеянном излучении, а в необходимых случаях и при комбинированном освещении. Параметры источников света (интенсивность, спектр, направление, поляризация и т. д.) выбирают исходя из конкретных условий, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения. Во всех случаях желательно иметь в помещении общее освещение, создающее освещенность не менее 10% от используемого местного освещения.

*Контрастом изображения* дефекта называют нормированный перепад яркости на дефектном участке и окружающем дефект фоне, т. е. отраженного или прошедшего сквозь материал контролируемого объекта света:

$$K_k = (B_d - B_\phi) / B_\phi,$$

где  $B_d, B_\phi$  — яркость изображения дефекта и фона, кд/м<sup>2</sup>.

При работе с аппаратурой оптического контроля качества должны соблюдаться общие правила по технике безопасности и охране труда. Оптический контроль происходит при повышенной нагрузке на глаза оператора, что надо учитывать при его организации. Особую опасность могут представлять источники, несущие концентрированные потоки световой энергии, в первую очередь оптические квантовые генераторы — лазеры. При их использовании в процессе проведения контроля должна быть произведена гигиеническая оценка условий контроля и особенно должна быть проанализирована опасность нанесения вреда людям отраженным или рассеянным излучением, в том числе и от предметов, которые могут случайно попасть на линию распространения лазерного излучения: металлические части, стеклянные поверхности, лист бумаги, хорошо отражающие участки стен и т. д. Поэтому работа с лазерными установками, особенно при значительных его мощностях должна производиться в специальных помещениях с использованием защитных очков со светофильтрами, задерживающими большую часть излучения, и при экранировании наиболее опасной части установки. Следует помнить, что наиболее опасно облучение глаз, они поражаются излучением квантового генератора настолько быстро, что при облучении трудно принять защитные меры и их в случае опасности необходимо предусмотреть заранее. Максимально допустимые уровни плотности потока мощности в зависимости от типа лазера, длины волны и режима работы оператора составляют для кожи 0,1 Дж/см<sup>2</sup>, а для глаз — 0,002— 1,0 мкДж/см<sup>2</sup>.

В качестве индивидуальных средств защиты персонала, работающего с квантовыми генераторами, могут быть применены: защитные очки, специальная одежда и перчатки, а также кремы (с двуокисью титана и цинка) для дополнительной защиты кожи лица и рук. Повышенное внимание при больших мощностях лазерного излучения, хотя бы и импульсных, надо уделять противопожарной безопасности.

## 5.2. Первичные преобразователи оптического излучения

Излучения оптического диапазона могут преобразовываться в видимое изображение (инфракрасное и ультрафиолетовое) или в электрический сигнал. Для преобразования невидимого изображения в видимое могут использоваться *индикаторы*. Вместе с тем в ряде случаев применяют индикаторы, реагирующие на кванты видимого света. Это необходимо, например, при документировании результатов неразрушающего контроля, при невозможности работы оператора около контролируемого объекта из-за опасных условий или ограниченности пространства, где размещен объект. Для решения такого рода задач широко используют регистрацию на фотопленку, волоконно-оптические и телевизионные системы. Применение фотопленки позволяет получить качественный документ на контролируемый объект, но процесс контроля при этом существенно удлиняется. Волоконно-оптические системы дают возможность переносить световое изображение в пространстве и вести контроль в труднодоступных местах, в

условиях ограниченного пространства. На их основе создают специализированные устройства для осмотра внутренних поверхностей — *эндоскопы*. Телевизионные системы используют передающие телевизионные трубки, последовательно преобразующие изображение контролируемого объекта в электрические сигналы, которое восстанавливается на выходном экране приемной электронно-лучевой трубки.

Первичные измерительные преобразователи светового излучения в электрический сигнал являются основой автоматизированных устройств неразрушающего оптического контроля качества промышленной продукции. В качестве первичных измерительных преобразователей используют: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, вакуумные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители, матрицы на базе полупроводниковых материалов и передающие телевизионные трубки. Принцип действия большинства этих приборов описан ранее, поэтому отметим лишь их особенности применительно к оптическому диапазону.

**Фоторезисторы и вакуумные фотоэлементы** имеют наилучшие метрологические характеристики при преобразовании интенсивности света в электрический сигнал. Фоторезисторы могут обеспечить регистрацию небольших световых потоков в широком спектральном диапазоне длин волн падающих фотонов, особенно при охлаждении их до криогенных температур (охлаждаемые болометры). Их недостатком является нелинейность световой характеристики и проявляющаяся иногда инерционность. Вакуумные фотоэлементы имеют линейную световую характеристику, но поскольку в них используется внешний фотоэффект, их чувствительность невелика, а спектральный диапазон работы меньше, что проявляется особенно сильно вблизи «красной границы» для квантов с малой энергией. Эти свойства обуславливают применение вакуумных фотоэлементов для точных светотехнических измерений.

**Фотодиоды и фототранзисторы** имеют высокую чувствительность, но недостаточно стабильные характеристики (сильно влияет на них температура). Поэтому они применяются в тех случаях, когда сигнал носит импульсный характер и небольшие изменения их параметров не оказывают существенного влияния на результаты контроля.

Фотоэлектронные умножители имеют характеристики, подобные фотоэлементам, но обладают по сравнению с ними высокой (в  $10—10^4$  раз) чувствительностью к освещенности. Значительно большие шумы и необходимость высоковольтного питания ограничивают области их применения.

В связи с достижениями микроэлектронной технологии начинают широко использоваться матричные приборы в виде линеек или пластин из полупроводниковых элементов с упорядоченным расположением выводов и приборы с зарядовой связью. Эти приборы служат базой для аппаратуры оптического неразрушающего контроля, воспринимающей оптические сигналы в пространстве путем квантования их и последующей дискретной обработки. На их основе строятся также твердотельные аналоги электронно-лучевых вакуумных трубок, позволяющие получить электрические сигналы о распределении освещенности в пространстве.

Электронно-лучевые вакуумные передающие трубки преобразуют сформированное на их входной мишени изображение в упорядоченную последовательность электрических сигналов, что дает возможность получать и обрабатывать большой объем информации о контролируемом объекте. Для работы электронно-лучевых передающих трубок необходимы высоковольтный блок питания электродов трубки, блок питания электромагнитной фокусировки, генераторы строчной и кадровой развертки. Поэтому конструкция передающей камеры с электронно-лучевой трубкой является сложной и требует качественной настройки. Среди разных видов передающих электронно-лучевых трубок: суперортикон, видикон, уникон, пирикон, термикон, кремникон, диссектор и др. Наиболее часто из них применяют следующие: видикон, суперортикон, пирикон и диссектор. Технические данные для некоторых трубок этих видов приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Название трубки	Тип	Рабочая освещенность, лк	Размер раstra, мм	Область спектральной чувствительности, мкм	Разрешающая способность, линий/мм	Неравномерность фона, %
Суперортикон	ЛИ218	0,25	26×26	0,4—0,7	625	30
Видикон	ЛИ410	8	18×18	0,45—0,60	800	30
»	ЛИ412	1	11,5×11,5	0,62—0,75	550	40
»	ЛИ420	10	9,5×12,7	0,42—0,78	500	±20
Диссектор	ЛИ604	100	25×25	0,42—0,50	300	30
Изокон	ЛИ801	0,01	—	—	625	—

*Суперортикон* — передающая электронно-лучевая вакуумная трубка, использующая внешний фотоэффект. За счет переноса электронов, появившихся в результате воздействия квантов падающего света, на двустороннюю накапливающую мишень и применения внутреннего фотоэлектронного умножения он имеет очень высокую чувствительность по сравнению с другими трубками. Однако его недостатки — сложность в производстве и эксплуатации, большие искажения изображения при попадании на мишень элементов изображений с большой яркостью — ограничивают его применение.

Наиболее часто в технических телевизионных системах применяется *видикон* — электронно-лучевая вакуумная трубка, использующая внутренний фотоэффект с накоплением зарядов. Видикон имеет меньшую чувствительность, чем суперортикон, и несколько хуже передает быстро движущиеся изображения. Спектральные характеристики видикона определяются материалом фотокатода. Например, мишени для работы в видимом диапазоне света изготавливают из соединений сурьмы, селена, мышьяка, селена; в инфракрасном — из сульфида свинца; в ультрафиолетовом — из селена, обладающего широкой спектральной характеристикой. На базе видикона созданы другие электронно-лучевые трубки, например, плумбикон и кремникон, реализующие успехи полупроводниковой технологии и имеющие более сложные мишени, что позволяет увеличить чувствительность и снизить инерционность трубки.

*Диссектор* — электронно-лучевая передающая вакуумная трубка без накопления заряда, использующая внешний эффект. Она содержит фотокатод, секцию фокусировки и развертки изображения, а также вторично-электронный умножитель. Выпускаемые промышленностью диссекторы имеют хорошие эксплуатационные показатели (механическая прочность, устойчивость к неблагоприятным внешним воздействиям и т. д.), линейную световую характеристику и дают возможность получить высокую разрешающую способность по яркости и в пространстве (отдельные экземпляры до 3000 строк).

### 5.3. Визуальный контроль качества

**Визуальный контроль** (осмотр невооруженным глазом)—простейший и общедоступный вид неразрушающего контроля, обеспечивающий высокую производительность контроля оптическими методами.

Главной особенностью его является активная роль оператора в его проведении и получении достоверных результатов. Визуальный контроль проводится без специальных средств, усиливающих природные качества человека-оператора. Он особенно эффективен при контроле объектов сравнительно больших размеров при необходимости выявления грубых дефектов, отклонений формы, размеров и оптических характеристик. Отметим особенности зрения человека, которые надо учитывать при организации визуального контроля.

Наибольшая чувствительность и наименьшая утомляемость человеческого глаза соответствует длине волны 0,56 мкм (желто-зеленый цвет) и яркости 10—100 кд/м<sup>2</sup>, по-

этому этой спектральной составляющей должно отдаваться предпочтение при работе с излучениями монохроматическим и смешанного состава. Чувствительность зрения от яркости света с фиксированным спектральным составом изменяется приблизительно по логарифмическому закону. Это затрудняет правильную количественную оценку яркости света оператором. Вместе с тем чувствительность глаза к относительному перепаду яркости остается примерно постоянной в диапазоне ее изменений до  $10^6$  раз. Поэтому оператор может правильно оценивать яркости источников одинакового порядка.

Поле зрения при визуальном контроле определяется зрением оператора и составляет  $125 \times 150^\circ$  (с зоной четкого видения  $2^\circ$ ), что при минимальном времени осмотра 2—3 с и времени инерции зрения примерно 0,1 с позволяет рассчитать производительность контроля конкретных изделий.

Нормальный невооруженный глаз человека (эмметрический) может изменять свои характеристики в процессе наблюдения (аккомодирует) так, что оператор может четко видеть резкое изображение с расстояния наилучшего зрения равного 250 мм и дальше с угловой разрешающей способностью около  $1'$ . Причем элементы изображения, находящиеся на разном расстоянии от глаза, видны резко, если они лежат в зоне, называемой *глубиной резкости*, которая состоит из трех составляющих: аккомодационной, геометрической и волновой. Если глаз аккомодирован на какое-то среднее расстояние, то точки (элементы, детали) объекта, находящиеся в сопряженной плоскости, будут изображаться на сетчатке глаза в виде точек, а расположенные ближе или дальше — в виде кружков рассеяния. При небольшом их размере (меньше остроты зрения оператора) кружки рассеяния будут восприниматься точечными и изображение будет казаться резким. Расстояние вдоль оптической оси на сопряженной плоскости, когда угловые размеры равны остроте зрения, называют *геометрической глубиной зрения*. Так как свет представляет собой электромагнитные колебания, то при малых размерах элементов изображения (обычно с использованием увеличительных средств) проявляются волновые свойства света (интерференция, дифракция и др.), которые также ограничивают возможности контроля.

Минимальные размеры различных деталей изображения конкретных контролируемых объектов (дефектов) определяются остротой зрения оператора и зависят также от условий контроля. При длительной работе глаз оператора утомляется и острота зрения снижается, что требует ограничения времени непрерывной работы оператора во избежание ошибок и пропусков дефектов. Острота зрения сильно понижается также с уменьшением яркости освещения контролируемого объекта. По яркости глаз уверенно различает 10—15 градаций, а по цвету — до 200 оттенков, что делает визуальный контроль более надежным, если дефект и фон (контролируемый объект) имеют разный цвет. В наилучших условиях контроля опытный оператор при резкой границе может обнаружить контраст  $V_d = 0,02$ .

Визуальный контроль производится в соответствии с утвержденными методиками для конкретных полуфабрикатов и изделий чаще всего в следующем порядке. Контролируемый объект предварительно подготавливают: очищают от загрязнений, консервирующих слоев, окислов и т. д., для чего используют протирку, промывку, пескоструйную или химическую обработку. После этого помещают контролируемый объект и аппаратуру в требуемое положение, устанавливают рекомендованные режимы контроля и освещение, а затем производят наблюдение или измерение контролируемых факторов. Оптический контроль качества серийной и массовой продукции производят путем их сравнения с эталонами, измерительными средствами или с утвержденным контрольным образцом. Затем производится обработка результатов измерений. Взаимное положение контролируемого объекта и аппаратуры, а также режимы освещения (яркость, спектральный состав, поляризация и др.) выбираются так, чтобы обеспечить максимально возможный контраст дефекта относительно фона. Контроль объектов из непрозрачных материалов, измерение их линейных размеров и характеристик поверхности осуществ-

ляется в отраженном или рассеянном свете. Объекты из прозрачных или полупрозрачных материалов контролируют обычно в проходящем свете или другом освещении, дающем большую контрастность. При организации оптического контроля предпочтительнее следует отдавать прошедшему или рассеянному освещению, поскольку они вызывают меньшее утомление зрения. С этой же целью необходимо защищать глаза оператора от прямого попадания световых лучей путем установки защитных экранов, козырьков, диафрагмы и т. п. Для проведения контроля может использоваться только общее освещение или в сочетании с местным (комбинированное), причем общее освещение должно составлять не менее 10% от местного. Поскольку достоверность выявления дефектов зависит от освещенности (рис. 5.1), она должна быть установлена не меньше определенной величины в соответствии с существующими нормами. Расстояние от глаза оператора до дефекта или плоскости, где производится отсчет, должно быть близким к расстоянию наилучшего зрения (примерно 250 мм). Общим правилом является необходимость увеличения освещенности, если надо выявлять дефекты меньшей величины (рис. 5.1), для нахождения дефектов с малым контрастом ( $C_d < 0,2$ ), когда освещенность повышают в 1,5—2 раза, и при контроле на темном фоне (ее увеличивают на 20—35%).

Важным условием является направление падения света, влияние которого показано на рис. 5.2 на примере обнаружения дефекта в виде поверхностной трещины. Рекомендуется выбирать угол падения света  $\theta = 30-4-60^\circ$  (рис. 5.2, *в*), поскольку при малых углах (направление света по нормали  $NN'$ ) невелик контраст дефекта, а при больших углах (направление света близко к касательной  $TT'$ ) появляется большое количество ложных затемнений, вызванных выступами и впадинами от шероховатости внешней поверхности. Наименьший размер выявляемых дефектов  $I_{\min}$  должен превышать величину микронеровностей рельефа поверхности не менее чем в 3 раза.

Для исследования несамосветящихся объектов и при недостаточности общего освещения применяются направленные осветители, обеспечивающие контроль в проходящем (в случае прозрачных или полупрозрачных объектов) или отраженном свете, в светлом или темном поле, от чего зависят разрешающая способность, контраст и качество изображения объекта. Наблюдение в *светлом поле* происходит, если свет от контролируемого объекта (или сквозь него) непосредственно попадает в объектив, создавая изображение, причем поглощающие или плохо отражающие элементы объекта будут выглядеть темными на светлом фоне (позитивное изображение). При работе в *темном поле* свет не попадает непосредственно от осветителя и контролируемого объекта в объектив или глаз оператора (косое освещение), если объект имеет высокое качество поверхностей и не имеет других дефектов, а изображение формируется только отдельными элементами или дефектами, на которых происходит диффузное рассеяние света. Сильно рассеивающие свет участки контролируемого объекта при этом выглядят более светлыми на темном фоне (негативное изображение). Для визуального контроля в трудно доступных местах используют зеркала, закрепленные на ручках или штангах и изменяющие направление хода лучей.

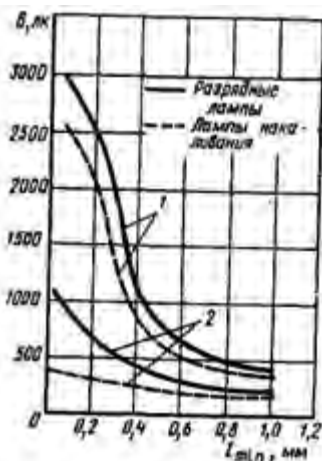


Рис. 5.1 Зависимость среднего значения нормируемой освещенности от размера минимального выявляемого дефекта:

1 — комбинированное освещение;  
2 — общее освещение

Таким образом, минимальный размер дефекта, который надежно выявляется при визуальном контроле, зависит от характера исследуемого объекта (в частности, чем грубее его поверхность и структура, чем больше размер обнаруживаемого дефекта), уровня яркости и направления освещения, контраста между дефектом и фоном, т. е. от перепада яркостей, цветов или отражающих способностей, а также от личных качеств оператора (зрения, опыта и т. д.). Ориентировочно полагают, что при визуальном контроле оператор с нормальным зрением на расстоянии наилучшего зрения уверенно обнаруживает дефекты с минимальным размером 0,1 мм в плоскости, перпендикулярной линии наблюдения.

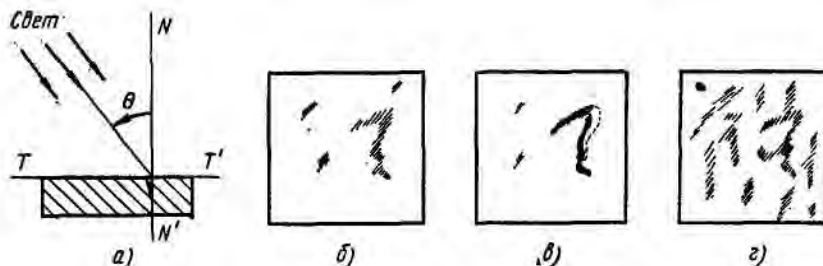


Рис. 5.2 Выбор направления освещения при дефектоскопии:

а — схема контроля; б — изображение при  $\theta=0^\circ$ ; в — вид при средних значениях  $\theta$ ;  
г — изображение при  $\theta=90^\circ$

## 5.4. Визуально-оптический контроль

**Визуально-оптическим** называют неразрушающий контроль качества с применением оптических средств, позволяющих существенно расширить пределы естественных возможностей органов зрения человека. Он является техническим продолжением визуального контроля, дает возможность обнаруживать более мелкие дефекты и производить измерения с высокой разрешающей способностью (1—5 мкм). При проведении визуально-оптического контроля надо учитывать основные особенности, характерные для визуального контроля, так как в обоих случаях решающую роль играет оператор. Усилить возможности человека позволяют лупы, микроскопы, телескопические устройства и другие технические средства. Главным недостатком визуально-оптического контроля является снижение производительности проведения неразрушающего контроля. Поэтому обычно проводят многоступенчатый контроль: осматривают поверхность изделия без оптических средств, выявляя крупные дефекты и подозрительные

места, изучают эти места через лупу (однолинзовый микроскоп), а затем исследуют отдельные участки контролируемого изделия с помощью многолинзового микроскопа, последовательно повышая кратность его увеличения. При правильном выборе условий визуально-оптического контроля размеры элементов объекта или минимальных выявляемых дефектов /min (в мм) уменьшаются в соответствии с оптическим увеличением устройства /Cv»:

$$I_{\min} = 0,1/K$$

**Лупы** предназначены для оптического контроля близко расположенных элементов изображения при небольшом увеличении (2—20<sup>x</sup>) и обычно при ручном контроле. Удобство работы с ними определяется тем, что их легко перемещать по контролируемому объекту, а зона обзора лупы сравнительно велика.

Видимое увеличение оптического устройства — это отношение размера изображения объекта на сетчатке глаза оператора при наблюдении его через оптическое устройство к его изображению при наблюдении невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения. Если разрешающая способность оптического устройства и глаза находятся в полном соответствии, то увеличение называется нормальным. Увеличение лупы можно определить из выражения:  $\Delta V_n = Wf$ , где /из — расстояние наилучшего зрения, если известно ее фокусное расстояние /.

Наибольший диаметр поля зрения зависит от размеров линзы, из которой изготовлена лупа, и обычно несколько меньше фокусного расстояния /. Глубина резкости может быть приблизительно оценена из выражения

$$I_p \approx \frac{f}{K_1 K_{y\text{н}}} \left(1 - \frac{1}{K_{y\text{н}}}\right).$$

Получить большую глубину резкости можно путем диафрагмирования ( $A_i < 1$ ), что, однако, приводит к уменьшению поля зрения и полезного светового потока.

Так как для луп и микроскопов с большим увеличением глубина резкости уменьшается, проведение контроля с их помощью усложняется и требует большего времени для фокусировки изображения (поиска расстояния наилучшего видения).

Лупы имеют различное конструктивное оформление в соответствии с вариантами их применения: обзорные — для контроля одновременно двумя глазами; налобные в виде увеличительных очков; складные, в том числе — карманные, часовые, телескопические. Оптическая часть лупы может состоять из одной линзы или нескольких скрепленных между собой, что дает возможность скорректировать часть aberrаций и получить изображение хорошего качества. Лупы с малым увеличением (2—7<sup>x</sup>) используют для поиска дефектов и дефектных зон, а с большим (5—20<sup>x</sup>) — для их анализа и обнаружения дефектов минимально возможных размеров. Чтобы максимально использовать возможности лупы при проведении визуально-оптического контроля, ее (кроме больших бинокулярных луп) надо держать как можно ближе к глазу, поскольку в этом случае воспринимается наибольшее количество лучей, идущих от контролируемого объекта, и снижается влияние отражений (бликов) от посторонних предметов и линзы. Лупа размещается, как правило, параллельно контролируемой поверхности, что повышает производительность и достоверность визуально-оптического контроля.

**Микроскоп** является оптическим многолинзовым устройством для наблюдения элементов, не видимых невооруженным глазом, имеющим регулировки оптических свойств. Он дает возможность получить качественное увеличенное изображение, причем увеличение может достигать 2000 раз, а линейное разрешение — 0,5 мкм. Для целей неразрушающего контроля качества довольно широко применяют микроскопы серийные (универсальные, измерительные, металлографические и др.) и специализированные для решения конкретных контрольно-измерительных задач. Микроскопы позволяют производить визуально-оптический контроль при различных режимах освещения и увеличения, а также по разным методикам. Линзовые системы являются апланатиче-



скими, т. е. для них выполняется условие синусов:

$$n_{\text{ко}} \sin \psi_{\text{ко}} = K_{\text{ур}} n_{\text{из}} \sin \psi_{\text{из}},$$

где  $n_{\text{ко}}$  и  $n_{\text{из}}$  — показатели преломления среды в пространстве предметов и в пространстве изображений;  $\psi_{\text{ко}}$  и  $\psi_{\text{из}}$  — апертурные углы в пространстве предметов и изображений.

Изменение показателя преломления среды перед объективом (если выявляемые детали изображения находятся в жидкости и объектив с ней контактирует) приведет к пропорциональному повышению линейного увеличения  $M_{\text{ув}}$ . Кроме того, при этом изменится геометрическая глубина резко изображаемого пространства и разрешающая способность из-за изменения переднего фокусного расстояния оптической системы.

В состав типичного микроскопа входят: осветитель, предметный столик, перемещающийся относительно корпуса микроскопа, и увеличительная часть. Наиболее сложные микроскопы для измерительных целей содержат электронные системы цифрового отсчета, а также преобразующую телевизионную установку для передачи и обработки изображения. Как правило, микроскоп работает с источником искусственного света, создающим большую освещенность контролируемого объекта необходимого спектрального состава и направления света (рис. 4.3).

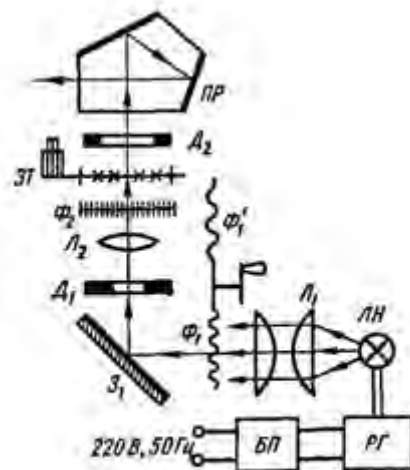


Рис. 4.3 Функциональная схема осветителя.

В осветителях микроскопов чаще всего применяют проекционные лампы накаливания  $ЛН$  (рис. 4.3), работающие при высокой температуре нити накала, что необходимо для получения близкого к белому свету и хорошей фокусировки, мощностью 40—200 Вт. Напряжение от блока питания  $БП$  лампы может изменяться оператором с помощью регулятора  $РГ$  (в простейшем случае — реостата). Световой поток от лампы накаливания  $ЛН$  через собирающий конденсор  $Л$  попадает на зеркало  $З$ , изменяющее направление хода лучей, поскольку лампа  $ЛН$  должна находиться по условиям охлаждения в определенном (вертикальном) положении. Сменный светофильтр  $Ф$  и диафрагма  $Д$ , ограничивают проходящий световой поток с целью получения хорошей его однородности. Поляризатор  $Фг$  пропускает часть светового потока только одной поляризации. Затвор  $ЗТ$  дает возможность ограничивать прохождение света, идущего после линзы  $Л$ , по времени, например при фотографировании или при больших перерывах в проведении контроля. Диафрагма  $Д_2$ , называемая полевой, позволяет регулировать размеры освещаемого участка на контролируемом объекте.

Выходной световой поток чаще всего имеет вид параллельного пучка лучей или специальное строение (сходящегося или расходящегося, со светлыми или темными местами, с различными метками и т. д.).

Увеличительная часть микроскопа (рис. 4.4) предназначена для получения изобра-

жения, удобного для оперативного анализа при контроле различных объектов в выбранном режиме. Типичный вариант построения увеличительной системы микроскопа изображен на рис. 4.4. Для расширения возможностей в увеличительной части микроскопа также имеются элементы, изменяющие световой поток, а осветитель может располагаться по-разному ( $OC_1$  или  $OC_2$ ).

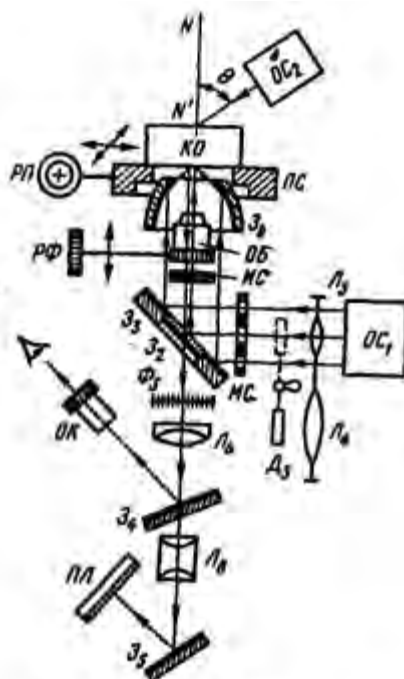


Рис. 4.4 Функциональная схема измерительного микроскопа

В системе, показанной на рис. 4.4, световой поток от осветителя  $OC_1$  дополнительно формируется рядом устройств, обеспечивающих работу в светлом и темном полях при освещенности объекта, меняющейся в зависимости от установленного увеличения, чтобы изображение, наблюдаемое оператором, имело примерно одинаковую яркость. От осветителя  $OC_1$  свет падает на линзу  $L_3$  (работа в светлом поле) или  $L_4$  (работа в темном поле) и через диафрагму  $D_3$  и маску  $MC$  направляется на сложные зеркала  $Z_2$  и  $Z_3$ . Зеркало  $Z_2$  выполнено прозрачным и отражает световой поток, прошедший сквозь линзу  $L_2$  в линзовый объектив  $OB$ , освещающий участок контролируемого объекта  $KO$ . Через этот же объектив  $OB$  и зеркало  $Z_3$  лучи света после взаимодействия с контролируемым

объектом направляются для анализа сквозь фильтр  $F_3$  и линзы  $L_6$  к зеркалам  $Z_4$  и  $Z_5$ . Таким путем проходит световой поток при работе в светлом поле, когда угол падения лучей света  $\theta$  близок к нулю. При работе в темном поле, когда хорошо отражающая полированная поверхность кажется черной, световой поток через периферийную часть линзы  $L_6$  попадает на зеркало  $Z_3$  и далее на зеркало  $Z_6$ , называемое *этим объективом* и выполненное в виде круглого кольцеобразного металлического зеркала с внутренней отражающей параболической поверхностью, которое формирует косое освещение. Центральная часть светового потока в этом варианте освещается перекрываемой диафрагмой  $D_3$ , чтобы не было прямого отражения света в объектив. Ход лучей света после взаимодействия с контролируемым объектом в обоих случаях одинаков.

Лучи света, несущие полезную информацию в виде изображения участка контролируемого объекта  $KO$ , отраженные от зеркала  $Z_4$ , через окуляр  $OK$  наблюдаются оператором. Если убрать зеркало  $Z_4$ , то лучи попадают в фотоокуляр  $Лв$ , который после отражения их от зеркала  $Z_3$  формирует изображение на пластине  $ПЛ$ , которая может быть матовым экраном при работе в проекционном режиме или фотопластинкой при фотографировании. Изучение изображения оператором через окуляр  $OK$  происходит при

большой яркости и четкости изображения, а применение проекционного режима, хотя и требует иногда затемнения экрана, но более удобно и менее утомительно. Получение четкого изображения обеспечивает его фокусировка путем перемещения объектива *ОБ* в направлении линии визирования (главной оптической оси) с помощью ручки фокусировки *РФ*, связанной с отсчетным микрометрическим устройством отсчета расстояния. Непосредственно в объективе, окуляре или около них устанавливается измерительная сетка *ИС* с делениями, цена которых зависит от увеличения микроскопа. Эта сетка обеспечивает проведение отсчетов длины в плоскости, перпендикулярной линии визирования, и может быть проградуйрована по эталонам или с помощью микрометрических отсчетных устройств.

Предметный столик *ПС* является базой, на которой размещается контролируемый объект *КО*, для чего к нему придается набор принадлежностей: специальные зажимы, пружинные держатели, дополнительные кольца и насадки и т. д. Предметный столик позволяет перемещать объект *КО* в направлениях, перпендикулярных линии визирования, что осуществляется ручками соответствующих координатных перемещений *РП*, связанных с предметным столиком *ПС* отсчетными микрометрическими устройствами.

Осветительная часть микроскопа *ОС<sub>2</sub>* для работы в прошедшем освещении может быть построена аналогично описанной выше, если ее разместить над предметным столиком, однако чаще всего ее выполняют более простой и компактной в виде лампы накаливания объектива, фильтра и диафрагмы, заключенных в общий корпус. Такой осветитель может легко размещаться в требуемом положении при оптимальном угле падения света и фиксировать его.

## 5.5. Применение оптических устройств для контроля качества

В зависимости от решаемой задачи контроля качества микроскоп можно использовать для работы в следующих режимах освещения: в проходящем и отраженном свете разного направления; с белым или монохроматическим светом, длина волны которого определяется фильтрами; с поляризованным и неполяризованным светом, при освещении световым потоком разной структуры, создаваемой масками. В части микроскопа, где происходит обработка светового потока после взаимодействия с контролируемым объектом, также возможны различные режимы работы, применение которых целесообразно с учетом его оптических свойств. Оптическая система большинства микроскопов отлаживается обычно на определенную длину волны (чаще 0,56 мкм), поэтому для получения изображений наилучшего качества используют монохроматический свет. Отметим наиболее распространенные режимы работы микроскопов.

Основной режим работы микроскопа — освещение белым светом. В этом режиме производятся первичные осмотры разных объектов и исследование полуфабрикатов и изделий путем анализа яркости или цвета, провзаимодействующего с контролируемым объектом излучения, что обуславливается отличием участков контролируемого объекта, дефектов или фона. Для получения изображений, на которых четко выделяется информация об отклонении объекта от нормы, устанавливают различные светофильтры, причем полоса их пропускания может быть близкой к длине волны, несущей полезную информацию, или, наоборот, является дополнительной к ней, что повышает контрастность изображения и будут резко выделяться инородные элементы и детали: дефекты, различные включения и т. п. Работа в темном поле особенно эффективна при изучении поверхностных дефектов или при контроле поверхностей с особыми оптическими свойствами, а также при контроле прозрачных объектов. Косое освещение и освещение с торца или со стороны каких-то особых участков контролируемого объекта целесообразно производить при контроле по рассеянному излучению, причем применение в этом случае освещения большой интенсивности и высококачественного темного поля позволяет определить наличие (но не размеры!) дефектов меньше предела разрешения

микроскопа (метод ультрамикроскопии). Поляризованный свет и поляризационный светофильтр (анализатор) можно использовать для решения многих контрольно-измерительных задач толщинометрии, дефектоскопии и определения физико-химических свойств материалов, причем в зависимости от конкретных условий положение поляризатора и анализатора устанавливается разным: от совпадения до ортогональности осей пропускания. При толщинометрии и контроле внутреннего строения изделий широко используются измерительные сетки, шаблоны и маски, а также отсчетные устройства микроскопа, связанные с ручками фокусировки и перемещения предметного столика с фиксированной ценой деления.

С помощью микроскопов и устройств, построенных по тому же принципу, решаются следующие задачи неразрушающего контроля качества: измерение геометрических размеров и формы малогабаритных изделий, обнаружение дефектов малых размеров (до долей микрометра) с высоким разрешением по их пространственному положению, контроль физико-химических свойств и состояния материалов (внутренних напряжений) по их оптическим характеристикам, контроль внутреннего строения малогабаритных изделий или их частей, расположенных в прозрачном или полупрозрачном материале.

Толщинометрия и контроль внутреннего строения малогабаритных изделий может успешно производиться в проекционном режиме работы или с помощью проекторов, имеющих мощный осветитель и предназначенных для контроля с выносом увеличенного изображения на матовый экран (обычно затененный) большого размера. Их применение дает наибольший эффект при массовом контроле однотипной продукции (штамповка, плоские детали и т. п.), повышает производительность контроля, а также его достоверность за счет устранения грубых ошибок и улучшений условий труда оператора. В этом случае на выходной экран проектора наносят шаблон или линии, показывающие допустимые отклонения формы или размеров. С помощью микроскопа осуществляют трехмерные измерения геометрических размеров. Размеры объекта в направлении, перпендикулярном линии визирования, определяют с помощью отсчетного устройства путем смещения предметного столика с расположенным на нем контролируемым объектом до совпадения соответствующих точек объекта с центром поля зрения микроскопа и считывания в эти моменты расстояния. Помимо этого, измерение этих размеров может осуществляться в плоскости изображений по измерительной сетке, отградуированной по эталонам с учетом увеличения микроскопа. Геометрические размеры в направлении линии визирования измеряются с помощью механизма точной фокусировки, которая должна производиться до максимального увеличения, поскольку погрешность определяется глубиной резкости в предметной области.

На базе микроскопов или их узлов путем доработки или частичного упрощения создаются специализированные устройства для решения конкретных задач неразрушающего контроля. В качестве примера таких устройств можно отметить переносные микроскопы, толщиномеры покрытий ПТС-1 и ПСС-2, прибор ПКПА для контроля качества кристаллов.

Переносные микроскопы имеют упрощенную конструкцию и устанавливаются непосредственно на контролируемый объект. Их увеличение невелико (обычно не более 100), а габариты гораздо меньше серийных микроскопов, что и определяет удобство их применения. Перекосные микроскопы позволяют обнаруживать дефекты, определять их размеры и глубину залегания, производить измерения других геометрических характеристик. Толщина прозрачных и полупрозрачных покрытий и глубина залегания дефектов в таких изделиях могут быть определены методом фокусировки изображения. Для этого сначала фокусируют микроскоп на поверхность изделия и запоминают показание отсчетного устройства на ручке фокусировки, а затем ее фокусируют на изображение элементов основания и отмечают показание отсчетного устройства. Определив разность перемещения объектива в направлении изделия, с учетом коэффициента пре-

ломления можно рассчитать толщину покрытия или расстояние до дефекта. Фокусировка на внешнюю границу прозрачного изделия в большинстве случаев осуществляется легко, поскольку даже хорошо отполированная поверхность является шероховатой и на микровыступах или впадинах происходит рассеяние света. Если рассеяние невелико и фокусировка на внешнюю поверхность затруднена, можно слегка «загрязнить» поверхность каким-либо мелкодисперсным материалом, например графитом мягкого карандаша, что повысит достоверность отсчета. Фокусируя микроскоп на разные части дефекта, можно оценить его протяженность.

Приборы ПТС-1 и ПСС-2 предназначены для контроля толщины прозрачных и полупрозрачных покрытий (до 320 и 40 мкм соответственно) методом светового свечения. Осветительная система этих приборов проектирует на контролируемое изделие изображение в виде светлой или темной черты, сформированное маской или оптической щелью. Часть света отражается от поверхности покрытия, а часть проходит внутрь материала покрытия, преломляется, отражается от основания изделия и выходит затем наружу со смещением относительно первого отраженного луча. Угол падения  $\theta$  часто берут близким к  $45^\circ$ , что обеспечивает хорошие условия измерений и уменьшает в силу ортогональности падающего и отраженного лучей прямое прохождение света от осветителя в окуляр. Оператор, таким образом, наблюдает два смещенных изображения световых линий. Измерив расстояние между ними с помощью измерительной сетки и зная коэффициент преломления  $n$ , можно определить толщину покрытия, используя выражение.

Прибор ПКПА предназначен для контроля качества прозрачных кристаллов путем оценки количества и размеров дефектов в них. Этот прибор имеет специальный осветитель, проецирующий на дефект метку монохроматического (желтого) света, и увеличительную часть с удобной системой отсчета трех координат положения дефекта и его размеров. Глубина залегания дефектов и их протяженность по глубине определяются методами фокусировки, а размеры в перпендикулярном направлении путем перемещения столика, где крепится кристалл, — по микрометрической шкале. Применение прибора ПКПА дает возможность обнаруживать, оценивать размеры пустот и инородных включений в глубине кристалла, по сравнению с серийными микроскопами упрощает и убыстряет процесс визуально-оптического контроля.

Если доступ к контролируемой части изделия затруднен или находится дальше расстояния наилучшего зрения, для проведения неразрушающего контроля используют специальные оптические приборы: телескопические лупы, зрительные трубы, бинокли, перископические дефектоскопы, бороскопы и др. Эти приборы строят из специально подобранных линз, призм и зеркал, позволяющих наблюдать в окуляр изображение контролируемой зоны изделия. Увеличение их обычно лежит в диапазоне  $0,1\text{—}300\times$ . Уменьшение изображения применяют, если необходимо изучать большое поле зрения или обнаруживать только крупные дефекты (раковины, сколы, каверны и др.) на крупногабаритных удаленных объектах. Для осмотра разных участков изделия перемещают весь прибор либо поворачивают зеркало или призму. В настоящее время эти приборы находят ограниченное применение, поскольку их заменяют более универсальными устройствами для осмотра полостей — эндоскопами на базе волоконно-оптических жгутов или малогабаритными телевизионными системами.

## 5.6. Эндоскопы

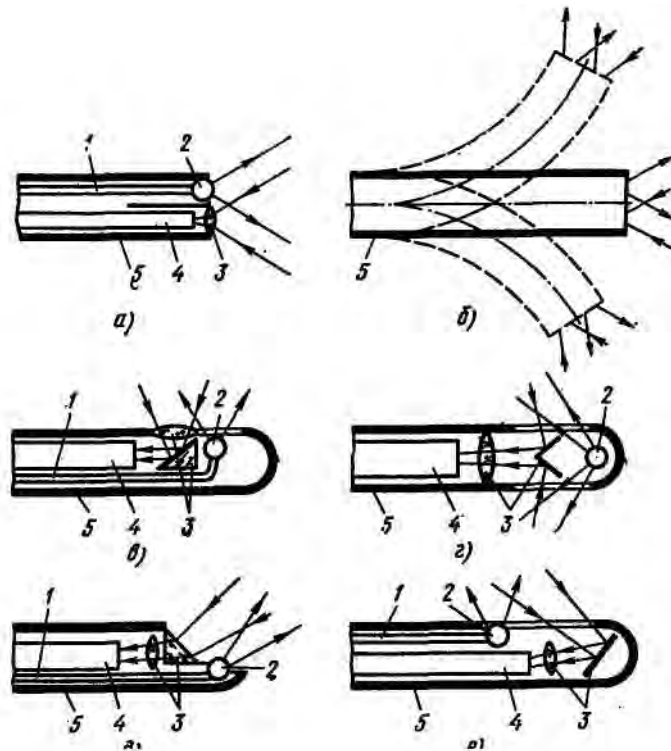


Рис. 5.5. Виды эндоскопов для обзора внутренних поверхностей:

а — прямой; б — регулируемый в полусфере; в — боковой; г —панорамный; а — угловой; е — ретроспективный (1 — осветительный жгут, 2 — осветительная оптическая система, 3 — объектив, 4 — обзорный жгут (регулярный), 5 — защитная оболочка)

Эндоскопом называют устройство, снабженное осветителем и оптической системой для осмотра внутренней поверхности объектов с полостями. Эндоскопы позволяют, в основном, решать задачи дефектоскопии и контроля строения изделий путем переноса видимого изображения из недоступной зоны к оператору. Сравнивая эндоскопы с другими устройствами, пригодными для решения аналогичных задач, и в первую очередь с малогабаритными телевизионными камерами, помещаемыми в полости, следует отметить, что гибкие эндоскопы имеют гораздо меньшие размеры поперечного сечения, что дает возможность вводить их через очень малые отверстия в объекте в полости и каналы сложного профиля, если радиус изгиба при повороте эндоскопа в полости более пяти диаметров жгута. Вместе с тем эндоскопы не создают электрического сигнала, несущего информацию о контролируемом объекте, что усложняет построение на их основе средств автоматизированного контроля качества.

В зависимости от вида контролируемого объекта, условий и целей проведения контроля концевая часть эндоскопа может компоноваться путем различных сочетаний элементов оптических систем (линз, призм, зеркал и др.) и источника освещения.

На рис. 5.5 показано несколько схем типичных вариантов контроля и расположения основных элементов, обеспечивающих различные варианты обзора внутренней поверхности контролируемого объекта. Эндоскоп содержит: осветительный жгут 1, осветительную оптическую систему 2, источник света, объектив 3, обзорный (регулярный) жгут 4, окуляр, защитную оболочку 5 и устройства управления (рис. 5.5 и 5.6).

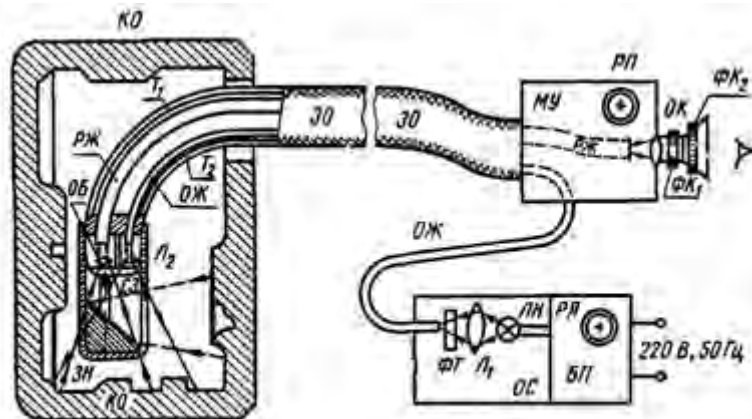


Рис 5.5 Конструкция гибкого эндоскопа ОД-203

По технологическим признакам эндоскопы выполняются *жесткой, полужесткой и гибкой конструкции*. Технические данные некоторых типов эндоскопов приведены в табл. 5.2. Использование эндоскопа той или иной конструкции обуславливается строением контролируемого изделия и объемом контроля. Эндоскопы жесткой конструкции легче фиксируются в зоне контроля.

Таблица 5.2

Показатели	Тип эндоскопа				
	РВП-452	РВП-470	ОД-20Э	Гибкий (IV тип)	Жаростойкий
Поле зрения, град	30	24—69	25	35	35
Минимальное расстояние до объекта, мм	17	100	25	7	7
Увеличение	4,5—16	0,7—2,2	Около 1	1—5	1—5
Максимальная разрешающая способность, линий/мм	23	12	5	31	31
Освещенность, лк	—	—	15 000	300	300
Мощность лампы, Вт	13	82	150	—	—
Длина погружаемой части, м	7,5	7	0,8	0,8—2,5	0,8
Диаметр погружаемой части, мм	30	34	14	6	12
Минимальный радиус изгиба, мм	Нет	Нет	150	40	60
Особенности	Сменные трубки		—	С насадками	До 1200°C

Жесткие эндоскопы изготавливают на базе линзово-зеркальных оптических систем, содержащих до 50 оптических элементов, а их возможности подобны микроскопам. Эндоскопы гибкой конструкции наиболее универсальны, так как хорошо вводятся в полости сложной конфигурации по криволинейным каналам, ведущим к полости, и изготавливаются на основе волоконно-оптических световодов, собранных в жгуты. При использовании таких эндоскопов необходимо иметь в виду, что доставленное к оператору изображение несколько искажается по сравнению с тем, которое проецируется на входной торец световодного жгута. В частности, элементарные световые потоки деполаризуются, по-разному запаздывают во времени, изображение имеет зернистую структуру, а контраст несколько нарушается за счет разного затухания света в отдельных волокнах жгута и разного пройденного пути, например, из-за непредсказуемых изгибов и переплетений волокон, а также неидеальности их отражающей поверхности. Конструкция гибкого или полужесткого эндоскопа показана на рис. 5.5. Основу эндоскопа составляют регулярный РЖ и осветительный ОЖ жгуты волоконно-оптических световодов, оптика объектива ОБ и окуляра ОК.

Освещение внутренней поверхности контролируемого объекта КО производится через линзу Л2 светом, пришедшим по осветительному жгуту ОЖ от блока освещения ОС. Световой поток создает лампа накаливания ЛН (а в некоторых случаях — лазер), которая получает электроэнергию от блока питания БП, где предусмотрена регулиров-

ка яркости (ручка *РЯ*) путем изменения тока в лампе *ЛН*. Световой поток концентрируется линзой  $\langle /7i$  на торце осветительного жгута *ОЖ* через тепловой фильтр *ФТ*, устраняющий нагрев контролируемого объекта. Линза *Л<sub>r</sub>* направляет световой поток на контролируемый объект *КО* так, чтобы его освещение было более равномерным.

Изображение части осматриваемой полости *КО* проектируется объективом *ОБ* на входной торец регулируемого жгута *РЖ* и передается им к окуляру *ОК* (проксимальный конец эндоскопа). Оператор наблюдает увеличенное изображение на выходном торце жгута *РЖ*, фокусируя его при необходимости с помощью колец *ФК\* и *Ф/(2)*. Часть эндоскопа, погружаемая в полость контролируемого объекта *КО* (дистальный конец эндоскопа), защищается от механических повреждений защитной оболочкой *ЗО* (металлорукав или полихлорвиниловая трубка), а торцовая часть — защитным стеклом *СЗ*. Оператор может изменять зону осмотра, перемещая эндоскоп вдоль оси и поворачивая его, а также фокусируя объектив *ОБ* на элементы контролируемого объекта, находящиеся на разном расстоянии, с помощью троса  $7''i$  и связанного с ним кольца *ФКи*. Кроме того, концевую часть эндоскопа — панорамную головку — оператор может отклонять механизмом управления *МУ*, имеющим трос *Та*, соединенный с рукояткой перемещения *РП*.

Для расширения функциональных возможностей эндоскопов они обычно снабжаются насадками с оптическими элементами (*ЗН*), что позволяет работать с разными увеличением, углом и направлением обзора. Эндоскопы для специальных видов контроля могут быть выполнены более сложными и содержать специальные источники света (мощные лампы накаливания, лазеры и др.) с фильтрами и преобразователями невидимых излучений в видимые. Поскольку эндоскоп является фактически устройством, переносящим изображение в пространстве и работающим в реальном масштабе времени, он может успешно использоваться с другими устройствами фиксации и обработки изображений, например фото-, кино- и телеаппаратурой. Условия освещения легко изменяются, поскольку источник света вынесен за пределы полости и его мощность можно увеличить до необходимого значения, несмотря на габариты. Обзор контролируемой полости производится путем вращения эндоскопа относительно своей оси, поступательного перемещения его и отклонения панорамной головки. Сложные специализированные эндоскопы в своем составе содержат иногда устройства для фотографирования, получения голограмм и др.

Разрешающая способность эндоскопа ограничена разрешениями волоконно-оптического жгута и оптической части эндоскопа, зависит от оператора. Пространственное распределение света, сформированное на входном торце отдельного оптического волокна в жгуте, при распространении по волокну подвергается неконтролируемым и невосстанавливаемым изменениям из-за неизвестного числа и характера отражений от стенок волокна при его изгибах. Это ведет к тому, что в плоскостях входного и выходного торцов волокна взаимно соответствуют лишь значениям средней интенсивности света, а структура изображения испытывает необратимые, хотя чаще всего не очень значительные, искажения. Чтобы полнее использовать возможности эндоскопа, стремятся к примерному равенству линейного разрешения в поле зрения и разрешающей способности регулярного жгута. В этом случае минимально допустимый диаметр торца жгута составит

$$D_{\text{ж}} = \frac{D_{\text{пз}} \cdot \delta}{\delta_{\text{ж}}},$$

где  $D_{\text{пз}}$  — линейный размер поля зрения эндоскопа, мм;  $\delta$  и  $\delta_{\text{ж}}$  — разрешающие способности по полю зрения эндоскопа и волоконно-оптического жгута соответственно,  $\text{мм}^{-1}$ . С помощью эндоскопа можно оценить линейные размеры элементов изделия путем сравнения их между собой или по измерительной шкале, но точность в этом случае невысока, поскольку трудно определить увеличение эндоскопа (масштаб изображения).



Основными составляющими погрешности при использовании эндоскопов являются: конечная разрешающая способность волоконно-оптического жгута, изменения линейного увеличения эндоскопа в процессе измерения, неточность изготовления измерительной шкалы или градуировки измерительной сетки, мозаичность структуры изображения. Обычно полагают, что минимальный размер элемента изображения контролируемого объекта или дефекта, надежно выявляемого эндоскопом, соответствует удвоенному диаметру отдельного волокна регулярного жгута, передающего изображение.

В связи с применением микропроцессоров и ЭВМ для получения необходимых данных и организации удобной упорядоченной обработки оптической информации часто встраивают в контролируемый объект большое число волоконных датчиков с преобразователями световых сигналов в электрические, стационарно установленных вблизи наиболее важных или ненадежных узлов и элементов сложных технических установок для непрерывного контроля за их состоянием. Применение ЭВМ в таких системах существенно повышает надежность их работы и решает следующие задачи: определение порядка опроса датчиков по значимости их информации; проверка правильности функционирования блоков, узлов, элементов установки на основании сигналов датчиков; выработка сигналов обратной связи для коррекции работы датчика или установки, обработка информации, представление ее в виде, удобном для оператора или для ее сохранения и накопления. Реализация некоторых методов с помощью гибких эндоскопов серьезно затрудняется сложностью фиксации дистального конца эндоскопа, получением требуемой когерентности излучения, стабилизации модового состава света в нем и другими причинами. Поэтому, оценивая применение эндоскопов в неразрушающем контроле качества в целом, следует сказать, что наиболее эффективная область их применения — оперативный контроль изделий сложной формы. Усложненные варианты проведения контроля должны достаточно тщательно обосновываться и анализироваться.

## 5.7. Фотометрические методы

Методы, основанные на измерении величин, характеризующих световое излучение, путем преобразования их в электрический сигнал и обработки его вторичными блоками, имеют широкое распространение, поскольку они хорошо вписываются в технологический процесс. К таким методам можно условно отнести фотометрический, денситометрический, колориметрический и некоторые разновидности поляризационного и спектрального методов. Фотометрический метод предполагает измерение вторичной освещенности, яркости, светового потока или интенсивности светового излучения, полученного после взаимодействия с контролируемым объектом. Использование той или иной физической величины зависит от конкретной реализации метода, выбранной оптической системы и первичного измерительного преобразователя. Денситометрический состоит в том, что измеряется оптическая плотность или коэффициент пропускания. Поляризационный отличается использованием поляризованного света и анализом поляризации прошедшей компоненты. Колориметрический заключается в анализе цветовых составляющих света или их отношения. При реализации этих методов основной процесс измерения или преобразования может быть сведен во многих случаях к фотометрическому, поэтому рассмотрим его как основной вариант построения аппаратуры и отметим особенности в реализации других методов.

**Фотометрический** и подобный ему методы могут быть применены для решения следующих задач неразрушающего контроля качества: измерение геометрических размеров и площадей, контроль коэффициента затухания, пропускания или отражения, дефектоскопия. Приборы, реализующие фотометрический метод, обычно работают в прошедшем излучении и имеют две оптические системы. Поскольку первичные измерительные преобразователи световых величин в электрические сигналы чаще всего

имеют нелинейные световые характеристики, а их стабильность недостаточна, применяют специальные способы построения приборов, чтобы эти недостатки оказывали минимальное влияние. В приборах для контроля геометрических размеров часто применяют следящие, системы и фотокомпенсационный, фотоимпульсный, растровый способы и др.

Фотокомпенсационный способ предполагает сравнение двух световых потоков, один из которых частично перекрывается контролируемым объектом, а другой— специальной пластиной, положение которой при равенстве световых потоков определяет геометрический размер объекта. Фотоследящий способ состоит в перемещении с помощью следящей системы фотоэлектрического преобразователя, отмечающего положение границы «свет—тень», создаваемой при освещении контролируемого объекта, и регистрации его параметров по положению преобразователя.

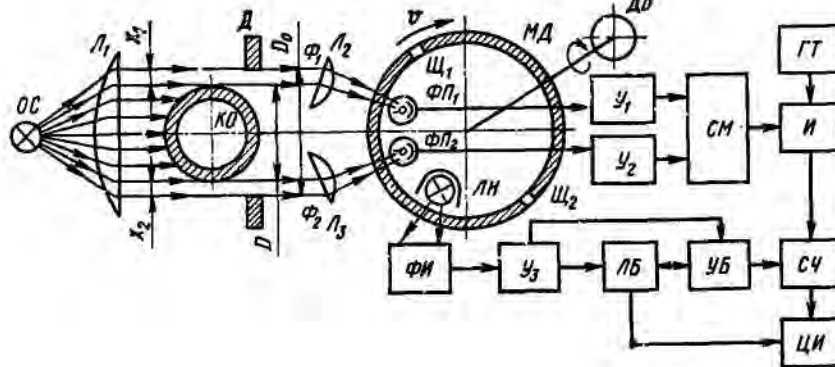


Рис. 5.7. Функциональная схема измерителя линейного размера

Фотоимпульсные приборы имеют наибольшее распространение и по существу используют преобразование линейного размера в электрический импульс, длительность которого связана с измеряемым размером и скоростью движения модулирующего элемента. Применение растровых устройств позволяет дискретизировать световой поток, идущий от контролируемого объекта, и получить последовательность импульсов, число которых связано с размерами контролируемого объекта. На рис. 5.7 показана упрощенная функциональная схема измерителя ОГ-10Ф, реализующая фотоимпульсный способ.

Световой поток создает осветитель *ОС* (лампа накаливания, лазер) и конденсор из линз  $L_u$  который формирует пучок однородных параллельных лучей света, освещающий зону контроля. Контролируемый объект *КО* (труба, пруток, лист или другой полуфабрикат с двумя краями) затеняет часть светового потока, определяемую его размером  $D$ . В результате за контролируемый объект проходят две части светового потока  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , задаваемые положением его краев и ограничивающей диафрагмой  $D$ . Потоки света  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  падают на призмы или линзы  $L_2$  и  $L_3$ , направляющие их на фотоприемники  $\Phi П_1$  и  $\Phi П_2$ . Поле зрения фотоприемников перекрывается вращающимся непрозрачным модулятором  $МД$ , имеющим прорези-щели  $Щ_1$  и  $Щ_2$  небольшой ширины. При вращении модулятора  $МД$  двигателем  $Дв$  его щели сканируют поле зрения фотоприемников  $\Phi П_1$  и  $\Phi П_2$ , в результате чего на их выходе появляются импульсы тока (рис. 5.8), амплитуды которых зависят от части светового потока, попадающего через щель модулятора  $МД$  на фотоприемники, а длительность  $T_1$  и  $T_2$  определяется протяженностью зоны, где идет световой поток ( $x_1$  или  $x_2$ ), т. е.

$$\tau_{1,2} = \frac{K_{л1,2} x_{1,2}}{v},$$

где  $v$ — линейная скорость сканирования модулятора  $МД$ ;  $K_{л2}$ — коэффициент, учитывающий изменение поперечного сечения светового потока за счет установки оптических элементов  $L_1$  и  $L_2$ .

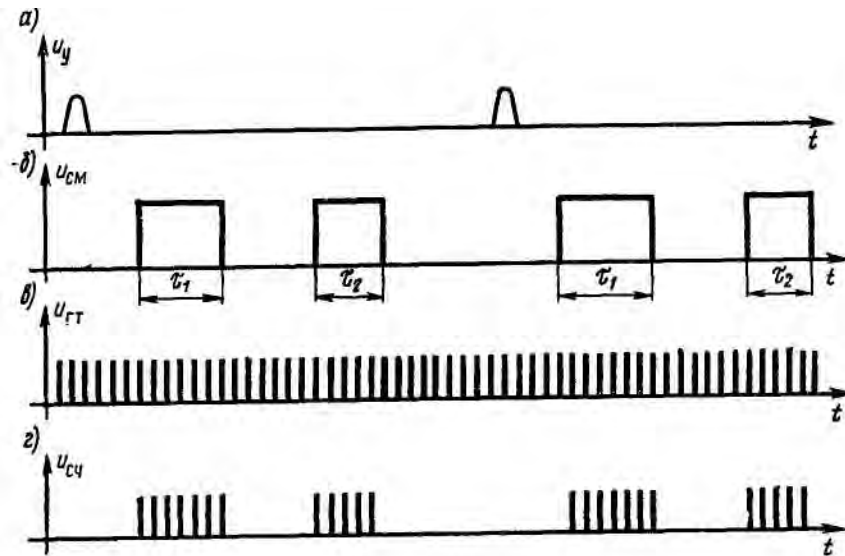


Рис. 5.8. Диаграммы напряжений- в разных блоках измерителя линейных размеров:

*a* — на фотопреобразователях; *б* — на выходе сумматора; *в* — счетные импульсы; *з* — на выходе счетчика

Из рис. 5.8 нетрудно видеть, что  $x_1 - x_2 = D_0 - D$  и при однородном параллельном освещении не зависят от смещения контролируемого объекта в зоне контроля. Сигналы фотоприемников  $\Phi\Pi_1$  и  $\Phi\Pi_2$  поступают на усилители  $У_1$  и  $У_2$ , а затем объединяются сумматором  $СМ$ . Таким образом, на выходе сумматора  $СМ$  в течение одного оборота формируются импульсы (рис. 5.8, а), общее число которых равно удвоенному количеству щелей в модуляторе  $M$ , а сумма времен двух импульсов

$$\tau_1 + \tau_2 = \frac{K_{л1}x_1 + K_{л2}x_2}{v}$$

Обеспечив равенство коэффициентов  $K_{л1} - K_{л2} = K_{л}$ , получим

$$\tau_1 + \tau_2 = K_{л} (D_0 - D) / v.$$

Это соотношение позволяет определить размер  $D$  контролируемого объекта. Для этого можно использовать систему цифрового отсчета, показанную на рис. 5.7.

Работу системы организует управляющий импульсный блок  $УБ$ , запускаемый формирователем импульсов  $\PhiИ$  через усилитель  $Уз$ . Формирователь импульсов  $\PhiИ$  может работать на принципе преобразования светового потока от излучателя  $ЛИ$  (светодиод, лампа накаливания и т. п.) специальным фотоприемником (фоторезистор, фотодиод), закрытым узкой диафрагмой, в импульс тока или напряжения, возникающих в момент прохождения щели (короткие импульсы  $u_y$  на рис. 5.8, а), или на другом, например, электромагнитном принципе. Блок  $УБ$  организует согласованную работу счетчика импульсов  $СЧ$ , блока логической обработки  $ЛБ$  и цифрового индикатора размера контролируемого объекта  $ЦИ$ . Импульсы сумматора  $и_{см}$  поступают на блок совпадения  $И$ , куда также подводятся короткие импульсы  $а_{ГГ}$  от тактового генератора  $П$ . На выходы блока  $И$  проходят тактовые импульсы, существующие во время действия импульсов  $t_i$  и  $T_{г}$  так, что общее число прошедших к счетчику  $СЧ$  тактовых импульсов «сч связано с размером контролируемого объекта. Логический блок  $ЛБ$  с учетом зависимости суммы длительности от размера  $D$  формирует сигналы, позволяющие цифровому сигналу индикатора  $ЦИ$  высвечивать размер  $D$ .

Устройства на принципе фотоимпульсного преобразования могут быть построены на базе других элементов и блоков вторичной обработки сигналов. В частности, очень перспективным является применение линейных матриц на базе приборов с зарядной связью, на выходе которых сразу получают последовательность импульсов, связанных с поперечным размером (световыми потоками  $\Phi$  и  $\Phi_{Г}$ ), что существенно упрощает по-

строение приборов для контроля геометрических размеров фотометрическим способом и обеспечивает лучшие метрологические показатели.

**Денситометрический** метод применен в приборе ОД-10М, основное назначение которого — контроль загрязнения масел и других жидких продуктов. Денситометр ОД-ЮМ работает по прошедшему излучению. Световой поток в нем создается световодом, излучающим инфракрасный свет ( $\lambda \ll 1$  -мкм), слабо затухающий в маслах. В качестве первичного фотоэлектрического преобразователя применен кремниевый фотодиод. Проверяемая жидкость заливается в пробирку или ампулу, помещается в измерительную зону между излучателем и фотопреобразователем. Сигналы, полученные от фотопреобразователя, после простейшей обработки подаются на стрелочный прибор. Денситометр ОД-ЮМ не позволяет получить высокую точность измерений из-за недостаточной стабильности излучателя и приемника света, но является незаменимым прибором для экспресс-контроля загрязнения масел и создает большой экономический эффект.

Повышенную точность контроля при измерениях коэффициента пропускания и сохранения таких преимуществ, как малогабаритность, небольшая масса, возможность оперативного контроля, дает применение импульсной модуляции светового потока с помощью прерывистого питания светодиода и стабилизации обратной связью. На этой же основе могут быть построены многопараметровые приборы контроля, если облучение производить последовательно от светодиодов, излучающих свет разных длин волн с обработкой полученных сигналов.

Фотометрический метод дефектоскопии реализует оптический дефектоскоп ОД-20Ф, предназначенный для контроля внутренней поверхности труб диаметром 30—146 мм при длине до 12 м. В качестве источника излучения в нем использован лазер, создающий тонкий направленный луч. Оптико-механическая система направляет луч вдоль образующей трубы и сканирует его по окружности. Различные дефекты — выступы, задиры, висячие пленки и т. п. — затеняют луч и создают на выходном конце трубы прерывающийся световой поток. Приемная оптическая система собирает световой поток на фотопреобразователь, выполненный на основе фотоэлектронного умножителя, обеспечивающего высокое быстродействие и большое значение сигнала. Затем происходит обработка полученных электрических сигналов и формирование информации о результатах контроля. Они отмечаются на осциллографе световыми и звуковыми сигнализаторами, а на специально предусмотренных электрических контактах формируется сигнал для механизмов разбраковки труб по качеству.

Таким образом, использование фотометрического и подобных ему методов дает возможность решать различные контрольно-измерительные задачи толщинометрии, дефектоскопии и контроля физико-химических свойств разнообразных изделий и полуфабрикатов.

## **5.8. Контроль телевизионными методами**

Основой применения телевизионных методов являются электронно-вакуумные передающие телевизионные трубки, которые позволяют преобразовать видимое изображение в упорядоченную последовательность—видеосигнал. Наибольшее распространение в телевизионных системах для целей неразрушающего контроля имеют видикон и диссектор. Сигналы, полученные от передающего телевизионного блока, дальше могут использоваться по-разному: для формирования видимого изображения, которое анализируется оператором, для логической обработки сигналов и выделения информации о контролируемом объекте или для ввода в ЭВМ. Самым эффективным результатом такого контроля является непосредственное использование его в технологическом процессе для его коррекции в нужном направлении, что лучше всего производить с помощью ЭВМ, которая может учесть все многообразие влияющих на качество готовой

продукции факторов.

Обобщая положительные черты телевизионного контроля, все шире заменяющего визуальный и визуально-оптический контроль, отметим основные его преимущества:

1) возможность одновременной оценки изображения на нескольких экранах группой операторов, что особенно существенно при работе с микроскопом, эндоскопом и другими подобными устройствами;

2) работа с крупным изображением, получаемым за счет электронного увеличения так, что общее увеличение составит:

$$K_y = K_{\text{opt}} K_{\text{эл}};$$

3) передача и анализ изображения практически на любые расстояния от контролируемого объекта;

4) возможность записи (оперативная память, видеоманитофон), обработки изображения (повышение контраста, выделение зон с интересующими деталями, нанесение шкал и отметок, цветовое контрастирование и т. д.) и его улучшения путем устранения помех с применением методов, широко применяемых в телеметрических системах;

5) простота проведения контроля для объектов различной формы;

б) широкие возможности автоматизации контроля и использования его результатов обработанных на ЭВМ, для их фиксации, анализа, а также управления ходом технологического процесса.

Большую часть этих преимуществ позволяет реализовать аппаратура или устройства, которые могут быть построены на базе серийных блоков и систем. Такие устройства называют *системами промышленного телевидения и телевизионной автоматики*. Кроме того, некоторые специальные устройства, создающие на выходе видимое изображение, по существу, построены на основе принципов, характерных для телевизионной техники.

Основным оборудованием при реализации телевизионных методов является промышленная телевизионная установка (ПТУ), представляющая собой замкнутую телевизионную систему, сигналы которой чаще всего передаются по кабелям. Промышленные телевизионные установки являются самостоятельными единицами и часто могут быть непосредственно использованы для проведения оптического телевизионного контроля при соответствующем выборе из широко выпускаемой номенклатуры. Структурная схема (рис. 6.11) показывает основные функциональные блоки типичной ПТУ. Ее передающая часть имеет от 1 до 32 телекамер ( $TK_u$   $TK_n$ ) с устройствами наведения ( $UH_u$   $UH_n$ ) и оптическими блоками ( $OB_u$   $OB_n$ ). В общем случае оптические блоки  $OB_u$   $OB_n$  представляют собой набор объективов с различными оптическими системами, смена которых может производиться дистанционно. Промышленные телевизионные системы используют передающие трубки типа «видикон»

разных марок. Устройства наведения  $UH_u$   $UH_n$  — механического типа — могут поворачивать телевизионную камеру дистанционно по сигналам управления на угол  $\pm 180^\circ$  в горизонтальной плоскости и на угол  $\pm (20—45)^\circ$  в вертикальной плоскости. Все электрические соединения телекамер между собой и с приемной частью выполнены с помощью распределительных коробок  $PK_1$  на передающей и  $PK_2$  на приемной сторонах. Соединяются эти коробки между собой магистральным коаксиальным кабелем  $MK$ , по которому идут видеосигналы, импульсы синхронизации и развертки, кабелем управления  $KV_2$ , по которому передаются питающие напряжения, а также сигналы управления телекамерами и блоками.

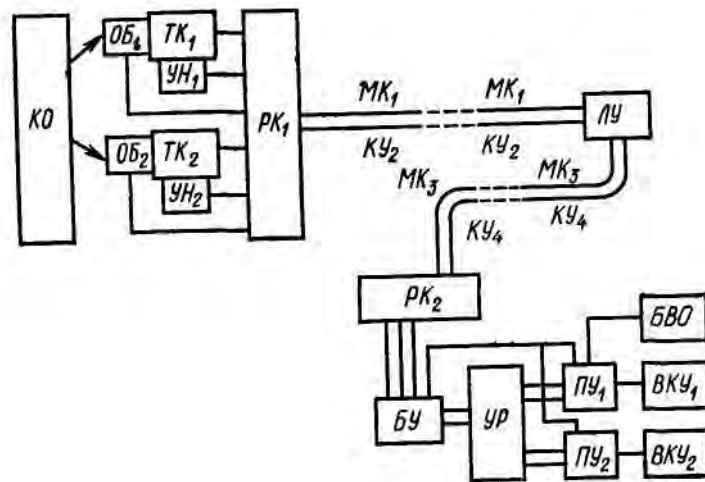


Рис. 5.9 Структурная схема промышленной телевизионной установки

Типичная длина кабелей составляет 100—1000 м, с линейным усилителем *ЛУ* и дополнительными кабелями (*МКз* и *КУ*) до 5 км. На приемной стороне видеосигналы от распределительной коробки *РК<sub>2</sub>* через центральный блок коммутации и управления *БУ* поступают на усилитель-распределитель *УР*, обеспечивающий электрическими сигналами все видоконтрольные устройства *ВКУ*, количество которых может быть также различным (чаще 1—4). Видоконтрольные устройства *ВКУ<sub>и</sub>* *ВКУ<sub>з</sub>* снабжены пультами управления *ПУ<sub>и</sub>* *ПУ<sub>2</sub>*, часть которых сделана выносными, что позволяет управлять дистанционно режимом работы системы в целом.

Типовые промышленные телевизионные системы обеспечивают 6—7 градаций яркости при освещенности 50—300 лк и четкости изображения около 500 линий в растре. Применение видиконоа специального исполнения дает возможность использовать телевизионные методы в случае невидимых излучений (инфракрасные, рентгеновские). Телевизионные сигналы могут быть приведены к более удобному виду блоками вторичной обработки *БВО*.

Промышленные телевизионные установки успешно применяются для решения задач, которые можно решить визуальным и визуально-оптическим методами, причем в более широком спектральном диапазоне излучений и в большем объеме. Их применение особенно эффективно в тех случаях, когда непосредственное наблюдение или присутствие оператора в зоне контроля невозможно из-за ограниченного объема пространства, опасных излучений или условий работы и т. д. Промышленные телевизионные установки позволяют решать задачи измерения геометрических размеров, формы полуфабрикатов и изделий, обнаружения дефектов, размеры которых превышают ширину строки телевизионного растра и достаточно контрастны, а также следить за ходом производственного процесса. В крупносерийном и массовом производстве контроль геометрических показателей целесообразно вести, установив перед экраном видеоконтрольного устройства шаблоны или маски, облегчающие работу проверяющего.

Во многих случаях имеет смысл применять цветные телевизионные установки или проводить цветное контрастирование изображения, что повышает достоверность контроля. Одной из существенных составляющих погрешности в толщинометрии является влияние нелинейности изображения вдоль экрана, создаваемой отклоняющими системами трубок. Для снижения этой погрешности градуируют выходной экран с помощью тест-объектов или координатных сеток либо помещают их в зону контроля. Если известно предположительное направление дефектов, то следует располагать приемную телевизионную камеру так, чтобы строки были перпендикулярны этому направлению, поскольку при этом снижается вероятность пропуска дефектов. Телевизионные методы позволяют обнаруживать дефекты, минимальный размер которых равен

$$I_{\min} = \frac{I_{\text{экр}}}{K_{\text{в}} m},$$

где  $m$  — число строк или число элементов изображения в строке.

Наряду с положительными чертами необходимо отметить, что телевизионные системы сравнительно дороги и сложны, что заставляет внимательно рассматривать целесообразность их применения с экономической точки зрения.

## 5.9. Интерференционные методы контроля качества

Отличительной чертой интерференционных методов оптического контроля является взаимодействие двух потоков света. К интерференционным методам относятся: интерферометрический, дифракционный, фазово-контрастный, рефрактометрический и голографический. Они основаны на изменении энергии и фазы вторичных потоков после взаимодействия с контролируемым объектом, его элементами или частями. Поскольку величиной, определяющей набег фазы, является длина волны, интерференционные методы обеспечивают измерения и контроль параметров объектов до долей длины волны. Обычно погрешность или разрешающая способность такого рода аппаратуры составляет 0,1. В связи с высокой разрешающей способностью и чувствительностью этих методов большое внимание должно быть уделено неизменности условий контроля, в том числе и параметров окружающей среды. Например, наличие на пути одного из световых потоков газа с переменными оптическими свойствами (нагретый или охлажденный воздух, дым, испарения) или температурные изменения размеров некоторых элементов аппаратуры могут существенно исказить результаты контроля. Интерференционные методы успешно применяются для высокоточного измерения геометрических размеров, физико-химических свойств (в первую очередь оптических), реже — для дефектоскопии и контроля внутреннего строения изделий.

Для целей неразрушающего контроля могут применяться *интерферометры* — стандартные измерительные приборы, распространенные в технике точных геометрических измерений. Они позволяют измерять различные геометрические размеры, в том числе толщины прозрачных покрытий, с погрешностью до 0,1 мкм, шероховатость и неровности на исследуемой поверхности такого же порядка. На рис. 5.10 показана схема конструкции микроинтерферометра для контроля качества поверхности путем сравнения с эталоном поверхности, а на рис. 5.11 — вид изображения в поле зрения интерферометра при наличии дефектов на поверхности (трещины и выступы).

Источник света  $ИС$  (лампа накаливания, лазер) с помощью конденсора  $L_1$ — $L_2$  формирует световой поток. Выделенная монохроматическим фильтром  $\Phi$  и диафрагмой  $M_1$  часть попадает на полупрозрачное зеркало  $Z_1$  и делится на два когерентных пучка. Один из пучков фокусируется на контролируемый объект  $КО$ , помещенный на предметный столик  $ПС$ , а другой — на поверхность эталонного зеркала  $Z_2$ . Отраженные лучи через микрообъективы  $МО_1$  и  $МО_2$  и полупрозрачное зеркало  $Z_1$  попадают в окуляр  $Л_3$ ,  $Л_4$  содержащий ряд линз и ограничивающую диафрагму  $D_2$ . Налагаясь в поле зрения, рабочий и эталонный световые потоки образуют интерференционную картину.

В случае плоских поверхностей объекта и эталона интерферограмма будет иметь вид параллельных светлых (потоки налагаются в фазе) и темных полос (фазы противоположны). Наличие кривизны и дефектов поверхности (трещин, впадин, царапин, риск или наплывов, выступов, задиров и т. п.) контролируемого объекта приводит к появлению регулярно изменяющегося или местного изменения набега фазы отраженного светового потока, что ведет к искривлению линий интерференционной картины (рис. 6.11).

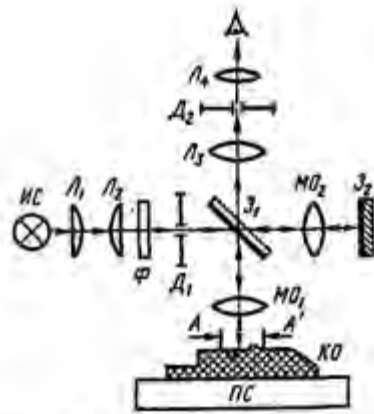


Рис. 5.10 Конструктивная схема интерферометра

Это позволяет обнаружить отклонение от плоскостности, дефекты и неровности поверхности и оценивать их величину. Так, при освещении монохроматическим светом глубина (высота) неровности может быть оценена по выражению

$$h = (\lambda/2) (\Delta l/l_0),$$

где  $\Delta$  — изгиб, соответствующий интерференционной линии, а  $l$  — интервал между интерференционными линиями. Отношение  $\Delta/l_0$  оценивается оператором или рассчитывается после измерения соответствующих величин с помощью измерительной сетки или микрометрического винта интерферометра. Таким образом легко изучаются микронарушения поверхности размером 0,1—1 мкм. Фокусируя на резкость интерференционные полосы последовательно на предельные точки дефекта или по глубине прозрачного контролируемого объекта, можно определять дефекты в виде рисок или трещин глубиной 20—100 мкм при ширине около 0,25 мкм.

Перемещение контролируемого объекта или эталонного зеркала приводит к смещению интерференционных полос, по которому можно находить абсолютные размеры элементов контролируемого объекта, толщину покрытий, глубину отверстий и т. д. с высокой точностью по отработанным стандартным методикам.

Метод фазового контраста применяют для наблюдения объектов или деталей, отличающихся от окружающей среды только показателем преломления. Фазы электромагнитных волн падающей и рассеянной на границе среды или неоднородности отличаются на  $\pi/2$ . Если добавить сдвиг фазы еще  $\pi/2$ , то незначительная разность фаз волн от объекта за счет перепада коэффициента преломления преобразуется в относительно большое приращение интенсивности вследствие интерференции падающего и рассеянного света. Необходимый дополнительный сдвиг фаз можно получить, помещая в задней фокальной плоскости объектива небольшую пластину, через которую будет проходить только прямой свет, а дифрагированным светом, прошедшим через нее, ввиду малости размеров можно пренебречь.

Разработаны и специализированные приборы для толщинометрии на базе дифракционных явлений. Примером может служить прибор для измерения диаметра тонкой проволоки 2—20 мкм с погрешностью не более 1%. Если поместить провод на пути лазерного пучка с диаметром больше максимального диаметра провода, то на некотором расстоянии от него будет наблюдаться дифракционная картина в виде пятен с убывающей от центра яркостью, расстояние между которыми пропорционально отношению длины волны к диаметру провода. Отсчитав с помощью цифрового устройства расстояние от центра картины до выбранного пятна света (обычно до 8—15), путем пересчета получают значение диаметра провода.



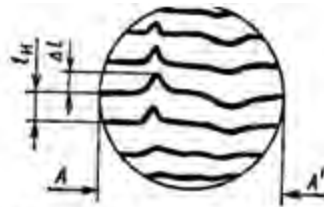


Рис. 5.11 Интерференционная картина при наличии выступа и впадины

Появление лазеров с хорошими техническими и экономическими показателями за счет увеличения яркости и сфокусированности пучка света расширило диапазон контролируемых длин до нескольких десятков метров. Принципиально измерение больших толщин строится по схеме, подобной изображенной на рис. 5.11, и сводится обычно к подсчету максимумов и минимумов, укладывающихся на измеряемой длине, аналогично анализу распределения поля в СВЧ-диапазоне. Однако поскольку на длине в 1 м число экстремумов поля для оптического диапазона более  $10^6$ , в средствах измерения больших длин устанавливаются блоки электронного счета их числа, по которым с учетом известной длины волны лазера и вычисляется искомый размер.

## 6. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

### 6.1. Общие вопросы радиационного контроля качества

Радиационный метод неразрушающего контроля качества промышленной продукции основан на взаимодействии с контролируемым объектом ионизирующих (проникающих) электромагнитных и корпускулярных излучений и регистрации результатов этого взаимодействия.

В радиационном контроле используют самые разнообразные излучения, причем двойственная природа электромагнитных волн и элементарных частиц, образующих излучение, воздействующее на контролируемые объекты, позволяет описать их кванты разными физическими величинами: частотой, длиной волны или энергией. Последняя является обобщенным показателем и применяется наиболее часто. Излучения, применяемые в радиационном контроле, имеют значение частоты кванта  $3 \cdot 10^{16}$  Гц и более или соответственно длину волны в вакууме короче 10 нм, или энергию кванта более 124 эВ (около  $20 \cdot 10^{-18}$  Дж). Энергия излучений, получаемых в настоящее время человеком от созданных технических устройств, имеет верхнюю границу примерно 300 МэВ. Излучения с энергией кванта больше этого значения встречаются в природе в виде космических лучей, не доходящих, однако, до поверхности Земли.

Различные ионизирующие излучения могут быть получены от источников следующих групп: электронные источники, радиоизотопные источники, реакторы и космические источники. Рассмотрим основные типы и некоторые особенности этих источников.

К источникам излучения, построенным на основе использования электронных устройств, относятся: рентгеновские аппараты (имеют наибольшее применение), бетатроны, линейные ускорители, микротроны и некоторые другие устройства.

Принцип действия электронных источников основан на преобразовании электроэнергии с помощью специальных электронных устройств или ускорителей потока частиц. Источники излучения на базе электронных устройств могут создавать рентгеновское излучение, гамма-излучение, бета-излучение. Бетатроны, линейные ускорители и микротроны непосредственно создают поток быстро движущихся электронов, а если направить его на мишень из определенного материала, можно получить электромагнитное (тормозное и характеристическое) излучение с энергией квантов, зависящей от

энергии попадающих частиц. Большим преимуществом электронных источников излучения является возможность регулировки интенсивности излучения и его спектрального состава, а также полная безопасность при выключении электропитания. Большие габариты и масса, а также необходимость внешнего источника энергии — их недостатки.

**Радиоизотопные источники** построены на использовании изотопов вещества, имеющего естественную или искусственную радиоактивность. Эти источники обычно создают корпускулярное излучение (электроны, протоны, нейтроны и др.) с различными энергиями частиц и гамма-излучение. Достоинством радиоизотопных источников является их портативность и возможность применения без дополнительных источников энергии. Последнее обстоятельство позволяет их применять в любых условиях: лабораторных, производственных и полевых.

**Реакторы** являются мощными источниками различных видов излучений, сопровождающих ядерные реакции: рентгеновское, нейтронное, гамма-излучение, альфа-излучение, бета-излучение и др. Для проведения неразрушающего контроля вблизи активной зоны реактора предусматривают специальные полости, в которые через шахту помещаются контролируемые объекты, первичные преобразователи излучения и другое необходимое оборудование (фильтры, маркировочные знаки, экраны и т. д.). Применение реакторов для целей контроля качества ограничено, поскольку контролируемые объекты надо транспортировать к реактору, расположенному далеко от места, где производятся объекты контроля, что снижает его оперативность.

**Космические источники** ионизирующего излучения являются сравнительно слабыми в связи со значительным поглощением их в атмосфере Земли. Однако первичное космическое излучение содержит кванты и частицы с очень большой энергией, которые не достижимы пока с помощью источников, имеющихся в распоряжении человека. Поэтому их применение возможно для контроля уникальных объектов при условии выноса аппаратуры за пределы атмосферы, например, космическими кораблями.

В настоящее время для радиационного контроля качества практически широко используют лишь источники, построенные на базе электронных устройств, и радиоизотопные. Свойства ионизирующего излучения этих источников обычно характеризуют интенсивностью излучения и его спектральным составом.

Длина волны ионизирующих излучений соизмерима с размерами молекул и атомов или меньше их, что определяет сложный характер взаимодействия этих излучений с материалом контролируемого объекта и обуславливает вероятностный характер результатов взаимодействия.

Общей тенденцией при взаимодействии ионизирующих излучений с веществом является увеличение его проникающей способности с увеличением энергии кванта. По отношению к ионизирующим излучениям свойства материалов как бы выравниваются и решающей величиной, влияющей на результаты взаимодействия квантов излучения, оказывается плотность материала и его строение (структура).

Исключение составляют резонансные поглощения некоторых частиц, имеющих определенные значения энергий.

Возможность применения радиационных методов контроля определяется в первую очередь тем, насколько сильно взаимодействует излучение с материалом контролируемого объекта, что обуславливает верхнюю и нижнюю границы диапазона толщин, когда результаты контроля получаются достаточно достоверными.

Наиболее часто в аппаратуре неразрушающего радиационного контроля используют прошедшее излучение и лишь при решении некоторых задач толщинометрии и контроля свойств используется обратное рассеяние или переизлучение квантов вторичного излучения.

Взаимодействуя с веществом, излучение изменяется и производит определенное изменение в объекте, с которым оно взаимодействовало. В частности, после взаимодействия с веществом какого-то объекта излучение может быть поглощено (полностью или

частично) или рассеяно, что приведет к изменению его характеристик: интенсивности, энергии и спектрального состава излучения, направления выхода квантов и др.

В материале контролируемого объекта ионизирующее излучение может вызвать проявление ряда эффектов: теплового, электрического (ионизационного), химического (фотохимического), люминесцентного и биологического. Перечисленные эффекты используют в различных устройствах, а для целей неразрушающего контроля — в преобразователях излучения в электрический сигнал или видимое изображение. Биологическое действие излучения должно учитываться при создании защиты персонала от излучения, а также при организации неразрушающего контроля.

Радиационные методы по сравнению с другими методами неразрушающего контроля имеют наибольшую биологическую опасность и действуют скрытно, поэтому при их использовании должны соблюдаться определенные организационные, санитарные нормы охраны труда и правила техники безопасности, значение которых увеличивается при повышении мощности источника излучения.

Излучения, применяемые в радиационном контроле, как электромагнитной природы в виде фотонов, так и корпускулярной природы в виде потока частиц, могут характеризоваться различными физическими величинами. Однако среди них можно выделить и общие показатели излучения: поток энергии, мощность источника, интенсивность, экспозиционная (поглощенная) доза, энергия кванта и спектральная характеристика.

Потоком энергии излучения  $F$  (Дж/м<sup>2</sup>) называется отношение суммарно энергии  $E$  частиц или квантов ионизирующего излучения, проникающих в объем элементарной сферы с площадью поперечного сечения  $S$ , к этой площади:  $Fk=E/S$ . Мощностью источника  $W$  называют отношение суммарной энергии частиц или квантов, излучаемых источником за единицу времени:  $W=AE/At$ .

Интенсивностью излучения (плотностью потока энергии, (Вт/м<sup>2</sup>)) называется отношение приращения энергии ионизирующего излучения  $AE$ , проходящего через сферу с площадью  $S$  за время

$$J = \frac{\Delta E}{S \Delta t} .$$

Интенсивность излучения изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния  $R$  от источника до точки наблюдения, поэтому интенсивность излучения указывают на определенном расстоянии от источника (обычно 1 м), что оговаривается в технической документации на него.

Интенсивность  $J$  для немонотонического излучения равна сумме энергий отдельных его составляющих. Она определяет в значительной степени величину и спектр вторичного излучения, полученного после взаимодействия с контролируемым объектом, сигналы от первичного преобразователя и с этих позиций должна выбираться достаточно большой. Вместе с тем с точки зрения безопасности работы операторов интенсивность используемого излучения следует уменьшать. Противоречивость этих требований приводит на практике к выбору минимально необходимой интенсивности, обеспечивающей достоверный контроль качества продукции.

Излучающая часть источников обычно много меньше расстояния до контролируемого объекта и преобразователя, поэтому можно считать, что интенсивность от расстояния убывает обратно пропорционально его квадрату:

$$J = J_0 \frac{R_0^2}{R^2} ,$$

где  $J_0$  — интенсивность излучения на расстоянии  $R_0$ .

Каждый фотон или частица может характеризоваться энергией или ее максимальным значением  $E_{max}$ , которым может быть поставлена в соответствие определенная длина волны  $\lambda$  или  $\lambda_{шах}$ , вычисляемая по известной формуле:

$$\lambda = c\hbar/E,$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  $h$  — постоянная Планка ( $6,6256 \cdot 10^{-34}$  Дж·с).

Энергия кванта излучения определяет его проникающую способность и, следовательно, возможность выявления дефектов в контролируемых объектах различной толщины и плотности. Источники ионизирующих излучений могут создавать одновременно кванты широкого спектрального диапазона энергий, которые по-разному взаимодействуют с веществом, достав излучения описывает спектральная характеристика — зависимость интенсивности в малом интервале энергии (длин волн) от энергии (длины волны) кванта. Она может быть задана в виде графика — так ее задают для рентгеновского излучения, или в виде таблицы — так задают ее обычно для радиоизотопных источников.

Излучение в виде потока частиц описывают также специальными величинами [20], основные из них: флюенс (перенос) частиц  $\Phi = \Delta A75$  (частиц/м<sup>2</sup>), поток частиц  $q > = AN/At$  (частиц/с), плотность, (потока частиц  $J = AN/SA t$  [частиц/(м<sup>2</sup>·с)], где  $AN$  — число частиц! прошедших через площадь  $S$  за время  $At$ , и др.

Независимо от конкретного вида ионизирующего излучения при организации радиационного неразрушающего контроля можно отметить две обобщенные схемы: по прошедшему и рассеянному (отраженному) излучениям.

Радиационный контроль по прошедшему излучению имеет наибольшее распространение и заключается в анализе излучения, прошедшего сквозь контролируемый объект. Этот метод особенно широко применяется для целей дефектоскопии и контроля внутреннего строения различных объектов при возможности двустороннего доступа к ним при значительной толщине (до 0,5 м).

Преимуществом работы с использованием прошедшего излучения является малое прямое прохождение излучения, минуя контролируемый объект, незначительное влияние его перемещений в направлении от источника к первичному преобразователю и простота реализации. Серьезным ограничением метода контроля по прошедшему излучению является необходимость двустороннего доступа к объекту и потребность в увеличенных размерах листа для его проведения.

Контроль по рассеянному (отраженному) излучению заключается в регистрации излучения в той же области, где расположен источник. Этот метод радиационного контроля применяется для целей толщинометрии и определения свойств материала полуфабриката или изделия. Он используется для испытаний слоев небольшой толщины (до нескольких миллиметров). Источник излучения и первичный измерительный преобразователь, регистрирующий вторичное (отраженное) излучение, в этом случае находятся близко : друг от друга, и для снижения прямого прохождения излучения I используют защитные экраны. Метод контроля по отраженному ; излучению наиболее удобен для применения и позволяет производить испытания разнообразных изделий любых размеров и форм. Аппаратура при реализации этого метода получается довольно компактной. Обстоятельством, усложняющим контроль по отраженному излучению, является значительное влияние расстояния между объектом, преобразователем и источником излучения. Взаимодействуя с веществом, ионизирующее излучение может полностью или частично поглощаться им и производить в нем различные изменения. Для определения количественных показателей результатов этого взаимодействия вводят понятия поглощенной/и экспозиционной дозы, мощности дозы.

Поглощенная доза излучения  $D_{nom}$  (Дж/кг или внесистемная единица — рад) равна средней энергии, переданной излучением/веществу, деленной на массу  $m$  вещества:

$$D = E/m.$$

Поглощенная доза зависит от свойств излучения и поглощающей среды. Чтобы характеризовать результаты взаимодействия рентгеновского и гамма-излучений (до энергий квантов 3,МэВ) с веществом по эффекту ионизации, вводят понятие «экспозицион-

ная доза» излучения —  $\mathcal{E}_{\text{эксп}}$  (Кл/кг или внесистемная единица-рентген) , которая равна заряду, созданному в единице воздуха, т. е.

$$D_{\text{эксп}} = Q/m.$$

Поглощенная и экспозиционная дозы излучения связаны между собой коэффициентом:

$$D_{\text{эксп}} \approx K_{\text{э-п}} D_{\text{погл}}$$

зависящим от использованных единиц измерений; в частности, если  $D_{\text{погл}}$  выражена в раддах, а  $\mathcal{E}_{\text{эксп}}$  — в рентгенах, то  $K_{\text{э-п}} = 0,877 \text{ Р/рад}$ .

Мощностью поглощенной дозы  $P_{\text{погл}}$  (Вт/кг, рад/с) называется величина дозы, поглощенная в единицу времени:

$$P_{\text{погл}} = D_{\text{погл}}/\Delta t.$$

Для немонотонного источника излучения вводится понятие «эквивалентная доза», а для оценки облучения живых организмов — «максимальная эквивалентная доза».

Полезную информацию при радиационном контроле несут различные показатели. Наиболее важными среди них являются: величина и распределение интенсивности излучения / (плотности потока энергии), спектральный состав вторичного излучения и направление прихода.

## 6.2. Источники корпускулярного излучения

Излучение в виде потоков частиц может быть получено с использованием радиоактивных веществ, излучения ядерного реактора и различного типа ускорителей, использующих электронную аппаратуру. В практике неразрушающего контроля наиболее применение получили радиоизотопные источники, бетатроны, линейные ускорители и микротроны.

**Основой радиоизотопных источников** являются искусственные изотопы, которые получают путем облучения не радиоактивных веществ в нейтронных потоках ядерных реакторов ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{132}\text{I}$  или на циклотронах ( $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ), а также путем деления ядерного реактора ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ). Радиоактивный изотоп является излучающей (активной) частью источника, определяющей его активность и спектр излучения.

Активностью  $C_{\text{р}}$  распада ( $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ распад/с}$ ) источника называется число актов распада атомов за единицу времени:

$$C_{\text{р}} = N/t.$$

Активность радиоизотопного источника определяет интенсивность (экспозиционную дозу) корпускулярного излучения. С течением времени за счет распада нуклидов число радиоактивных атомов препарата уменьшается по экспоненциальному закону:  $N = N_0 \exp(-t/T_{1/2})$ , где  $N_0$  и  $N$  — число радиоактивных атомов в начальный момент времени и в момент времени  $t$ ,  $T_{1/2}$  — период полураспада, т. е. время, в течение которого распадается половина всех атомов данного радионуклида.

С периодом полураспада связано также время жизни радиоактивных атомов, которое равно  $\tau_{\text{ж}} = 1,443 T_{1/2}$ .

Радиоизотопные источники имеют дискретный спектр излучения, состоящий обычно из излучения частиц и  $\gamma$ -квантов с различной энергией. Они могут создавать все виды ионизирующих излучений:  $\alpha$ -излучение,  $\beta$ -излучение,  $\alpha$ -излучение, тормозное и нейтронное излучения.

В табл. 6.1 приведены основные данные для некоторых радиоактивных изотопов, применяемых в неразрушающем контроле качества. Некоторые виды излучений (тормозное, нейтронное) получают путем облучения специально установленной с этой целью мишени. В отличие от электронных источников спектр излучения радиоизотоп-

ных однозначно определен радиоактивным веществом и не может быть изменен внешними воздействиями. Спектр излучения радиоизотопного источника является дискретным и задается обычно в виде таблицы.

Таблица 6.1

Изотоп	β-излучение		γ-излучение		Период полураспада $T_{1/2}$ , годы	Максимальная экспозиционная доза, Р/с*
	Энергия основных линий, МэВ	Доля линий, %	Энергия основных линий, МэВ	Доля линий, %		
<sup>60</sup> Co	0,318	99,9	1,17	99,0	5,25	$3,57 \cdot 10^4$
<sup>75</sup> Se	—	—	1,33	100	0,33	$5,36 \cdot 10^{-5}$
			0,136	61		
			0,265	71		
<sup>137</sup> Cs	0,52	92	0,4	16	29,6	$0,86 \cdot 10^{-4}$
	0,867	24	0,661	82,5		
<sup>170</sup> Tl	0,95	76	0,084	3	0,35	$2,79 \cdot 10^{-7}$
	0,24	15	0,296	26,6		
	0,535	38	0,316	81,8		
<sup>192</sup> Ir	0,67	41	0,468	56,5	0,2	$1,29 \cdot 10^{-4}$
			0,604	11		
			0,04	—		
<sup>252</sup> Cf**	—	—	—	—	2,63	$8 \cdot 10^{-4}$

\* Для γ-излучения при активности 1 Ки на расстоянии 1 м.

\*\* Источник быстрых нейтронов ( $2,3 \cdot 10^{12}$  на 1 г) со средней энергией 2,3 МэВ.

Поскольку утечка или распыление радиоактивного вещества может представлять серьезную опасность, его помещают в герметическую ампулу, помещаемую в контейнер из специальных материалов. Типичные конструкции радиоизотопных источников ионизирующего излучения изображены на рис. 6.1.

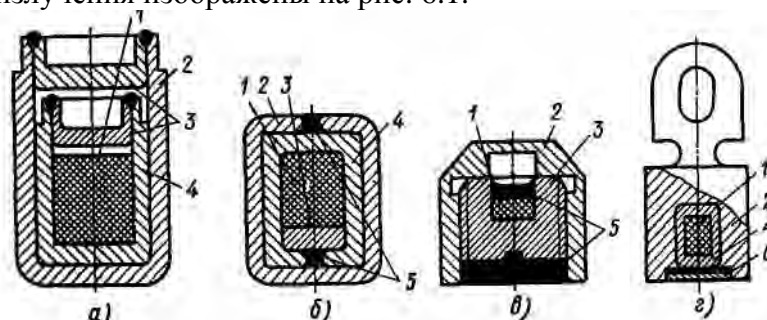


Рис. 6.1. Виды радиоизотопных источников с разной герметизацией: а — сваркой или пайкой; б — завальцовкой и клейкой; в — на резьбз с заливкой; г — завальцовка и заливка (1 — радиоактивное вещество, 2 — защитный корпус, 3 — крышка, 4 — внутренняя оболочка ампулы; 5 — герметик, 6 — мишень)

Ампула, содержащая радиоактивный изотоп, может быть залита эпоксидной смолой, заварена или завальцована. Часто для повышения надежности используют комбинацию этих способов крепления и герметизации. Технические данные для некоторых радиоизотопных источников приведены в табл. 6.2.

Радиоизотопные источники дают постоянное излучение, интенсивность которых непрерывно падает, поэтому хранятся в защитных контейнерах, а вне пределов рабочего времени помещаются в специальные хранилища. При их использовании важно знать дату изготовления источника и учитывать снижение интенсивности излучения. Эту особенность учитывают при организации неразрушающего контроля и построением аппаратуры путем введения необходимого запаса по чувствительности и дополнительных регулировок.

Размеры фокусного пятна радиоизотопных источников определяются проекцией области, занятой радиоактивным веществом, на тонкую часть ампулы, откуда выходит излучение, или на плоскость, перпендикулярную направлению излучения.

Таблица 6.2

Тип источника	Радиоактивный изотоп	Максимальная экспозиционная доза на расстоянии 1 м, Р/с	Размеры радиоактивной части (диаметр, высота), мм	Внешние размеры (диаметр, высота), мм
ГИД-К-2	$^{60}\text{Co}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1×1	4×5
ГИД-К-10	$^{60}\text{Co}$	0,5	15×15	19×22
ГИД-Ц-1	$^{137}\text{Cs}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	3×3	6×10
ГИД-Ц-6	$^{137}\text{Cs}$	0,05	23×23	27×31
ГИД-И-1	$^{192}\text{Ir}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,5×0,5	4×5
ГИД-И-7	$^{192}\text{Ir}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	6×6	8×9
Се-2	$^{75}\text{Se}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	5×6	7,5×9,5
Се-5	$^{75}\text{Se}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	11,5×11	16,5×16,5
Ту-0	$^{170}\text{Tm}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	2×2	4,5×5
Ту-3	$^{170}\text{Tm}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	9×7	12×10

Радиоизотопные источники имеют следующие достоинства: небольшие габариты и массу, не требуют источников питания и постоянно готовы к использованию в любых условиях.

Недостатком радиоизотопных источников является необходимость для них специальных хранилищ и уменьшение активности со временем.

Ускорители заряженных частиц, обычно электронов, непосредственно создают поток частиц, движущихся с определенной энергией, зависящей от его режима работы. С их помощью при достаточной скорости движения электронов можно получить и другие виды корпускулярных излучений и  $\gamma$ -излучение путем бомбардировки специально подобранных мишеней. Так, используя мишени из дейтерия, трития, бериллия, урана или висмута, при бомбардировке их электронами можно получать нейтронное излучение, а мишени из вольфрама или молибдена создают тормозное  $\gamma$ -излучение. Тормозное излучение, полученное с помощью облучения мишени от ускорителей, имеет немонотонный энергетический спектр, подобный излучению рентгеновской трубки. *Размер фокусного пятна* вторичного тормозного излучения ускорителей составляет доли квадратного миллиметра.

Таблица 6.3

Показатели	Тип бетатрона							Импульсный
	ПМБ-5	В-18	В-25/10	В30-2	В35/6	СБС-4-15	Импульсный	
Максимальная энергия излучения, МэВ	5	18,5	25	30	35	13,7	100	
Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м, Р/с	0,003	0,2	0,6	2×4	8	13	—	
Частота повторения циклов, Гц	50	100	50	50	50	50	2-10-12 (однократно)	
Габариты электромагнита, м <sup>3</sup>	0,28×0,28× ×0,19	0,5×0,6× ×0,75	1,2×1,2× ×1,2	1,2×1,7× ×1,5	1,51×1,57× ×1,05	—	—	
Масса электромагнита, кг	26	500	2500	5000	4000	3800	—	
Конструктивное исполнение	Переносной	Передвижной	—	—	—	Стационарный	—	
Потребляемая мощность, кВт	1	50	10	40	35	—	—	
Толщина просвечивания по стали, мм	60—300	130—300	До 500	150—400	150—450	250	—	
Особенности	—	—	—	Двулучевой	Стереосильноточный	—	Безжелезный, сальниковый	

Бетатрон является мощным источником электронов, построенным на базе циклического индукционного ускорителя. Технические данные некоторых типов бетатронов, применяемых для контроля качества промышленной продукции, приведены в табл. 6.3. Наиболее мощный современный бетатрон создает поток электронов с энергией до 300 МэВ.

Принцип действия бетатрона поясняет рис. 6.2.



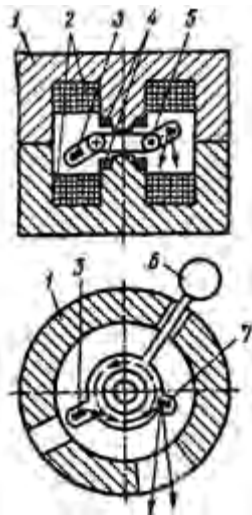


Рис. 6.2 Схема конструкции бетатрона:

- 1 — электромагнит;
- 2 — обмотки электромагнита;
- 3 — инжектор;
- 4 — смещающиеся обмотки;
- 5 — вакуумная камера;
- 6 — вакуумный насос;
- 7 — мишень.

Основной частью бетатрона является мощный электромагнит 1, имеющий осевую симметрию. Электроны в бетатроне двигаются в его магнитном поле, нарастающем во времени, под действием индуцированного вихревого ускоряющего электрического поля, силовые линии которого — коаксиальные окружности. Обмотки электромагнита 2 питаются от сети переменного тока. В начале периода инжектор 3, выполненный в виде высоковольтной электронной пушки (катод, ускоряющий электрод и анод), впрыскивает в полость вакуумной камеры 5, воздух из которой откачан насосом 6, поток электронов по касательной к центральной окружности камеры. За четверть периода питающего напряжения (около 5 мс при частоте 50 Гц) электроны сделают несколько миллионов оборотов и приобретут необходимую энергию. В конце четверти периода, когда происходит ускорение, на смещающиеся обмотки 4 подается импульс тока, заставляющий электроны сдвинуться с орбиты, и они попадают в нужную область вне камеры или на мишень 7 внутри камеры, установленную для получения тормозного излучения. Изменяя момент подачи импульса тока в смещающих обмотках, можно регулировать энергию электронов, попадающих на мишень.

**Линейные ускорители** отличаются тем, что ускоряемые электроны двигаются по траекториям, близким к прямым линиям. По сравнению с другими источниками тормозного излучения они дают большую интенсивность излучения (табл. 6.4).

Таблица 6.4

Показатели	Тип линейного ускорителя			
	ЛУЭ-10/1	ЛУЭ-15/1,5	ЛУЭ-25	У-13
Энергия электронов, МэВ	10	15	25	10
Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м, Р/с	33	167	420	42
Масса блока излучателя, т	2	5,5	—	—
Габариты блока излучателя, м <sup>3</sup>	2,8×1×0,8	4,5×1,5×2	—	0,54×0,95×0,6
Потребляемая мощность, кВт	—	—	—	35

Линейные ускорители могут использовать различные принципы ускорения: элек-

тростатический, каскадный, импульсный, индукционный и резонансный. В промышленности наибольшее применение получили линейные резонансные ускорители, построенные на использовании бегущей волны в диафрагмированном волноводе, созданные магнетронным СВЧ-генератором (рис. 6.3).

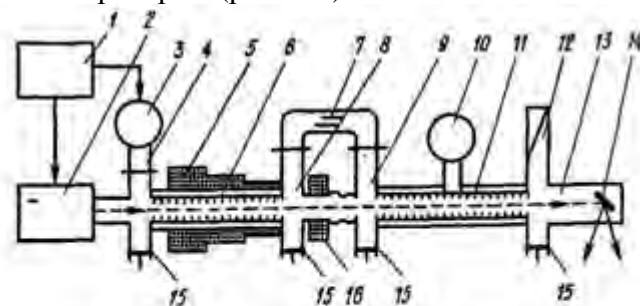


Рис. 6.3. Схема конструкции линейного ускорителя:  
 1 — блок питания; 2 — инжектор; 3 — СВЧ-генератор; 4 — волновод; 5 — фокусирующие катушки; 6, 11 — волноводные замедляющие структуры; 7 — подстройка фазы; 8, 9 — отрезки волновода; 10 — вакуумный насос; 12 — согласованная нагрузка; 13 — камера излучателя; 14 — мишень; 15 — надстречные поршни; 16 — дополнительная катушка

В резонансных линейных ускорителях используют катушки, фокусирующие электроны магнитным полем и замедляющие волноводные структуры. Линейные ускорители имеют хорошие перспективы в неразрушающем контроле качества, особенно при контроле изделий из черных металлов большой толщины.

Таблица 6.5

Показатели	Тип микротрона		
	МД-10	МТ-20	МР-30
Максимальная энергия электронов, МэВ	10	20	30
Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м, Р/с	33	133	270
Фокусное пятно на мишени, мм	2	3	3
Габариты блока излучателя, м <sup>3</sup>	1,2×1,5×1,5	—	—
Масса блока излучателя, т	2	2,5	3
Потребляемая мощность, кВт	2	3	3

**Микротрон** является циклическим ускорителем с постоянным и однородным магнитным полем и постоянной частотой СВЧ ускоряющего поля. Технические данные микротронов, нашедших применение в неразрушающем контроле качества, приведены в табл. 6.5.

Конструкция микротрона показана на рис. 6.4. Поток электронов возбуждается термокатодом, расположенным чаще всего на резонаторе 4, сквозь который пролетают ускоряемые электроны. Резонатор находится в вакуумированной камере 8, где по круговым орбитам в постоянном магнитном поле двигаются электроны. Частота СВЧ-колебаний выбирается таким образом, чтобы электроны при движении по круговым орбитам попадали в резонатор 4 в такие моменты, когда поле между его пластинами — ускоряющее. Периодическое ускорение электронов обеспечивается в том случае, если время обращения электрона отличается от времени обращения на предыдущей или последующей орбите на один период СВЧ-колебаний. При достижении орбиты наибольшего диаметра электроны выводятся из микротрона.

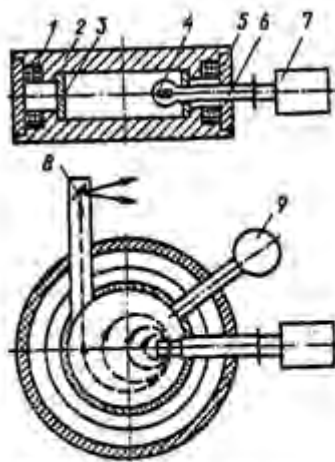


Рис. 6.4 Схема конструкции микротрона:

1 — обмотка электромагнита; 2 — корпус вакуумной камеры; 3 — стенка камеры; 4 — резонатор и инжектор; 5 — стенка корпуса микротрона; 6 — волновод; 7 — СВЧ-генератор; 8 — мишень; 9 — вакуум-

Помимо отмеченных выше устройств находят применение и другие виды ускорителей: ускорители прямого действия (типа ЭЛИТ, ЭЛТ, катрон и т. д.), в которых ускорение происходит под действием постоянного электрического поля, и ускорители более тяжелых заряженных частиц ( $\alpha$ -частиц, протонов, дейтонов), энергию которых помимо непосредственного использования можно преобразовать в другие виды ионизирующих излучений (тормозное излучение, поток нейтронов и др.).

Ускорители по сравнению с радиоизотопными источниками дают возможность получать потоки частиц и других излучений с большой энергией квантов и интенсивностью. Их преимущество — безопасность в выключенном состоянии. Недостаток ускорителей как источников корпускулярного излучения — большая масса и габариты, значительное потребление электроэнергии.

### 6.3. Источники рентгеновского излучения

Наибольшее распространение в неразрушающем контроле качества имеет рентгеновская аппаратура. В зависимости от решаемой контрольно-измерительной задачи используют: рентгеновскую трубку, рентгеновский излучатель, моноблок или рентгеновский аппарат.

Рентгеновская трубка — высоковольтный электровакуумный прибор, имеющий катод, анод и фокусирующие элементы, предназначенный для генерации рентгеновских лучей.

Рентгеновская трубка является основным прибором, применяемым в других функциональных устройствах.

Рентгеновский излучатель содержит рентгеновскую трубку и металлический корпус (кожух), который обеспечивает механическую прочность излучателя, крепление его к другим устройствам, охлаждение рентгеновской трубки, необходимые электрические показатели и защиту персонала от поражения рентгеновским излучением и электрическим током. Рентгеновский излучатель является основой рентгеновских аппаратов кабельного типа.

Моноблок объединяет в одном металлическом корпусе рентгеновский излучатель, трансформатор накала и источник высоковольтного напряжения для питания рентгеновской трубки. Внутри моноблок заполняется изоляционной жидкостью (чаще всего — трансформаторное масло) или газом под избыточным давлением 1,5—3 кгс/см<sup>2</sup>.

Рентгеновский аппарат — наиболее сложное устройство, содержащее все блоки,

необходимые для создания рентгеновского излучения и регулировки его показателей. По сравнению с моноблоком рентгеновский аппарат содержит регулирующие и контрольно-измерительные блоки и устройства, а также дополнительную биологическую защиту и устройства, облегчающие работу с ним.

Рентгеновская трубка изготавливается в виде замкнутого стеклянного или керамического баллона, который обычно выполняет также роль корпуса и внутри него создается вакуум с разряжением  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  мм рт. ст. На рис. 6.5 показана конструкция наиболее часто применяемой двухэлектродной рентгеновской трубки с нагреваемым катодом и неподвижным анодом.

В вакуумированной колбе 8 располагаются катод 2 и анод 7, являющиеся двумя основными электродами трубки. Катод 2 является источником потока электронов, появляющихся при нагреве катода до температуры  $2100$ — $2500^\circ\text{C}$  нитью накала / за счет термоэлектронной эмиссии. Количество вылетающих электронов определяет ток анода и зависит от температуры катода, которая задается величиной тока нити накала. Фокусирующие электроды 3 и 5 создают электрическое поле специальной формы, собирающие электроны в узкий пучок. С этой же целью, используют элементы секционированных рентгеновских трубок, применяемых при повышенных (более 400 кВ) напряжениях на аноде, а в некоторых трубках дополнительную фокусировку осуществляются магнитным полем коротких катушек 4, по которым пропускают постоянный, электрический ток. Анод 7 изготовлен из медного цилиндра с приваренной, к его торцу мишенью 6 из вольфрама, графита или другого тугоплавкого материала и часто имеет систему 9 охлаждающих трубок для отвода теплоты жидкостью (ОХЛ), выделяемой при попадании электронов на анод. Между анодом и катодом приложено высокое постоянное напряжение  $U^*$  от десятков киловольт до нескольких мега-вольт. За счет большого положительного потенциала на аноде электроны ускоряются и подлетают к аноду с большой скоростью. При ударе о мишень 6 они тормозятся и создают рентгеновское излучение, выходящее через окно 10.

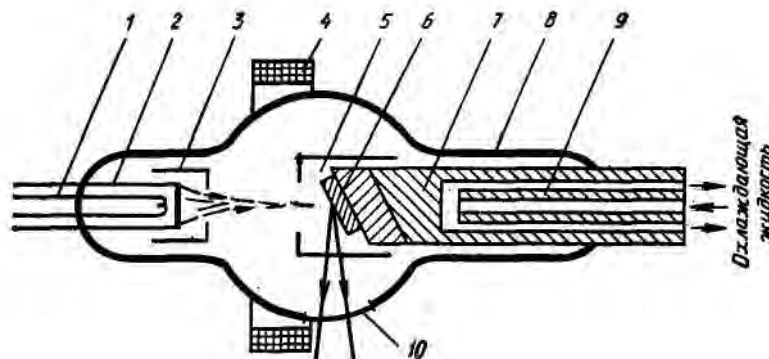


Рис. 6.5. Схема конструкции рентгеновской трубки: 1 — нить накала; 2 — катод; 3, 5 — фокусирующие электроды; 4 — фокусирующие катушки; 6 — мишень; 7 — анод; 8 — колба; 9 — охлаждающие трубки; 10 — выходное окно

В рентгеновских трубках в энергию излучения преобразуется небольшая часть энергии пучка (0,15% при  $U_a = 20$  кВ и 10% при  $U_a = 2$  МВ), а основная часть кинетической энергии электронов преобразуется в тепловую на аноде, причем область, куда попадают электроны, мала по размерам, что делает режим работы мишени весьма напряженным. Величина анодного напряжения определяет интенсивность и спектральный состав рентгеновского излучения. Интенсивность излучения, кроме того, прямо пропорциональна анодному току. Главной причиной, ограничивающей интенсивность излучения, величину энергии квантов рентгеновского излучения и минимальный размер фокусного пятна (область, из которого идет излучение), является сильный локальный и общий нагрев мишени анода, что может привести к их разрушению или расплав-

лению. Для повышения анодного напряжения и тока трубки принимают различные конструкции анодов (полый, вращающийся и др.) (рис. 6.6), а также систему его естественного или принудительного охлаждения. Чтобы уменьшить размеры фокусного пятна, которые определяют потенциальные возможности рентгеновского аппарата по разрешающей способности в пространстве, или получить пучок излучения определенной формы (кольцевой, в виде широкого пучка и др.), используют аноды с мишенями различной формы (рис. 6.6) и дополнительные фокусирующие устройства. Рентгеновское излучение, созданное мишенью, выходит сквозь баллон трубки наружу. Чтобы снизить потери рентгеновского излучения в материале колбы 8 трубки (стекло С47-1 толщиной 2—3 мм или керамика), особенно при малых анодных напряжениях, толщину материала в этой части делают минимально допустимой (до 1—1,5 мм) или делают окно из специального материала (бериллия). Бомбардировка мишени электронами приводит, кроме того, к появлению вторичных свободных электронов, отраженных или выбитых из мишени за счет вторичной электронной эмиссии и имеющих значительные скорости. Вторичные электроны, попадая на элементы конструкции рентгеновской трубки, приводят к снижению срока службы трубки, а значительная их часть снова попадает на анод и вызывает появление дополнительного рентгеновского излучения — афокального, возбуждаемого вне фокуса трубки и имеющего более широкий спектральный состав и угол излучения. Технические показатели некоторых рентгеновских трубок приведены в табл. 6.6.

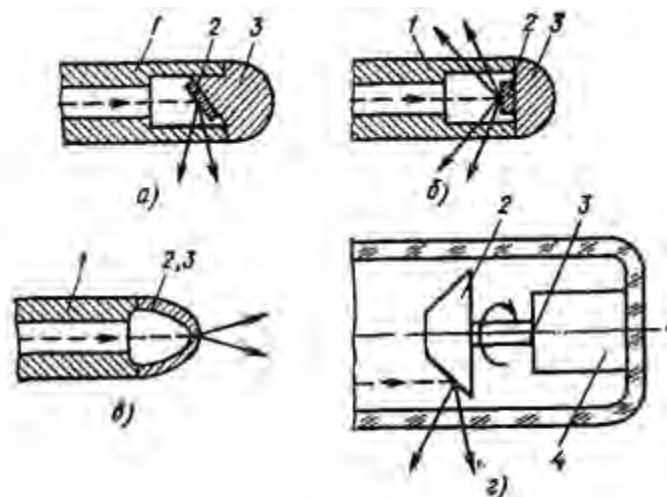


Рис. 6.6 Варианты изготовления анодов различной конструкции:  
а — острофокусный; б — панорамной; в — широкоугольной; г — с вращающимся анодом (1 — корпус, 2 — мишень, 3 — основание анода, 4 — двигатель)

В зависимости от назначения и электрических показателей конструкции рентгеновских трубок имеют некоторые особенности.

*Трубки с холодным катодом* отличаются меньшим потреблением электроэнергии, имеют меньшие габариты, массу и применяются в портативной аппаратуре неразрушающего контроля. Для получения потока свободных электронов в них используется явление автоэлектронной эмиссии. Для увеличения интенсивности и энергии квантов при больших напряжениях и токах анода используют *вращающийся анод*, механически закрепленный на валу асинхронного двигателя, располагаемого внутри баллона трубки.

Таблица 6.6

Тип рентгеновской трубки	Напряжение на аноде, кВ	Максимальный ток анода, мА	Интенсивность излучения, Р/с (на расстоянии, м)	Угол расхождения пучка излучения, град	Размер фокусного пятна, мм	Охлаждающая жидкость (расход, л/мин)	Особенности
1,5БПВ7-150	До 150	15	0,15 (0,5)	360×60	3	Вода (6)	—
1БДМ6-75	» 75	10	0,13 (3)	44	3	Масло	—
0,3БПВ7-150	40—75	2	0,83 (0,5)	55	0,3	охл. естественное	Острофокусная
1,5БПВ3-400	75—150	2	0,83 (0,5)	55	1,2—1,4	Вода (6)	—
БСМ-1	400	5	—	45	7	»	—
ИАЗ-250	30—45	0,45	—	—	0,04	Вода (5)	—
	250	—	—	—	2	—	Импульсная

В системе охлаждения анода также могут быть вентиляторы для его принудительного охлаждения. Для увеличения срока службы используют *двухфокусные* рентгеновские трубки.

Разрешающую способность рентгеновских трубок характеризуют размеры действительного фокусного пятна — сечения, в котором электронный поток пересекает анод, и технологический показатель: эффективное фокусное пятно — его проекция на плоскость, перпендикулярную выбранному направлению распространения рентгеновских лучей. В зависимости от размеров фокусного пятна рентгеновскую трубку называют острофокусной при значении фокусного пятна от 0,1 до 1,0 мм и микрофокусной если размеры менее 0,1 мм.

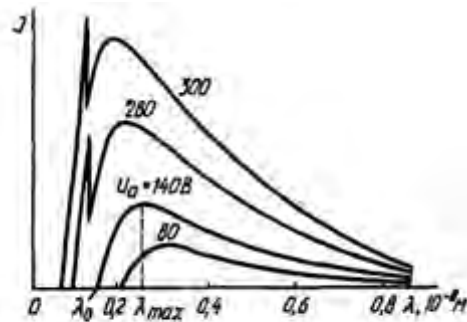


Рис. 6.7 Спектр рентгеновского излучения

*Импульсные* рентгеновские трубки служат для изучения динамических процессов и получения больших интенсивностей излучения в течение короткого времени. Вследствие малой длительности импульса удается получить большие анодные токи, например при напряжении 300 кВ и длительности импульса около 20 нс анодный ток достигает  $10^5$  А. Применение импульсных трубок позволяет иметь излучение большой интенсивности при небольших габаритах рентгеновской трубки и блока его питания, что особенно ценно при контроле в труднодоступных местах.

Интенсивность / возникающего рентгеновского излучения зависит от напряжения анод — катод  $U_{аи}$  прямо пропорциональна анодному току  $I_a$  и обычно задается на определенном расстоянии от трубки. Спектр рентгеновского излучения (рис. 6.7) содержит две составляющие: тормозное и характеристическое излучения. Тормозное излучение однозначно связано с напряжением  $U_{и}$  и имеет непрерывный спектр, а характеристическое получается при превышении определенного  $U_a$  и определяется физическими параметрами материала мишени. Энергия кванта рентгеновского излучения с минимальной длиной волны  $\lambda_0$  примерно равна напряжению  $U_a$ , а длина волны излучения  $\lambda_{max}$ , соответствующего максимуму излучения, в 1,3—1,5 раза больше минимальной длины  $\lambda_0$ . Характеристическое рентгеновское излучение возникает за счет изменения энергетического состояния атома материала мишени. Наибольшую интенсивность это

излучение имеет в сравнительно узком диапазоне длин волн и определяется сериями уровней энергии (К-, L-, М-серии). Интенсивность характеристического излучения также зависит от  $i_a$  и  $U_3$ , причем анодное напряжение должно превышать потенциал возбуждения соответствующей серии.

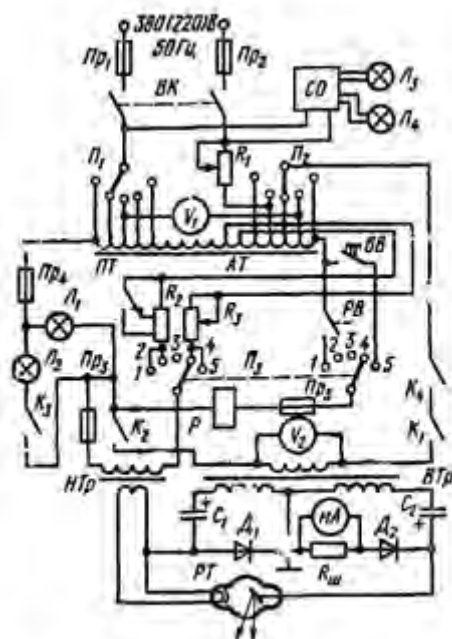


Рис. 6.8 Схема рентгеновского аппарата

В комплект типичного рентгеновского аппарата входят: рентгеновский излучатель (один или несколько), высоковольтный генератор (один или два), система охлаждения, пульт или шкаф управления, барабан с соединительным кабелем и вспомогательные устройства: штатив, тележка и т. п. Упрощенная электрическая цепь рентгеновского аппарата, показывающая соединение основных элементов, приведена на рис. 6.8.

Комплектация рентгеновского аппарата несколькими излучателями на базе различных трубок существенно расширяет его функциональные возможности: за счет различного вида трубок (панорамные, острофокусные и т. д.) и отличия их максимальных электрических показателей ( $h$ ,  $U_a$ ), определяющих интенсивность и спектр получаемого излучения (табл. 6.7).

Высоковольтный генератор предназначен для соединения постоянного (или пульсирующего) напряжения между анодом и катодом необходимой величины и тока питания нити накала рентгеновской трубки. В основе источника высокого анодного напряжения — повышающий трансформатор ВТР и выпрямитель.

Для выпрямления напряжения применяют различные схемы, часто для увеличения напряжения  $t_a$  на трубке используют схемы с удвоением напряжения (рис. 7.8). В качестве вентилей  $D_1$  и  $D_2$  используют вакуумные диоды (кенотроны) или полупроводниковые диоды. В связи с жесткими требованиями к конденсаторам (небольшие габариты при необходимой емкости и большом рабочем напряжении) фильтры выполняются простейшими — емкостными  $C_1$  и  $C_2$ . За счет этого постоянное напряжение близко к максимальному значению вторичного переменного напряжения, что позволяет получить излучение стабильной интенсивности и энергетического спектра. Изменение анодного напряжения производится на низкой стороне с помощью автотрансформатора АТ, подключенного к питающей сети.

Таблица 7.7

Тип рентгеновского аппарата	Конструктивное исполнение	Тип рентгеновской трубки	Анодное напряжение, кВ	Максимальный ток трубки, мА	Максимальная толщина просвечивания по стали, мм	Масса рентгеновского блока и аппаратуры, кг	Потребляемая мощность, кВт	Охлаждение
РУП-200-5-2	Переносной	0,7БПМЗ-200	200	5	50	85; 120	2	Водяное
РУП-150/300-10	Передвижной	2,5БПМУ-250	30—250	10	70	55; 1000	4	Масляное, водяное
ИРА-2Д	Портативный, импульсный	1,5БПВ7-150	30—150	10	—	—	—	—
		0,3БПВ6-150	10—150	2	—	—	—	—
РТД-1	Установка для спецлаборатории	Двухэлектродная с холодным анодом	350	—	20	15; 28	0,06	—
РАП-150/300-10	Передвижной*	1,5БПВ-12/13-1000	1000	—	160	—	—	Азот + фреон
		1,2-3БПМ-300	300	10/4	80	—	—	Масляное, водяное
		1,5ПВ7-150	30—150	10	70	—	—	—
		ГБПВ-15-100	100	2—10	—	—	—	—
		0,3БПВ6-150	10—150	2	70	—	—	—

\* Стабилизация напряжения — 1%, реле ассоциации РЭП-1.

Контрольно-регулирующие приборы служат для установки требуемого режима просвечивания ( $U_a$ ,  $h$ ) и для получения информации о работе аппарата.

В комплекте рентгеновского аппарата имеются следующие измерительные приборы: вольтметр для измерения анодного напряжения  $U_a$ , миллиамперметр для измерения тока трубки  $I_t$ , реле времени для отсчета времени экспозиции, приборы для измерения (индикации) температуры и давления охлаждающего вещества. Контроль за работой аппарата производится по показаниям измерительных приборов, а также по индикаторным лампочкам. Режимы работы аппарата устанавливаются с помощью переключателей и реостатов, большая часть которых из условий безопасной работы включена на стороне низкого напряжения ( $ВВ$ ,  $Пх$ — $Пз$ ) или заземляется ( $МА$ ).

Защита электрических цепей осуществляется плавкими предохранителями ( $Пр1$  —  $Прг$ ), реле и блокировкой, снимающей напряжение при открывании аппарата.

Питающее сетевое напряжение через предохранители  $Прп1$  //  $p_2$ , выключатель сети  $ВК$ , переключатель  $/7i$  и реостат  $/7i$  подводится к обмотке автотрансформатора  $АТ$ . О



подключении аппарата к сети сигнализирует свечение лампы  $Ji$  (зеленый цвет). С помощью переключателя  $n_i$  и реостата  $/\rho_i$  корректируется (грубо и плавно) влияние изменений напряжения питающей сети, что обеспечивает правильную работу всех блоков рентгеновского аппарата. Контроль за правильностью установки осуществляется по показаниям вольтметра  $Vi$ . Переключатель  $Я_2$  установлен для регулировки анодного напряжения рентгеновской трубки. Напряжение с автотрансформатора  $AT$  поступает на трансформатор накала  $HTP$  и через контакты  $A_i$  и  $K_2$  на высоковольтный трансформатор  $BTr$ . Ток в цепи накала трубки регулируется с помощью реостата  $R$  или резистора  $Я_2$  с отводами на первичной стороне понижающего трансформатора  $HTp$ . Высоковольтный трансформатор является повышающим и определяет анодное напряжение  $U_A$ . Выпрямительное устройство собрано по схеме удвоения напряжения на диодах  $D\%$  и  $D_2$  и конденсаторах  $di$   $C\%$ , которые заряжаются до максимального значения напряжений на обмотках высоковольтного трансформатора  $BTr$ . Анодный ток рентгеновской трубки измеряется миллиамперметром  $mA$ , который из соображений техники безопасности зашунтирован резистором  $R_m$  и заземлен, что позволяет размещать его на передней панели управления.

Переключатель  $/7_3$  управляет режимом работы рентгеновской трубки. В положении 3 рентгеновская трубка отключена. Два режима (положения переключателя 2 и 4) являются подготовительными, когда включен накал рентгеновской трубки, поскольку анодное напряжение надо подавать при прогревом катода. При установке переключателя  $11\%$  в положения / и 5 на трубку подано высокое напряжение и производится экспозиция. В положении / устанавливается один из стандартных режимов по цепи накала (резистор  $/\rho_2$ , переключатель  $Я_1$ ), а выдержка осуществляется с помощью реле времени  $PB$ . Ток накала в положении 5 переключателя устанавливается оператором путем регулировки сопротивления реостата  $R_2$ , а выдержка производится также оператором путем замыкания контактов кнопкой  $BB$ . Высокое напряжение подается при срабатывании реле  $P_i$  и замыкании реле контактов  $K_i$  и  $K_2$ . Одновременно с этим замыкается контакт  $K_3$ , включающий лампу  $L_2$  (красный цвет), которая сигнализирует о работе трубки в режиме излучения. Основные электрические цепи защищены плавкими предохранителями  $/7_{p1}$  —  $Pr_6$ . Кроме того, в цепь подачи высокого напряжения последовательно включены контакты  $K_i$ , отключающие эту цепь при перегреве или неправильной работе системы охлаждения.

Регулирующие устройства, контрольно-измерительные блоки и элементы монтируются в виде пульта или шкафа (стойки) управления, а часть их элементов может быть сделана выносными (лампы, сигнализации, сетевой щит).

Охлаждение анода рентгеновских трубок производится чаще всего жидкостью, протекающей через систему трубок в медном аноде. При замкнутой системе охлаждения используют масло или дистиллированную воду, перекачиваемые насосом через трубки в полости анода. В более простых технических рентгеновских аппаратах анод охлаждается проточной водой. В системе охлаждения смонтированы датчики температуры и давления жидкости, связанные с соответствующими индикаторами и электрическими цепями и сигнализирующие или отключающие аппарат при достижении предельных значений.

Как уже упоминалось, помимо рентгеновских трубок тормозное излучение можно получить путем облучения мишеней из специально подобранных материалов с помощью потоков элементарных частиц больших энергий. Этот способ создания тормозного излучения применяется при контроле объектов большой толщины, когда необходимо иметь излучение с квантами больших энергий (1—30 МэВ) и возникают технические сложности в создании рентгеновских трубок.

## 6.4. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Длина волны, характеризующая ионизирующие излучения, оказывается соизмеримой с межатомными расстояниями, поэтому эти излучения взаимодействуют с атомными ядрами и электронами оболочек атома, что отличает этот процесс от рассмотренных ранее видов излучений и определяет более сложный его характер. Как уже отмечалось, взаимодействие ионизирующих излучений с веществом приводит к появлению тепловых, ионизационных, электрических, люминесцентных, фотохимических и биологических эффектов. Разные виды ионизирующих излучений имеют и общие черты результатов взаимодействия. Падающие на вещество кванты излучения могут быть рассеяны или поглощены, а также могут вызывать появление новых свободно движущихся частиц или фотонов. Процессы взаимодействия ионизирующих излучений с веществом носят случайный (вероятностный) характер, что необходимо учитывать при организации неразрушающего контроля. Очень небольшая часть квантов первичного излучения может вообще не взаимодействовать с материалом объекта, что зависит от атомного номера вещества и энергии кванта. Обобщая все процессы взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, можно отметить следующие его результаты, важные для целей радиационного контроля качества.

1. Поглощение первичного излучения ( $J_0$ ), выражающееся в уменьшении его интенсивности приблизительно по экспоненциальному закону так, что интенсивность излучения после прохождения объекта с толщиной  $b$  будет равна

$$J = J_0 \exp(-\mu b),$$

где  $\mu$  — линейный коэффициент поглощения ( $1/\text{м}$ ), который зависит от плотности вещества, его состава и энергии фотонов.

2. Появление новых видов излучений, которых не было в первичном, падающим от источника излучении, обычно с меньшей энергией квантов и с различным направлением его распространения, вплоть до обратного.

3. Расширение угла, в котором распространяется излучение, прошедшее сквозь объект («широкий пучок»), по сравнению с углом, в котором распространялось первичное излучение («узкий пучок»). Это явление усредненно учитывается при анализе излучения, попадающего на индикатор или первичный измерительный преобразователь, множитель больше 1, называемым «фактором (коэффициентом) накопления».

4. Полное поглощение излучения при определенной толщине объекта из данного материала, что является принципиальным ограничением радиационного метода контроля качества.

Рентгеновское и  $\gamma$ -излучение имеют близкую физическую природу, взаимодействуют в форме электромагнитных колебаний, отличающихся длиной волны (энергией кванта) или происхождением фотонов, поэтому их взаимодействие с веществом происходит однотипно в виде трех процессов: фотоэлектрического эффекта, рассеяния и образования пар «электрон—позитрон».

**Фотоэффект** заключается в том, что при получении электроном оболочки атома от фотонов излучения энергии большей, чем его энергия связи в атоме, он покидает атом со скоростью, соответствующей избыточной энергии фотона, переходя в зону проводимости.

Если фотон освободил электрон с внутренних оболочек атома, место этого электрона занимают электроны с внешних оболочек, испуская при этом излучение, называемое характеристическим и определяемое номерами орбит и номер химического элемента атома. Направление вылета фотоэлектронов при энергии фотонов менее 0,5 МэВ перпендикулярно направлению движения фотона, а при увеличении энергии фотонов приближается к направлению излучения. Фотоэффект преобладает над другими видами взаимодействия при низкой энергии падающего излучения и при большом атомном но-

мере вещества. Он характеризуется линейным коэффициентом фотоэлектрического поглощения Цф (1/м), который уменьшается с повышением энергии кванта излучения и возрастает с увеличением атомного номера вещества. При определенных значениях энергии квантов (длины волны) падающего излучения происходят резкие изменения Цф > Н зываемые скачками поглощения, соответствующие достижению энергетическ1 уровней электронов: один скачок — в К-серии, три — в L-серии, пять — в М-серии и т. д. Скачки поглощения имеют место, когда длина волны падающего кванта становится несколько меньше длины волны фотонов соответствующе серии.

**Рассеяние** рентгеновского и у-излучения происходит в двух формах: классическое (когерентное) и комптоновское (некогерентное) которые характеризуются линейным коэффициентом ослаблены за счет рассеяния  $\mu_p$ .

В случае падения на вещество длинноволнового излучения пр;  $\lambda > 0,03$  нм, когда энергия первичного фотона оказывается соизмеримой с энергией связи электрона с ядром, осуществляется когерентное рассеяние. Первичные фотоны вызывают вынужденные колебания слабо связанных с атомами электронов, которые при этом сами излучают вторичные рассеянные у-кванты той же длины волны, но в другом направлении (максимум — в прямом и обрат ном, минимум — в перпендикулярном). Таким образом, когерентное рассеяние фактически состоит в переизлучении полученной энергии в виде фотона с той же частотой, двигающейся в произвольном направлении, но прямое и обратное направления являются предпочтительными. Линейный коэффициент ослабления излучения за счет когерентного рассеяния связан с плотностью вещества и равен

$$\mu_{p1} = 0,402\rho \frac{Z}{A},$$

где  $Z$ — порядковый номер элемента;  $A$  — атомная масса элемента. Для большинства веществ, кроме водорода,  $Z/Am < 0,5$ , поэтому если первичные у-кванты имеют длину волны менее 0,03 нм, то начинают проявляться не только их волновые свойства, но и свойства как частиц, сталкивающихся подобно столкновению двух упругих шаров. При комптоновском рассеянии электрону передается лишь часть энергии первичного кванта. В результате появляется вторичный электрон, движущийся под углом от 0 до 90° к направлению первичного кванта, а непоглощенная им часть энергии кванта будет преобразована в меньшую энергию вторичного фотона, который может распространяться в любом направлении. Появившийся вторичный фотон также может взаимодействовать с другими электронами или атомами, что вызывает появление многократно рассеянных фотонов с различной энергией (длиной волны), меньшей, чем у первичного фотона, пока не произойдет их полного поглощения, обычно за счет фотоэффекта. Комптоновское рассеяние является основным процессом взаимодействия излучений с веществом в широком интервале энергией излучения. Длина волны  $\lambda_n$  (нм) вторичных фотонов зависит от угла рассеяния  $\varphi$ :

$$\lambda_n = \lambda_0 + 4,86 \cdot 10^{-3} \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

где  $\lambda_0$ — длина волны, соответствующая первичному кванту.

Интенсивность вторичного излучения в виде фотонов также зависит от направления их выхода и характеризуется диаграммой рис. 6.9, где параметр  $K_s$  равен

$$K_s = \frac{\hbar \nu_0}{m_0 c^2},$$

где  $\nu_0$  — частота первичного кванта;  $m_0$  — масса покоя электрона.

Кинетическая энергия, возникающая при некогерентном рассеянии, зависит также от угла выхода вторичного фотона  $\theta$  и павна

$$W_k = \hbar \nu_0 \frac{K_s (1 - \cos \varphi)}{1 + K_s (1 - \cos \varphi)},$$

а угол  $\theta$ , под которым вылетает электрон отдачи, связан с углом  $\varphi$  соотношением

$$\operatorname{tg} \psi \approx \frac{1}{1 - (\lambda_B/\lambda_0)} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}$$

Суммарный коэффициент ослабления при некогерентном рассеянии, учитывающий передачу энергии вторичному электрону и появление нового кванта, можно определить по формуле, справедливой для  $\lambda_B > 0,008$  нм:

$$\mu_{p2} = \frac{\mu_{p1}}{1 + 2K_B}$$

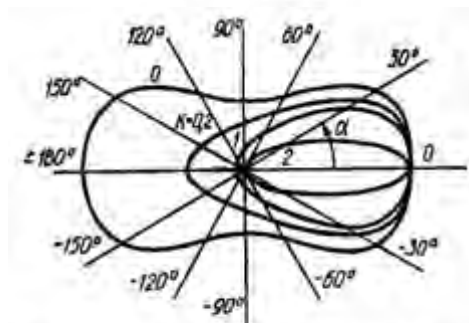


Рис. 6.9 Диаграмма распределения интенсивности вторичного излучения

Для образования пары электрон — позитрон требуется, чтобы энергия первичного кванта превышала энергию покоя электрона и позитрона ( $h\nu_a = 1,022$  МэВ). В связи с этим такое взаимодействие характерно для высокоэнергетических излучений.

Образовавшиеся позитрон и электрон двигаются с такой скоростью, чтобы их кинетическая энергия была равна разнице между энергией первичного кванта и энергией покоя пары. Линейный коэффициент поглощения  $\mu_{п}$  за счет образования пары электрон — позитрон  $\mu_{п}$ , растет при увеличении энергии квантов излучения и может быть найден из приближенного выражения

$$\mu_{п} = K_{эп} \frac{Z^2}{A} \rho (h\nu_0 - 1,022).$$

Электрон и позитрон могут двигаться в веществе и взаимодействовать с другими атомами. При встрече электрона с позитроном они могут нейтрализовать

друг друга — аннигилировать и создать два кванта, движущихся в противоположных направлениях.

Если  $\gamma$ -кванты обладают очень большой энергией (несколько десятков мегаэлектронвольт), они могут приводить атомы вещества в возбужденное состояние. В результате из ядра вылетают протоны или нейтроны, а в некоторых случаях происходит деление тяжелых ядер на два осколка.

Рассмотренные явления имеют место, например, падающие мощные кванты  $\gamma$ -излучения вызывают появление всех отмеченных эффектов, а возникшие вторичные движущиеся электроны, позитроны и фотоны могут вызывать появление новых частиц и фотонов и т. д. Из-за многократного взаимодействия частицы и фотоны в итоге движутся в любых направлениях, что и ведет к значительному расширению сектора, в котором выходит вторичное излучение — появляется «широкий пучок». В результате общий линейный коэффициент ослабления излучения определяется за счет всех процессов взаимодействия:

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_p + \mu_{п}$$

и его зависимость от энергии первичных квантов падающего излучения и состава вещества носит сложный характер.

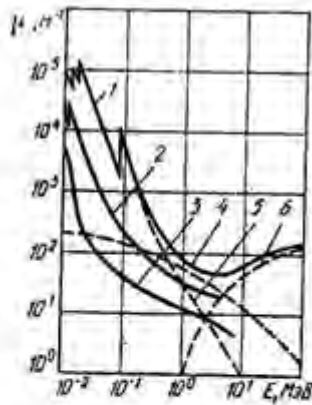


Рис. 6.10 Зависимость линейного коэффициента поглощения от энергии монохроматического излучения:  
 1 — свинец; 2 — железо; 3 — алюминий; 4 — от фотоэффекта; 5 — от рассеяния; 6 — за счет образования пары электрон — позитрон

На рис. 7.10 показан вид зависимостей различных коэффициентов поглощения от энергии монохроматического излучения. Значения линейного коэффициента ослабления для свинца приводятся в литературе в виде достаточно подробных таблиц по отдельным составляющим (цфс, рре, фпе) или графиков. Используя их, нетрудно приближенно рассчитать линейный коэффициент ослабления для большинства химических элементов как сумму составляющих по выражению

$$\mu \approx \frac{\rho}{11,3} \left( \mu_{\text{фс}} \frac{Z^4}{82^4} \frac{207}{A} + \mu_{\text{рр}} \frac{Z}{82} \frac{207}{A} + \mu_{\text{пс}} \frac{Z^2}{82^2} \frac{207}{A} \right).$$

Если вещество, с которым взаимодействует ионизирующее излучение, имеет сложный химический состав, то коэффициенты поглощения находятся для каждого химического элемента, а потом суммируются. Аналогично поступают и в том случае, если падающее на объект излучение имеет широкий спектр, который разбивают на ряд спектральных участков, где линейные коэффициенты поглощения и интенсивность излучения примерно постоянны, а затем суммируют интенсивности вторичных излучений. Для интегральной оценки условий контроля часто заменяют излучение сложного спектра многоэнергетическим с эффективной энергией квантов излучения  $E_{\text{эф}}$  и эффективным линейным коэффициентом  $\mu_{\text{эф}}$  и ведут расчет.

Следует отметить также, что после прохождения слоя материала спектральный состав немнозоэнергетического излучения изменяется, так как кванты различной энергии поглощаются по-разному. Обычно фотоны низких энергий затухают быстрее, поэтому эффективный линейный коэффициент ослабления увеличивается, а прошедшее излучение становится по спектральному составу более жестким, это используется в целях фильтрации. При анализе интенсивности прошедшего излучения или мощности экспозиционной дозы в широком пучке следует учитывать, что часть квантов, рассеянных вторично, также попадает на индикатор или первичный измерительный преобразователь и увеличивает мощность экспозиционной дозы. Это увеличение учитывается умножением на коэффициент накопления или путем уменьшения линейного коэффициента ослабления на  $\text{ц.ш} < \text{ц}$ .

Поток движущихся электронов (р-излучение) проникает в вещество на значительно меньшее расстояние, чем рентгеновское и  $\gamma$ -излучение, и быстро поглощается веществом. Взаимодействие р-излучения с веществом происходит путем упругого и неупругого рассеяния, торможения электронов в электрическом поле атомов. Упругое рассеяние имеет место, когда электроны взаимодействуют с атомами или с электронами их оболочек, и состоит в изменении направления движения электрона без изменения общей

энергии столкнувшихся частиц. Отклонение электронов от начального направления движения возможно на любой угол, но с большей вероятностью электроны отклоняются на малые углы (подобно кривым рис. 6.9 при  $K\epsilon > 0,3$ ). Упругое рассеяние тем больше, чем больше атомный номер вещества. При неупругом рассеянии, происходящем, в основном, при взаимодействии р-частиц с орбитальными электронами атома, часть энергии р-частиц передается орбитальному электрону, который возбуждается и иногда покидает атом. В результате неупругого рассеяния появляется ионизация вещества и испускание возбужденными атомами характеристического излучения. Потери энергии движущихся электронов с постепенным снижением их скорости до тех пор, пока их энергия не достигнет теплового уровня. Минимум потерь наблюдается для р-частиц с энергией примерно 1 МэВ. Кроме того, пролетая мимо атомного ядра вещества, движущиеся электроны тормозятся его электрическим полем и теряют энергию в виде тормозного электромагнитного излучения. Эти потери начинают быстро расти при повышении энергии р-частиц выше 1 МэВ. Сравнительно тонкий слой вещества, определяемый как толщина насыщения или максимальная длина пробега.

Для алюминия максимальная величина пробега 0-частиц может быть найдена из приближенных выражений (см):

$$L_{\max \text{Al}} = \begin{cases} 0,196 \frac{A}{Z} \rho E_{\max}^{1,38} & \text{при } E_{\max} < 0,8 \text{ МэВ,} \\ \rho (0,261 E_{\max} - 0,064) & \text{при } E_{\max} > 0,8 \text{ МэВ} \end{cases}$$

$L \approx L_{\text{Al}} \frac{\rho}{\rho_{\text{Al}}}$

Число поглощенных и рассеянных р-частиц при толщине ело контролируемого объекта, меньшей  $L_{\max}$ , зависит от толщины и материала слоя, что используется при создании толщиномеров тонки; изделий в виде листа и покрытий. Излучения моноэнергетическое и широкого спектрального состава по-разному затухают в веществе. В случае широкого спектра зависимость затухания от толщины слой вещества близка к экспоненциальной, а для моноэнергетического излучения — близка к прямой линии. Полностью затухающее в небольшом слое вещества р-излучение при большой активности источника и энергии частиц тем не менее может представлять определенную опасность из-за возникающего тормозного излучения.

Поток а-частиц, проходя через слой вещества, так же как поток р-частиц, довольно быстро затухает. В веществе а-частицы испытывают упругие и неупругие столкновения, в результате чего изменяется направление движения, уменьшается интенсивность и излучение полностью затухает.

Упругое рассеяние а-частиц происходит при столкновениях с атомом в целом—его электронными оболочками или ядром. Энергия при этом обычно не теряется, а изменяется лишь на небольшой угол направление движения а-частицы, но в результате многократных упругих столкновений угол может достигать 90 и даже 180°. Неупругие столкновения, когда а-частицы воздействуют на внешние электроны атомов, молекул и электрическое поле а-частицы ускоряет их, приводят к ионизации вещества, возбуждению атомов и молекул, а в некоторых случаях и к диссоциации молекул, причем а-частицы теряют часть своей энергии.

Длина пробега а-частиц в веществе даже для моноэнергетического излучения распределяется по вероятностному закону Гаусса, поэтому их пробег характеризуется средней длиной пробега, соответствующей максимуму кривой, и которая приближенно может быть найдена из выражения (см)

$$\bar{L}_a = 10^{-4} \frac{A \sqrt{E^3}}{\delta \sqrt{Z^2}}$$

Поскольку длина пробега а-частиц невелика (при энергии  $E = 5$  МэВ средняя длина пробега в воздухе составляет 3,7 см, а в алюминии — 0,05 мм), этот вид излучения в

неразрушающем контроле применяется редко.

Нейтроны не имеют электрического заряда, поэтому их взаимодействие происходит с атомными ядрами, а вероятность их встречи зависит от энергии нейтрона и в гораздо большей степени, чем для других видов излучений, химического состава и структуры вещества. При движении нейтрона около ядра или при попадании его в ядро нейтрон может быть упруго или неупруго рассеян, что изменяет направление его движения или энергию, кроме того, могут излучаться при этом  $\gamma$ -кванты. Попавший в ядро нейтрон может быть захвачен ядром, что вызовет ядерную реакцию с образованием нового изотопа, испускание  $\alpha$ -частицы или другого излучения. Величиной, характеризующей процесс взаимодействия нейтронов с веществом, является эффективное сечение рассеяния или поглощения. Оно сложным образом зависит от химического состава вещества и энергии нейтронов (рис. 6.11) с наличием ряда экстремумов. Поэтому при организации радиационного контроля качества промышленной продукции необходимо тщательно учитывать возможный состав материала контролируемого объекта и энергетический спектр нейтронного излучения.

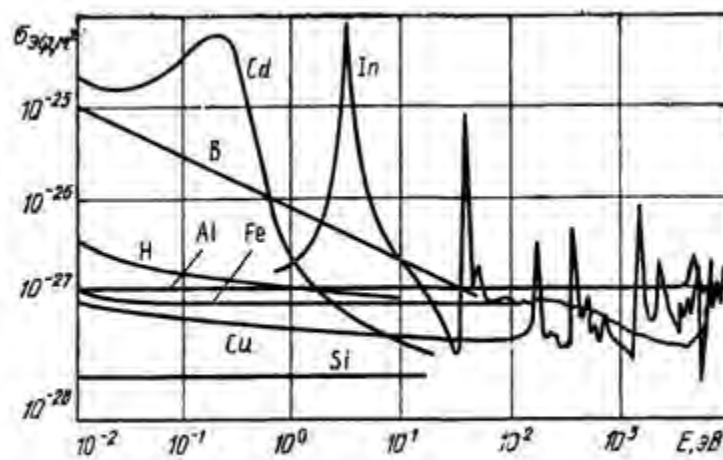


Рис. 6.11 Сечение взаимодействия нейтронов с разными веществами

В зависимости от энергии  $E$  (скорости движения) нейтроны условно делят на несколько групп. Ультрахолодные и холодные нейтроны отличаются аномально большой проникающей способностью сквозь поликристаллические вещества. При взаимодействии с большинством химических элементов они испытывают рассеяние, причем для определенных энергий проявляются *резонансные явления*, особенно у элементов с тяжелыми ядрами. Исключения составляют ядра легких элементов  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$  и  $^{14}\text{N}$ , у которых сечение взаимодействия чрезвычайно велико в широком диапазоне энергий нейтронов и преимущественным процессом взаимодействия являются экзотермические ядерные реакции с поглощением нейтронов и вылетом  $\alpha$ -частиц или протонов и  $\gamma$ -квантов. Тепловые нейтроны находятся в термодинамическом равновесии с атомами и молекулами окружающего вещества и могут диффундировать через слабопоглощающие среды. Встречаясь с атомами различных элементов, они испытывают рассеяние или захватываются в результате реакции радиационного захвата с излучением  $\gamma$ -кванта.

Таблица 6.8

Группа нейтронов	Энергия, эВ	Особенности
Ультрахолодные	$< 10^{-7}$	Характерно слабое взаимодействие
Холодные Тепловые	$10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-3} - 0,1$	
Надтепловые	0,1—500	Находятся в термодинамическом равновесии
Промежуточные	500— $2 \cdot 10^5$	
Быстрые	$0,2 \cdot 10^6 - 20 \cdot 10^6$	Происходят ядерные реакции
Сверхбыстрые	$> 20 \cdot 10^6$	

Сечения взаимодействия для тепловых нейтронов сильно и нерегулярно изменяются от элемента к элементу и даже для разных изотопов одного и того же элемента. Так, например, сечения поглощения легких элементов  $^9\text{Be}$  и  $^{10}\text{B}$  или изотопов  $^2\text{H}$  и  $^3\text{H}$  отличаются в  $10^5$ — $10^6$  раз. В этом же диапазоне проявляется и влияние химического строения вещества, поскольку энергия химической связи атомов соизмерима с энергией тепловых нейтронов. Надтепловые и более быстрые нейтроны проходят сравнительно свободно сквозь кадмий, который задерживает нейтроны с меньшими скоростями. Промежуточные и быстрые нейтроны взаимодействуют с атомными ядрами в виде упругого и неупругого рассеяния, а иногда возникают и пороговые ядерные реакции. В зависимости от состава материала быстрый нейтрон отдает при упругом рассеянии различную энергию. Так, ядрам железа отдается примерно 3,5% энергии, углерода — 16, водорода — 50%. При неупругом рассеянии нейтрон передает атому до 90% своей энергии, которая идет на возбуждение ядра, в результате чего ядро испускает нейтроны с иной энергией и  $\gamma$ -кванты. Резонансное поглощение в области больших энергий проявляется все слабее. Сверхбыстрые нейтроны производят в веществе ядерные реакции с вылетом большого числа частиц и  $\gamma$ -квантов. Нейтроны с энергией более 300 МэВ взаимодействуют с ядром атома все слабее (прозрачность ядер) и происходят ядерные реакции с испусканием нескольких осколков и от бомбардируемых ядер.

Применение нейтронного излучения дает существенные преимущества при неразрушающем контроле неоднородных изделий, содержащих слои или части из различных химических элементов, особенно при сочетаниях легких и тяжелых элементов.

## 6.5. Индикаторы ионизирующего излучения

Для преобразования распределения интенсивности или суммарной дозы ионизирующего излучения, полученного после взаимодействия с контролируемым объектом, в видимое могут быть использованы следующие индикаторы: фотопленка, ксерорадиографическая пластина, радиолюминесцентные индикаторы, электронно-оптические преобразователи и рентгеновидиконы. Универсальным индикатором, используемым в наиболее широком спектре излучений, является фотопленка. Она имеет наибольшее применение в настоящее время в неразрушающем контроле качества. Рентгеновидиконы могут быть использованы в качестве индикаторов в сочетании с радиоэлектронными блоками обработки электрических сигналов. Вместе с тем рентгеновидиконы могут применяться как преобразователи рентгеновского излучения в электрические сигналы и служат основой для построения автоматизированных систем контроля. Рассмотрим особенности индикаторов ионизирующих излучений, применяющихся для контроля качества промышленной продукции.

**Фотопленка** использует фотохимический эффект взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, широко применяется для дефектоскопии и изучения внутреннего строения контролируемых объектов. Она обладает свойством интегрировать падающее излучение, причем при правильной организации контроля легко получать де-



фектоскопическую чувствительность не хуже 1%. Изображение на фотопленке характеризует величина, называемая *степенью почернения*:

$$D_n = \lg(\Phi/\Phi_0),$$

где  $\Phi$ ,  $\Phi_0$  — световой поток, падающий на негатив или прошедший сквозь него. Степень почернения фотопленки (плотность негатива) зависит от произведения мощности экспозиционной дозы  $D$ , на время облучения — экспозиции  $U$  (рис. 6.12) или от произведения интенсивности ионизирующего излучения на время экспозиции ( $Jt_3$ ), причем имеется область, где кривая  $D_n(KJt_3)$  близка к прямой.

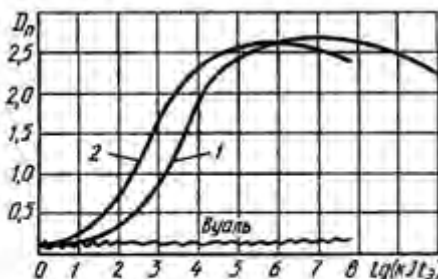


Рис. 6.12 Зависимость степени почернения от экспозиционной дозы:  
1 — без экрана; 2 — с экраном

В этом случае контрастность изображения, определяемая наклоном кривой на рис. 6.12, постоянна:

$$S_n = K_n \frac{dD_n}{d(Jt_3)}.$$

Области малых и больших экспозиций являются нерабочими, поскольку при малых экспозициях степень почернения соизмерима с собственной вуалью пленки серого цвета, появляющейся за счет разных причин, а при больших — наступает соляризация пленки и степень почернения попадает в область насыщения. При использовании флуоресцирующих или металлических экранов чувствительность пленки возрастает (рис. 6.12). Чувствительность пленок обычно определяется величиной, обратной дозе облучения, необходимой для получения определенной степени почернения. В большинстве случаев принято определять чувствительность по величине, обратной экспозиционной дозе, выраженной в рентгенах, при которой степень почернения на определенное значение (0,85) больше плотности вуали на пленке если используется излучение рентгеновской трубки при напряжении на аноде 80 кВ, и обозначать  $S_{0,85}$ .

Фотопленки, применяемые для радиографии, выполняют на прозрачной основе, а с целью увеличить плотность негатива эмульсию наносят на основу с двух сторон, что позволяет в 2 раза снизить время экспозиции. Чувствительность фотопленки  $S^*$  равна величине, обратной дозе излучения в рентгенах, необходимой для получения определенной плотности почернения. Спектральную чувствительность фотопленок (фотослой — бромистое серебро) показывает рис. 6.13. Максимум чувствительности достигается при энергии квантов излучения около 45 кэВ ( $\lambda_a \sim 80$  кВ).

Чтобы снизить время экспозиции, используют усиливающие (металлические или флуоресцирующие) экраны [1, 2, 211], которые позволяют снизить время экспозиции от 2 до 15 раз. Усиливающие экраны преобразуют падающее рентгеновское или  $\gamma$ -излучение в Другой вид ( $\rho$ -излучение — металлический экран), который в большей степени, чем первичное излучение, воздействует на фотоэмульсию. Применение экранов из специально подобранных материалов расширяет область применения фотопленок по спектральному диапазону излучений.

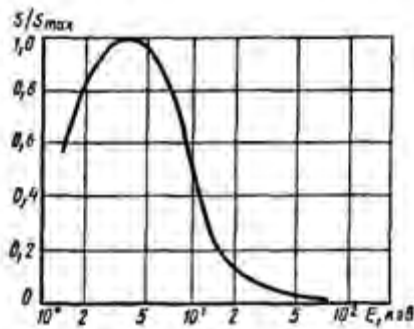


Рис. 6.13 Спектральная чувствительность фотоленки от энергии квантов

Основные характеристики некоторых фотоленок, применяемых для радиографии, даны в табл. 6.9. После экспонирования фотоленки должны быть обработаны раствором химикалий. Обработка фотоленок содержит следующие операции: проявление — преобразование скрытого фотоизображения в видимое; промежуточная промывка водой от проявителя; фиксирование изображения — удаление из раствора остатков невосстановленного бромистого серебра для получения светлого и прозрачного изображения; окончательная промывка для удаления остатков фиксажа; сушка проявленной пленки. Фотообработка занимает 0,5—1 ч времени. При большом количестве снимков фотообработку производят с помощью автоматических (АФ-40) и полуавтоматических устройств.

Таблица 6.9

Тип пленки	Чувствительность пленки $S_{0,85}$		Разрешающая способность пленки, линий/мм	Тип пленки	Чувствительность пленки $S_{0,85}$		Разрешающая способность пленки, линий/мм
	без экрана	с экраном			без экрана	с экраном	
PM-1	18	300	73—78	PT-2*	25	350	73—78
PM-2	20	400	73—78	PT-3	20—30	35—45	111
PM-3	12	300	78	PT-4	9—12	—	134
PT-1*	50—60	100	68—73	PT-5**	3—5	13	178

\* Контроль грубых дефектов.

\*\* Особомелкозернистая.

В неразрушающем контроле начинают использоваться цветные фотоленки (например, фотоленка РЦ-2), имеющие больше фотоэмульсионных слоев, чем черно-белые. Разные слои фотоэмульсии цветной фотоленки имеют различную чувствительность и спектральную характеристику. Поэтому получаемое цветное изображение несет больше информации о контролируемом объекте. Кроме того, поскольку человек различает оттенки света лучше, чем перепады яркости, облегчается расшифровка получаемого изображения. Цветные фотоленки дают возможность проводить радиационный контроль качества изделий с большим перепадом толщин и плотностей материала контролируемого объекта, что увеличивает достоверность контроля.

Фотоленку просто и удобно использовать при проведении неразрушающего контроля в мелкосерийном и единичном масштабе, а его результаты легко сохранять долгое время. Применение фотоленки обеспечивает высокую дефектоскопическую чувствительность при различной толщине полуфабрикатов и изделий. Недостатками применения фотоленки в неразрушающем контроле, как индикаторе излучения, являются длительность процесса ее обработки («мокрый» способ) и использование драгоценного металла — серебра. В связи с этим ведутся усиленные исследования возможностей, других материалов в качестве регистраторов ионизирующих излучений, используются ксерорадиографические пластины и радиоскопические методы контроля.

Ксерорадиографическая пластина (ксеропластина) использует электрический эффект воздействия ионизирующего излучения. Ксеропластины состоят из электропроводящего основания (латунь, алюминий) и тонкого (50—300 мкм) фотослоя, чаще всего из аморфного селена (полупроводник). Изображение на ксеропластине получается в результате следующих операций.

Перед экспозицией фотослой ксеропластины равномерно заряжают до напряжения 0,6—1 кВ, а затем размещают ее относительно контролируемого объекта так же, как фотопленку, обращая слой селена к контролируемому объекту.

Во время экспозиции ионизирующее излучение от контролируемого объекта, попадая в материал полупроводникового фотослоя ксеропластины, частично разряжает его, причем тем больше, чем больше интенсивность падающего ионизирующего излучения. Полученное изображение в виде электростатического рельефа превращают в видимое (проявляют), опыляя фотослой заряженным сухим мелкодисперсным порошком (КСЧ-5, ПСЧ-1, ПСЧ-74 или др.) с размером частиц не более 10 мкм. Количество оседающего порошка зависит от электрического потенциала в точках экспонированного фотослоя ксеропластины, что создает видимое изображение, которое сразу же может анализироваться оператором. Однако для удобства расшифровки результатов и для сохранения их полученное изображение переносят на бумагу и фиксируют его, хотя при переносе на бумагу разрешающая способность снижается в 1,5—2 раза.

Процесс получения видимого изображения от заряженной пластины до получения изображения на бумаге (без учета времени экспозиции) длится менее минуты, что является большим преимуществом ксерорадиографии перед фотографическим способом. Разрешающая способность ксерорадиографии достигает 20 линий/мм. Ксеропластины могут быть изготовлены также с усиливающим экраном в виде слоя олова между основанием и фотослоем. Основные процессы при ксерорадиографии — зарядка пластин, проявление изображения порошком, перенос изображения на бумагу, его закрепление, а также очистка пластин — производятся с помощью ксеро-радиографических установок ЭРГА-М, ЭГУ-73 и др.

Применение ксеропластин позволяет получить большую производительность контроля при высоком качестве изображений и локального контраста, что особенно эффективно при дефектоскопии. Недостатками ксерорадиографического метода является: ограничение размеров зоны проведения неразрушающего контроля размерами ксеропластины, возможность появления ложных дефектов за счет повреждения поверхности пластин, особенно в конце срока службы (около 1000 экспозиций), плохое качество передачи полутонов и повышенная жесткость ксеропластины. Несмотря на трудности применения ксерорадиографического метода радиационного контроля качества, при массовом контроле он является весьма перспективным.

Радиолюминесцентные индикаторы изготавливают на основе различных люминофоров в виде экранов или монокристаллов (сцинтилляторы). Эти индикаторы преобразуют падающее ионизирующее излучение в видимое свечение, что позволяет оператору производить неразрушающий контроль непосредственно в технологическом потоке или фиксировать видимое изображение с помощью фото- или киноаппаратуры.

Флуоресцирующие экраны состоят из основы (картон, пластмасса), на которую наносится тонкий слой люминофора. Флуороскопические экраны, изображение на которых оценивает непосредственно оператор, выполняют на основе веществ (ZnS, CdS и т. д.), испускающих белый или желто-зеленый свет, соответствующий максимальной чувствительности глаза, а усиливающие флуороскопические экраны для фотопленки — на основе веществ (PbSO<sub>4</sub>, BaSO<sub>4</sub> и т. д.), которые излучают фотоны с большой энергией — синий, фиолетовый и ультрафиолетовый свет. Флуороскопические экраны имеют разрешающую способность 6—17 линий/мм, т. е. ниже, чем у фотопленок, но позволяют оперативно анализировать результаты проведенного контроля.

*Сцинтилляционные монокристаллы* изготавливают из неограниченных веществ, на-

пример NaI (Tl), KI (Tl), CsI (Na), а также из органических веществ, например антрацен, стилбен и др., в виде пластин или дисков. При взаимодействии падающего излучения с атомами монокристалла происходят короткие (около  $10^{-9}$  с) вспышки света (сцинтилляции), число которых зависит от интенсивности падающего на монокристалл ионизирующего излучения и его спектра.

Сцинтилляционные кристаллы являются основой для создания сцинтилляционных счетчиков с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП) и других устройств для преобразования ионизирующих излучений в видимое изображение. Подбирая монокристаллы различного состава, можно преобразовывать в световое излучение (далее — в электрический сигнал) ионизирующие излучения различных видов и энергий (от 30 кэВ до 40 МэВ) [1, 21]. Поскольку толщина кристаллов может быть сделана достаточно большой, эффективность регистрации излучения с их помощью повышается. Поэтому по сравнению с флуоресцирующими экранами и с фотопленкой сцинтиллирующие кристаллы имеют более высокую эффективность преобразования излучения, повышенную разрешающую способность по интенсивности излучения и быстродействие.

Электронно-оптические преобразователи при радиационном контроле качества используются с двумя целями: для преобразования изображения ионизирующего излучения в видимое изображение (рентгеновский ЭОП — РЭОП) и для повышения яркости изображения в видимом свете (усилитель яркости). В первом случае электронно-оптический преобразователь имеет мишень, чувствительную к воздействию ионизирующего (чаще всего рентгеновского) излучения. Такая мишень может иметь алюминиевое покрытие, обращенное в сторону контролируемого объекта и отражающее возникающие световые вспышки в сторону фотокатода, сцинтиллирующий слой и фотокатод, создающий свободные фотоэлектроны. За счет энергии высоковольтного источника питания электроны, число которых прямо связано с интенсивностью падающего излучения, ускоряются и создают большую яркость свечения выходного экрана. Рентгеновские электронно-оптические преобразователи типа РУ-135 и РУ-230 позволяют выявлять дефекты с размером 3—5% толщины полуфабриката или изделия при разрешающей способности 1,5—2 линий/мм.

При использовании электронно-оптического преобразователя в качестве усилителя яркости преобразование изображения ионизирующего излучения в видимое осуществляется сцинтиллятором, флуороскопическим экраном или другим рентгеновским электронно-оптическим преобразованием а изображение в видимом свете проецируется на фотокатод вторичного электронно-оптического преобразователя. Полученное на выходном экране более яркое изображение может быть подано на следующей электронно-оптический преобразователь, т. е. еще раз усилено по яркости. Системы таких электронно-оптических преобразователей называют *каскадными* и используют на практике до пяти каскадов усиления яркости.

Преимуществом электронно-оптических преобразователей является оперативное получение яркого видимого изображения, что позволяет работать при пониженных интенсивностях излучения. Недостатки этих приборов: малая разрешающая способность и появление искажений изображения (особенно на краях экрана), что усиливается при увеличении числа каскадов.

**Рентгеновидиконы** — это специальные передающие телевизионные трубки, которые дают возможность получить электрический сигнал об интенсивности ионизирующего излучения после взаимодействия его с контролируемым объектом и получить видимое изображение этого распределения на телевизионном экране. Технические характеристики серийных рентгеновидиконов ЛИ-417 и ЛИ-423 приведены в табл. 6.10.

В целом устройство рентгеновидикона подобно устройству видиконов, работающих в диапазоне видимого света [1.] Принципиальным отличием рентгеновидиконов, позволяющим использовать его для преобразования рентгеновского излучения в элек-

трический сигнал, является полупроводниковая мишень, чувствительная к рентгеновскому излучению. Мишень рентгеновидикона изготавливают из аморфного селена (ЛИ-417 и ЛИ-423), окиси цинка, окиси свинца, сернистой сурьмы и других соединений. Входное окно рентгеновидиконов ЛИ-417 и ЛИ-423 закрыто тонкой алюминиевой пластиной для защиты чувствительного слоя от воздействия других видов излучений (в первую очередь от видимого света).

На основе рентгеновидиконов ЛИ-417 и ЛИ-423 выпускаются *прикладные телевизионные установки* ПТУ-38 и ПТУ-39, имеющие общепромышленное применение, а также телевизионные рентгеновские микроскопы типа МТР.

Преобразовательные свойства рентгеновидиконов определяются его мишенью (особенно ее толщиной), поэтому для расширения спектральных возможностей рентгеновидикона в область более жестких излучений используют более толстые мишени, специально подбирают ее материал.

Таблица 6.10

Показатели	Тип рентгеновидикона	
	ЛИ-417	ЛИ-423
Диаметр мишени, мм	18	80
Толщина мишени, мкм	25—30	80—100
Диапазон рабочих интенсивностей, Р/мин	0,01—0,1	0,01—0,1
Энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ	5—150	5—150
Разрешающая способность (по мишени), мкм	20	60
Контрастная чувствительность, %	5	4

Рентгеновидиконы дают большие возможности по обработке сигналов о свойствах различных контролируемых объектов и их дефектах и при дополнении аппаратуры на их базе логическими устройствами позволяют автоматизировать процесс проведения радиационного контроля качества. На этой же основе возможно применение и микро-ЭВМ для обработки результатов неразрушающего контроля и далее — корректировка технологического процесса производства. Вместе с тем рентгеновидиконы имеют определенный размер мишени, который ограничивает зону контроля и снижает его производительность. Кроме того, они эффективны при контроле полуфабрикатов и изделий малой толщины или поглощения, когда используются источники с квантами малой энергии.

Индикаторы ионизирующих излучений получили наибольшее применение в практике радиационного контроля качества промышленной-продукции для радиографии и радиоскопии.

## 6.6. Первичные преобразователи ионизирующего излучения в электрические сигналы

Преобразование величин, характеризующих ионизирующие излучения, в электрический сигнал могут производить следующие устройства: электронно-вакуумные приборы и рентгеновидиконы, фотоэлектронные умножители в сочетании с монокристаллическими сцинтилляторами, ионные приборы и полупроводниковые приборы. Каждый тип приборов имеет свои особенности и области наилучшего применения.

**Фотоэлектронные умножители** используют в паре со сцинтиллирующим кристаллом для получения электрических сигналов, зависящих от интенсивности и состава излучения. Фотон или частица, вызвавшая сцинтилляцию, приводит к появлению в цепи анода фотоэлектронного умножителя импульса электрического тока, который может быть зарегистрирован. Амплитуда полученного импульса зависит от энергии кванта ионизирующего излучения, материала и размеров сцинтиллирующего монокристалла, а

количество импульсов, появляющихся за единицу времени, зависит от интенсивности падающего на монокристалл излучения.

Достоинствами сцинтиллятора, объединенного с фотоэлектронным умножителем, являются высокая чувствительность, большая разрешающая способность по времени ( $10^{-6}$ — $10^{-9}$  с) и возможность измерения энергии частиц излучения. Недостатком ФЭУ являются: большой шум в выходном сигнале и влияние нестабильности напряжения высоковольтного источника питания.

**Принцип действия ионных приборов** основан на взаимодействии ионизирующего излучения с газом, в котором оно создает свободные носители зарядов. Для неразрушающего контроля используют ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера — Мюллера. Разница между этими приборами состоит в конструктивных особенностях и различных электрических режимах работы. На рис. 6.14 приведена обобщенная вольт-амперная характеристика разряда в газе, на которой отмечены характерные режимы для ионных приборов. Ионные приборы можно использовать для регистрации всех видов излучений, однако с разной степенью эффективности, показывающей, какая часть излучения относительно падающего приводит к появлению электрического сигнала. Значения эффективности регистрации излучения некоторыми преобразователями ионизирующих излучений приведены в табл. 6.11.

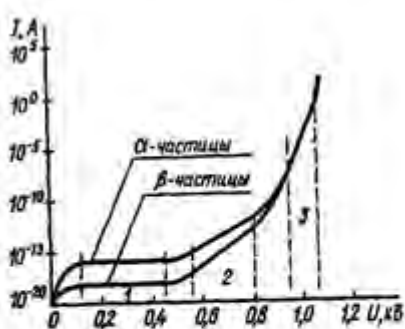


Рис. 6.14 Вольт-амперная характеристика газоразрядных приборов при регистрации излучений:  
1 — ионизационная камера; 2 — пропорциональный счетчик; 3 — счетчик Гейгера — Мюллера

Наилучшим образом ионные приборы регистрируют поток  $\alpha$ -и  $p$ -частиц, которые при объеме камер 1—2 л регистрируются полностью. Регистрация рентгеновского,  $\gamma$ - и нейтронного излучения затрудняется малой ионизацией в объеме газа, поэтому состав газа в ионизационной камере подбирают в соответствии с видом и энергиями квантов регистрируемого излучения, а стенки ионного прибора покрывают специальными веществами, чтобы падающее первичное излучение преобразовывалось в другой вид излучения, которое вызывает гораздо большую ионизацию в газовой среде ионного прибора. Например, для регистрации потока тепловых нейтронов стенки ионного прибора покрывают изотопом бора ( $^{10}\text{B}$ ) или заполняют его объем газообразным соединением ( $\text{BF}_3$ ); для регистрации нейтронов больших энергий прибор помещают в замедлитель — парафин и другие вещества, что позволяет расширить диапазон энергий эффективно регистрируемых нейтронов от 10 кэВ до 3 МэВ.

Таблица 6.11

Вид излучений	Энергия кванта, МэВ	Эффективность регистрации %			
		Ионизационная камера	Пропорциональный счетчик	Счетчик Гейгера — Мюллера	Сцинтиллятор с ФЭУ
$\alpha$ -излучение	—	100	100	100	100
$\beta$ -излучение	—	100	100	100	70—100
Рентгеновское и $\gamma$ -излучение	0,005	1—2	100	30—50	80—100
	0,05	1—2	45—99	0,05—1	100
	0,14	1—2	3—20	0,03—1	96
	0,66	1—2	1—2	0,3—1	56
	1,33	1—2	1—2	0,8—1	45
	6,0	1—2	1—2	5	34
	14,0	1—2	1—2	12	37
	25,0	1—2	1—2	20	—
Нейтронное излучение	$3 \cdot 10^{-8}$	—	—	24	90—100
	0,05	—	—	0,17	5

Ионизационные камеры работают при небольших напряжениях между электродами (100—350 В) в режиме насыщения, когда все электроны, появившиеся от воздействия ионизирующего излучения, собираются анодом. Выходной ток ионизационных камер невелик, но ионизационные камеры имеют наиболее стабильный коэффициент преобразования интенсивности излучения в ток (см. табл. 6.11).

Пропорциональные счетчики работают в режиме несамостоятельного разряда и создают при падении ионизирующего излучения большие импульсы тока за счет эффекта «газового усиления» (от 10 до  $10^6$  раз), обусловленного многократным повторением процесса ионизации. В результате один первичный электрон приводит к образованию большого числа вторичных электронов, общее число которых пропорционально числу первичных электронов и зависит от их энергии.

В счетчиках Гейгера — Мюллера коэффициент «газового усиления» еще больше, а возникающий от ударной ионизации электрический ток не зависит от энергии квантов падающего излучения и определяется электрическим сопротивлением внешней цепи. Появившиеся первичные электроны приводят к существованию в счетчике самостоятельного разряда. Поэтому в счетчиках Гейгера — Мюллера необходимо гашение разряда за счет специального построения электронной схемы или за счет подбора состава газовой смеси в объеме колбы счетчика (самогасящиеся счетчики). Выходной сигнал счетчика Гейгера — Мюллера равен 1—50 В, что дает возможность применять их непосредственно без усилительных устройств.

Ионные приборы являются эффективными, простыми и доступными преобразователями энергии ионизирующих излучений в электрический сигнал. Недостаток этих приборов — ограниченные возможности по регистрации параметров излучений, сравнительно большие габариты и хрупкость.

Развитие полупроводниковой технологии позволило разработать и изготавливать серийно полупроводниковые приборы для регистрации ионизирующих излучений. Работа полупроводниковых приборов основана на внутреннем фотоэффекте, проявляющемся в том, что при воздействии излучения изменяется удельная электрическая проводимость полупроводникового вещества за счет изменения числа носителей зарядов (электронов или дырок), количество которых связано с интенсивностью излучения и его энергией. Для регистрации ионизирующих излучений используют полупроводниковые резисторы с одним проводящим слоем и устройства с несколькими слоями, имеющими различные типы проводимости.

*Полупроводниковые резисторы* (датчики проникающих излучений) изготавливают на основе пленок из поликристаллических материалов — сульфида кадмия, селенида кадмия и др. — путем возгонки в вакууме и осаждения полупроводниковой пленки на металлическую подложку, которая является одним из выводов. Второй вывод наносится поверх полупроводникового слоя также напылением в вакууме. Датчики проникающих

излучений герметизируются эпоксидной смолой (для приборов РГД-0 и РГД-1, регистрирующих рентгеновское и  $\gamma$ -излучение) или путем помещения полупроводника в тонкий металлический корпус (приборы РГД-2 и ГД-Г1). В последнем случае обеспечивается надежная защита от светового и рентгеновского излучения и надежная регистрация  $\gamma$ -излучения с квантами, имеющими большую энергию.

Рентгено-гамма-датчики РГД-0, РГД-1 и РГД-2 имеют среднюю чувствительность 360 мА/(Р/с) и при мощности излучения 1,4 мР/с создают ток 500 мкА и более (при рабочем напряжении 10 В), что в 50 раз превышает наибольшее значение его темнового тока.

Гамма-датчик ГД-Г1, предназначенный для регистрации  $\gamma$ -излучения, при напряжении 30 В и мощности излучения 0,83 мР/с создает ток 4 мА при наибольшем значении темнового тока 1 мА.

Датчики проникающего излучения РГД-0, РГД-1, РГД-2 и ГД-Г1 по сравнению с другими преобразователями ионизирующих излучений обладают высокой чувствительностью при сравнительно низких рабочих напряжениях (не более 50 В), поэтому они применяются для целей индикации и дозиметрии рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, особенно в малогабаритной аппаратуре. Существенным недостатком этих приборов является большая инерционность (постоянная времени 20—60 с и более), что ограничивает область их применения и не допускает использования их для счета импульсов, возникающих от квантов ионизирующего излучения.

*Полупроводниковые детекторы многослойной конструкции* для преобразования ионизирующих излучений в электрические сигналы изготавливают из германия или кремния. Полупроводниковые детекторы могут быть выполнены поверхностно-барьерными в виде р-п-перехода или диффузионно-дрейфовыми в виде трехслойного кристалла р-і-л-типа. На полупроводниковые детекторы подается электрическое напряжение так, чтобы они были включены в обратном направлении. Чувствительной к ионизирующему излучению зоной у них является обедненный носителями запирающий слой или і-слой.

При воздействии излучения в зоне, обедненной носителями зарядов, за счет энергии квантов излучения возникают дополнительные электроны или дырки. На ионизацию одного атома в кристалле германия или кремния расходуется 3—4 эВ. В зависимости от энергии кванта падающего излучения в запирающем или j-слое образуется соответствующее число дополнительных носителей зарядов, формирующих импульс тока в цепи, в которую включен полупроводниковый прибор. Если на длине пробега кванта излучения энергия его будет полностью израсходована на ионизацию атомов, то зависимость амплитуды импульса тока на выходе полупроводникового прибора от энергии кванта будет линейной. Это обуславливает необходимость изготовления полупроводниковых приборов сравнительно больших размеров. Общее число импульсов, полученных на выходе полупроводникового прибора за единицу времени, определяется интенсивностью падающего ионизирующего излучения.

*Поверхностно-барьерные детекторы* сравнительно просты в изготовлении, работают при комнатной температуре и используются для регистрации и спектрометрии заряженных частиц с малой длиной пробега и нейтронов. Такие детекторы часто изготавливают на базе одного кристалла в виде пар, предназначенных для включения в дифференциальные схемы и мостовые электрические.

Полудетекторы (один из приборов) пары отличаются дополнительными слоями специальных веществ, нанесенных для повышения эффективности преобразования излучения в электрический сигнал. Например, за счет нанесения полиэтиленовой пленки при воздействии быстрых нейтронов появляются протоны отдачи, которые эффективно регистрируются детектором; за счет нанесения слоя фтористого лития ( $\text{Li}^6\text{F}$ ) и происходящей при попадании нейтронов ядерной реакции повышается чувствительность к тепловым нейтронам.



Вместе с тем эффективность регистрации поверхностно-барьерными детекторами остается небольшой из-за малой толщины слоя, где излучение взаимодействует, она гораздо больше у *диффузионно-дрейфовых детекторов*, где толщина обедненного носителями зарядов *i*-слоя составляет 1—10 мм. При такой толщине чувствительной области импульс электрического тока линейно зависит от энергии излучения для широкого спектра излучений (0,05—15 МэВ). *Германиевые детекторы*, предназначены для прецизионной спектроскопии рентгеновского и  $\gamma$ -излучения. Они успешно применяются для рентгено-флуоресцентного анализа. Изготавливают дрейфовые полупроводниковые детекторы планарной конструкции (*p*- и *n*-слои располагают на торцах цилиндрического кристалла) и коаксиальной конструкции (*p*-слой располагается на наружной поверхности цилиндра, а *n*-слой на оси цилиндра). Чтобы снизить собственные шумы детектора и повысить чувствительность, его охлаждают до температуры жидкого азота, а литиево-дрейфовые полупроводниковые детекторы постоянно хранят при температуре жидкого азота. Дрейфовые детекторы также могут группироваться парами.

Преимуществами полупроводниковых диффузионно-дрейфовых детекторов являются: относительно высокая эффективность регистрации различных излучений (около 1%), большая энергетическая разрешающая способность (3,5 кэВ для детекторов типа ДГД-11, ДГД-12, ДНДПК-23 и ДНДПК-24), высокое быстродействие (минимальное время нарастания импульса тока 0,5 мкс).

В целом полупроводниковые приборы являются удобными и перспективными преобразователями ионизирующих излучений в электрический сигнал, особенно когда необходимо измерять два параметра: интенсивность и энергию квантов излучения.

Фотоэлектронные умножители, ионные и полупроводниковые приборы получили наибольшее применение в практике радиационного контроля качества при реализации радиометрических методов в толщинометрии, контроле физико-химических свойств и изредка в дефектоскопии. Вместе с тем в тех случаях, когда индикаторы ионизирующих излучений по каким-либо причинам (вследствие низкой эффективности регистрации излучений с большой энергией квантов или малой чувствительности) не могут быть использованы тогда одноточечные первичные измерительные преобразователи в сочетании со сканирующей системой и системой двумерной индикации дают возможность получить пространственные распределения интенсивности и спектрального состава ионизирующего излучения. В этом смысле первичные измерительные преобразователи обладают универсальными свойствами, проще в изготовлении и имеют более высокие метрологические характеристики, хотя и за счет меньшей скорости получения информации (последовательный анализ).

## 6.7. Дефектоскопия и контроль внутреннего строения

Выявление внутреннего строения контролируемых объектов и наличия в нем дефектов производится путем анализа прошедшего излучения и чаще всего с использованием преобразователей излучения в видимое изображение. Для этого используют: фотопленку коеропластину, флуороскопические экраны, сцинтилляторы и рентгеновидиконы. Наибольшее применение имеет фотопленка, как простой, доступный и надежный преобразователь излучения.

Обобщенная схема радиационного контроля качества по прошедшему излучению приведена на рис. 6.15.

*Источник излучения III* создает поток энергии соответствующего вида излучения. Чтобы излучение шло только в область, где располагается контролируемый объект *КО*, источник излучения *И* помещен в защитный контейнер *ЗК*, который, кроме того, снижает загрязнение излучением окружающей среды. Для того чтобы контролируемый объект облучался только в течение определенного времени, необходимого для контро-

ля, на пути излучения установлен затвор  $З$ , управляемый оператором и определяющий время экспозиции  $t_3$ , с учетом интенсивности прошедшего излучения, измеряемой экспонометром ЭКС. Излучение источника  $И$  может содержать компоненты излучений различных видов или спектрального состава, в связи с чем на пути устанавливается фильтр  $\Phi$ , пропускающий только необходимую часть излучения. Фильтр  $\Phi$  выполняется чаще всего в виде пластин определенной толщины из материала, хорошо поглощающего мешающую часть излучения. Помимо того, в состав фильтра может входить *коллиматор* — специальный элемент значительной толщины, часто в виде плиты со сходящимися коническими отверстиями. Коллиматор улучшает конфигурацию поперечного сечения выходящего потока излучения, например, за счет сильного поглощения лучей, выходящих от частей источника, удаленных от его центра, уменьшает эффективные размеры источника, что увеличивает четкость радиационного изображения и повышает разрешающую способность контроля. В контакте с контролируемым объектом находятся: компенсатор  $КМ$ , эталоны чувствительности  $ЭЧ$  и маркировочные знаки  $МЗ$ .

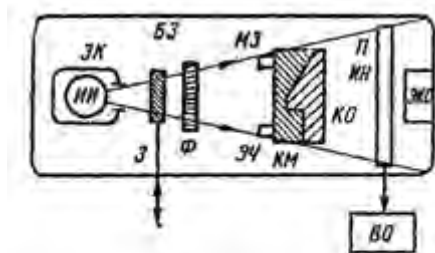


Рис. 6.15 Схема радиационного контроля по прошедшему излучению

*Компенсатор* (выравниватель)  $КМ$  обычно изготавливают из материала, близкого по составу к материалу  $КО$ , но для создания компенсатора могут быть использованы пасты, сыпучие материалы (песок, дробь и т. д.) и жидкости (вода, масло) [1, 2]. Назначение компенсатора  $КМ$  — дополнить контролируемый объект с номинальными параметрами до системы, имеющей равные значения толщины в направлении распространения излучения. Кроме того, компенсатор  $КМ$  может так же, как и фильтр  $\Phi$ , устранять нежелательную часть излучения источника  $ИИ$ . Компенсатор  $КМ$  позволяет получить одинаково четкое изображение или соизмеримые величины сигналов от тонких и толстых частей контролируемого<sup>1</sup> объекта. •/

*Эталон чувствительности ЭЧ* устанавливают в месте контролируемого объекта, где условия контроля наихудшие (обычно на краях), а появление дефектов маловероятно или не так опасно. Они необходимы для того, чтобы убедиться в достоверности результатов и оценить качество изображения. В зависимости от состава материалов контролируемого объекта используют эталоны чувствительности, изготовленные из сплава на основании железа, алюминия, титана и др., подбирая при неразрушающем контроле наиболее близкий по физическим свойствам эталон. Существует несколько видов эталонов, отличающихся по конструкции. В СССР стандартизованы пластинчатые эталоны с канавками и проволочные, они же имеют наибольшее распространение и в других странах. Чувствительность с помощью эталонов определяется расчетным путем в процентах для конкретных условий контроля.

*Маркировочные знаки МЗ* служат для удобства анализа, хранения данных и результатов неразрушающего контроля (нумерация снимков, указание особенностей изделия и т. д.). Они помещаются в поле зрения первичного измерительного преобразователя  $П$  или индикатора  $ИИ$  в месте, не занятом изображением контролируемого объекта, или в области, где маловероятно появление дефектов или их наличие неопасно.

*Индикатор ИИ* излучения трансформирует величины, характеризующие поле прошедшего излучения, в видимое изображение, которое изучает и оценивает оператор,

или в электрические сигналы, которые анализируются в блоках вторичной обработки информации *ВО*.

Для защиты оператора и окружающей среды от ионизирующего излучения вся установка, где имеется ионизирующее излучение, защищается *стенкой биологической защиты БЗ* из свинца, стали, бетона, водосодержащих материалов, кирпичной кладки или другого плотного материала без щелей.

**Проведение радиационного контроля** качества возможно с применением универсальной или специализированной аппаратуры, причем основным вопросом в обоих случаях является получение изображения достаточной яркости, контрастности и четкости. В силу наибольшей применимости, а также для иллюстрации будем считать, что в качестве преобразователя радиационного изображения в видимое используется фото-пленка, а особенности, которые надо учитывать при работе с другими преобразователями, будут отмечаться особо ниже.

При использовании универсальной аппаратуры процесс неразрушающего контроля состоит из следующих операций:

1. Выбор источника излучения и индикатора (первичного измерительного преобразователя) радиационного изображения с учетом размеров и свойств контролируемого объекта.

2. Выбор условий просвечивания, в том числе расположения блоков аппаратуры и времени экспозиции.

3. Размещение и подготовка контролируемого объекта для проведения контроля, установка вспомогательных приспособлений (эталонные, компенсаторы, маркировочные знаки).

4. Экспозиция, т. е. просвечивание в течение определенного времени контролируемого объекта с воздействием излучения на индикатор.

5. Обработка индикатора (фотопленки, ксероластины или др.) для получения видимого изображения.

6. Расшифровка результатов радиационного неразрушающего контроля и их документирование.

При использовании специализированной аппаратуры радиационного контроля качества перечисленные операции выполняются частично или производятся автоматически, что существенно повышает производительность труда и снижает вероятность ошибок при проведении неразрушающего контроля.

**Выбор источника излучения** обусловлен материалом и толщиной полуфабриката или изделия, а также используемым индикатором излучения. Характерные области применения некоторых источников излучения, имеющие наибольшее распространение, указаны в табл. 6.12.

Таблица 6.12

Толщины объектов, мм, из сплавов в основе				Рентгеновское излучение		γ-излучение		Тормозное излучение	
железо	титан	алюминий	магния	Тип аппарата	Рекомендуемое напряжение, кВ	Тип источника	Энергия основных линий, кэВ	Изотоп	Тип аппарата
До 4	До 12	До 60	До 80	РУП-100-10	10—60	ИРИП-4	60; 160	$^{147}\text{Pm}/\text{Be}$	
1—20	2—40	5—150	10—200	РУП-200-5-2	60—140	Ту-0-Ту-3	84	$^{170}\text{Tm}$	
2—40	4—70	10—200	15—260	ИРА-3Д	300—350	Се2—Се5	130; 280; 405; 206—613	$^{75}\text{Se}$	
30—100	50—170	95—300	130—420	РУП-150/ 300-10	90—180	ГИД-И-1— ГИД-И-7	661	$^{192}\text{Ir}$	
60—200	100—340	190—550	280—820	РУП-150/ 300-10	180—300	ГИД-Ц-1— ГИД-Ц-6	1170; 1330	$^{137}\text{Cs}$	Бетастроны: ПМБ-6; Б-18
100—500	175—800	280—1440	450—2000	РУП-400-1	250—400	ГИД-К-1— ГИД-К-10		$^{60}\text{Co}$	Бетастроны: Б-25/10; Б-30; Б-35 Макростроны: МД-10; МТ-20; МР-30

Для каждого материала и источника излучения существует предельная толщина просвечивания и рекомендуемый режим просвечивания. Чем больше толщина контролируемого объекта, тем более жесткое излучение (с большей энергией квантов) надо использовать. Часто для сравнения говорят о предельной толщине просвечивания «по стали», что объясняется широким применением сплавов железа в качестве конструкционного материала и легкостью определения по этому значению предельных толщин для полуфабрикатов из других материалов. При организации радиационного контроля качества должен учитываться и экономический фактор, в частности сравнительно низкая стоимость радиоизотопных источников. Получающие все большее применение во всех отраслях промышленности пластмассы, синтетические и композиционные материалы обычно имеют малый линейный коэффициент ослабления  $\mu$ . Для увеличения эффективности взаимодействия при их контроле используют низкоэнергетические излучения.

**Выбор преобразователя радиационного изображения** в видимое определяется, в основном, общими требованиями к неразрушающему контролю.

Если необходимо получить документальные результаты и хранить их, используя фотопленку или ксеропластину. Фотопленка дает максимальную разрешающую способность по размерам дефектов и возможности различения полутонов. Для проведения оперативного радиационного контроля качества применяют флуороскопические экраны, сцинтилляторы и телевизионные установки. Последние особенно удобны при автоматизации контроля и обработке их результатов на ЭВМ.

**Условия просвечивания** выбирают так, чтобы получить видимое изображение необходимого качества и требуемую дефектоскопическую чувствительность. Выбор условий неразрушающего контроля производят с помощью таблиц и графиков, составленных для рентгеновских, радиоизотопных источников или бетатронов, по известным свойствам материала контролируемого объекта и его толщине.

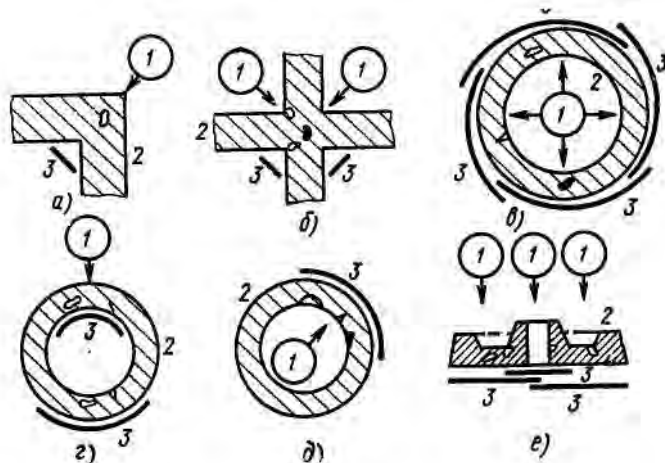


Рис. 6.16. Радиационный контроль литых объектов: а, б-изделий с углами; в-д — изделий в виде трубы; е-сложного литого изделия (1-источник излучения, 2-контролируемый объект, 3 — индикатор)

**Типичные варианты взаимного расположения** источника излучения преобразователя, компенсатора и контролируемого объекта при обследовании литых, слоистых и сварных объектов показаны на рис. 6.16—6.18. Размещение вспомогательных приспособлений производится в соответствии с конфигурацией, особенностями строения контролируемого объекта и степенью опасности появления дефектов на его участках.

**Экспозиция и обработка фотопленки** или ксеропластины производится по номограммам в соответствии с выбранными условиями и технологическими рекомендациями для них. В качестве примера на рис. 6.19 приведена номограмма при радиационном контроле качества с помощью рентгеновской трубки, а на рис. 6.20 — с помощью радиоизотопного источника.

**Расшифровка результатов** неразрушающего контроля состоит в установлении причин, вызвавших те или иные изменения на индикаторе. Для просмотра фотопленок используют *негатоскопы* - устройства, создающие равномерную освещенность по экрану и позволяющие изучать фотопленку на просвет. Ксероизображения рассматривают при равномерном освещении лампой молочного цвета. Прежде всего оценивается качество изображения в целом/и отбрасываются дефекты самой пленки: полосы, проходящие через негатив, круглые пятна различных размеров, отпечатки от посторонних предметов (пальцы оператора, царапины, следы от других известных предметов) и т. п. Снимок считается качественным, «если на нем четко видны все элементы контролируемого объекта, отличающиеся по толщине или по материалу (металл и пластмасса, разные сплавы и др.), видны маркировочные знаки и эталоны, нет грубых пороков на индикаторе, мешающих расшифровке».

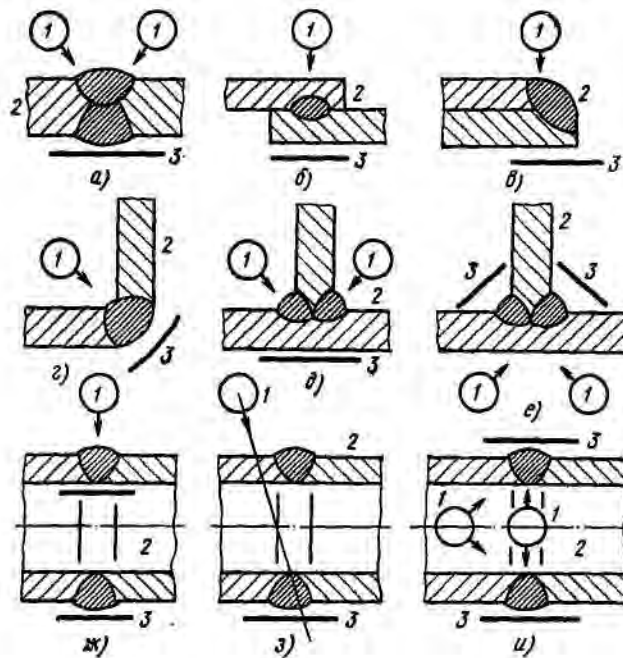


Рис. 6.17. Радиационный контроль качества сварных конструкций: а — встык, б — внахлест; в — е — сварка торцов под разными углами; ж — двух труб встык; з — двух труб при косом расположении источника; и — просвечивание сварных труб изнутри (1 — источник излучения, 2 — сваренные детали, 3 — индикатор)

При изучении изображения могут возникнуть сомнения в прохождении того или иного элемента на фотопленке (дефект индикатора пленки или дефект контролируемого объекта). Если пороки индикатора располагаются в местах изображения объекта, где можно предполагать наличие дефектов, или в ответственных местах, которые будут испытывать при работе большие нагрузки, необходимо сделать повторную экспозицию этого же объекта.

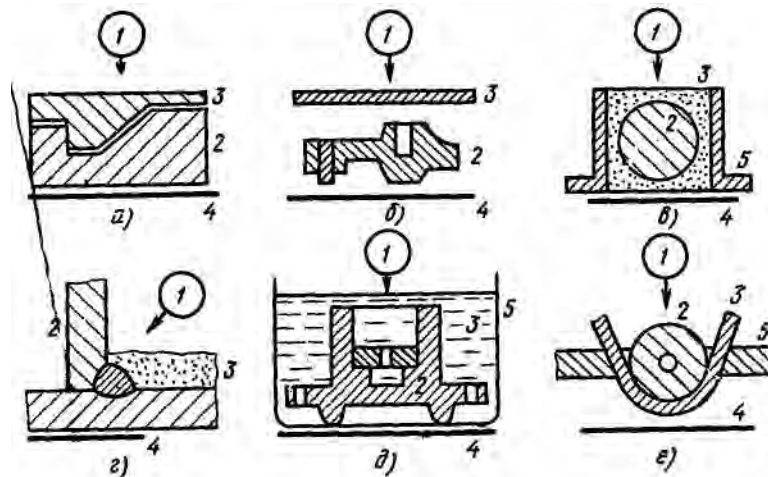


Рис. 6.18. Радиационный контроль объектов сложной формы с применением компенсаторов: а — дополняющее изделие до постоянной толщины; б — лист; в, г — насыпной материал; д — жидкость; е — гибкий материал (1 — источник излучения, 2 — контролируемый объект, 3 — компенсатор, 4 — индикатор, 5 — вспомогательное оборудование)

Для повышения достоверности неразрушающего контроля часто в одну кассету закладывают две фотопленки, сравнивают и выясняют, случайно появился тот или иной элемент изображения. Оценка правильности проведения радиационного контроля качества производится по эталонам чувствительности, для чего определяется дефектоскопическая чувствительность  $S_A$  как наименьший размер выявляемого элемента ( $B_s$  —

наименьший диаметр проволоки или глубины канавки эталона), различимого на изображении объекта в направлении просвечивания, выраженный в процентах от толщины контролируемого объекта  $B$ :

$$S_x = \frac{u_{3,100}}{k_{1,1} k}$$

Окончательное заключение о годности контролируемого объекта, его материала или элементов выносится в соответствии с браковочными признаками и с техническими условиями на данный полуфабрикат или изделие.

В наиболее сложном варианте радиационного контроля качества с помощью радиоизотопного источника интенсивность излучения, прошедшего сквозь объект в виде листа, может быть записана в виде

$$J_n = J_0 \frac{R_0^2}{R^2} [2^{-t/T_{1/2}}] \exp(-\mu b).$$

Яркость изображения на индикаторе определяется интенсивностью прошедшего сквозь лист излучения. Как следует из этого выражения, для получения изображения достаточной яркости при большой толщине изделия необходимо выбирать источник с большим радиационным выходом  $J_0$  и с энергией фотонов или частиц, соответствующей минимальному значению линейного коэффициента поглощения, а радиоизотопный источник — использовать как можно быстрее, пока его активность имеет достаточно большое значение. Наилучшие результаты при неразрушающем контроле дает применение монохроматических источников излучения с оптимальной энергией квантов.

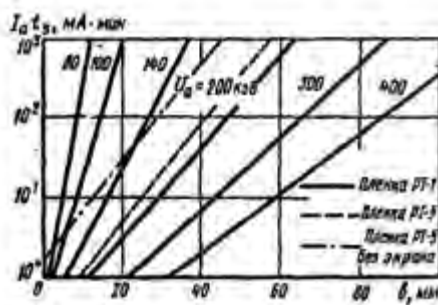


Рис. 6.19) Номограммы для расчета экспозиции при использовании разных пленок и источников

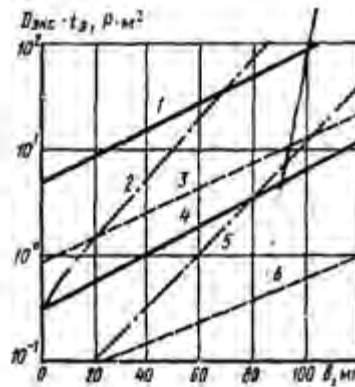


Рис. 6.20 Номограммы расчета экспозиции для радиоизотопных источников:

1-3 — пленка РТ-5, 4-6 — пленка РТ-1  
(1, 4 —  $^{60}\text{Co}$ ; 2, 5 —  $^{137}\text{Cs}$ ; 3, 6 —  $^{137}\text{Cs}$ )

Излучение с энергией фотонов или частиц, больше оптимальной, меньше поглощается материалом изделия и создает засветку индикатора, но дает контрастные изображения, а излучение с малой энергией фотонов или частиц может быть почти полностью поглощено изделием. Поэтому выбирают излучение с оптимальной или минимальной возможной энергией фотонов или частиц, а интенсивность излучения задают такой, чтобы получить необходимую яркость изображения. Расстояние между источником излучения и контролируемым объектом, называемое часто *фокусным расстоянием*, выбирают исходя из необходимой интенсивности с учетом допустимой величины ее уменьшения на краях изображения, которое, как нетрудно видеть, изменяется приблизительно по закону:

$$J_{кр} \approx J_n \cos^2 \alpha.$$

Если удовлетворить оба требования не удастся, необходимо взять более мощный источник излучения (с большим током рентгеновской трубки, большой активностью и т. д.) или увеличить время экспозиции. При использовании фотопленки или ксеропластины можно получить яркое и контрастное изображение, увеличивая поглощенную

дозу излучения, которая растет по экспоненциальному закону при увеличении толщины и обратно пропорциональна интенсивности источника, что затрудняет просвечивание толстых изделий и полуфабрикатов. Для снижения времени экспозиции используют экраны — передний (обычно металлический) и задний (чаще флуоресцентный). Фокусное расстояние  $R$  выбирается из компромиссных условий. При его увеличении улучшается качество изображения контролируемого объекта, поскольку снижается нерезкость изображения и меньше расходятся лучи от источника (центральная проекция). Но увеличение расстояния  $R$  ведет к необходимости также увеличивать радиационный выход источника (что ухудшает условия работы персонала), время экспозиции или интенсивность излучения источника (что снижает производительность труда).

Если излучение проходит через дефектную область с коэффициентом линейного поглощения  $\mu_d$  и с размером  $x$  в направлении распространения излучения, интенсивность излучения будет равна:

$$J_x = J_0 \frac{R_0^2}{R^2} [2^{(-t/T_{1/2})}] \exp[-\mu(b-x) - \mu_d x].$$

Контрастность изображения дефекта, равная отношению интенсивностей излучения в дефектном и бездефектном месте, составит

$$K_d = \exp[-(\mu_d - \mu) x].$$

Таким образом, контрастность получаемого изображения при правильном выборе условий проведения радиационного контроля качества зависит только от разницы линейных коэффициентов поглощения материала контролируемого объекта и вещества дефекта, а также от размера дефекта в направлении просвечивания.

Резкость получаемого изображения в основном определяется: размерами фокусного пятна источника излучения, разрешающей способностью преобразователя изображения и относительными механическими перемещениями источника контролируемого объекта и индикатора.

Нерезкость изображения за счет конечных размеров фокусного пятна источника излучения можно приблизительно найти, воспользовавшись геометрическими построениями (рис. 6.21). Считая контролируемый объект, индикатор *ИН* инерезкости-направление  $F_1F_2$ , в котором размыто фокусное пятно, параллельными, что является наихудшим случаем, получим:

$$FiF \rightarrow a, a = 1/h.$$

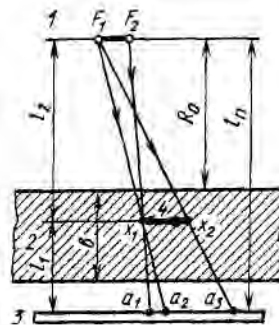


Рис. 6.21. Схема образования геометрической

Изображение на индикаторе из-за расхождения лучей будет увеличенным, а коэффициент увеличения равен:

$$K_{ув} = a_2 a_3 / x_1 x_2.$$

Из подобия  $AF_1F_2$  и  $AF_1F_2a_2$  следует:

$$K_{ув} = (l_1 + l_2) / l_1.$$

Выразив отношение  $l_2/l_1$  через  $K_{ув}$  и подставив его, получим величину зоны размытого изображения:



$$a_2 a_3 = F_1 F_2 (K_{yb} - 1).$$

Обозначив  $\Delta F = F_1 F_2$  и полагая, что дефект имеет минимально различимый размер  $a_2 a_3 = \delta_{\min}$ , когда  $a_1 a_3 = c i 2 a_3$ , с учетом полученных выражений найдем минимальный размер выявляемых дефектов:

$$l_{\min}^r = \Delta F \frac{K_{yb} - 1}{K_{yb}}.$$

Видно, что наилучшие условия по выявлению дефектов будут на поверхности контролируемого объекта, обращенной к источнику излучения, где увеличение достигает максимальной величины:

$$K_{yb}^M = l_n / R_0.$$

Конечная разрешающая способность преобразователя изображения также приводит к размытости получаемого изображения. Она зависит от зернистости структуры преобразователя и от появления вторичных электронов при использовании экранов. Нерезкость, возникающая за счет конечной разрешающей способности преобразователя, называется внутренней и определяется размером пятна от точечного дефекта. Ориентировочно считают величину внутренней нерезкости  $b_v$  равной 0,2 мм для фотопленки без экранов; 0,3 мм — при использовании металлических экранов; 0,7 мм — при использовании светящихся экранов. Минимальный размер выявляемых дефектов с учетом увеличения будет равен:

$$l_{\min}^b = \delta_n / K_{yb}.$$

Относительные перемещения контролируемого объекта, индикатора и источника излучения могут быть обусловлены технологическими причинами проведения неразрушающего контроля в потоке или случайными причинами (механические воздействия, вибрации и др.). Нерезкость изображения будет соответствовать эквивалентному перемещению преобразователя за время экспозиции (при постоянном движении) или амплитуде смещения при воздействии типа вибраций. Обозначив эту величину  $\delta_n$ , можно записать выражение для размера минимально выявляемого дефекта при наличии относительных перемещений:

$$l_{\min}^n = \delta_n / K_{yb}.$$

В практике радиационного контроля качества надо анализировать все факторы, вызывающие нерезкость изображения. Вычислив размеры минимально выявляемых дефектов, следует выбрать наибольший из них.

При высокопроизводительном радиационном контроле качества различные причины появления нерезкости не могут быть устранены полностью, а меры по их снижению являются противоречивыми, поэтому когда размеры минимальных выявляемых дефектов, обусловленных той или иной причиной появления нерезкости, примерно равны, организацию контроля можно считать оптимальной.

## 6.8. Рентгеновский контроль

В радиационном контроле качества наибольшее применение имеет дефектоскопия, контроль внутреннего строения полуфабрикатов и изделий с помощью рентгеновского излучения — рентгеновская радиография и рентгеноскопия. Рентгеновский контроль может производиться с помощью установок, основным элементом которых является рентгеновский аппарат, или путем использования комплектной аппаратуры, примером которой являются интроскопы типа РИ, рентгенотелевизионные микроскопы типа МТР и др.

Установки для рентгеновского контроля качества в зависимости от размеров и материалов контролируемых объектов могут быть различных размеров. При больших

толщинах просвечивания объектов из тяжелых материалов установка может занимать большую площадь и располагаться в двух комнатах. Типичным составом установки, являются следующая аппаратура и оборудование: рентгеновский аппарат, устройство для закрепления и перемещения контролируемого объекта, блок индикатора или преобразователя, аппаратура управления и сигнализация. Общее расположение аппаратуры и оборудования, а также вопросы организации контроля зависят от конкретной решаемой контрольно-измерительной задачи и определяются с учетом рекомендаций выбора условий контроля и получения качественного изображения.

Излучающая часть установки, обычно в виде рентгеновского аппарата, чаще всего выбирается из имеющихся серийных выпускаемых устройств с различными приспособлениями в виде штативов и стоек для закрепления блока рентгеновской трубки в необходимом положении относительно контролируемого объекта. При контроле крупногабаритных объектов просвечиваемых участков используют мощные источники излучения, в том числе ускорители, а управление ими оператор производит из другого помещения.

Устройство для закрепления и перемещения контролируемого объекта определяется его серийностью. В случае малых серий используют различные универсальные приспособления или устройства, применяемые для изготовления этих объектов. Такими устройствами могут быть в простейшем случае струбцины, тиски, переносные подставки, рольганги и т. п.

Таблица 6.13

Тип рентгеновского интроскопа	Источники излучения	Размеры экрана, мм	Передающая трубка	Стальные изделия		Разрешающая способность, линий/мм
				Толщина, мм	Чувствительность, %	
РИ-10Т	РУП-120-5, РУП-150/300-10	∅ 120×3	ЛИ-218	4—20	2,5—3,5	10
РИ-20Т	РУП-150/300-10	∅ 150×5	Изокон	4—45	2	—
РИ-30Т	Микротрон, линейный ускоритель	∅ 150×25	ЛИ-216	40—150 До 280	2 3—7	1 —
РИ-60ТЭ-1	РУП-150/300-10	∅ 150, 230	УРИ-П, ЛИ-217	4—50	3	10
РИ-10 ЭТ	РУП-150/300-10	∅ 200×5	ЭОП типа УМ-42 и ЛИ-421	20—80	3—4	10
РИ-10Э**	РУП-200-5-2	200	Трехкамерный ЭОП типа УМ-92	10—50	2—3	5—7
РИ-10Ф**	РУП-200-5-2	200×250 (флуороскоп)	—	До 40*	4*	3

\* Для объективов из алюминиевых сплавов.  
\*\* Имеется биологическая защита.

При массовом производстве радиационный контроль качества промышленной продукции часто производится непосредственно в технологическом цикле, где предусматриваются специальные участки или посты для неразрушающего контроля.

Индикатор, или блок первичного измерительного преобразователя, размещается в зоне, где получается радиационное изображение интересующей части контролируемого объекта. Когда необходимо расположить источник излучения внутри контролируемого объекта, используют источник специальной конструкции, например рентгеновскую трубку с выносным анодом.

Аппаратура управления и сигнализации может состоять из блоков, входящих в состав рентгеновского аппарата или другого источника излучения, и дополнительного

оборудования в виде типовых устройств, например экспонетр или сигнализатор наличия излучения и т. п., или специально разработанных блоков, таких, как логические блоки разбраковки, блоки сопряжения с ЭВМ или с элементами управления технологическим процессом.

Рентгеновские интроскопы типа РИ являются комплектными установками для неразрушающего контроля различных изделий. В их состав, как правило, входят: рентгеновский аппарат, устройство для закрепления контролируемого объекта, блок индикатора или преобразователя и устройства для управления. Основные технические данные рентгеновских интроскопов типа РИ приведены в табл. 6.13.

Индикатором и первичным преобразователем распределения интенсивности рентгеновского излучения для получения видимого изображения в большинстве интроскопов является монокристаллический индикатор на основе CsI(Tl) или поликристаллический экран. Полученное видимое изображение в большинстве случаев усиливается электронно-оптическим преобразователем (РИ-10Э, РЭ-10ЭТ) или преобразуется с помощью передающей телевизионной трубки в последовательность электрических сигналов, которые поступают на электронные блоки для последующей обработки и индикации. В случае необходимости рентгеновские интроскопы типа РИ могут применять для радиационного контроля качества при движении со скоростью до 0,5 м/мин и более.

Рентгеновский интроскоп РИ-10Ф предназначен для оперативного контроля небольших изделий и полуфабрикатов из легких материалов, вписывающихся в круг диаметром 200 мм, при небольшой толщине (до 40 мм для объекта из алюминиевых сплавов) по изображению на флуороскопическом экране. Интроскоп РИ-40Ф выполнен в виде рабочего стола, на котором располагаются рентгеновский излучатель, блок-трансформатор, устройство для закрепления контролируемого объекта и устройства индикации и аппаратуры управления. Вся настольная часть интроскопа заключена в общий кожух. Устройство для закрепления контролируемого объекта представляет собой прозрачную для рентгеновских лучей подставку, на которую горизонтально закладывается контролируемый объект. Рентгеновское излучение идет сквозь него сверху вниз и попадает на флуороскопический экран, под которым расположено зеркало, изменяющее ход световых лучей для удобства наблюдения изображения оператором. Получаемое изображение, после отражения зеркала, оператор изучает через увеличительную линзу. На передней панели располагаются приборы и органы управления и регулирования работой рентгеновского интроскопа. Рентгеновский блок окружен металлическими элементами биологической защиты, а оператор рассматривает изображение через свинцовистое стекло, защищающее от рассеянного излучения. Предусмотренные меры защиты от излучения обеспечивают максимальную дозу облучения на расстоянии 0,1 м от интроскопа РИ-10Ф не более 0,15 мкР/с. Изображение с флуороскопического экрана интроскопа с помощью тубуса может быть сфотографировано фотоаппаратом «Зенит-3». Интроскоп РИ-10Ф дает возможность производить радиационный контроль качества различных полуфабрикатов и изделий при обычном освещении и только при поиске мало контрастных деталей изображения (небольших дефектов), когда требуется получение предельного значения чувствительности по контрасту и яркости, помещение требуется затенять. Рентгеновский интроскоп РИ-10Ф послужил прототипом для специальных моделей интроскопов РИ-10ФА и РИ-10ФП, первый из которых имеет автоматическую фотокамеру, а второй выполнен так, что может использоваться в полевых условиях. Большим преимуществом проведения контроля с помощью интроскопа РИ-10Ф является оперативность и низкая стоимость контроля. Его недостатками являются: малый диапазон толщин контролируемых объектов (до 5 мм по стали), невысокая чувствительность (4—6%) и трудность повышения радиационной безопасности оператора без существенного увеличения массы конструкции или применения экранов.

Расширяется применение для оперативного рентгеновского контроля **электрорентгенографических** аппаратов, не требующих дефицитных материалов и длительного

процесса «мокрой» обработки, позволяющих быстро получить документ на проконтролированный объект. Наиболее совершенный аппарат этого типа ЭРГА-0,3, который имеет герметичный бокс и работает с замкнутым циклом очистки воздуха от порошка и других загрязнений, что существенно улучшает санитарные условия работы с ним и устраняет загрязнение окружающей среды.

Повысить чувствительность контроля и использовать более мощные излучатели позволяют **рентгентелевизионные системы**, в которых видимое изображение на экране или монокристалле воспринимается электронно-оптическими преобразователями (РИ-10Э) или передающей телевизионной трубкой (РИ-10Т, РИ-20Т и др.). Рентгеновский интроскоп РИ-10Э построен в виде компактной установки, подобной РИ-10Ф, но в отличие от последнего изображение, полученное на сцинтилляционном кристалле CsI(Tl), проецируется объективом «Юпитер-3» на каскадный электронно-оптический преобразователь, а затем более яркое изображение изучается оператором или фотографируется. Это позволяет с помощью той же рентгеновской трубки и в тех же условиях, что и у интроскопа РИ-10Ф, увеличить максимальную толщину просвечивания по стали до 50 мм и несколько улучшить разрешающую способность и дефектоскопическую чувствительность. В рентгеновском интроскопе РИ-10Э предусмотрен координатный стол для перемещения контролируемого объекта по двум направлениям в наиболее удобное для проведения неразрушающего контроля положение.

Рентгеновские телевизионные установки РИ-10Т, РИ-20Т, РИ-30Т и РИ-10ТЭ [1] состоят из нескольких крупных блоков, совместимых между собой и предназначенных для использования в тех случаях, когда облучение контролируемого объекта производится в одном помещении, а блоки, осуществляющие вторичную обработку сигналов, и оператор находятся в другом помещении. Стены или перегородки в этом варианте аппаратуры обеспечивают надежную биологическую защиту, которая при необходимости без изменения оборудования может быть дополнительно усилена за счет наращивания их толщины или установки вспомогательных экранов. Крупными блоками этих установок являются: рентгеновский аппарат; устройство для закрепления контролируемого объекта, изготавливаемое обычно потребителем; входной преобразовательный блок, содержащий монокристалл, передающую телевизионную аппаратуру и механизм установки их в необходимое относительное положение; видеоконтрольное устройство в настольном исполнении; высоковольтный блок питания передающей телевизионной части и электронно-оптического преобразователя. Эти рентгентелевизионные интроскопы в качестве выходного устройства имеют кинескоп 35ЛК2Б, изображение на котором может анализироваться оператором как в позитивном, так и в негативном виде, а при необходимости получить документ долговременного хранения (изображение на экране кинескопа может фотографироваться).

На основе рентгеновского интроскопа РИ-60ТЭ создан рентгентелевизионный комплекс РИ-60ТЭ-1 для дистанционного контроля качества сварных швов в стальных трубах диаметром от 530 до 2520 мм с толщиной стенки 4—50 мм. Комплекс содержит рентгеновский аппарат, усилитель яркости типа УРИ-П и телевизионную систему. Изображение на экран телевизионного индикатора может быть передано в виде электрических сигналов на значительное расстояние, полностью исключающее радиационную опасность. Помимо основного назначения рентгено-телевизионный комплекс РИ-60ТЭ-1 применяют для радиационного контроля качества других полуфабрикатов и изделий: стальных листов и литых конструкций, изделий из цветных металлов, толстых изделий из керамики и полимеров. Телевизионный сигнал, полученный на соответствующем выходе блока комплекса, легко перерабатывается с помощью блоков сопряжения в сигналы, пригодные для ввода в ЭВМ или для использования микропроцессорной системы, а также для применения различных систем обработки изображений. Это обстоятельство открывает широкие перспективы для высокопроизводительного и достоверного рентгеновского контроля качества сложных изделий в различных отраслях промыш-

ленности.

Создавать удобную рентгенотелевизионную аппаратуру для неразрушающего контроля позволяет применение серийных рентгено-видиконов ЛИ-417 и ЛИ-423. На базе этих рентгеновидиконов созданы **рентгенотелевизионные микроскопы** типа МТР, установки типа «Микрон» и прикладные телевизионные установки. Технические данные по аппаратуре с рентгеновидиконами приведены в табл. 7.14. Аппаратура с рентгеновидиконами дает возможность контролировать качество малогабаритных изделий [1] небольшой толщины или доступных для двустороннего контроля участков более крупных объектов. Наибольший размер зоны контроля аппаратуры с рентгеновидиконами определяется размерами их полупроводниковой мишени Рентгенотелевизионные микроскопы типа МТР являются комплектными установками для неразрушающего контроля изделий не больших размеров. Упрощенная функциональная схема рсмспителевизионного микроскопа типа МТР дана на рис. 6.22. В нем используется эффект геометрического увеличения, а для получения достаточного резкого изображения в качестве источника излучения применяют микрофокусные рентгеновские трубки БСВ-7.

Таблица 7.14

Тип рентгеновских устройств	Передающая трубка	Рентгеновский аппарат или трубка	Анодные напряжения на трубке, кВ	Максимальная толщина просвечивания по стали, мм	Разрешающая способность по толщине, мкм	Разрешающая способность в плоскости экрана, линий/мм	Пороговая контрастная чувствительность, %	Телевизионное увеличение изображения
МТР-1	ЛИ-417	РУП-200-5-1	50—120	5	20—30	12	5	10—30
МТР-3И	ЛИ-417	РУП-150-10	30—150	10	20	20	2—3	15—35
МТР-4 «Микрон-2»	ЛИ-417 ЛИ-417	БСВ-7 БСВ-7	5—45 До 45	1 1—10	15 10	13 5	2 —	До 50 25—30
ПТУ-38	ЛИ-417	РУП-150-10	> 150	10	20	5	2	25
ПТУ-39	ЛИ-423	РУП-150-10	> 150	10	60	4	2	5

Режим работы рентгеновской трубки, необходимый для контроля конкретных изделий, обеспечивает блок питания трубки *БПТ*. С помощью механизма установки изделия *МУ* изделие *КО* закрепляется и может перемещаться с одной или несколькими степенями свободы. Рентгеновское излучение, прошедшее сквозь изделие *КО*, попадает на входную мишень рентгеновидикона *РВ* и преобразуется в последовательно считываемый электрический видеосигнал. Считывание потенциального рельефа с мишени, образованного падающим рентгеновским излучением, поэлементно определяют блоки развертки *БР* и *БС*, которые управляют движением луча по вертикали — кадровая развертка и по горизонтали — строчная развертка. В такой же последовательности, как по мишени рентгеновидикона *РВ*, с помощью блока развертки *БР* перемещается электронный луч в осциллоскопе *ОС* или в видеоконтрольном устройстве, где на экране формируется видимое изображение просвечиваемой области изделия.

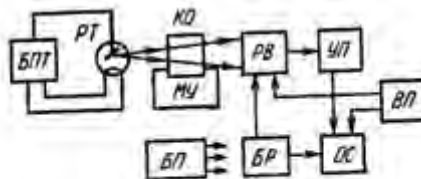


Рис. 6.22 Функциональная схема рентгенотелевизионного микроскопа

Видеосигнал с рентгеновидикона поступает на усилитель-преобразователь *УП*, где

он увеличивается и приводится к виду, необходимому для модуляции яркости свечения экрана кинескопа 43ЛК.3Б. Рентгеновидикон *PВ* и приемный кинескоп осциллоскопа *ОС* получают высокое напряжение от высоковольтного блока питания *ВП*, а другие блоки и устройства — от блока питания *БП*.

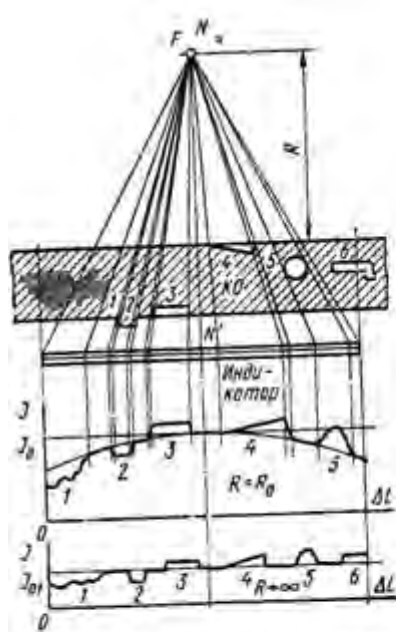


Рис. 6.23 Влияние геометрии и структуры контролируемого объекта на интенсивность прошедшего излучения:  
1 — более плотный материал; 2 — выступ; 3 — впадина; 4 — плавное уменьшение толщины; 5, 6 — полости разной формы

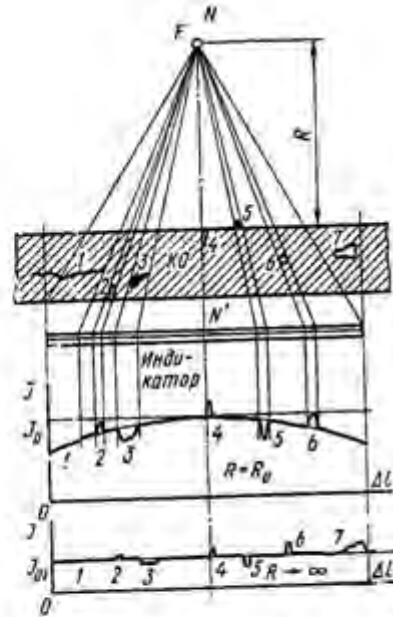


Рис. 6.24 Влияние различных дефектов на интенсивность прошедшего излучения:  
1 — расслоение; 2, 4 — трещины; 3 — включение; 5 — неоднородный предмет; 6 — поры; 7 — полость

На экране кинескопа оператор наблюдает увеличенное теневое изображение из Увеличение изоиралчсппл а происходит по двум причинам: за счет большого формата телевизионного изображения на выходном экране кинескопа (телевизионное увеличение) и за счет геометрического увеличения изображения в рентгеновских лучах, появляющегося из-за большого расстояния от изделия до рентгеновидикона, хотя последнее и приводит к некоторой потере четкости. Форма телевизионного видеосигнала в значительной степени повторяет изменение интенсивности прошедшего излучения от строения просвечиваемого объекта и дефектов (рис. 6.23, 6.24).

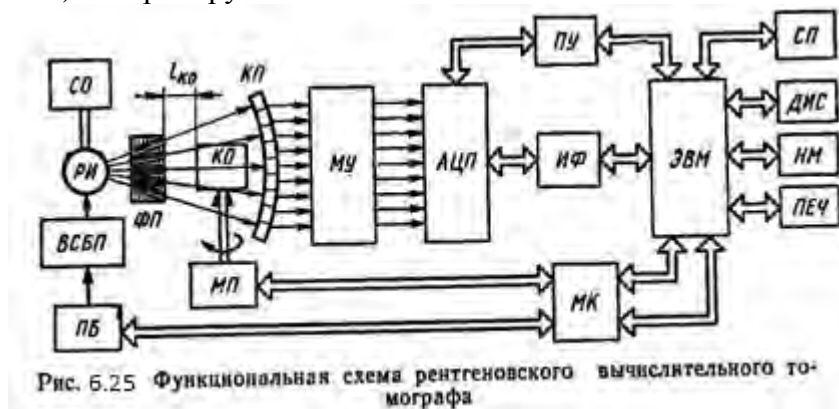
Рентгенотелевизионные микроскопы успешно применяются при неразрушающем контроле малогабаритных материалов и изделий  $\rho < \text{inil. } < \dots \dots \dots \text{, } \rho_{\text{Qnnn}}$  компонентов радиоэлектроники и микроэлектроники, малогабаритных механических узлов и деталей и т. п. Они удобны тем, что не требуют каких-либо дополнительных устройств для проведения контроля, их возможности могут расширяться путем применения систем обработки информации.

**Прикладные телевизионные установки** типа ПТУ-38 и ПТУ-39 содержат необходимые блоки приемной стороны, воспринимающие рентгеновское излучение и создающие видимое его изображение на экране видеоконтрольного устройства ВК-29 с кинескопом, имеющим размер по диагонали 47 см. Фактически они являются установками визуализации рентгеновского поля или изображения. Для проведения неразрушающего контроля с помощью этих установок их необходимо дополнить излучающей частью, для чего часто используют рентгеновский аппарат РУП-150-10, и устройствами для установки и перемещения контролируемого объекта. Прикладные телевизионные установки ПТУ-38 и ПТУ-39 предназначены, в основном, для радиационного контроля радиоэлектронных узлов.

Поскольку при использовании рентгеновидикона «электрическое изображение» на мишени, сформированное падающим рентгеновским излучением различной интенсив-

ности, непосредственно преобразуется в электрический видеосигнал, а при использовании электронно-оптических преобразователей и передающих телевизионных трубок видимого диапазона имеется еще ряд промежуточных этапов передачи изображения, то установки с рентгеновидико-нами дают принципиальную возможность получать более качественное изображение, особенно по краям экрана. Аппаратура с рентгеновидико-нами имеет на одном из выходов упорядоченный телевизионный сигнал, поэтому ее можно сравнительно просто соединить с микропроцессорными и логическими устройствами, а также с ЭВМ.

**Промышленная рентгеновская томография** является высокоэффективным методом неразрушающего контроля качества. Она стала возможна в связи с широким внедрением ЭВМ с большим быстродействием и объемом памяти и небольшими габаритами. Вычислительная томография реализует возможность решения обратной задачи интроскопии — по объемной информации об интенсивности прошедшего сквозь контролируемый объект в различных направлениях излучения найти распределение линейного коэффициента ослабления, связанного с плотностью материала внутри объема контролируемого объекта. К сожалению, в настоящее время пока нет качественных и надежных трехмерных индикаторов и поэтому оператор излучает послойные изображения (томограммы) контролируемого объекта.



Томограммы по сравнению с обычным рентгеновским изображением имеют гораздо большую информативность, поскольку детально показывают внутреннюю геометрическую структуру, распределение плотности и элементного состава материалов, что невозможно при использовании обычных методов без разрушения контролируемого объекта. Повышенный объем информации и ее детализация в рентгеновской вычислительной томографии получаются за счет применения большого количества первичных измерительных преобразователей, сканирования контролируемого объекта путем движения его или частей аппаратуры, снижения погрешности измерений с помощью известных в радиационной технике мер и совместной обработки полученной информации на ЭВМ.

Реализация рентгеновской вычислительной томографии строится на различных способах реконструкции изображения, среди которых чаще всего отдают предпочтение алгоритму обратного проецирования с фильтрацией сверткой. Быстрота получения изображения, в конечном счете, определяется сканирующим устройством и процедурой обратной дискретной свертки, требующем многочисленных операций умножения (выполняемых медленнее других операций), количество которых связано с кубом размерности матрицы изображений. Например, для матрицы изображения размером  $256 \times 256$  элементов необходимо выполнить около  $2 \times 10^7$  операций умножения. В связи с этим для проведения этих расчетов используют специальный процессор. Упрощенная схема рентгеновского вычислительного томографа приведена на рис. 6.25.

Излучающая часть рентгеновского вычислительного томографа содержит рентгеновский излучатель *РИ*, формирователь пучка *ФП*, высоковольтный стабилизированный блок питания *ВСБП* и систему охлаждения *СО*. Рентгеновский излучатель в томо-

графе должен быть более качественным по сравнению с обычным, т. е. иметь меньшее фокусное пятно, более стабильный спектральный состав излучения, постоянную интенсивность излучения и др., для чего применяют коллиматор, компенсаторы и фильтры, стабилизируют источник питания (допустимая нестабильность высоковольтного напряжения составляет 0,01—0,3% при колебаниях напряжения питающей сети на 10—15%), а также вводят управление рентгеновским излучателем от ЭВМ.

Сканирующее устройство в виде механизма точного перемещения *МП* обеспечивает взаимное перемещение контролируемого объекта *КО* относительно излучательной части и жестко скрепленного с ней комплекта преобразователей *КП*, причем так, чтобы это движение имело строго постоянную скорость, и получение с помощью специальных счетчиков сигналов о положении просвечивающих лучей по отношению к контролируемому объекту. Сканирующее устройство представляет собой сложную высокоточную систему, в состав которой входят: прецизионный механический привод, блоки стабилизации параметров движения, в том числе подавления вибраций, измерительные датчики координат, устройство для обмена сигналами между подвижной и неподвижной частями установки, кабельные устройства, узлы крепления и подачи контролируемого объекта, элементы, обеспечивающие безопасную работу с томографом, пульт управления сканирующей системой и блоки индикации. Чаще всего движется контролируемый объект, а рентгеновская часть и комплект преобразователей — неподвижны, что облегчает съем и передачу электрических сигналов, но предъявляет более жесткие требования к механизму перемещений при контроле разнотипных объектов.

Комплект первичных измерительных преобразователей *КП* (блок датчиков детекторов) выполняется обычно в виде матрицы преобразователей измерительного канала (до 2000 шт.) и опорного канала (от 1 до 4 шт.). Комплект преобразователей *КП* также снабжен коллиматором и фильтром *ФП*, что формирует пучок излучения отдельных преобразователей и существенно снижает влияние рассеянного излучения. Наиболее существенными требованиями, предъявляемыми к комплекту преобразователей, являются: хорошая идентичность преобразователей и высокие метрологические характеристики (стабильный темновой ток, постоянная чувствительность, линейность характеристики, большой динамический диапазон и др.) при высоком быстродействии. По существу комплект преобразователей создает сканирование контролируемого объекта по второй координате путем опроса отдельных преобразователей. В качестве преобразователей в томографах используют сцинтиллирующий кристалл вместе с фотоэлектронным умножителем, полупроводниковым фотоэлементом или ионизационную камеру.

Сигналы от комплекта преобразователей *КП* подводятся к многоканальному усилителю *МУ* с противозумовой коррекцией и стабильным коэффициентом усиления. Выходные сигналы с усилителя *МУ* поступают к аналого-цифровому преобразователю *АЦП* для формирования из них упорядоченных цифровых сигналов для последующей обработки и через интерфейс *ИФ* к ЭВМ.

Работу рентгеновского вычислительного томографа организует мини-ЭВМ, которая собирает необходимую информацию для реконструкции послойных изображений и управляет согласованной работой всех блоков. Микроконтроллер *МК* управляет работой излучательной части, механизма перемещений и передачей информации от комплекта датчиков *КП* к ЭВМ в режимах, задаваемых оператором с пульта управления томографом *ПУ*. ЭВМ редактирует и упорядочивает сведения, полученные по каждому из направлений, устраняет различные ошибки и погрешности и обрабатывает их с учетом координат лучей для реконструкции изображения в выбранном сечении с помощью спецпроцессора *СП*, осуществляющего операцию фильтрации сверткой. Математическое обеспечение томографов достаточно развито и помимо отмеченных функций позволяет производить много процедур по обработке и преобразованию томограмм. Результаты расчетов формируются в виде квадратной матрицы (256x256 или 512X X512 элементов) значений коэффициентов линейного ослабления и запоминаются в накопи-



телях на магнитных дисках или лентах *НМ*. Полученные данные могут в зависимости от заданного режима работы томографа выводиться на дисплей *ДИС*, алфавитно-цифровое печатающее устройство *ПЕЧ*, передаваться на центральное или более мощное вычислительное устройство и т. д.

Оператор по своему усмотрению с учетом целей контроля может выводить результаты рентгеновского вычислительного томографа на дисплей, в том числе и с цветовой индикацией, документировать информацию разного вида путем распечатки всего изображения или отдельных его количественных характеристик, проводить калибровку и диагностику томографа в целом. Выходная информация томографа с помощью ЭВМ может выводиться по-разному: с изменением масштаба в разных поперечных сечениях контролируемого объекта, с разным контрастом изображения, с указанием числовых показателей для выбранной области и т. п.

Рентгеновские вычислительные томографы дают возможность решать многие задачи неразрушающего контроля качества — как задачи интроскопии, так и количественной оценки параметров различных объектов. В настоящее время наибольшее применение они имеют для контроля объектов с небольшим затуханием излучения, в частности объектов из легких сплавов, композиционных материалов, углепластиков, резины, дерева и т. п. материалов толщиной до 20 мм и с внешними размерами до 1,5 м при решении по коэффициенту линейного ослабления 0,5%. Чтобы сохранить разрешающую способность при контроле объектов с разными размерами, изменяют расстояние между излучательной частью и контролируемым объектом /ко. Проблема увеличения размеров контролируемых объектов связана с излучательной частью вычислительного томографа.

Промышленные вычислительные томографы для целей неразрушающего контроля качества только начинают свой путь и несомненно их широкое внедрение в ближайшем будущем для решения многих задач с высокой точностью и достоверностью результатов контроля.

## 6.9. Гамма-дефектоскопы

Появление сравнительно дешевых радиоактивных изотопов, излучающих кванты с различной энергией, и легкость получения источников с требуемой активностью привели к созданию специальных комплектов оборудования, названных гамма-дефектоскопами. Основой их являются радиоизотопные источники, которые перемещаются в зону контроля с помощью специального механизма по проложенным шлангам (универсальные шланговые дефектоскопы) или остаются неподвижными, а экспозиция производится за счет открывания и закрывания затвора (дефектоскопы для фронтального и панорамного просвечивания). Гамма-дефектоскопы, представляя собой, по существу, лишь излучающую часть установки для проведения радиационного контроля качества, наиболее удобны при использовании в качестве индикатора фотопленки, т. е. для *гаммаграфии*. В этом случае неразрушающий контроль чаще всего проводится непосредственно в месте расположения изделия, особенно если оно имеет большие габариты, а комплект гамма-дефектоскопа получается очень компактным и его легко переносить. Вместе с тем гамма-дефектоскопы могут успешно применяться в сочетании с установками или устройствами, производящими регистрацию излучений и вторичную обработку сигналов о дефектах, например вместе с установкой РИ-ЮЭТ или вместе с устройством радиометрической регистрации прошедшего ионизирующего излучения, что реализовано в дефектоскопе РД-10Р. Технические характеристики некоторых гамма-дефектов приведены в табл. 6.15. Рассмотрим типичное устройство **универсального шлангового дефектоскопа**, функциональная схема которого показана на рис. 6.26.

Таблица 6.15

Тип дефектоскопа	Толщина просвечивания по стали, мм	Максимальная экспозиционная доза* Р/с	Диаметр активной части, мм	Углы коллимации пучка, град	
				фронтальные	панорамные
Универсальные					
РИД-21М	7—60	$5 \cdot 10^{-4}$	3—5	53	Сфера
РИД-41	30—2000	$2,5 \cdot 10^{-3}$ 0,14	0,5—2 7	40 и 53	20 и сфера
«Гаммарид-11»	1—20	$1,2 \cdot 10^{-4}$	9	53	28 и сфера
«Гаммарид-12»	1—20	$5 \cdot 10^{-4}$ $4,5 \cdot 10^{-5}$	11,5 9	$28 \times 53$ 53 $28 \times 53$	28 и сфера
«Гаммарид-25»	7—80	$5 \cdot 10^{-4}$	5	53 $28 \times 53$	28 и сфера
Для фронтального и панорамного просвечивания					
РИД-13	1—20	$1,2 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-4}$ $4,5 \cdot 10^{-5}$	9 11,5 9	53 $28 \times 53$	28
«Гаммарид-20»	7—60	$5 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-3}$	5	53 $28 \times 53$	28
«Магистраль-1»	7—80	$1,2 \cdot 10^{-2}$	6	$12 \times 90$	12

\* На расстоянии 1 м.

Радиоизотопный источник излучения — ампула  $A$  в нерабочем состоянии хранится в центре радиационной головки  $РГ$  (положение  $A_1$ ), а для экспозиции перемещается по шлангу — ампулопроводу  $Ш_2$ —  $Ш_3$  в коллимирующую насадку  $КН$  (положение  $A_2$ ) по шлангам  $Ш_u$   $Ш_2$  и  $Ш_b$  с помощью тросов  $T_b$ ,  $T_3$  и  $T_3$  механизма управления  $МУ$ . Коллимирующая насадка  $ЛЯ$  обеспечивает облучение контролируемого объекта  $КО$  в необходимом секторе и выбирается в зависимости от его формы, расположения преобразователя лучистой энергии  $ПЛЭ$  и особенностей проведения контроля и может быть сменной. Поскольку изотопный источник излучает кванты нескольких энергетических линий, чтобы пропустить только желательную часть спектра, устанавливается фильтр  $\Phi$ . Положение ампулы указывает сигнализатор  $С$  механического или электромеханического типа. Для упрощения работы вместе с гамма-дефектоскопом может использоваться экспонетр  $ЭКС$ , определяющий поглощенную дозу излучения. Его применение особенно целесообразно в гаммаграфии (индикатор — фотопленка), поскольку из-за снижения активности радиоизотопного источника во времени возможны ошибки в выборе времени экспозиции. Для удобства транспортировки гамма-дефектоскопа и дополнительных принадлежностей прилагается тележка  $T$ .

Чтобы расширить возможности гамма-дефектоскопов по контролю различных полуфабрикатов и изделий, к ним придают набор источников, помещаемых в защитный контейнер (магазин) для перезарядки ампул несколькими радиоактивными источниками. С целью увеличения числа решаемых задач контроля в комплект гамма-дефектоскопа может входить несколько источников, коллимирующих насадок и шлангов.

Длина амплудопровода, м	Радиоизотоп	Привод источника излучения	Сигнализация о пучке излучения	Электропитание	Условия работы	Масса, кг		
						радиационной головки	пульта управления	контейнера
8	$^{137}\text{Cs}$	Ручной	Световая	Батарея 3 В	Полевые	25	6	110
12	$^{192}\text{Ir}$ $^{60}\text{Co}$	Электро-механический	Световая, радиометрическая	3-фазная сеть 380 В	Цеховые	900	50	1000
5	$^{170}\text{Tm}$	Ручной	Механическая	Нет	Полевые	7,5	3	55
15	$^{76}\text{Se}$ $^{90}\text{Sr} + \text{Be}$	Электро-механический	Световая, механическая	$\pm 24$ В; 220 В; 50 Гц	Цеховые	7,5	30	55
13	$^{137}\text{Cs}$	Ручной	Механическая	Нет	Полевые	15	3	54
5	$^{170}\text{Tm}$ $^{76}\text{Se}$	»	»	»	»	8	5	55
8	$^{90}\text{Sr} + \text{Be}$ $^{137}\text{Cs}$	»	»	»	»	12	3	54
30	$^{192}\text{Ir}$ $^{192}\text{Ir}$	Электро-механический	Световая, механическая	$\pm 24$ В	»	25	10	55

Защитную часть радиационной головки, контейнеров и коллимирующей насадки выполняют из свинца, вольфрамовых сплавов, обедненного урана или из комбинаций этих материалов. Коллимирующая насадка *КН* может помещаться при проведении контроля в труднодоступных местах на расстоянии, определяемом длиной шлангов. Наиболее совершенные аппараты (РИД-11, РИД-41, «Гаммарид-21», «Гаммарид-26») снабжены гибким зубчатым тросом, находящимся в постоянном зацеплении с зубчатым колесом управления. Источники излучения, располагаемые в контейнере-магазине используются в зависимости от материала и толщины контролируемого объекта, фокусного расстояния *R*, ориентации пучка излучения и других конкретных условий. В качестве вспомогательных приспособлений к дефектоскопам придаются штативы или специальные устройства крепления и перемещения, маркировочные знаки, эталоны чувствительности, магнитные держатели и т. п. приспособления для проведения радиационного контроля качества, аналогичные применяемым в рентгенографии.

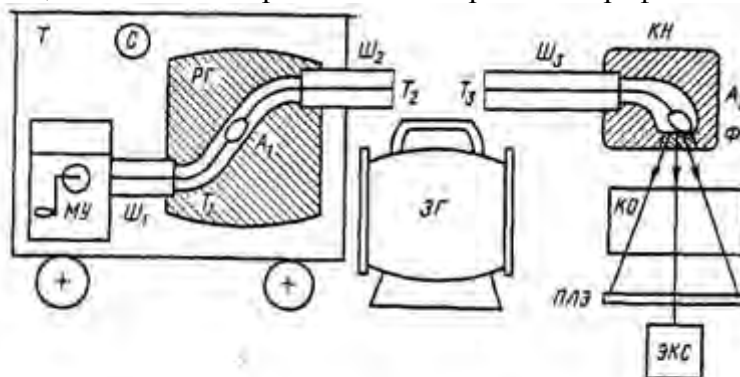


Рис. 6.26 Устройство универсального шлангового дефектоскопа

Гамма-дефектоскопы для фронтального и панорамного просвечивания РИД-КЗ, «Магистраль-1» и другие имеют неподвижный радиоизотопный источник, а экспозиция осуществляется дистанционным перемещением затвора. Некоторые дефектоскопы («Гаммарид-12») снабжены реле времени с выдержкой от 1 до 99 с, а дефектоскоп РИД-

41 имеет гамма-экспонетр. Привод выпуска пучка излучения у аппаратов, работающих в полевых условиях, выполняется обычно ручным, а в цеховых — ручным или электромеханическим.

Чтобы обеспечить высокую степень безопасности, в гамма-дефектоскопах предусмотрена блокировка выхода ампулы с помощью встроенных или навесных замков, упоров в ампулопроводах и приводе аварийного возврата. Нахождение ампулы в рабочей зоне отмечается световой, механической и радиометрической сигнализацией. Современные гамма-дефектоскопы имеют контейнеры, изготовленные так, чтобы они выдерживали воздействие крупной аварии: пожар при 800°C, падение на бетонный монолит с высоты 9 м, падение на стальной штырь с высоты 1 м.

**Дефектоскоп РД-10Р** является комплектной установкой для проведения радиационного контроля качества и содержит все необходимые устройства. Он построен на базе гамма-дефектоскопа РИД-41 и в своем составе дополнительно имеет: пятиканальный блок преобразователей, блоки управления, питания и регистрации, быстродействующий самопишущий прибор Н-327/5, механизм установки и перемещения контролируемого объекта.

В качестве преобразователя излучения в дефектоскопе РД-10Р использован сцинтиллирующий кристалл NaI(Tl) с фотоэлектронным умножителем. Дефектоскоп РД-10Р предназначен для неразрушающего контроля объектов различной конфигурации при перепаде толщин от 0,1 до 1 м, в связи с чем в нем предусмотрено несколько режимов работы блоков обработки сигналов и их регистрации, что позволяет оптимизировать условия контроля. В частности, режим работы ФЭУ регулируется в зависимости от средней интенсивности воздействующего на кристалл излучения путем изменения напряжения питания. Это существенно расширяет диапазон регистрируемых интенсивностей излучения до  $10^4$  раз. Блок преобразователей излучения и комплекс регистрирующей аппаратуры соединяются кабелями длиной 200 м, обеспечивая безопасную работу персонала. Сочетание мощного источника излучения на основе изотопа  $^{60}\text{Co}$  с высокой чувствительностью радиометрических преобразователей позволяет вести контроль полуфабрикатов и изделий с плотностью материала  $1,8 \text{ г/см}^3$  и толщине до 1 м. Помимо пяти основных приемников излучения в дефектоскопе РД-10Р имеется еще три дополнительных приемника для определения глубины залегания дефекта. Блок управления позволяет дистанционно управлять приемниками излучения при изменении фокусного расстояния и выбирать оптимальный режим контроля конкретных полуфабрикатов и изделий.

Аналоговая и логическая обработка информации от нескольких преобразователей дефектоскопа дает возможность вести многопараметровый радиационный контроль качества, который состоит в определении наличия дефектов, измерении толщины слоя и нахождении глубины залегания дефектов, что является преимуществом дефектоскопа РД-10Р по сравнению с другими.

Отмечая преимущества гамма-дефектоскопов в целом, можно сказать об их небольших размерах, экономичности и возможности эксплуатации без источников питания, что особенно важно в полевых условиях. Недостатками гамма-дефектоскопов являются: ограниченные возможности по регулировке режимов работы, необходимость периодической замены источников, потерявших активность, и дополнительной регулировки в процессе эксплуатации из-за снижения активности источника во времени, а также невозможность полностью «выключить» радиоактивный источник. Учитывая эти особенности, при организации радиационного контроля качества конкретных объектов необходимо провести всесторонний технико-экономический анализ применения рентгеновской аппаратуры и гамма-дефектоскопов по выбору оптимального метода контроля

## 6.10. Радиационная толщинометрия в прошедшем излучении

Контроль геометрических параметров—толщинометрия с помощью ионизирующих излучений— может производиться радиометрическим методом, реже методами радиографии и радиоскопии. В основе радиационной толщинометрии различных объектов лежат методы, использующие анализ прошедшего или отраженного (рассеянного) излучения, что позволяет определить толщину в направлении просвечивания.

Измерение геометрических параметров в *плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания*, осуществляется методами радиографии и радиоскопии по получаемому изображению. Погрешность измерения в этих случаях определяется в первую очередь нерезкостью изображения. Для повышения точности измерения геометрических размеров изображение можно с помощью сканирующего оптико-электронного или телевизионного устройства превратить в электрический сигнал, что даст возможность провести обработку информации с целью снижения влияния помех и более четко выделить уровень сигнала, характеризующий измеряемый геометрический размер. Однако такой контроль недостаточно оперативен и точен, это ограничивает его распространение.

Более широко применяются толщиномеры, предназначенные для измерения толщины в *направлении просвечивания*. Они строятся на принципе измерения интенсивности прошедшего излучения. Технические данные некоторых толщиномеров приведены в табл. 6.16. Взаимодействие ионизирующих излучений с материалом контролируемого объекта имеет статистический характер, а зависимость интенсивности излучения от толщины слоя близка к экспоненциальной. Поэтому шкала радиационного толщиномера будет нелинейной, в связи с чем для толщинометрии широко используют компенсационные и мостовые методы измерений, когда имеется больше возможностей корректировать выходные сигналы или показания прибора и снизить влияние изменений во времени интенсивности излучения, особенно при использовании радиоактивных изотопов с небольшим периодом полураспада.

Таблица 6.16

Показатели	Тип толщиномера листов			
	ИТХ-5736	ИТГ-5688	ИТ-5460	ИТШ-496-1
Диапазон измеряемых толщин, мм	0—3—4—5— —6—8—10—12	0—8—10—12	0,4—3	0,03—0,8
Погрешность измерения: мкм %	1—3 1—3	1—3 1—3	10 1	1,5 1
Материал	Сталь холодная	Сталь горячая	Сталь, медь, никель, цинк, титан	Сталь
Время измерения, с Источник излучения	0,1—1 Рентгеновская трубка	0,1—1 Рентгеновская трубка	0,25 <sup>170</sup> Tm	0,3 <sup>147</sup> Pm, <sup>204</sup> Tl, <sup>90</sup> Sr и др.
Преобразователь излучения	Ионизационная камера		Сцинтиллятор и счетчик	

Статистический характер взаимодействия ионизирующего излучения с веществом проявляется дважды: при взаимодействии первичного излучения с веществом контролируемого объекта и при взаимодействии вторичного излучения с материалом преобразователя излучения в электрический сигнал. Чтобы снизить возникающую при этом статистическую погрешность, следует увеличить число квантов или частиц, воздействующих на преобразователь, для чего необходимо использовать источники излучения с большим радиационным выходом или увеличивать время регистрации излучения. Эти способы снижения статистической погрешности противоречат другим требованиям к процессу неразрушающего контроля. Так, увеличение радиационного выхода ухудшает условия проведения контроля с точки зрения техники безопасности и делает необходи-

мыми дополнительные меры по защите от излучения, а увеличение времени регистрации, излучения снижает производительность контроля.

В общем случае, когда контролируемый объект — многослойный и его материалы состоят из нескольких химических элементов с разными атомными номерами (химическое соединение, сплав или смесь и т. п.), показание толщиномера определяется выражением

$$\alpha = K_{\tau} \frac{I_0 R_0^2}{R^2} \exp [-(\mu_1 p_1 b_1 + \mu_2 p_2 b_2 + \dots)] 2^{(-t/T_{1/2})},$$

где  $K_{\tau}$  — постоянная, характеризующая преобразование сигналов блоками толщиномера;  $\mu_i$ ,  $\mu_2$ , ... — линейные коэффициенты поглощения 1, 2, ... элементов материалов контролируемого объекта;  $p_1$ ,  $p_2$ , ... — величины, характеризующие долю данного элемента;  $b_1$ ,  $b_2$ , ... — толщина слоя с элементами 1, 2, ...

Из выражения нетрудно получить значение чувствительности к толщине и проанализировать погрешность ее измерения. Погрешность измерения толщины обусловлена тремя основными причинами: нестабильностью блоков толщиномера — источника излучения, преобразователя вторичного излучения, электронных блоков обработки сигналов и индикаторного прибора; непостоянством свойств контролируемого объекта из-за изменения его химического состава, формы, положения и др.; статистическим характером получения сигналов при радиационном контроле качества. Первые две причины возникновения погрешностей измерений характерны для многих областей измерительной техники и неразрушающего контроля, а статистическая составляющая погрешности специфична для аппаратуры, использующей ионизирующие излучения, и требует принятия специальных мер и компромиссных решений при создании толщиномеров.

Следует также отметить, что взаимодействие ионизирующего излучения с контролируемым объектом в значительной мере определяется его толщиной, а изменение плотности и химического состава материала будет мешающим измерению фактором и может привести к появлению большой погрешности. В связи с этим наряду с понятием толщины в единицах длины (мкм, мм) в толщинометрии ионизирующими излучениями довольно широко используется своеобразная единица измерения толщины слоя (покрытия) — поверхностная плотность материала, выраженная в  $\text{г/м}^2$ ,  $\text{г/см}^2$  или  $\text{мг/см}^2$ . В этих же единицах часто аттестуют и стандартные образцы покрытий для проверки радиационных толщиномеров.

Толщиномеры, использующие прошедшее излучение, широко применяются для контроля полуфабрикатов и изделий, ограниченных двумя внешними поверхностями: листы, трубы, сосуды и различные емкости, стенки и др. Для объекта из одного слоя толщиной  $b$  можно получить выражения для погрешности за счет блоков измерительной аппаратуры

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{1}{\mu b} \frac{\Delta \alpha}{\alpha}$$

и гтятигтичег.кой погешности

$$\frac{\sigma b}{b} = \frac{\exp [-(\mu b/2)]}{\mu b} \frac{1}{\sqrt{I_0 \frac{R_0^2}{R^2} t_{\text{из}} \xi^2 (-t/T_{1/2})}},$$

где  $t_{\text{из}}$  — время измерения;  $\xi$  — эффективность регистрации излучения преобразователем.

Как видно, для снижения статистической погрешности надо увеличивать поглощенную дозу, т. е. интенсивность излучения источника или время измерения, причем в большей степени по сравнению с требуемым снижением погрешности. Анализ выражений показывает, что минимум аппаратурной погрешности достигается при  $b \approx 1/\mu$ , а минимум статистической погрешности при  $b \approx 2/\mu$ .

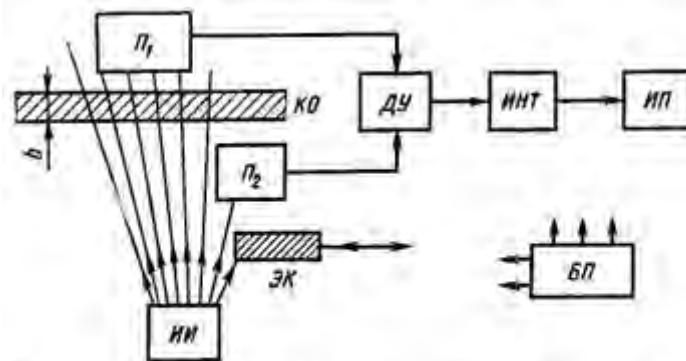


Рис. 6.27 Функциональная схема толщиномера листа компенсационного типа

Так как толщина  $B$  задается техническими требованиями на контролируемый объект и определяется конкретной целью неразрушающего контроля, то выбор условий контроля, особенно с учетом зависимости  $\mu$  от энергии квантов излучения, носит сложный характер, является компромиссным и должен производиться с учетом всех влияющих факторов.

На рис. 6.27 показана упрощенная функциональная схема одного из простых толщиномеров листов, построенного на компенсационной схеме с непосредственным измерением толщины по интенсивности прошедшего излучения. Толщина листа определяется по разности интенсивностей от источника  $ИИ$ , падающих на преобразователи  $П_1$  и  $Я_2$ . Для снижения потока излучения, падающего на преобразователь  $Я_2$ , он часто закрыт экранирующей шторкой  $ЭК$ , которая служит для установки начального показания толщиномера. Электрические сигналы с преобразователей  $П_1$  и  $П_2$  поступают на дифференциальный усилитель  $ДУ$ , так что при отклонении толщины от номинального значения, установленного при настройке, на его выходе получается сигнал того или иного знака. Интегрирующий блок  $ИИТ$  усредняет импульсные сигналы, поступающие от усилителя  $ДУ$ , и создает напряжение постоянного тока, подаваемое на измерительный прибор  $ИП$ , показывающий отклонение толщины листа от номинального значения. В толщиномере по схеме рис. 6.27 устраняется погрешность, вызванная непосредственно изменением интенсивности источника излучения (регулировка шторкой  $ЭК$ ), но не учитывается влияние ее на чувствительность толщиномера, что приводит при больших отклонениях к появлению погрешности, равной относительной величине изменения интенсивности излучения. Поэтому этот толщиномер требует периодической подстройки по контрольным или стандартным образцам, особенно при использовании радиоизотопного источника.

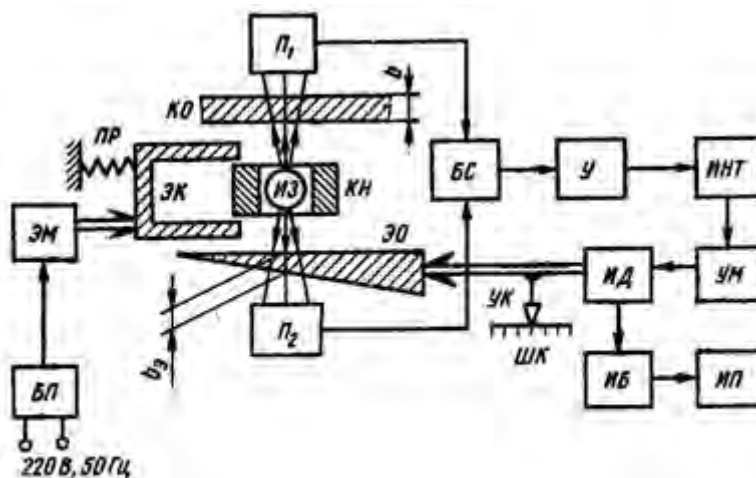


Рис. 6.28 Функциональная схема толщиномера стальных листов типа ИТГ

В более совершенных толщиномерях типа ИТГ, упрощенная структурная схема ко-

торых приведена на рис. 6.28, использован способ компенсации эталоном в сочетании с системой автоматического слежения, что дает возможность получить меньшую погрешность измерения.

Излучение от источника *ИЗ*, ограниченное коллимирующей насадкой *КН*, попадает на преобразователи *Ш* и *П*<sub>2</sub> через контролируемый объект *КО* и эталонный образец *ЭО*, выполненный в виде пластины переменной толщины (клина) из того же или близкого по физическим свойствам материала, что и контролируемый объект *КО*. Сигналы от преобразователей *Л*<sub>4</sub> и *Я*<sub>2</sub> передаются в блок сравнения *БС*, где они вычитаются. Разностный сигнал поступает к усилителю *У*, а затем усредняется интегратором *ИНТ*. Сигнал постоянного тока с интегратора *ИНТ*, характеризующий отличие толщины контролируемого объекта *КО* и эквивалентной толщины эталонного образца *ЭО*, после усилителя мощности воздействует на исполнительный двигатель *ИД*. Под действием постоянного тока, направление и величина которого зависят от отклонения толщины, исполнительный двигатель *ИД* перемещает эталонный образец до тех пор, пока между источником излучения *ИЗ* и преобразователем *Л*<sub>4</sub> не окажется участок эталонного образца *ЭО*, средняя эквивалентная толщина которого равна толщине объекта *КО*. В этом случае разностный сигнал интегратора *ИНТ* будет равен нулю и двигатель *ИД* остановится. Отсчет толщины контролируемого объекта производится в этот момент с помощью механически связанной с эталонным образцом *ЭО* стрелки указателя *УК* по неподвижной шкале *ШК*. Кроме того, с валом двигателя *ИД* механически соединен измерительный блок *ИБ*, перемещение потенциометра в котором создает электрический сигнал, вызывающий соответствующее показание индикаторного прибора *ИП*. Питание всех блоков толщиномера осуществляется от блока питания *БП*.

Чтобы защитить персонал и окружающую среду от ионизирующего излучения в нерабочее время, предусмотрен защитный экран *ЭК* (затвор), открывающий источник *ИЗ* только при включении толщиномера для работы путем пропускания тока от блока питания *БП* через электромагнит *ЭМ*. При включении блока питания в сеть электромагнит *ЭМ* перемещает экран *ЭК* от выходного отверстия коллимирующей насадки *КН*, открывая источник излучения *ИЗ*. Когда питание выключено, защитный экран закрывает источник *ИЗ* с помощью возвратной пружины *ПР*, надежно перекрывая излучение.

Толщиномеры листов типа ИТХ-5736, ИТГ-5688 и другие используют рентгеновский излучатель и построены по схеме рис. 6.28. Дополнительно они имеют ряд устройств, облегчающих их использование и снижающих погрешность измерений. В их составе имеется система автоматической сигнализации о достижении предельного значения толщины и о работоспособности толщиномера, а также блоки для подключения к автоматической системе регулирования листа в процессе холодной или горячей прокатки. Для подстройки нуля и настройки на нужный диапазон толщины в толщиномере предусмотрены еще два образца-клины, регулирующее устройство для изменения анодного напряжения рентгеновской трубки, устройство для переключения циферблатов индикатора и другие электронные и потенциометрические элементы.

Сравнивая рентгеновские толщиномеры листовых полуфабрикатов и изделий с толщиномерами аналогичного назначения, реализующими другие методы неразрушающего контроля качества, следует отметить их бесконтактность по сравнению с ультразвуковыми толщиномерами, слабое влияние небольших вариаций химического состава, термообработки и других воздействий на материал по сравнению с магнитными и вихретоковыми методами. Недостатками радиационных толщиномеров является их сложность и повышенные требования к соблюдению правил техники безопасности при их использовании.

### 6.11. Толщиномеры многослойных изделий

Изделия, состоящие из двух и более слоев, могут контролироваться с использова-



нием прошедшего излучения, если мешающее влияние неконтролируемых слоев оказывается небольшим, например контроль толщины металла на пластмассе. В этих случаях можно применять устройства, описанные выше. Однако такие варианты контроля многослойных изделий встречаются редко. К многослойным изделиям относятся многочисленные изделия с различными покрытиями, толщина которых много меньше толщины основного металла и доступ к которым возможен только с одной стороны. Радиационный контроль толщин таких покрытий возможен с помощью рассеянного излучения, чаще всего в направлении, обратном направлению распространения первичного излучения. Обратное рассеянное излучение может иметь такой же вид, как первичное, или иной, в частности световые фотоны. Для толщинометрии чаще других используют  $\gamma$ -излучение с регистрацией рассеянных  $u$ -квантов, рентгеновское излучение с регистрацией характеристического электромагнитного излучения и  $p$ -излучение с регистрацией  $p$ -частиц. Жесткое рентгеновское и  $\gamma$ -излучение применяются при измерении больших толщин (до десятков мм),  $p$ -излучение и рентгеновское малых энергий — при измерении тонких покрытий (обычно менее 1 мм) для различных изделий.

Основные погрешности измерения толщины по рассеянному излучению также могут быть описаны двумя составляющими: аппаратурной

$$\frac{\Delta b_n}{b_n} = \frac{1}{\mu_p b_n} \frac{\Delta \alpha}{K' \alpha [(Z_1/Z_2)^n - 1]}$$

и статистической

$$\frac{\sigma b_n}{b_n} = \frac{\exp\left(-\frac{\mu_p b_n}{2}\right)}{b_n \mu_p} \sqrt{\frac{(Z_1/Z_2)^n [(Z_1/Z_2)^n - 1]}{J_0 \frac{R_0^2}{R^2} t_n \xi [(Z_1/Z_2) - 1] 2^{-t/T_{1/2}}}}$$

где  $Z$  и  $Z_i$  — атомные номера покрытия и основания контролируемого объекта;  $\mu_p$  — эффективный коэффициент рассеяния (меньше  $\mu$  в 2—3 раза);  $n$  — экспериментально определяемая величина показателя степени (для  $p$ -излучения  $n \ll 3/4$ ).

Анализ составляющих погрешностей приводит к выводам, аналогичным при контроле по прошедшему излучению, и выбор условий контроля также производится из компромиссных соображений. Технические данные для некоторых толщиномеров покрытий приведены в табл. 6.17.

**Типичным толщиномером** для контроля сравнительно толстых слоев металла является толщиномер ТОР-3, предназначенный для измерения толщин листов, стенок труб и емкостей из листов углеродистых сталей при одностороннем доступе (рис. 6.29).

В источнике излучения *ИИ* использован радиоизотоп  $^{60}\text{Co}$ , имеющий  $u$ -кванты с большой проникающей способностью. Вторичное излучение, отраженное от контролируемого объекта, падает на сцинтиллирующий кристалл *СЦ* из  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , состыкованный с фотоэлектронным умножителем типа ФЭУ-35. От воздействия потока первичного излучения сцинтиллятор *СЦ* защищен вольфрамовым экраном *ЭК*. Электрические импульсы, вызванные сцинтилляциями, с выхода ФЭУ поступают на согласующий усилитель *СУ*, поскольку выходное сопротивление цепи ФЭУ велико. Формирователь импульсов *ФИ* отсекает шум ФЭУ, содержащийся в усиливаемом сигнале и имеющий величины в несколько раз меньше амплитуды импульса сцинтилляции, и вместо каждого импульса, вызванного сцинтилляцией, создает импульс нормированной амплитуды и длительности. Последовательность полученных сформированных импульсов усредняется по времени интегратором *ИНТ*, на выход которого подключен стрелочный прибор *СП*, показывающий толщину покрытия. Питание всех блоков толщиномера производится от батареи *Б* из 6 элементов по 1,5 В, причем фотоэлектронный умножитель ФЭУ питается от батареи *Б* через высоковольтный преобразователь напряжения *ВП*. Толщиномер ТОР-3 является портативным прибором, работоспособным при температуре окружающей среды от  $-30$  до  $+50^\circ\text{C}$  и влажности до 98%.

Показатели	Тип толщиномеров покрытий				
	ТОР-3	«Бетамикромметр-2»	Бетаскоп	ТПРУ-1	ФРАТ-2
Диапазон измеряемых толщин, мкм	500—3000—16000	0—150	0—150	0,1—2—10—40	2—30
Погрешность измерения: мкм	150—200	0,25—0,85	1	0,1—0,15	0,2
%	4—6	—	1	5—8	2
Материал покрытия	Сталь	Цветные металлы		Любые при плотности 0,1—100 мг/см <sup>2</sup>	Никель, хром
Материал основания	Жидкости, пластмассы	Сталь, цветные металлы		Любые металлы	Титановые сплавы
Время измерения, с	До 60	1—1000	15	1—1000	180
Источник излучения	<sup>60</sup> Со	БИП-М, БИП-К	Набор β-излучателей	БИП-М, БИП-К	Рентгеновская трубка

**Толщиномеры типа «Бетамикромметр»** предназначены для измерения толщины разнообразных гальванических покрытий по обратному р-рассеянию. Принцип их действия основан на зависимости числа обратно рассеянных р-частиц от толщины покрытия, которая должна быть меньше толщины насыщения. В зависимости от того, какой материал покрытия или основания имеет больше атомный вес, число рассеянных р-частиц будет нарастать или убывать при увеличении толщины покрытия. Упрощенная функциональная схема покрытия, использующая р-излучение, изображена на рис. 6.30.

Источник *ИИ* создает р-излучение и закрыт вольфрамовым экраном *Ж*, чтобы его первичное излучение не попадало на сцинтиллятор *СЦ*. Зона облучения контролируемого объекта *КО* ограничивается диафрагмой *ДФ* и коллиматором *КМ*, верхняя часть которого выполнена со светозащитой. Рассеянное объектом *КО* излучение попадает на поверхность монокристалла *СЦ*, и сцинтилляции, возникающие в нем, приводят к появлению импульсных сигналов на выходе *ФЭУ*. Из импульсов *ФЭУ* после их ограничения формируются импульсы стандартной длительности и амплитуды, что делает формирователь импульсов *ФИ*.

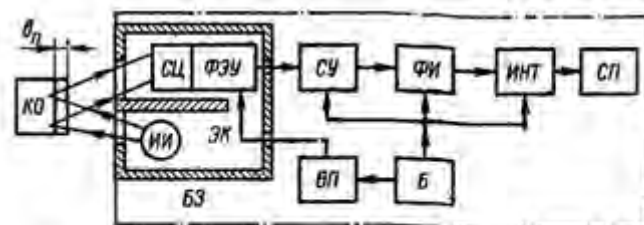


Рис. 6.29 Функциональная схема толщиномера стенки из стали

Эти импульсы после согласующего усилителя *У* подводятся к управляемому счетчику *УС*, который осуществляет пересчет числа импульсов за определенный отрезок времени и с задаваемым коэффициентом деления числа импульсов. Время счета и коэффициент деления через блок управления счетчиком *БУС* вычисляет микропроцессор *МКП* (в более ранних разработках его устанавливал оператор) с учетом передаваемых с пульта управления *ПУ* через устройство связи с пультом *УСП* сведений об элементах основания и покрытия, а также об источнике излучения, которые вводит оператор. Результаты работы счетчика пересылаются в память оперативного запоминающего устройства *ОЗУ*, которое может содержать несколько полупроводниковых запоминающих устройств в виде микросхем.

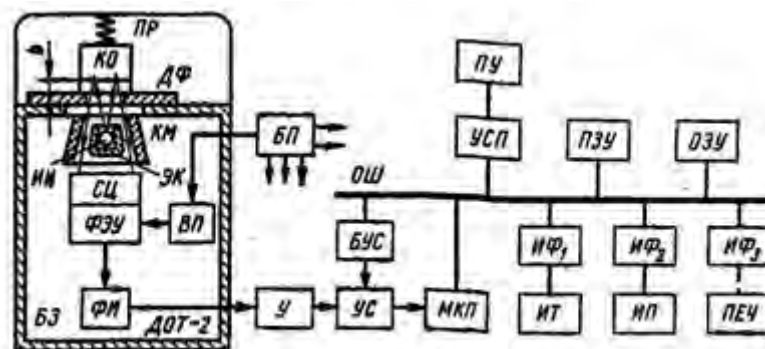


Рис. 6.30 Функциональная схема толщиномера покрытий

Помимо этого, в память *ОЗУ* вводятся сведения о количестве измерительных циклов и другие данные с пульта *ПУ* или в процессе измерений. Микропроцессор *МКП* с помощью математического обеспечения, записанного в постоянной памяти *ПЗУ* и вызываемого по командам или с пульта управления *ПУ*, обрабатывает полученные данные с учетом номера материала покрытия и основания, вычисляет толщину покрытия, а если проведено несколько серий измерений, то и погрешность серии измерений с учетом статического характера радиационного контроля. Итоги работы толщиномера указываются на индикаторах толщины *ИТ*, погрешности *ИП* и выдаются на печатающее устройство *ПЕЧ*, связанное с другими блоками через интерфейсы *ИФ*, *ИФ*<sub>1</sub>, *ИФ*<sub>2</sub> с помощью общей шины *ОШ*. Питание всех блоков толщиномера обеспечивается от блока постоянных напряжений *БП*, кроме фотоэлектронного умножителя, питаемого от высоковольтного преобразователя или блока питания *ВП*.

Толщиномер «Бетамикрометр-2» состоит из двух конструктивных единиц — блока датчика *ДОТ-2* и электронного блока. Блок *ДОТ-2* выполнен в виде измерительного столика, в котором размещены: источник (5-частиц, сцинтиллятор, фотоэлектронный умножитель, высоковольтный преобразователь и формирователь импульсов. Пружина *ПР* фиксирует объект *КО* на измерительном столике относительно источника *ИИ* и преобразователя *СЦ*, прижимая объект *КО* сверху. Электронный блок содержит: согласующий усилитель, все пересчетные и управляющие блоки, блок питания и цифровые индикаторы толщины и отсчета времени. На передней панели электронного блока установлены переключатели режимов работы и ручки управления работой прибора.

Современный толщиномер *ТПРУ-1* подобен «Бетамикрометр-ру-2», но может работать с несколькими излучательно-преобразовательными блоками и выполнен в виде двух блоков обработки импульсов. Эти особенности расширяют область его применения и позволяют применять его в условиях гальванических цехов. В комплект толщиномера *ТПРУ-1* входит также набор эквивалентных мер толщины покрытий (до 50 шт.), предназначенных для настройки и периодической проверки толщиномера.

«Бетаскоп-СС-950» является толщиномером, использующим *p*-рассеяние, и построен на базе микропроцессора. Им можно измерять толщину гальванических покрытий от 100 до 0,1 мкм на различных основаниях, отличающихся по атомному номеру покрытия на 3—5 единиц. В этом толщиномере имеется набор легко заменяемых источников излучения и обеспечивается отсчет толщины покрытий для различных сочетаний материалов путем введения их цифровых кодов. При измерениях с помощью этого прибора оператор устанавливает в соответствии с рекомендациями для данного сочетания материала основания и покрытия определенный источник излучения, набирает переключателями номера, присвоенные каждому из материалов, указывает режим измерений и помещает контролируемый объект в измерительную зону. «Бета-скоп-СС-950» с помощью микропроцессора, производящего необходимые расчеты, показывает на выходном цифровом индикаторе среднее значение толщины покрытия и отклонение в среднем для серии измерений, что позволяет оценить статистическую погрешность. Применение микропроцессора облегчает учет свойств материалов основания и покрытия, параметры

выбранного источника и число выполненных измерений. В приборе также предусмотрен выход на цифropечатающее устройство. Минимальная площадь, на которой может проводиться измерение —  $0,15 \text{ мм}^2$ . Помимо толщинометрии им можно определить коэффициент обратного рассеяния р-излучения, т. е. оценивать физические свойства материалов из монолитных объектов.

Ценным качеством толщиномеров, использующих обратное р-рассеяние, является высокая универсальность их применения, так как они имеют наиболее широкие возможности по толщино-метрии покрытий по сравнению с другими методами контроля качества— контроль при большом числе сочетаний материалов. Единственно принципиально важное требование к свойствам материала основания и покрытия — отличие в разнице атомных номеров не менее чем на 3, а в перспективе при повышении чувствительности и стабильности аппаратуры, эта разница, видимо, будет стремиться к 1. Ценным качеством бетатолщиномеров является также проведение контроля тонких покрытий, что существенно затруднено с помощью других методов из-за влияния мешающих факторов. Большие возможности заложены в применении микропроцессоров в составе этих толщиномеров. Микропроцессоры дают возможность улучшить метрологические характеристики приборов за счет использования сложных зависимостей параметров сигналов от толщины покрытия, в частности определять толщину по индивидуальным градуировочным характеристикам для каждой пары материалов покрытия и основания, расширить пределы измерения и число сочетаний материалов, упростить настройку толщиномера и отсчет показаний, производить статистическую обработку результатов измерений и выдавать их в необходимом виде, т. е. цифровой отсчет, быстродействующая печать, ввод в ЭВМ и выдача сигналов для управления технологическим процессом.

Быстро развивается и показывает хорошие результаты рентге-нофлуоресцентный метод, основанный на том, что падающее первичное излучение создает при взаимодействии с материалом покрытия характеристические электромагнитные волны, имеющие кванты определенных длин волн и интенсивности. Спектральный состав излучения зависит от того, какие элементы имеются в материалах контролируемого объекта, а интенсивность — от массы данного элемента. Подбирая фильтры, выделяющие необходимую спектральную линию, характерную для материала покрытия, анализируя интенсивность и энергию квантов вторичного излучения с помощью различных электронных дискриминаторов, можно определить толщину одного или нескольких не очень толстых покрытий. Используемые при рентгенофлуоресцентном методе эффекты более сложны в приборной реализации, поэтому аппаратура на базе этого метода пока не выпускается крупными сериями. Вместе с тем имеются примеры успешного внедрения таких приборов в практику неразрушающего контроля толщин покрытий при разных сочетаниях материалов: хром, олово, цинк, алюминий, титан или серебро на стали, медь на алюминии, хром на цинке, кадмий на титане и др. Решающим фактором применимости рентгенофлуоресцентного метода является наличие достаточной интенсивности вторичного излучения в диапазоне, где его регистрация эффективна. Также его ценным качеством является возможность измерений толщины многослойных покрытий, причем, когда их толщины соизмеримы, можно проводить в ряде случаев отдельный контроль. Успешно производится измерение толщины серебра на фотобумаге и ферролаковом покрытии.

Рентгенофлуоресцентный метод перспективен, имеет высокую степень универсальности, нечувствителен к изменению физических свойств за счет внешних воздействий: термообработки, механической обработки, намагничивания и др., позволяет вести работу в технологическом процессе нанесения покрытий. Недостатком его является сложность оборудования и имеющиеся иногда трудности в перестройке при изменении материала покрытия и основания. В целом методы радиометрической толщинометрии могут применяться в значительно более широкой области по материалам покрытия и

основания и по значениям толщин покрытий, чем другие методы контроля качества. Сдерживают массовое применение радиационных методов толщинометрии следующие их недостатки: большее время измерения, сложность используемого оборудования, необходимость более строгого подхода к соблюдению правил техники безопасности и санитарии. Вместе с тем они являются перспективными для решения многих задач толщинометрии, поскольку могут использоваться источники излучения малой интенсивности, а области их применения очень обширны.

## 6.12. Контроль физических свойств материалов

Влияние на интенсивность и спектр вторичного излучения физико-химических свойств материала контролируемого объекта дает возможность проводить их контроль, причем чаще всего ионизирующие излучения используют для измерения физических свойств, связанных с плотностью и составом материала. Аппаратура радиационного контроля качества применяется для измерения плотности, концентрации определенного вещества (элемента) в смеси или химическом соединении, расхода вещества, и для обнаружения наличия того или иного вещества в каком-то объеме. Контроль физических свойств проводят по прошедшему или отраженному излучению, а также по наведенной или собственной радиоактивности материала. Одним из перспективных методов радиационного контроля материалов является применение нейтронных потоков и наиболее чувствительных — радиационных методов избирательного контроля содержания определенных химических элементов.

Структурные схемы приборов для контроля физических свойств по прошедшему и отраженному излучению (плотномеров, концентр атомеров, влагомеров и т. д.) подобны соответствующим схемам других радиометрических приборов контроля качества, например толщиномеров. Причем размеры и толщина слоя материала должны быть фиксированы или должна вводиться поправка с учетом нелинейности ее влияния. Значительную погрешность при использовании рассеянного излучения может оказать изменение расстояния между излучателем, преобразователем излучения и слоем контролируемого материала, если оно превышает допустимые пределы. Возможности контроля различных физических свойств показывает табл. 6.18.

Тип прибора	Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Погрешность	Быстродействие, мин	Источник излучения
ПР-1024В	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	500—3000	1—10	1	<sup>137</sup> Cs
ПГП-2	Плотность почвы, кг/м <sup>3</sup>	1000—2300	100	2—5	<sup>137</sup> Cs
«Нейтрон-37»	Влажность сыпучих материалов, %	2—15	5% от диапазона	1,5	<sup>210</sup> Po+Be
КРК-2	Содержание калия в сыпучих материалах, %	100	0,3	10	<sup>40</sup> K

**Радиационные плотномеры** измеряют объемную массу (плотность) различных материалов и веществ в твердом, жидком или газообразном состоянии как в чистом виде, так и в виде смесей различного типа. В последнем случае обычно измеряется величина, связанная с результирующей плотностью смеси. Типичным прибором такого типа является плотномер ПР-1024В, выпускаемый серийно для контроля различных жидкостей, суспензий, эмульсий, пульпы и других смесей, транспортировка которых возможна через трубы диаметром 0,1—0,3 м, а иногда и более при суммарной толщине их стенок до 20 мм. Плотномер ПР-1024В содержит: блок источника излучения, блок приемника на базе сцинтиллятора, электронный самопишущий блок и стабилизатор напряжения С-0,09. Блоки источника излучения и приемника размещаются по разные стороны трубы, где движется контролируемая смесь, т. е. реализует контроль по прошедшему излуче-

нию. Проведение контроля с помощью этого прибора возможно при расстоянии между источником излучения и приемником до 3 м. Регистрирующая часть плотномера изготовлена на базе электронного моста КСМ-3П. Измерения плотности могут производиться с выносом на всю шкалу моста диапазона плотностей 50—500 кг/м<sup>3</sup>, что позволяет надежно контролировать наиболее важные для практики текучие смеси с высокой разрешающей способностью.

**Накладной радиационный плотномер** ППП-2 предназначен для определения разнородностей почв — всех грунтов, кроме торфа, в полевых условиях путем анализа рассеянного излучения. Первичным преобразователем в нем служит газоразрядный счетчик типа СБМ-20. Плотномер ППП-2 успешно используется во многих отраслях народного хозяйства — мелиорация, геология, строительство и другие—для оперативного получения информации. Для его применения достаточно иметь слой грунта толщиной 10—15 см.

**Радиационные измерители концентрации** какого-либо вещества или элемента используются для контроля химического состава различных смесей, химических соединений, эмульсий, аэрозолей и т. п. Обычно для каждого сочетания материалов или химических элементов выбирают определенный вид излучения, энергию частиц или квантов, преобразователь излучения в электрический сигнал и соответствующие дискриминаторы, анализирующие импульсы от преобразователя по амплитуде, длительности и другие в зависимости от носителя полезной информации. Аналогично работают многоэлементные анализаторы состава вещества, которые могут собираться из отдельных приборов и подключаться к устройствам логической обработки, микропроцессорным системам или управляющим ЭВМ.

Серия приборов типа «Нейтрон» предназначена для измерения относительной массы влаги в различных сыпучих материалах. Прибор «Нейтрон-3» выполняется с погруженным или накладным первичным измерительным блоком. Контроль влагосодержания является важной проблемой для разных отраслей народного хозяйства. Измерять содержание влаги можно многими косвенными методами неразрушающего контроля, но наиболее достоверная информация получается при нейтронной влагометрии, когда контролируемый материал облучается потоком быстрых нейтронов. При соударениях нейтронов с ядрами элементов материала происходит их замедление, причем, чем больше концентрация водорода (воды) в материале, тем больше замедленных нейтронов регистрирует электронный блок на основе счетчика нейтронов. Влагомер «Нейтрон-3» дает в среднем правильные показания только в том случае, если вблизи его измерительного блока не происходит сгущения или налипания обезвоженного материала. Конструкция нейтронных влагомеров постоянно совершенствуется, а так как результаты такого контроля непосредственно зависят от процентного содержания водорода, то достоверность контроля велика.

**Концентратомер** калия КРК-2 измеряет содержание хлористого калия путем регистрации счетчиком собственного излучения изотопа <sup>40</sup>К, находящегося в материале в смешанном состоянии с нерадиоактивными изотопами. Шкала его является линейной во всем диапазоне измерений, если измерительный блок окружен продуктом или смесью, содержащей калий в области сферы с радиусом не менее 1 м, что обуславливает области его применения. В качестве основы измерительного блока для решения подобных задач по собственному излучению материала, содержащего естественный или искусственный радиоактивный изотоп, можно использовать типовую радиометрическую или дозиметрическую аппаратуру.

Гамма-реле — релейные приборы для определения наличия достаточного количества какого-либо вещества получили широкое применение в системах автоматизации производства. Принцип действия их основан на фиксации момента достижения заданного значения потока ионизирующего излучения, которое зависит от наличия массы этого вещества в контролируемом объеме материала, полуфабриката или изделия.

Многоцелевыми релейными приборами являются гамма-реле типа ГР-6, ГР-7, ГР-8 с быстродействием 0,5—6 с. На их основе создаются уровнемеры, дозаторы, счетчики деталей и блоков, устройства для блокировки, управления движением и для сигнализации об отклонениях технологических процессов от нормы. Релейные приборы изготавливают в различных вариантах исполнения с защитой от неблагоприятных внешних воздействий. Они являются первичными блоками-датчиками о ходе технологического процесса и успешно используются в сочетании с блоками логической обработки и управления технологическими операциями или с управляющей ЭВМ.

Радиационные устройства для контроля физических свойств имеют распространение при работе с большими объектами или масштабными технологическими процессами, однако могут быть собраны и малогабаритные приборы для контроля материалов, полуфабрикатов и изделий небольшой массы. Области применения приборов для контроля физических свойств радиационным методом ограничены тем, что не всегда имеется однозначная связь между конкретным физико-химическим свойством и характеристиками вторичного излучения от материала контролируемого объекта.

## 7. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ДЕТАЛЕЙ АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

### 7.1. Ультразвуковые колебания и их основные свойства

Механические колебания с частотами выше 16 000 Гц называются ультразвуковыми. Если в какой-либо точке материальной среды возбуждаются колебания, то они распространяются в этой среде в виде упругих волн сжатия и растяжения. Свойства среды, в которой распространяется упругая волна, определяют скорость ее движения.

Как и всякое волновое движение, ультразвуковые колебания характеризуются частотой  $f$ , длиной волны  $K$  и скоростью распространения  $C$ , связанными между собой известным соотношением  $C = \lambda f$ .

Механические колебания в твердых телах приводят к возникновению растягивающих или сжимающих напряжений.

В жидкостях и газах амплитуда акустических волн может характеризоваться одной из следующих величин:

1) акустическим давлением (Па)

$$p = p^0,$$

где  $\rho$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  — скорость распространения акустических волн, м/с;  $v$  — скорость колебательного движения частиц, м/с;

2) смещением частиц из положения равновесия в процессе колебательного движения  $U = U_0 \sin t$ ;

3) колебательной скоростью частиц  $v = v_0 \sin t$ .

В жидкостях и газах могут распространяться только продольные волны. В твердых телах могут существовать также и другие виды волн: поперечные, поверхностные, крутильные, изгибные. Скорость распространения волн каждого вида различна.

Отношение  $p/|v| = \rho C$  называется акустическим импедансом. Для безграничной среды, в которой потери ультразвуковой энергии пренебрежимо малы, акустический импеданс для каждого материала является акустической характеристикой (характеристический импеданс).

Скорость распространения волны в стержне меньше, чем в неограниченной среде, и зависит от соотношения площади поперечного сечения стержня и длины волны.

Ультразвуковые колебания распространяются прямолинейно. Поэтому они могут распространяться в виде узких пучков и давать звуковые тени. Ультразвуковые лучи во многом похожи на световые: могут отражаться и фокусироваться по законам, аналогичным законам геометрической оптики.

## 7.2. Акустические методы и средства неразрушающего контроля

Методы акустического контроля можно разделить на две группы: основанные на излучении и приеме акустических волн и основанные на регистрации акустических волн, возникающих в материалах и изделиях.

К первой группе относятся методы контроля с использованием бегущих и стоячих волн или резонансных колебаний контролируемого объекта. В их числе:

1) Теневой метод, или метод сквозного прозвучивания (рис. 7.1, а). Излучатель 1 и приемник 3 разделены контролируемым изделием 2. Наличие дефекта ослабляет принимаемый сигнал или задерживает его регистрацию вследствие удлинения пути ультразвуковых волн при огибании дефекта.

2) Эхо-метод (рис. 7.1, б). В этом случае излучатель 1 генерирует короткий ультразвуковой импульс, который отражается от донной поверхности изделия 2 или от дефектов и других неоднородностей. Отраженный импульс принимается тем же или другим излучателем. Наличие дефекта определяется по времени прихода сигналов, отражающихся от дефектов и от поверхностей объекта, при этом можно определить глубину расположения дефекта.

3) Зеркально-теневой метод, являющийся разновидностью теневого метода. При контроле используется обычный эхо-метод. Ослабление сигнала служит признаком наличия дефектов.

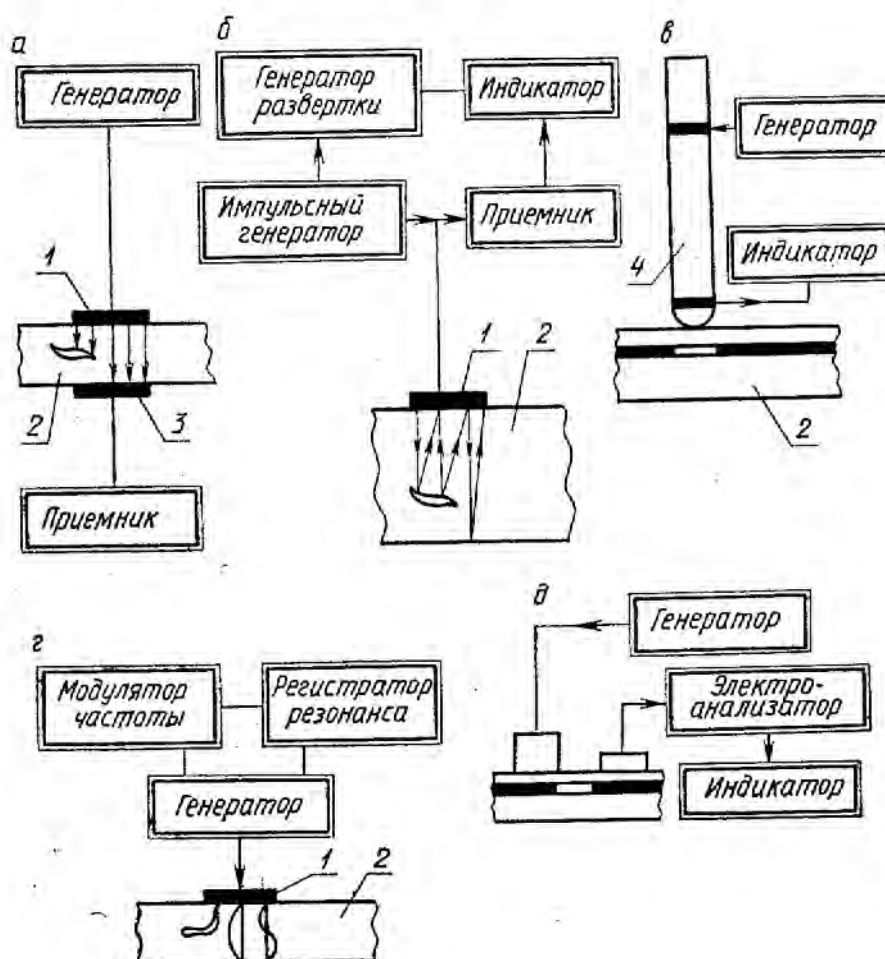


Рис. 7.1 Методы контроля с использованием бегущих и стоячих волн или резонансных колебаний контролируемого объекта.

4) Импедансный метод (рис. 7.1, в). При контроле идет наблюдение за режимом колебаний стержня 4, опирающегося на поверхность изделия 2. При наличии дефекта уменьшается импеданс данного участка поверхности, т. е. он становится как бы более



мягким. Изменение импеданса влечет за собой изменение амплитуды колебаний стержня, уменьшение механического напряжения на его конце, изменение фазы колебаний и смещение частоты, резонансных колебаний. По одному из этих признаков судят о наличии дефекта.

5) Резонансный метод (рис. 7.1, г). Он применяется в дефектоскопии и при измерении толщины пленок покрытий. После определения скорости распространения звуковых волн в исследуемом материале плавным изменением частоты генератора отыскивается резонансная частота, соответствующая возникновению стоячей волны в изделии и характеризующая его толщину. Если при перемещении искателя 1 по поверхности изделия 2 наблюдается ослабление сигнала или исчезновение резонанса, то в этом месте можно предполагать наличие дефекта.

6) Метод свободных колебаний (рис. 7.1, д), при котором анализируется спектр частот собственных колебаний изделия. Эти колебания возникают вследствие вибрации изделия после удара по нему.

Ко второй группе методов относятся:

1. Метод акустической эмиссии. Контроль основан на регистрации упругих волн, которые возникают в момент образования и развития трещин. О наличии опасных дефектов можно судить по увеличению частоты следования и амплитуды сигналов в определенном диапазоне частот.

2. Шумо-вибрационный метод. В этом случае производится наблюдение спектра частот работающего механизма в целом или отдельных его частей. В качестве преобразователя применяют либо микрофон, либо прибор, напоминающий медицинский стетоскоп, прижимаемый к различным участкам работающего механизма.

Наиболее широкое распространение получил эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии. Контроль качества поковок, штамповок, проката, термообработанного литья, сварных швов, измерение толщины изделий — вот неполный перечень возможностей применения эхо-метода.

Для определения качества проката малой и средней толщины, резиновых изделий, для исследования упругих свойств стеклопластиков, бетона и графита применяют теневой метод. Недостатком теневого метода является необходимость двустороннего доступа к контролируемому изделию. Когда двусторонний доступ осуществить невозможно, применяют зеркально-теневого или резонансный методы.

Качество швов сварных конструкций при испытаниях на прочность и во время эксплуатации можно контролировать методом акустической эмиссии.

Качество клееных и паяных соединений из металла, стекла и пластмасс проверяют чаще всего импедансным методом или методом свободных колебаний.

Ультразвуковые волны хорошо отражаются от тончайших зазоров, и поэтому для улучшения условий передачи ультразвука от преобразователя к изделию зазор между ними заполняют слоем жидкости (обычно минеральным маслом).

Достоинства акустических методов контроля:

1. Возможность выявления как поверхностных, так и внутренних (глубинных) дефектов. При всех других методах, кроме радиационных, выявляются только поверхностные или подповерхностные дефекты.

2. Возможность обнаружения тонких трещин.

3. Безопасность для обслуживающего персонала.

4. Простота автоматизации ультразвукового контроля. Применение акустических методов контроля ограничивается следующими факторами:

1) сложностью формы и малыми размерами детали, затрудняющими использование ультразвукового контроля. Кроме того, могут возникать ложные сигналы из-за наличия неровностей на поверхности вблизи области возможного расположения дефектов;

2) неоднородностью внутренней структуры материала, что приводит к

рассеиванию ультразвуковых волн, ослаблению полезного сигнала и появлению шумов;

3) шероховатостью поверхности изделия, которая влияет на чувствительность ультразвукового контроля из-за изменения акустического контакта преобразователя с изделием. Особенно высокие требования к шероховатости поверхности предъявляются при контактном способе контроля. При иммерсионном способе требования к шероховатости могут быть уменьшены;

4) сложностью оценки характера и размеров дефекта.

### 7.3. Пьезоэлектрические искатели

В приборах акустического контроля для возбуждения звуковых колебаний в основном используется преобразование электрических колебаний в механические при помощи пьезоэлементов. Для изготовления последних используются искусственные пьезокерамические материалы, поляризованные по толщине таким образом, что направления электрических и механических колебаний совпадают. Пьезопластины изготавливают из цирконата-титаната свинца (ЦТС), ниобата свинца (ИБС) и некоторых других материалов.

Преобразователь электромагнитных колебаний в упругие, называемый обычно искателем, может иметь различные конструктивные решения: совмещенные искатели (предназначенные как для возбуждения, так и для приема ультразвуковых колебаний), раздельно-совмещенные и раздельные.

На рис. 7.2 показаны конструктивные схемы нормального (а), наклонного (б) и раздельно-совмещенного (в) искателей.

Искатель состоит из металлического или пластмассового (металлизированного) корпуса 7, в котором находится пьезопластина 3, прижатая или приклеенная к демпферу 2. Назначение демпфера — гасить свободные колебания пьезопластины. Демпферы изготавливают из искусственных смол, имеющих определенный акустический импеданс. Со стороны, обращенной к исследуемому материалу, пьезопластина закрыта протектором 4 толщиной 0,1—0,5 мм, который предохраняет ее от износа и нежелательных воздействий иммерсионных сред. Кроме того, протектор улучшает акустический контакт пьезоэлемента с контролируемым изделием 5. Для этой же цели между протектором и изделием располагается прослойка контактной среды 6.

При необходимости возбуждения колебаний под углом к поверхности изделия в конструкцию искателя включается призма 8, изготавливаемая из материалов, характеризующихся небольшой скоростью прохождения звука (полистирол, оргстекло). Призма может применяться также для трансформации падающих продольных колебаний в поверхностные, сдвиговые и т. п.

Соединение металлизированных поверхностей пьезопластины с электронным блоком осуществляется при помощи выводов 1. При раздельно-совмещенной конструкции искателя для предупреждения прямой передачи сигналов от излучателя к приемнику вводится акустический экран 9.

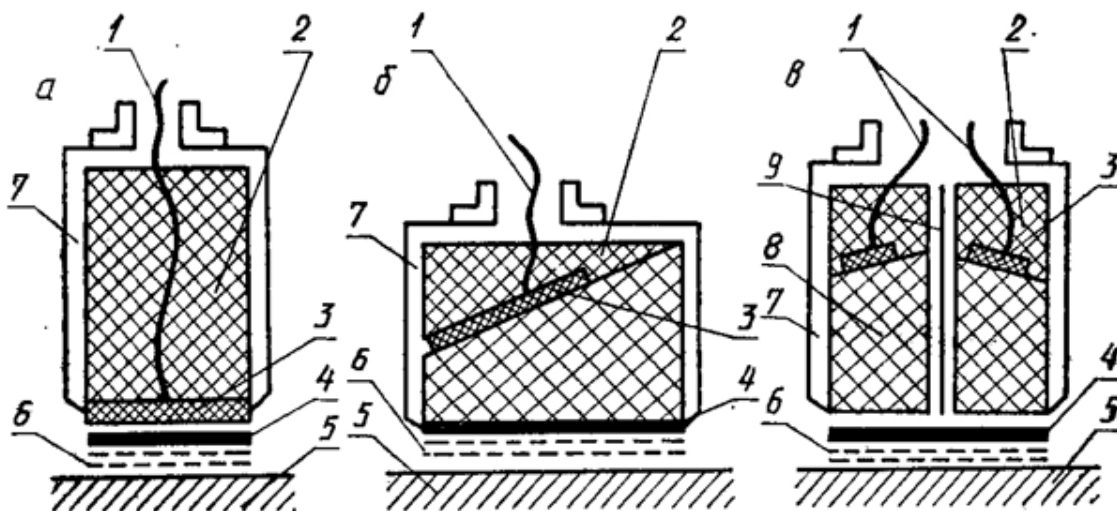


Рис. 7.2 Конструктивные схемы нормального (а), наклонного (б) и раздельно-совмещенного (в) искателей

## 8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.

### 8.1. Электромагнитный метод неразрушающего контроля

Электромагнитный метод неразрушающего контроля (метод вихревых токов) находит широкое применение в практике современного металлургического и машиностроительного производства. Он основан на регистрации изменения вихревых токов, наводимых в объектах контроля из электропроводных материалов катушкой возбуждения вихревого преобразователя.

Распределение вихревых токов и их интенсивность в объекте контроля зависят от многих факторов, связанных как со свойствами объекта контроля, так и с условиями контроля (характеристиками преобразователей, формой, частотой и характером напряжения питания, конструктивными особенностями преобразователей, взаимным расположением и относительной скоростью движения преобразователя и объекта контроля и т. п.). Такая многофакторная связь определяет как достоинства, так и недостатки электромагнитных методов неразрушающего контроля, так как, с одной стороны, позволяет контролировать различные геометрические, физико-механические, химические и некоторые другие характеристики электропроводных, ферромагнитных и неферромагнитных изделий, с другой же стороны, затрудняет выделение интересующей исследователя информации.

Используя метод вихревых токов, можно осуществлять контроль без непосредственного контакта преобразователя и объекта, что позволяет получать измерительную информацию при перемещении преобразователя относительно объекта.

Важной положительной стороной метода вихревых токов является то, что на измерительный сигнал практически не влияет влажность, давление и загрязненность среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта токонепроводящими материалами.

Метод вихревых токов широко используется для обнаружения нарушений сплошности как находящихся на небольшой глубине, так и выходящих на поверхность материала разнообразных трещин и раковин, неметаллических включений и т. п., причем возможно выявление небольших по размерам дефектов, например глубиной до 0,2 мм и протяженностью до 2 мм.

Метод вихревых токов позволяет:

1. Контролировать линейные размеры изделий (диаметр проволоки, прутка, трубы, толщину металлических листов, толщин стенок корпусных деталей и т. п.).
2. Измерять толщину нанесенных покрытий в диапазоне от единиц микрометров до десятков миллиметров, точность измерения при этом составляет 5—10%.
3. Определять отклонения химического состава, а также структуру металлов и сплавов. Это связано с тем, что электрические и магнитные свойства металлов существенно зависят от химических и структурных изменений материала.
4. Определять значения механических напряжений.

## 8.2. Физические основы электромагнитного метода измерений

Сущность электромагнитного метода заключается в измерении степени взаимодействия электромагнитного поля специальной катушки вихретокового преобразователя с контролируемым изделием. Контролируемый объект помещают в электромагнитное поле катушки, которая питается переменным электрическим током. В этом случае электропроводящий объект контроля можно рассматривать как короткозамкнутую катушку, в которой индуцируются токи, протекающие по замкнутым круговым линиям, — вихревые токи.

Сила вихревых токов, наведенных в изделии, зависит от силы и частоты переменного тока, питающего катушки, электропроводности, магнитной проницаемости и формы изделия, расстояния от катушки до поверхности изделия. Со своей стороны, электрические и магнитные характеристики материала контролируемого изделия зависят от термической обработки, степени деформации, химического состава. Кроме того, на значение возбужденных в изделии вихревых токов влияют изменения структуры материала и наличие в нем посторонних включений и дефектов, так как они создают дополнительное сопротивление и препятствуют протеканию вихревых токов.

Вихревые токи, наведенные в изделии, создают вторичное переменное электромагнитное поле, направление которого в соответствии с правилом Ленца противоположно возбуждающему полю. Это приводит к обратному влиянию индуцированного магнитного потока на катушку возбуждения и проявляется в форме увеличения ее полного сопротивления и, следовательно, уменьшения силы тока, протекающего по ней.

Из вышеизложенного вытекает, что полное сопротивление катушки зависит от значения и характера распределения вихревых токов в контролируемом изделии. Вихревые токи, индуцированные в изделии без дефекта (рис. 8.1, а), создают магнитный поток  $\Phi_1$  который больше магнитного потока  $\Phi_2$  вихревых токов в изделии с дефектом (рис. 8.1, б). Это вызвано наличием дефекта в материале, что приводит к некоторому уменьшению его электропроводности, снижению плотности вихревых токов, а следовательно, и магнитного поля, возбуждаемого ими.

Поэтому обратное влияние магнитного потока  $\Phi_1$  больше, чем потока  $\Phi_2$ , и в катушке возбуждения протекает ток  $i_1 < i_2$ .

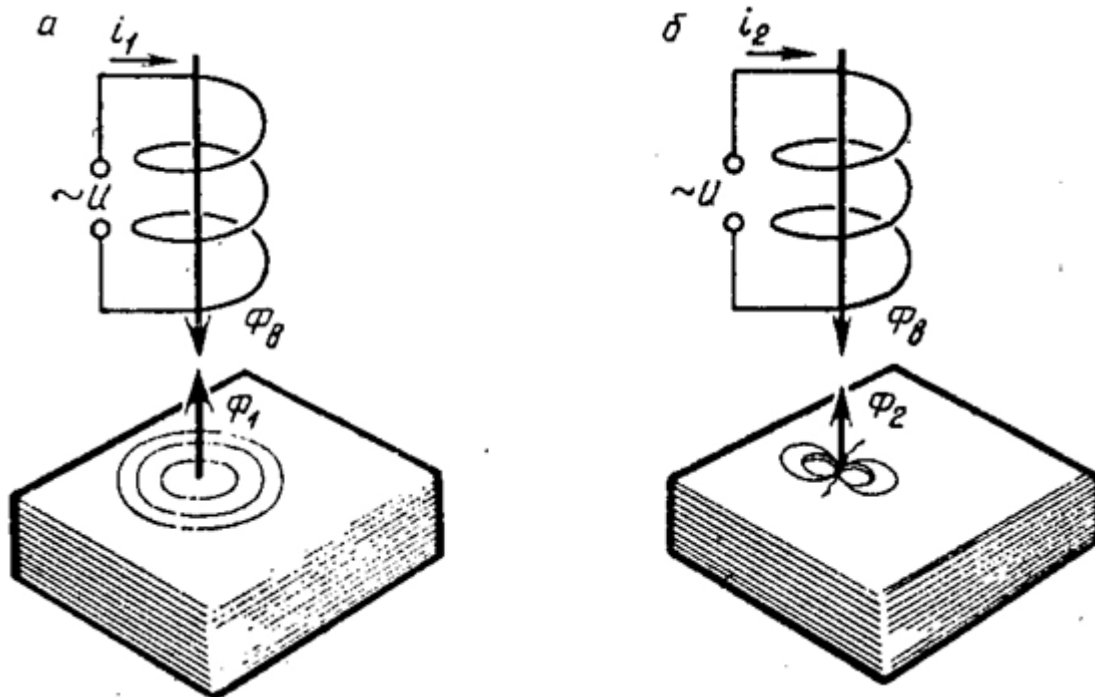


Рис. 8.1 Вихревые токи, индуцированные в изделии.

Как было указано выше, на силу вихревых токов оказывают влияние различные факторы, связанные со свойствами изделия. Поэтому при определении качества изделия по всему комплексу этих факторов проблемы определения годности не возникает. Однако в большинстве практических случаев требуется определять величину или характер измерения одного из влияющих параметров при неопределенном значении остальных, и это ставит задачу — выделить информацию о состоянии параметра, интересующего исследователя.

Чтобы получить возможность разделять измерительную информацию, применяют различные методы: измеряют фазу сигнала, выбирают и изменяют частоту возбуждающего тока. Можно использовать разную форму сигнала напряжения, разные значения возбуждающего тока и форму возбуждающего электромагнитного поля (путем различного конструктивного выполнения катушки). Таким образом, удастся находить зависимость контролируемых параметров изделия от перечисленных факторов. В процессе измерения можно использовать преобразователи как с одной обмоткой (параметрические), так и с двумя или более обмотками (трансформаторные). У параметрических преобразователей контролируемые параметры преобразуются в полное (комплексное) сопротивление, а у трансформаторных, состоящих из обмотки возбуждения и измерительных обмоток, — в напряжение, индуцированное в измерительных обмотках.

Сила вихревых токов изменяется в зависимости от расстояния до контролируемой поверхности и по глубине изделия.

Условной глубиной проникновения вихревых токов в однородном поле для плоской поверхности считается глубина, на которой ток равен  $1/e = 0,36788$  силы тока на поверхности. Глубина проникновения электромагнитных полей (и возбужденных вихревых токов) зависит также от частоты тока в катушке возбуждения — так называемый поверхностный эффект. Вихревые токи при малых частотах проникают на значительную глубину, в то время как при больших частотах электромагнитные поля и вихревые токи распределяются в поверхностных слоях изделия. Поверхностный эффект связан с тем, что возбужденные внешним полем вихревые токи создают электромагнитное поле, направленное навстречу возбуждающему полю и ослабляющее его.

Токи, наводимые в поверхностных слоях, оказывают экранирующее действие и

уменьшают возможность наведения вихревых токов в более глубоких слоях. Протекающие в глубинных слоях вихревые токи ослабляют и частота возбуждающего поля, с увеличением которой увеличиваются вихревые токи, лежащие ближе к поверхности, и возрастает напряженность возбуждаемого ими электромагнитного поля. Это усиливает экранирующее действие для токов, лежащих дальше от поверхности изделия.

К факторам, оказывающим наиболее существенное влияние на глубину проникновения тока, следует отнести: частоту возбуждающего тока  $f$ , электрическую проводимость  $G$  и магнитную проницаемость  $\mu$ , материала контролируемого изделия. При контроле изделий глубину проникновения вихревых токов можно получить подбором частоты тока возбуждения. Помимо того, следует учитывать, что вихревые токи, расположенные глубже, отстают по фазе от токов, лежащих ближе к поверхности, в то же время уменьшаясь по амплитуде.

Фазовый угол между токами на глубине  $d$  в плоском проводнике по сравнению с токами на поверхности составляет  $d/\lambda$  рад, где  $\lambda$  — условная глубина проникновения вихревых токов. Время отставания токов на глубине

$d$  от токов на поверхности  $t = d/v$ ; отсюда фазовая скорость  $v = d/t = \lambda f$ .

В проводниках скорость распространения электромагнитных колебаний меньше, чем в вакууме, и зависит также от частоты переменного тока. При относительно небольших скоростях распространения электромагнитных колебаний в проводниках можно измерить сдвиг фазы, который зависит от времени прохождения волн на глубину  $d$  и обратно.

Возможности метода вихревых токов расширяются при использовании для анализа сигнала измерений сдвига фазы между напряжением и током.

При изменении магнитной проницаемости материала сдвиг по фазе имеет характер, отличный от сдвига при появлении дефекта. Это происходит вследствие того, что магнитная проницаемость влияет на магнитную индукцию  $B$  сильнее, чем на силу тока  $I$ , векторы которых сдвинуты по фазе друг относительно друга. Такой же эффект имеет место при колебаниях размеров изделий или изменении относительного положения испытательной катушки и контролируемого изделия. Таким образом, изменение фазы может характеризовать размеры изделия, глубину залегания дефекта, электропроводность и магнитную проницаемость материала изделия.

Фазочувствительные методы обладают большими возможностями при определении различных параметров исследуемых изделий, но требуют детального изучения характера зависимости фазы от интересующего исследователя параметра.

При практическом использовании фазочувствительных методов удобнее заменить измерение фазового угла между током и напряжением измерением полного сопротивления катушки преобразователя, так как между этими двумя характеристиками существует вполне определенная устойчивая зависимость. В большинстве приборов для этой цели применяется фазочувствительная мостовая схема, в плечи которой включают два преобразователя. Один из преобразователей взаимодействует с образцовой деталью, а второй — с исследуемой. Характер изменения полного сопротивления катушек обоих преобразователей и рассогласование этих сопротивлений регистрируются чаще всего на экране электронно-лучевой трубки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолов И. Н., Останин Ю.А. Методы и средства неразрушающего контроля: Учебное пособие для инженерно-технических специальностей. – М.: Высш. Школа, 1988. – 368 с.
2. Алешин Н. П., Щербинский В. Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопии металлоизделий. – М.: Высш. Школа, 1991. – 271 с.
3. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. В 2 кн./Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1976.