

К. П. ЛАТЫШЕНКО, А. А. ЧУРИКОВ, С. В. ПОНОМАРЕВ,  
А. Г. ДИВИН, Н. А. КОНЫШЕВА

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Часть 1

Учебное электронное издание  
на компакт-диске



Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2016



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

К. П. ЛАТЫШЕНКО, А. А. ЧУРИКОВ, С. В. ПОНОМАРЕВ,  
А. Г. ДИВИН, Н. А. КОНЬШЕВА

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

В двух частях

## Часть 1

*Утверждено Учёным советом университета  
в качестве учебного пособия по дисциплинам  
«Методы и средства измерений, испытаний и контроля»,  
«Измерительные системы», «Неразрушающий контроль»  
для студентов бакалавриата направлений  
27.03.02 «Управление качеством», 15.03.06  
«Мехатроника и робототехника» и студентов магистратуры  
направления 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»*

*Учебное электронное издание  
комплексного распространения*



---

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2016

УДК 536.2 (075.8)  
ББК ж102.3я73 + з32я73  
Н54

Рецензенты:

Доктор технических наук,  
заведующий лабораторией № 10 ФГБНУ ВНИИТиН  
*А. И. Петрашев*

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
*П. С. Беляев*

Кандидат технических наук, ведущий математик АО «ТНИИР «Эфир»  
*С. Н. Мочалин*

Н54 Неразрушающий контроль [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов бакалавриата направлений 27.03.02 «Управление качеством», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» и студентов магистратуры направления 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» : в 2 ч. / К. П. Латышенко, А. А. Чуриков, С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Н. А. Коньшева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 2 электрон. опт. диска (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; Windows 95/98/XP ; мышь. – загл. с экрана.  
ISBN 978-5-8265-1553-2.

Ч. 1: Неразрушающий контроль. – 1 электрон. опт. диск ; 25,4 Мб RAM. – ISBN 978-5-8265-1565-5.

Описаны виды и методы контроля качества и испытаний промышленной продукции, приведены физические основы методов неразрушающего контроля, схемы устройств и методы измерений.

Изложены основные разделы дисциплин «Методы и средства измерений, испытаний и контроля», «Измерительные системы», «Неразрушающий контроль» в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов к подготовке бакалавров направлений 27.03.02 «Управление качеством», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» и магистров направления 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

УДК 536.2 (075.8)  
ББК ж102.3я73 + з32я73

Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.

ISBN 978-5-8265-1565-5 (ч. 1)  
ISBN 978-5-8265-1553-2

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2016

## ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии изложены основные разделы дисциплин «Методы и средства измерений, испытаний и контроля», «Измерительные системы», «Неразрушающий контроль» в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов к подготовке бакалавров направлений 27.03.02 «Управление качеством», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» и магистров направления 15.04.06 «Мехатроника и робототехника». Глава 6 настоящего пособия содержит результаты, полученные при выполнении государственного задания № 539 на 2014 – 2016 годы (в рамках базовой части).

В первой части учебного пособия рассмотрены физические методы неразрушающего контроля и такие его разновидности, как капиллярный метод, метод течеискания, акустический, магнитный и тепловой методы контроля.

Вторая часть посвящена изучению электрического, вихревого, радиоволнового, оптического и радиационного методов контроля.

Развитие общества, его деятельность всегда были связаны с измерениями. Научно-технический прогресс во многом обусловлен появлением новых процессов, технических устройств, автоматизированных систем управления и контроля различного назначения. Вместе с тем непрерывно повышаются требования к качеству и надёжности функционирования объектов, систем, устройств, и чем они становятся сложнее, тем труднее получить высокие показатели качества и надёжности. Общеизвестно, что невозможно достичь этих показателей без проведения измерений и контроля нескольких десятков, сотен и тысяч параметров и характеристик объектов измерений.

**Измерение** – это процесс нахождения значения физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств.

Метрологическая суть измерения сводится к основному уравнению измерения

$$X = n[x] \text{ или } n = \frac{X}{[x]},$$

где  $X$  – измеряемая величина;  $[x]$  – единица величины;  $n$  – число.

В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины), такие величины оценивают по условным шкалам.

Результат измерения физической величины – значение величины, полученное путём её измерения.

В основе любых измерений лежат различные физические явления, определяющие принцип измерения.

Принцип (от лат. *principium* – начало, основа) измерений – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений. Например, применение эффекта Доплера (С. Doppler – австрийский физик и астроном, 1803 – 1853) для измерения скорости.

Современные СИ основаны на самых разных принципах действия – как широко известных, так и сравнительно недавно освоенных. При этом новые эффекты используют не как альтернатива традиционным, а как дополнение к ним. Это объясняется тем, что СИ, основанные на традиционных принципах действия, благодаря внедрению достижений науки и техники получают дальнейшее развитие вплоть до радикального улучшения технико-эксплуатационных характеристик.

Вид измерений – часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин.

Методика выполнения измерений – установленная совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с гарантированной точностью в соответствии с принятым методом. Обычно методика измерений регламентируется какой-либо нормативно-технической документацией (НТД).

Нормативно-техническая документация – это документация, устанавливающая требования к объектам стандартизации, обязательная для исполнения в определённых областях деятельности, разработанная в установленном порядке и утверждённая компетентным органом. Основные виды НТД – это технические регламенты, стандарты и технические условия.

Конкретные методы измерений определяются видом измеряемых величин, их величиной, требуемой точностью, быстротой измерения, условиями, при которых проводят измерения, и рядом других причин. В принципе каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, которые могут отличаться друг от друга теми или иными техническими и метрологическими особенностями. В настоящее время существует множество методов измерений, и по мере развития науки и техники их число будет только увеличиваться.

По способу получения численного значения измеряемой величины выделяют прямые (непосредственной оценки, сравнения с мерой, нулевые, замещением, дополнением и дифференциальные), косвенные, совокупные и совместные измерения, одно- и многократные, статические (от греч. *στατική* – учение о весе, равновесии) и динамические (от греч. *δύναμις* – сила), контактные (от лат. *contactus* – прикосновение) и бесконтактные, абсолютные (от лат. *absolutus* – безусловный, неограниченный) и относительные, равно- и неравноточные, технические и технологические (от греч. *τεχνη* – искусство, мастерство, умение и *...λογία*) и др.

**Контроль** – операция, заключающаяся в определении соответствия измеряемых величин допускам, установленным на их значения для обеспечения нормального функционирования технического объекта или процесса. ГОСТ Р 50779.11–2000 трактует контроль как действия, такие как измерение, обследование, испытание и калибровка одного или нескольких показателей продукции или услуги и сравнение с установленными требованиями для определения соответствия.

Суть контроля сводится к осуществлению двух основных этапов:

1. Получение информации о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств. Эту информацию можно назвать первичной.

2. Сопоставление первичной информации с заранее установленными требованиями, нормами, критериями, т.е. обнаружение соответствия или несоответствия фактических данных требуемым. Информацию о рассогласовании (согласовании) фактических и требуемых данных можно назвать вторичной.

Таким образом, первый этап контроля – это измерение параметров объекта, а второй – логическая операция по сопоставлению результатов измерения и требуемых характеристик.

Закон «О техническом регулировании» регламентирует права государственного контроля и предварительный отзыв продукции при несоответствии продукции требованиям технических регламентов.

На стадии разработки продукции технический контроль заключается в проверке соответствия опытного образца и разработанной технической документации правилам оформления и техническому заданию.

На стадии изготовления технический контроль охватывает качество, комплектность, упаковку, маркировку и количество предъявляемой продукции, ход и состояние производственного процесса.

На стадии эксплуатации готовой продукции технический контроль заключается в проверке соблюдения требований эксплуатационной и ремонтной документации.

**Технический контроль** – это проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

**Техническая диагностика** (от греч. διαγνωστική – способный распознавать) – это определение технического состояния объекта, т.е. установление и изучение признаков, характеризующих состояние изделия, для предсказания возможных отклонений их параметров, в том числе за допускаемые пределы, вследствие чего возникают отказы, а также разработка методов и средств эксплуатационного определения состояния изделий с целью своевременного предотвращения нарушений нормального режима работы.

Задачами технической диагностики являются (ГОСТ 20911–89):

- контроль технического состояния;
- поиск места и определение причин отказа (неисправности);
- прогнозирование технического состояния.

По степени создания и существования продукции различают:

- производственный контроль, осуществляемый на стадии производства. При этом производственный контроль охватывает, как правило, все вспомогательные, подготовительные и технологические операции;
- эксплуатационный контроль, который осуществляется на стадии эксплуатации продукции. Он представляет собой неотъемлемую составную часть технического диагностирования объектов. Объектами эксплуа-

тационного контроля могут быть эксплуатируемые изделия и процесс эксплуатации.

По этапам производства контроль бывает:

– входной, т.е. контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику и предназначенной для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции. Его основными задачами являются (ГОСТ 24297–87):

– проверка наличия сопроводительной документации на продукцию, удостоверяющей качество и комплектность продукции;

– контроль соответствия качества продукции и комплектности продукции требованиям конструкторской и НТД и применения её в соответствии с протоколами разрешения;

– накопление статистических данных о фактическом уровне качества получаемой продукции и разработка на этой основе предложений по повышению качества и пересмотра (при необходимости) требований НТД на продукцию;

– периодический контроль за соблюдением правил и сроков хранения продукции поставщиков;

– операционный (контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции);

– приёмочный, когда по его результатам принимается решение о пригодности продукции к поставкам или использованию;

– инспекционный – это контроль, осуществляемый специально уполномоченными лицами для проверки эффективности ранее выполненного контроля.

По полноте охвата контроль бывает:

– сплошной;

– выборочный, когда решение о соответствии или несоответствии всей продукции установленным техническим требованиям принимают по результатам контроля выборки из исследуемой партии продукции. Он бывает одно-, двух- и многоступенчатым, выборочным, непрерывным, одно- и многостадийным, серийным, контролем с пропуском партий и инспекционным;

– летучий, который проводят в случайное время. Эффективность летучего контроля обуславливается его внезапностью, правила обеспечения которой должны быть специально разработаны. Этот вид контроля, как правило, осуществляется непосредственно на месте изготовления, ремонта, хранения и т.п.;

– непрерывный, при котором поступление информации о контролируемых параметрах происходит непрерывно;

– периодический, при котором поступление информации о контролируемых параметрах происходит через установленные интервалы времени.

По влиянию на объект контроля (ОК), в результате которого объект (продукция) может сохранить свои свойства или необратимо изменить их, его делят на неразрушающий и разрушающий.



**Неразрушающий** – это такой вид контроля, после которого продукция может быть использована по прямому назначению.

Неразрушающие методы позволяют вести сплошной контроль. Необходимость перехода от выборочного контроля к сплошному возрастает с усложнением контролируемой продукции. Из всех известных методов контроля качества наибольшими функциональными возможностями обладают физические методы НК, которые в настоящее время являются самой массовой технологической операцией.

## **1. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Методы неразрушающего контроля (НК) разделяют на группы, объединённые общностью физических принципов.

Виды НК классифицируют по следующим признакам:

*а)* характеру физических полей или излучений, взаимодействующих с контролируемым объектом;

*б)* характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом: автоэмиссионный, акустико-эмиссионный, импедансный, конвективный, магнитный, активационного анализа, индуцированного излучения, отражённого излучения (эхометод), прошедшего излучения, рассеянного излучения, свободных колебаний, собственного излучения, характеристического излучения, молекулярный, резонансный, тепловой контактный, термоэлектрический, трибоэлектрический и электрический методы;

*в)* первичному информативному параметру: амплитудный, временной, геометрический, газовый, жидкостной, коэрцитивной силы, магнитной проницаемости, намагничённости, напряжённости, остаточной индукции, плотности потока энергии, многочастотный, на эффекте Баркгаузена (H. Barkhausen – немецкий учёный, 1881 – 1956), поляризационный, спектральный, теплометрический, термометрический, фазовый, частотный, электроёмкостной и электропотенциальный методы;

*г)* способам получения первичной информации: акустический, болометрический, визуально-оптический, галогенный, голографический, детекторный (диодный), индукционный, интерференционный, ионизационный, calorиметрический, катарометрический, люминесцентный, люминесцентно-цветной, магнитографический, магнитопорошковый, магниторезисторный, манометрический, масс-спектрометрический, вторичных электронов, ВЧ-разряда, жидких кристаллов, контактной разности потенциалов, остаточных устойчивых деформаций, рекомбинационного излучения, термокрасок, термобумаг, термолюминофоров, термозависимых параметров, фильтрующих частиц, фотоуправляемых полупроводниковых частиц, экзозлек-

тронной эмиссии, на эффекте Холла (Е. Hall – американский учёный, 1855 – 1938), микрофонный, нефелометрический, оптический интерференционный, параметрический вихретоковый, пирометрический, пондемоторный, порошковый, пузырьковый, пьезоэлектрический, радиоактивный, радиографический, радиоскопический, рефлексометрический, рефрактометрический, сцинтилляционный, термисторный, трансформаторный, феррозондовый, химический, цветной (хроматический), шумовой, электроискровой, электромагнитно-акустический, электропараметрический, электростатический порошковый и яркостный (ахроматический) методы;

д) способу представления окончательной информации.

Классификация методов НК приведена в табл. 1 и 2.

### 1. Классификация методов НК

Вид контроля	Классификация методов НК		
	по характеру взаимодействия полей с ОК	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы Намагниченности Остаточной индукции Магнитной проницаемости Напряжённости Эффекта Баркгаузена	Магнитопорошковый Индукционный Феррозондовый Эффекта Холла Магнитографический Пондеромоторный Магниторезисторный
Электрический	Электрический Трибоэлектрический Термоэлектрический		Электростатический порошковый Электропараметрический Электроискровой Рекомбинационного излучения Экзоэлектронной эмиссии Шумовой Контактной разности потенциалов

Вид контроля	Классификация методов НК		
	по характеру взаимодействия полей с ОК	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
Тепловой	Тепловой контактный Конвективный Собственного излучения	Термометрический Теплометрический	Пирометрический Жидких кристаллов Термокрасок Термобумаг Термолюминофоров Термозависимых параметров Оптический интерференционный Калориметрический
Оптический	Прошедшего излучения Отражённого излучения Рассеянного излучения Индукцированного излучения	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Поляризационный Геометрический Спектральный	Интерференционный Нефелометрический Голографический Рефрактометрический Рефлексометрический Визуально-оптический
Радиационный	Прошедшего излучения Рассеянного излучения Активационного анализа излучения	Плотности потока энергии Спектральный	Сцинтилляционный Ионизационный Вторичных электронов Радиографический Радиоскопический
Вихре-токовый	Прошедшего излучения Отражённого излучения	Амплитудный Фазовый Частотный Спектральный Многочастотный	Трансформаторный Параметрический

Вид контроля	Классификация методов НК		
	по характеру взаимодействия полей с ОК	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
Радиоволновой	Прошедшего излучения Отражённого излучения Рассеянного излучения Резонансный Характеристического излучения Автоэмиссионный	Амплитудный Фазовый Частотный Временной Поляризационный Геометрический	Детекторный (диодный) Болометрический Термисторный Интерференционный Голографический Жидких кристаллов Термобумага Термолюминофоров Фотоуправляемых полупроводниковых пластин Калориметрический
Акустический	Прошедшего излучения Отражённого излучения Резонансный Импедансный Свободных колебаний	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Спектральный	Пьезоэлектрический Электромагнитноакустический Микрофонный Порошковый

Производственный НК – контроль, осуществляемый на стадии изготовления объекта.

Эксплуатационный НК – контроль, осуществляемый на стадии эксплуатации объекта.

Входной НК – контроль объекта, поступившего к потребителю или заказчику.

Операционный НК – контроль объекта во время выполнения или после завершения технологической операции.

Приёмочный НК – контроль объекта, по результатам которого принимается решение о его пригодности к поставке и (или) использованию.

Сплошной НК – контроль каждой единицы продукции в партии.

Выборочный НК – контроль, при котором решение о контролируемой совокупности объектов или процессе принимают по результатам проверки одной или нескольких выборок.

Измерительный контроль – контроль, осуществляемый с применением средств измерения (СИ).

## 2. Классификация методов контроля проникающими веществами

Классификация методов контроля проникающими веществами (капиллярных и течеискания)		
по характеру взаимодействия веществ с ОК	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
Молекулярный	Жидкостный Газовый	Яркостный (ахроматический)
		Цветной (хроматический)
		Люминесцентный
		Люминесцентно-цветной
		Фильтрующихся частиц
		Масс-спектрометрический
		Пузырьковый
		Манометрический
		Галогенный
		Радиоактивный
		Катарометрический
		Высокочастотного разряда
		Химический
Остаточных устойчивых деформаций		
Акустический		

В соответствии с ГОСТ 18353–79 различают следующие виды НК:

1. Капиллярный метод основан на капиллярном проникновении в полость дефекта индикаторной жидкости (керосин, скипидар и др.), хорошо смачивающей материал объекта.

2. Методы течеискания используют для выявления только сквозных дефектов в объекте контроля (ОК).

3. Акустический метод основан на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в ОК.

4. При магнитном методе анализируют взаимодействие магнитного поля с ОК.

5. Электрический метод основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с ОК (собственно электрический метод), или поля, возникающего в ОК в результате внешнего взаимодействия (термоэлектрический и трибоэлектрический методы).

6. Вихретоковый метод реализован на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в ОК.

7. Радиоволновой метод использует регистрацию изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с ОК.

8. Тепловой метод контроля основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей ОК.

9. При оптическом методе наблюдают или регистрируют параметры оптического излучения, взаимодействующего с ОК.

10. Радиационный метод контроля основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с ОК.

Большое значение имеет характер взаимодействия поля или вещества с ОК. Взаимодействие должно быть таким, чтобы контролируемый признак объекта вызывал определённые изменения физического поля или состояния вещества.

Например, чтобы наличие несплошности вызывало изменение прошедшего через неё излучения или проникновение в неё пробного вещества. В некоторых случаях используемое для контроля физическое поле возникает под действием других физических эффектов, связанных с контролируемым признаком. Например, ЭДС, возникающая при нагреве разнородных материалов, позволяет контролировать химический состав материалов (термоэлектрический эффект).

Первичный информативный параметр – конкретный параметр поля или вещества (амплитуда поля, время его распространения, количество вещества и т.п.), изменение которого используют для характеристики ОК. Например, наличие несплошности увеличивает или уменьшает амплитуду прошедшего через неё излучения.

Способ получения первичной информации определяется конкретным типом датчика или вещества, которые используют для измерения и фиксации упомянутого информативного параметра.

Сопоставим виды НК. Как уже отмечалось ранее, многие методы применимы для контроля только определённых типов материалов: радиоволновой и электроёмкостный – для неметаллических или плохо проводящих ток материалов, магнитный – для ферромагнитных материалов, вихретоковый – для электропроводящих, акустический – для материалов, обладающих небольшим затуханием звука соответствующей частоты. Далее следует иметь в виду различную область применения разновидностей методов: измерение размеров, исследование химического состава и структуры, поиск несплошностей. Поэтому сопоставление различных методов контроля можно проводить только в тех условиях, когда возможно применение нескольких методов.

Сравнение можно проводить, например, по глубине расположения дефектов, которые этими методами выявляются. Контроль течением рассчитан на выявление только сквозных дефектов. Визуальные и капиллярные методы контроля позволяют обнаруживать только дефекты, выходящие на поверхность (в том числе несквозные). Магнитные и вихретоковые методы дают возможность регистрировать как поверхностные, так и подповерхностные (залегающие на глубине нескольких миллиметров) дефекты. Радиационные и акустические методы могут обнаруживать как поверхностные дефекты, так и внутренние.

Экологически небезопасны для обслуживающего персонала радиационные и радиоволновые методы. Определённую токсичность имеют методы капиллярные и течеискания при использовании некоторых типов пробных веществ и УФ-осветителей. Влияние остальных методов на здоровье обслуживающего персонала не установлено.

Наиболее благоприятны для автоматизации контроля вихретоковых, оптический, электрический, магнитные методы с феррозондовыми и индукционными преобразователями, радиационный радиометрический и некоторые тепловые методы. Главные их преимущества заключаются в отсутствии механического контакта первичных измерительных преобразователей (ПИП) с объектом и представлении информации о дефектах в виде показаний приборов. Перечисленным методам уступает ультразвуковой, для которого, как правило, необходим акустический контакт датчика с изделием, например, через слой воды. Трудность автоматизации других методов заключается в необходимости визуальной обработки информации о дефектах, которые эти методы представляют.

По стоимости выполнения контроля наиболее дорогие методы – радиографический и течеискания. Это связано с длительностью операций контроля, а также необходимостью капитальных затрат на оборудование и помещения. Низкая производительность также у капиллярного метода контроля.

Рассмотрим физические методы НК в последовательности, соответствующей традиционному изложению материала в физике.

## 2. КАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Капиллярный (от лат. *capillaris* – волосной) метод контроля основан на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полость несплошностей материала ОК и регистрации образующихся индикаторных следов визуально или с помощью преобразователя (ГОСТ 18442–80). Метод позволяет обнаруживать поверхностные, т.е. выходящие на поверхность, и сквозные, т.е. соединяющие противоположные поверхности стенки изделия контроля, дефекты, которые могут быть установлены также при визуальном контроле.

Капиллярные методы позволяют контролировать объекты любых размеров и форм, изготовленные из чёрных и цветных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики, а также других твёрдых ферромагнитных материалов.

Основные капиллярные методы НК классифицируют следующим образом (ГОСТ 18442–80):

- в зависимости от типа проникающего вещества:
  - проникающих растворов;
  - фильтрующихся суспензий (лат. *suspensio*, букв. – подвешивание, от лат. *suspendo* – подвешиваю);
- в зависимости от способа получения первичной информации:
  - яркостный (ахроматический);

- цветной (хроматический);
- люминесцентный;
- люминесцентно-цветной.

Комбинированные капиллярные методы контроля в зависимости от характера физических полей (излучений) и особенностей их взаимодействия с контролируемым объектом подразделяют на следующие:

- капиллярно-электростатический;
- капиллярно-электроиндукционный;
- капиллярно-магнитный;
- капиллярно-радиационный поглощения;
- капиллярно-радиационный излучения.

Капиллярные явления – это физические явления, обусловленные поверхностным натяжением на границе раздела несмешивающихся сред.

Процесс капиллярного контроля состоит из следующих основных операций (рис. 1):

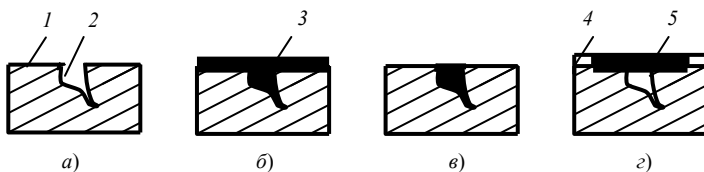
*а)* очистка поверхности 1 ОК и полости дефекта 2 от загрязнений, жира и так далее путём их механического удаления и растворения, что обеспечивает хорошую смачиваемость всей поверхности ОК индикаторной жидкостью и возможность её проникновения в полость дефекта.

Различают следующие способы очистки контролируемой поверхности:

- механический – очистка струёй абразивного материала (песком, дробью, косточковой крошкой) или механической обработкой поверхности;
- паровой – очистка в парах органических растворителей;
- растворяющий – очистка промывкой, протирка с применением воды, водных моющих растворов или легколетучих растворителей;
- химический – очистка водными растворами химических реактивов;
- электрохимический – очистка водными растворами химических реактивов с одновременным воздействием электрического тока;
- ультразвуковой – очистка растворителями, водой или водными растворами химических соединений в УЗ-поле с использованием УЗ капиллярного эффекта;
- анодно-ультразвуковой – очистка водными растворами химических реактивов с одновременным воздействием ультразвука и электрического тока;
- тепловой – очистка прогревом при температуре, не вызывающей недопустимых изменений материала ОК и окисления его поверхности;
- сорбционный – очистка смесью сорбента и быстросохнущего органического растворителя, наносимой на очищаемую поверхность, выдерживаемой и удаляемой после высыхания;

*б)* пропитка дефектов индикаторной жидкостью 3. Для этого она должна хорошо смачивать материал изделия и проникать в дефекты в результате действия капиллярных сил. По этому признаку метод называют капиллярным, а индикаторную жидкость – индикаторным пенетрантом или просто пенетрантом (от лат. *penetro* – проникаю, достаю).





**Рис. 1. Основные операции при капиллярном контроле:**

*a* – очистка поверхности ОК; *б* – пропитка дефектов пенетрантом; *в* – удаление излишков пенетранта; *г* – обнаружение пенетранта в дефектах; 1 – поверхность ОК; 2 – полость дефекта; 3 – индикаторная жидкость; 4 – проявитель; 5 – след

Различают следующие способы заполнения дефектов пенетрантом:

- капиллярный – самопроизвольное заполнение полостей дефектов индикаторным пенетрантом, наносимым на контролируемую поверхность смачиванием, погружением, струёй, распылением сжатым воздухом, хладоном или инертным газом;

- вакуумный – заполнение полостей дефектов индикаторным пенетрантом при давлении в их полостях менее атмосферного;

- компрессионный (от лат. *compressio* – сжатие) – заполнение полостей дефектов индикаторным пенетрантом при воздействии на него избыточного давления;

- ультразвуковой – заполнение полостей дефектов индикаторным пенетрантом в УЗ-поле с использованием УЗ капиллярного эффекта;

- деформационный – заполнение полостей дефектов индикаторным пенетрантом при воздействии на ОК упругих колебаний звуковой частоты или статического нагружения, увеличивающего минимальный размер дефектов;

- в*) удаление с поверхности изделия излишков пенетранта, при этом он в полости дефекта сохраняется. Для удаления используют эффекты диспергирования (от лат. *dispergo* – рассеиваю, рассыпаю) и эмульгирования (от лат. *emulgere* – доить), применяют специальные жидкости – очистители.

Способы удаления индикаторного пенетранта следующие:

- протирка – удаление индикаторного пенетранта салфетками с применением или без применения очищающего состава или растворителя;

- промывка – удаление индикаторного пенетранта водой, специальным очищающим составом или их смесями (погружением, струёй или распыленным потоком);

- обдувка – удаление индикаторного пенетранта струёй песка, дроби, кочечковой крошки, древесными опилками;

- гашение – устранение люминесценции или цвета воздействием гасителя.

- г*) обнаружение пенетранта в полости дефектов. Как указывалось, это делают чаще визуально, реже – с помощью специальных устройств – преобразователей. В первом случае на поверхность наносят специальное ве-

щество – проявитель 4, извлекающий пенетрант из полости дефектов за счёт явлений сорбции или диффузии. Сорбционный проявитель имеет вид порошка или суспензии.

Проявитель наносят следующими способами:

- распылением – нанесение жидкого проявителя струёй воздуха, хладона, инертного газа или безвоздушным методом;
- электрораспылением – нанесение проявителя в электростатическом поле с воздушным или безвоздушным распылением;
- воздушной взвеси – нанесение порошкообразного проявителя созданием его воздушной взвеси в камере, где размещён ОК;
- кистевым – нанесение жидкого проявителя кистью, щёткой или средствами, их заменяющими;
- погружением – нанесение жидкого проявителя кратковременным погружением в него ОК;
- обливанием – нанесение жидкого проявителя обливанием;
- электроосаждением – нанесение проявителя погружением в него ОК с одновременным воздействием электрического тока;
- посыпанием – нанесение порошкообразного проявителя припудриванием или обсыпанием ОК;
- наклеиванием – нанесение ленты плёночного проявителя прижатием липкого слоя к ОК.

Пенетрант пропитывает весь слой проявителя (обычно довольно тонкий) и образует следы (индикации) на его наружной поверхности, обнаруживаемые визуально. Различают яркостный или ахроматический метод, в котором индикации имеют более тёмный тон по сравнению с белым проявителем, цветной метод, когда пенетрант обладает ярким оранжевым или красным цветом, и люминесцентный, когда пенетрант светится под действием УФ-облучения.

Способы проявления индикаторных следов дефектов:

- временной – выдержка объектов на воздухе до момента полного и чёткого появления индикаторных следов дефектов;
- тепловой – нагревание объектов при нормальном атмосферном давлении;
- вакуумный – создание вакуума над поверхностью объекта с постоянным или изменяющимся по определённому закону разрежением;
- вибрационный – упругодеформационное воздействие на объект посредством вибрации, циклического или статического его нагружения.

Обнаружение дефектов представляет собой сочетание или отдельное использование способов наблюдения и регистрации индикаторного следа (табл. 3).

Заключительной операцией при капиллярном методе контроля является очистка ОК от пенетранта.

Рассмотрим основные физические явления, используемые в капиллярной дефектоскопии.

### 3. Способы наблюдения и регистрации индикаторного следа

Наименование метода	Способ обнаружения индикаторного следа дефекта	Обозначение способов	Технологическая характеристика
Проникающих растворов	Яркостный (ахроматический)	Я	Обнаружение дефектов по индикаторному ахроматическому следу в видимом излучении
	Цветной (хроматический)	Ц	Обнаружение дефекта по цветному индикаторному следу в видимом излучении
	Люминесцентный	Л	Обнаружение дефекта в УФ-излучении по люминесцирующему индикаторному следу
	Люминесцентно-цветной	ЛЦ	Обнаружение дефекта по цветному или люминесцирующему индикаторному следу в видимом или УФ-излучении
Фильтрующихся суспензий	Люминесцентный	ФЛ	Обнаружение дефекта по скоплению отфильтрованных частиц (люминесцентных, цветных, люминесцентно-цветных)
	Цветной	ФЦ	
	Люминесцентно-цветной	ФЛЦ	
Комбинированный	Капиллярно-электростатический	КЭ	Обнаружение дефектов в неметаллических ОК по индикаторному следу, образованному наэлектризованным порошком и пенетрантом

К наиболее важной характеристике индикаторных жидкостей относится их способность к смачиванию материала изделия. Смачивание – это взаимное притяжение атомов или молекул жидкости и твёрдого тела.

Суть растворения состоит в распределении молекул растворимого вещества среди молекул растворителя. При использовании капиллярного метода контроля растворение применяют при подготовке объекта к контролю для очистки полости дефектов. Растворение газа (воздуха), собравшегося

ся у конца тупикового капилляра (дефекта) в пенетранте, существенно повышает предельную глубину проникновения пенетранта в дефект.

*Сорбция* (от лат. *sorbeo* – поглощаю) – это физико-химический процесс, в результате которого происходит поглощение каким-либо веществом газа, пара или растворённого вещества из окружающей среды. В основе капиллярного метода для проявления лежит главным образом явление физической адсорбции (от лат *ad* – на, при и ...*сорбция*) жидкости на поверхности твёрдого тела.

*Диффузия* (от лат. *diffusio* – растворение, растекание) – движение частиц (молекул, атомов) среды, приводящее к переносу вещества и выравнивающее концентрацию частиц разного сорта. В капиллярном методе контроля явление диффузии наблюдается при взаимодействии пенетранта с воздухом, сжатым в тупиковом конце капилляра. Здесь этот процесс не отличается от растворения воздуха в пенетранте.

В капиллярной трубке мениск (от греч. *μηνίσκος* – полумесяц) жидкости под действием капиллярного давления движется в направлении открытого конца. Капиллярное давление  $p_k$ , пройденное расстояние  $l$  и время движения мениска  $t$  описывают уравнения:

$$p_k = \frac{2r\sigma \cos\theta}{r}; \quad (1)$$

$$l^2 = \frac{r\sigma \cos\theta}{2\mu}; \quad (2)$$

$$t = \frac{2\mu}{r\sigma \cos\theta} l^2, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $\sigma$  – сила поверхностного натяжения;  $\theta$  – краевой угол смачивания;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости.

Заполнение тупикового капилляра, которое очень часто встречается на практике, отличается тем, что воздух, сжатый вблизи тупикового конца, ограничивает глубину проникновения пенетранта. Предельная глубина заполнения  $l_{\text{пред}}$  в этом случае

$$l_{\text{пред}} = l \frac{p_k}{p_a + p_k}, \quad (4)$$

где  $p_a$  – атмосферное давление.

Рассмотрим технологию капиллярного контроля более подробно.

Перед капиллярным контролем проводят очистку поверхности изделия для того, чтобы устранить возможность возникновения фона и ложных индикаций, очистить полость дефектов.

Пропитка пенетрантом. Он должен хорошо смачивать поверхность ОК. Для этого в качестве основы пенетранта используют керосин, жидкие

масла, спирты, бензол, скипидар, у которых поверхностное натяжение составляет  $(2,5 \dots 3,5) \cdot 10^{-2}$  Н/м, для всех этих веществ  $\cos\theta$  не менее 0,9. Пенетрант должен иметь низкую вязкость, необходимую для сокращения времени пропитки, а также возможность и удобство обнаружения индикаций.

Индикаторные пенетранты подразделяют:

- в зависимости от физического состояния и цветоколеристических признаков (табл. 4);
  - в зависимости от физических свойств:
    - нейтральные;
    - магнитные;
    - электропроводящие;
    - ионизирующие;
    - поглощающие ионизирующее излучение;
    - комбинированные;
  - в зависимости от технологических признаков:
    - удаляемые органическими растворителями;
    - водосмываемые;
    - водосмываемые после воздействия очистителя или поверхностно-активных веществ (ПАВ);
    - нейтрализуемые гашением люминесценции или цвета.

#### 4. Светоколеристические признаки пенетранта

Физическое состояние пенетранта	Колористический признак пенетранта	Колористическая характеристика следа дефекта
Раствор	Ахроматический	Чёрный, серый, бесцветный
	Цветной	Имеет характерный цветовой тон при наблюдении в видимом излучении
	Люминесцентный	Испускает видимое излучение под воздействием длинноволнового УФ-излучения
	Люминесцентно-цветной	Имеет характерный цветовой тон при наблюдении в видимом излучении и люминесцирует под воздействием длинноволнового УФ-излучения
Суспензия	Люминесцентный или цветной	Скопление люминесцентных или цветных частиц суспензии в устье дефекта

В последнее время в качестве пенетранта предложено использовать ферромагнитные жидкости. В них в жидкой основе, например керосине, взвешены ферромагнитные частицы очень малого размера (2...10 мкм), стабилизированные ПАВ, в результате чего жидкость ведёт себя как однофазная система. Проникновение такой жидкости в дефекты интенсифицируется магнитным полем, а обнаружение индикаций возможно магнитными датчиками, что облегчает автоматизацию контроля.

Пропитку пенетрантом выполняют погружением в ванну, намазыванием кистью, поливанием, разбрызгиванием пульверизатором (фр. *pulvérisateur*, от лат. *pulvis* – пыль) или из аэрозольного баллона. Пенетрант оставляют на поверхности изделия от 10 до 30 мин.

Удаление излишков пенетранта с ОК необходимо, чтобы исключить образование фона (при неполном удалении пенетранта) и возникновение ложных индикаций (при сохранении пенетранта на отдельных участках, в углублениях). При выполнении этой операции важно сохранить пенетрант в полости дефектов. Согласно стандарту сначала применяют протирку, а потом промывку.

В качестве очистителей используют воду (для пенетрантов на основе скипидара), водные растворы ПАВ и органические растворители.

После промывки ОК сушат, для ускорения процесса обдувают тёплым воздухом.

Проявление – это процесс извлечения пенетранта, оставшегося в полости дефектов, и образования индикаций. В качестве проявителя используют порошок, суспензию (от лат. *suspensio* – подвешивание, поднимание), краски, лаки, липкую ленту.

Проявители подразделяют:

- в зависимости от состояния (табл. 5).
- в зависимости от характера взаимодействия проявителя с индикаторным пенетрантом:
  - химически пассивные (от лат. *passivus* – недейтельный), не меняющие колористические свойства индикаторного пенетранта;
  - химически активные (от лат. *activus* – деятельный) (реактивные), меняющие цвет, способность люминесцировать или дающие продукты реакции, индицирующие дефекты.

Чувствительность капиллярного метода контроля определяют по размеру наименьших выявляемых дефектов. Согласно ГОСТ 18842–80 основным параметром дефекта, по которому оценивают чувствительность, служит ширина его раскрытия. Поскольку глубина и длина дефекта также оказывают существенное влияние на возможность его обнаружения, эти параметры считают стабильными.

Установлено пять классов чувствительности в зависимости от размеров дефектов (табл. 6).

## 5. Проявители и их характеристики

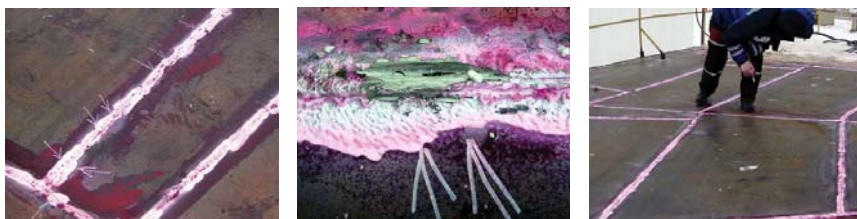
Физическое состояние	Принцип действия	Характеристика
Порошок	Сорбционный	Сухой, преимущественно белый сорбент, поглощающий пенетрант
Суспензия		Преимущественно белый сорбент, поглощающий пенетрант, диспергированный в летучих растворителях, воде или быстро-сохнущих смесях
Краска (лак)	Диффузионный	Связывающий пигментированный или бесцветный быстро-сохнущий раствор, поглощающий пенетрант
Плѐнка		Бесцветная или белая накладная лента с проявляющим, например липким слоем, поглощающим пенетрант, отделяемый индикаторным следом от контролируемой поверхности

С чувствительностью по классу 1 контролируют лопатки турбореактивных двигателей, уплотнительные прокладки клапанов (от нем. Klarre – крышка заслонка) и их гнезд. По классу 2 проверяют корпуса и антикоррозийные наплавки реакторов, детали подшипников. По классу 3 проверяют крепѐж ряда объектов, а по классу 4 – толстостенное литьѐ.

Капиллярным методом контролируют изделия из металлов (преимущественно неферромагнитных), неметаллических материалов и композиционные любой конфигурации. Изделия из ферромагнитных материалов контролируют обычно магнитопорошковым методом, который более чувствителен, хотя для контроля ферромагнитных материалов также иногда применяют капиллярный метод, если возникают трудности с намагничиванием материала или сложная конфигурация поверхности изделия создаѐт большие градиенты магнитного поля, затрудняющие выявление дефектов.

## 6. Классы чувствительности

Класс чувствительности	Минимальная ширина раскрытия дефекта, мкм
1	Менее 1
2	1...10
3	10...100
4	100...500
Технологический	Не нормируется



**Рис. 2. Капиллярный метод контроля**

Контроль капиллярным методом проводят до УЗ- или магнито- порошкового контроля, иначе (в последнем случае) необходимо сначала размагнитить ОК. Весьма перспективное направление совершенствования капиллярного контроля – использование электронного парамагнитного резонанса (ЭРП). Сравнительно недавно получены вещества типа стабильных нитроксильных радикалов. Они имеют слабосвязанные электроны, которые могут резонировать в электромагнитном поле частотой от нескольких мегагерц до десятков гигагерц, причём спектральные линии определяются с большой степенью точности. Нитроксильные радикалы стабильны, малотоксичны, способны растворяться в большинстве жидких веществ. Это даёт возможность вводить их в жидкие пенетранты. Индикация основывается на регистрации спектра поглощения в возбуждающем электромагнитном поле радиоспектроскопа. Чувствительность этих приборов велика, они позволяют обнаруживать скопления до  $10^{12}$  парамагнитных частиц.

Капиллярные методы НК (рис. 2) находят широкое применение в энергетике, авиации, ракетной технике, судостроении, химической промышленности и др. Ими контролируют основной металл и сварные соединения из сталей аустенитного (У. Роберт-Остен, W. Roberts-Austen – английский металлург, 1843 – 1902) класса (нержавеющих), титана, алюминия, магния и других цветных металлов.

### **3. МЕТОД ТЕЧЕИСКАНИЯ**

*Течеискание* – вид испытаний на герметичность, основанный на регистрации веществ, проникающих через течи, сквозные отверстия.

*Герметичность* – свойство конструкций препятствовать проникновению через них веществ (газовых, жидких, парогазовых). Герметичность конструкции нарушается, если при её разработке применяют материалы с достаточно сильной проницаемостью или в процессе технологических операций при её изготовлении возникают течи в отдельных элементах конст-



рукции. Проницаемость материала, т.е. его способность пропускать газы (фр. gas, от греч. χηραος – хаос) или жидкости, определяется его природой и может изменяться в широких пределах.

*Течь* – это канал или пористый участок в конструкции, нарушающий её герметичность. Определение геометрии течей весьма трудная задача. Поэтому в технике течеискания о наличии течей судят по количеству газа или жидкости, протекающих через них в единицу времени.

С учётом проницаемости материала конструкции и практически всегда существующих малых течей, недоступных для регистрации существующими методами контроля, можно утверждать, что абсолютную герметичность обеспечить невозможно. Исходя из этого, контролируемые объекты считают герметичными, если переток газа и жидкости через стенки и соединения не приводит к нарушению нормального функционирования ОК в течение срока его эксплуатации или к ухудшению его характеристик за время хранения. Поэтому в качестве количественной характеристики герметичности используют термин «степень герметичности», которая характеризуется суммарным расходом вещества  $J$  через течи. При постоянном изменении давления во времени этот поток равен

$$J = V \frac{\Delta P}{\Delta t}, \quad (5)$$

где  $V$  – объём, занимаемый газом;  $\Delta P$  – изменение давления за интервал времени  $\Delta t$ .

Физический смысл измерения потока в единицах мощности состоит в том, что произведение давления на объём есть энергия, запасённая в газе, а изменение энергии во времени – мощность, которая измеряется в ваттах (Дж. Ватт, J. Watt – английский изобретатель, 1736 – 1819). Однако на практике чаще используют размерность потока газа – м<sup>3</sup>·Па/с.

Уравнение для расчёта потока  $B$  в нормализованных условиях имеет вид

$$B = \frac{d^3}{2l\eta\sqrt{M}} (1,22 \cdot 10^{-2} d \sqrt{M} P_2^2 + 34,28 \sqrt{T} \eta P_2), \quad (6)$$

где  $P_2$  – давление у входа в канал;  $M$  – молекулярный вес газа;  $T$  – абсолютная температура;  $\eta$  – динамическая вязкость ( $\eta_{\text{возд}} = 18,1$  Па·с);  $d, l$  – диаметр и длина канала течи соответственно.

*Натекание* – проникновение вещества извне внутрь герметизированного объёма под действием перепада общего или парциального давлений.

*Утечка* – истечение вещества из герметизированного объёма. Для однозначности характеристики течи и возможности сопоставления степени негерметичности изделий, испытываемых и работающих в различных условиях, вводится понятие нормализованной течи. Это поток воздуха, перетекающий через течь из атмосферы в вакуум при комнатной температуре.

Испытания на герметичность – это испытания с целью оценки характеристик герметичности изделия как результата воздействия на него при его функционировании или моделировании воздействия.

В процессе испытания на герметичность используют пробные, балластные (англ. balast, от кельт. bal – песок и ...las, lad – груз, тяжесть) и индикаторные вещества. Основные иницирующие функции выполняет пробное вещество, проникновение которого через течь обнаруживается в процессе контроля. В этом и состоит суть метода течеискания. В качестве пробных веществ применяются, как правило, газы с малым молекулярным весом, с низким содержанием их в атмосфере, инертные газы, не взаимодействующие с материалом ОК и веществом внутри них. В ряде случаев роль пробного вещества выполняет рабочее вещество, заполняющее герметизированный объект при эксплуатации или хранении, например фреон в холодильнике или бытовой газ в баллоне.

При испытании оборудования химическим методом часто применяют индикаторное вещество, которое в результате взаимодействия с пробным веществом способствует формированию сигнала о наличии течи.

Методы течеискания весьма разнообразны и существенно различаются по чувствительности, избирательной реакции на пробное вещество, принципам обнаружения утечки этого вещества, по виду используемых при реализации метода пробных веществ и т.д.

Методы контроля герметичности разделяют на три группы в зависимости от вида применяемых пробных веществ:

1. Газовые – какой-либо газ (гелий, аргон, воздух и т.д.).
2. Газогидравлические – газ, например воздух, а жидкость играет роль вспомогательной среды для определения факта и места утечки газа.
3. Гидравлические – жидкость, например вода, масло.

В таблице 7 приведены краткие характеристики основных методов контроля герметичности. Её анализ показывает, что существует широкий спектр используемых на практике методов контроля герметичности, позволяющих обеспечить контроль течей в широком диапазоне. В то же время приведённая таблица является лишь ориентиром при выборе конкретного метода контроля.

## 7. Основные методы контроля герметичности

Предельный порог	Пробное вещество	Принципиальные основы метода	Метод
<i>Газовые методы</i>			
$1 \cdot 10^{-13}$	Гелий, аргон, водород	Выделение проникающего через течи пробного вещества путём разделения ионов смеси газов по отношению их массы к разряду и регистрации содержания пробного газа в этой смеси	Масс-спектрометрический
$1 \cdot 10^{-8}$	Фреон, трихлорэтилен, четырёххлористый углерод	Регистрация проникновения пробного вещества через течи по увеличению эмиссии положительных ионов с накалённой металлической поверхности при попадании на неё галогенов	Галогенный
$1 \cdot 10^{-10}$	Воздух, кислород	Регистрация перетекания через течи электроотрицательных пробных газов, склонных к образованию отрицательных ионов	Электронно-захватный
$1 \cdot 10^{-4}$	Гелий, водород, метан, углекислый газ	Регистрация проникающих через течи пробных веществ, теплопроводность которых отличается от теплопроводности воздуха	Катарометрический
$1 \cdot 10^{-7}$	Метан, углекислый газ, фреон, окись углерода, закись азота	Регистрация пробных веществ, молекулы которых состоят не менее чем из двух различных атомов, избирательно поглощающих ИК-излучение	Оптико-акустический
$1 \cdot 10^{-2}$	Любые газы	Регистрация вытекающих через течи пробных веществ по интенсивности акустических колебаний, создаваемых струёй газа	Акустический

Предельный порог	Пробное вещество	Принципиальные основы метода	Метод
$1 \cdot 10^{-7}$	Аммиак	Регистрация проникающих через течи веществ по эффекту химических реакций с индикаторным покрытием	Химический
$1 \cdot 10^{-8}$	Воздух	Регистрация проникающих через течи пробных веществ по изменению общего давления в контролируемом объёме или камере, в которой находится объект	Манометрический

*Газогидравлические методы*

$1 \cdot 10^{-6}$	Газ: воздух, азот; жидкость: вода, масло	Изделие под давлением погружают в ванну с жидкостью	Опрессовка в жидкой ванне
$1,5 \cdot 10^{-6}$	Газ: воздух, азот; жидкость: вода	Изделие, имеющее замкнутый объём, погружается в нагретую жидкость	Погружение в нагретую жидкость
$1,5 \cdot 10^{-7}$	Газ: воздух; жидкость: уайт-спирит, трансформаторное или вакуумное масло	Регистрация пузырьков воздуха, выходящих через неплотности из корпуса изделий в жидкость, в которой создаётся вакуум	Вакуумно-жидкостный
$1,5 \cdot 10^{-6}$	Газ: воздух, азот	Регистрация пузырьков газа, выходящих через течи корпуса изделия, сварные швы которого покрывают слоем мыльной пены	Опрессовка с обмыливанием

Предельный порог	Пробное вещество	Принципиальные основы метода	Метод
<i>Гидравлические методы</i>			
$1 \cdot 10^{-1}$	Вода, спирт, масло	Заполнение изделий жидкостью под давлением и регистрация вытекающих через течи канала струек жидкости	Опрессовочный
$1 \cdot 10^{-10}$	Люмоген	Обследование изделия, предварительно смоченного в растворе люминофора, в лучах ртутно-кварцевой лампы и наблюдение светящихся точек в предполагаемых местах утечки жидкости из ОК	Люминесцентный

**Масс-спектрометрический метод** основан на создании повышенного парциального давления пробного газа с одной стороны ОК и отборе пробного вещества с другой стороны для масс-спектрометрического анализа на присутствие молекул пробного газа. Метод находит широкое применение в практике промышленных испытаний из-за его высокой чувствительности при всех видах вакуумных и атмосферных испытаний.

Он выгодно отличается от других методов тем, что позволяет оценить течь не только качественно, но и выполнить количественные измерения потока через неё с погрешностью до 10%.

На рисунке 3 показан гелиевый масс-спектрометрический течеискатель с чувствительностью на входе  $5 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>·Па/с.

**Галогенный метод** основан на использовании эффекта увеличения термоионной эмиссии с поверхности накаливаемой платины в присутствии галогеносодержащих веществ (фреоны, четырёххлористый углерод и др.).

Галогены (от греч. *χαλος* – соль и *γενεσ* – рождающий) – химические элементы фтор, бром, йод, хлор, составляющие главную подгруппу VII группы периодической системы.

Чаще всего внутрь ОК вводят галогеносодержащее пробное вещество, а снаружи вдоль предполагаемых мест течей перемещают щуп, соединённый с регистрирующим прибором (течеискателем).



**Рис. 3. Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель**

На рисунке 4 показан галогенный течеискатель со щупом, имеющий порог чувствительности  $2,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ .

Галогенный метод применяют при контроле изделий больших объёмов или систем с сильно разветвлёнными трубопроводами. Ему отдают предпочтение при контроле герметичности объектов, в которых галогено-содержащие вещества используют в качестве технологических (аэрозольные упаковки, кондиционеры, холодильники и др.).

**Катарометрический метод** контроля основан на использовании зависимости теплопроводности газовой смеси  $\lambda_{\text{см}}$  от концентрации одного из её компонентов (пробного вещества), теплопроводность которого  $\lambda$  значительно отличается от теплопроводности остальных компонентов (табл. 8).

Использование этого метода предпочтительно в тех случаях, когда в качестве пробных газов берут гелий либо водород или внутри ОК находится хлор.

Катарометрический метод неизбирателен, он может быть использован для контроля утечки бинарных или псевдобинарных пробных газов, для которых теплопроводность смеси  $\lambda_{\text{см}}$  описывает уравнение

$$\lambda_{\text{см}} = \lambda_{\text{пр}} C_{\text{пр}} + (1 - C_{\text{пр}}) \lambda_{\text{ср}}, \quad (7)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – объёмная доля пробного газа;  $\lambda_{\text{пр}}$ ,  $\lambda_{\text{ср}}$  – теплопроводность пробного газа и средняя теплопроводность суммы неопределяемых компонентов. При этом  $\lambda_{\text{пр}} \gg \lambda_{\text{ср}}$ .



**Рис. 4. Галогенный течеискатель со щупом**

## 8. Теплопроводность некоторых газов и паров при 0 °С и 98,1 кПа

Газ или пар	$\lambda \cdot 10^4$ , Вт/(м·К)	Газ или пар	$\lambda \cdot 10^4$ , Вт/(м·К)
Воздух	244	Метилхлорид	92
Водород	1,740	Фреон-12	84
Гелий	1,457	Хлор	79

**Электронно-захватный метод** основан на способности молекул некоторых газов захватывать электроны (от греч. *ελεχτρον* – янтарь), превращаясь при этом в электроотрицательные ионы. Это свойство веществ называют сродством к электрону. Оно характеризуется энергией, выделяющейся при образовании отрицательно заряженного иона. Например, сродство к электрону атомов кислорода равно 1,46 эВ.

Так как различные газы обладают неодинаковой способностью к захвату электронов, то чувствительные элементы таких течейскаателей характеризуются избирательностью, например к галогеносодержащим, органическим соединениям. Чувствительность электронно-захватных ПИП к различным пробным газам зависит от степени электроотрицательности или сродства к электрону этих газов.

**Химический** (греч. *χημεια*, от *χημιοσ* – сок) **метод**. Его суть состоит в визуальном наблюдении эффекта химического взаимодействия пробного газа с реагентом, нанесённым на предполагаемое место течи. Известно несколько модификаций (позднелат. *modificatio* – установление меры) этого метода: нанесение на контролируемый объект индикаторной массы, применение индикаторных лент, использование индикаторной краски.

Общим для всех модификаций является применение соответствующего пробного газа, создание избыточного давления этого газа в ОК и визуальное наблюдение эффекта взаимодействия пробного газа с химическим составом, тем или иным образом нанесённым на предполагаемое место течи. Чаще всего в качестве пробного газа используют технологический газ или смесь газов.

**Манометрический метод** часто применяют на практике, так как это один из самых доступных в реализации методов. Он основан на регистрации изменения давления в ОК или во вспомогательной камере, в которую помещают контролируемое изделие.

На практике обычно контролируют падение (повышение) давления за определённое время.

Вакуумный измеритель проницаемости (рис. 5) предназначен для определения водонепроницаемости бетона и сопротивления проникновению воздуха (ГОСТ 12730.5–84).



**Рис. 5. Вакуумный измеритель проницаемости**

Принцип действия прибора основан на измерении в течение определённого промежутка времени падения вакуумного давления  $P_{\text{вак}}$ , предварительно созданного в вакуумной камере прибора, полость которого герметично с помощью мастики (от греч.  $\mu\alpha\sigma\tau\iota\chi\eta\epsilon$  – жевательная смола) соединена с поверхностью испытуемого материала, с последующим автоматическим вычислением по измеряемым величинам параметров проницаемости.

Падение давления в камере обусловлено фильтрацией в неё окружающего воздуха сквозь поры и дефекты материала, подвергаемого вакуумированию.

Скорость изменения давления зависит от параметров воздухопроницаемости  $a$  материала или обратному ему значения сопротивления материала проникновению воздуха  $m$ . Вычисление сопротивления материала проникновению воздуха  $m$  (с/см<sup>3</sup>) производят по формуле

$$m = \frac{\Delta t}{0,423V_0 \ln(P_0 / P_1)}, \quad (8)$$

где  $\Delta t$  – время, в течение которого произошло падение давления;  $V_0$  – объём вакуумной камеры;  $P_0$ ,  $P_1$  – начальное и конечное значения давления, кПа.

Воздухопроницаемость материала  $a$  вычисляют по формуле

$$a = \frac{1}{m}. \quad (9)$$

Технические характеристики вакуумного измерителя проницаемости приведены в табл. 9.

**Газогидравлический (пузырьковый) метод** основан на наблюдении пузырьков пробного газа, выделяемых из течи при опрессовке газом ОК, погружённого в жидкость.

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



## 9. Технические характеристики вакуумного измерителя проницаемости

Диапазон измерений сопротивления материала проникновению воздуха $m$ , с/см <sup>3</sup>	0,1...1000
Диапазон измерений марки материала по его водонепроницаемости $W$ , кг/см <sup>2</sup>	0...20
Начальное вакуумное давление $P_{\text{вак}}$ , кПа	35...65
Предел допускаемого значения основной абсолютной погрешности измерения давления $P$ , кПа	±2

Этот метод используют, например, при определении герметичности камер. Накачанную камеру опускают в ёмкость с водой и по наличию пузырьков воздуха определяют место прокола.

**Гидравлический метод.** Процесс гидроиспытаний, которому подвергают многие изделия, можно использовать как способ течеискания. Контроль на обнаружение больших течей называют испытанием на непроницаемость. Таким испытаниям подвергают корпуса судов, гидроёмкости и т.д.

Испытания проводят либо при статическом давлении столба воды высотой 0,5...2,5 м с выдержкой не менее 1 ч, либо струёй воды под напором. Менее ответственные объекты контролируют водой без напора или рассеянной струёй воды. Результаты считают удовлетворительными, если не наблюдают струй, потоков или непрерывно стекающих капель воды.

Сосуды, корпуса, трубные системы и другие объекты, которые должны выдерживать значительные давления, подвергают гидроиспытаниям опрессовкой давлением значительно выше рабочего. Этот процесс также используют для поиска течей, причём признаком течи может быть отпотевание стенки объекта.

Для большинства отраслей промышленности трудоёмкость испытаний изделий на герметичность составляет 15...25% от общей трудоёмкости их изготовления. Особенно это относится к производствам, в которых организован сплошной контроль герметичности.

Дефекты изделий, вызывающих утечку газовых и жидких сред, могут быть разделены на три группы:

1) возникающие в процессе первичного производства сырья, материалов, металлов и т.д. К ним относят трещины, пузыри, расслоения, поры, каналы, которые образуются в процессе протяжки,ковки, термообработки и других технологических операций;

2) возникающие при обработке материалов и изделий. Течи в процессе обработки различных металлических и неметаллических поверхностей могут быть самой различной величины и формы. Особенно актуален вопрос контроля герметичности сварных швов;

3) эксплуатационные дефекты. Они возникают в процессе функционирования изделий при переменной нагрузке и температуре вследствие износа уплотняющих материалов, трущихся частей и т.п.

Помимо конструкционных и эксплуатационных факторов изделия, на степень герметичности оказывает влияние коэффициент проницаемости материалов, из которых изготавливают изделия. Материалы, используемые в производстве (металлы, керамика, полимеры), не обладают абсолютной герметичностью (табл. 10).

Коэффициент проницаемости  $K$

$$K = V\mu \frac{\Delta l}{\Delta P}, \quad (10)$$

где  $V$  – скорость фильтрации;  $\mu$  – вязкость газа;  $\Delta P$  – перепад давления на протяжении  $\Delta l$ .

Для металлов коэффициент проницаемости весьма мал, для керамики – в 100, а для полимеров – уже в 100 000 раз больше, что оказывает существенное влияние на степень герметичности конструкций и изделий. Значение коэффициента проницаемости существенно зависит от целого ряда факторов. Например, размер молекул газа или жидкости, степень их полярности, концентрация могут изменять коэффициент проницаемости от 60 до 150 раз, структура или кристалличность материала – от 3 до 150 раз, температура, облучение, давление – от 0,2 до 55 раз.

Таким образом, степень герметичности различных изделий определяется множеством факторов, связанных с выбором материала, его обработкой, способами соединения элементов конструкции, условиями эксплуатации и др.

### 10. Газопроницаемость материалов

Материал	Газопроницаемость
Стекло	Наблюдается заметное проникновение гелия, водорода и других газов. Скорость диффузии прямо пропорциональна давлению
Металлы	Инертные газы практически не проникают. Максимальной способностью к диффузии обладает водород. Кислород проникает через серебро. Скорость процесса пропорциональна давлению в степени 1/2
Полимеры	Все газы легко проникают сквозь все полимеры. Скорость диффузии всех газов пропорциональна давлению

#### 4. АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Акустический метод НК основан на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в ОК (ГОСТ 23829–85).

Акустическая дефектоскопия – акустический НК на наличие дефекта – нарушения сплошности и однородности.

Акустическая дефектометрия – измерение параметров дефектов, оценка их вида и ориентации в ОК методами акустического НК.

Акустическая толщинометрия – измерение толщины ОК методами акустического НК.

Акустическая структуроскопия – определение структуры материала ОК методами акустического НК.

*Акустика* (от греч. ακουστικός – слуховой, слушающийся) – область физики, исследующая упругие колебания и волны от самых низких частот (условно от нуля герц) до предельно высоких ( $10^{11} \dots 10^{13}$  Гц), их взаимодействие с веществом и разнообразные применения.

*Упругость* – это свойство твёрдых тел восстанавливать свою форму и объём (а жидкостей и газов – только объём) после прекращения действия внешних сил. Среду, обладающую упругостью, называют упругой средой. Упругие или акустические волны – механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Частный случай акустических волн – слышимый человеком звук, отсюда происходит термин «акустика» в широком смысле слова – учение об упругих волнах, а в узком – учение о звуке. Различают следующие диапазоны частот упругих колебаний (табл. 11).

#### 11. Диапазоны частот упругих колебаний

Название колебаний и волн	Качественное определение	Частота, Гц	
		Физический диапазон	Условный диапазон
Инфразвук	Ниже границы слышимости	Ниже 16...25	Ниже 20
Звук	Диапазон слышимости	От 16...25 до $(15 \dots 20) \cdot 10^3$	$20 \dots 20 \cdot 10^3$
Ультразвук	Выше границы слышимости	От $(15 \dots 20) \cdot 10^3$ до $10^9$	$20 \cdot 10^3 \dots 10^9$
Гиперзвук	Длина волны меньше длины свободного пробега молекул воздуха	Выше $10^9$	Выше $10^9$

Упругие колебания и акустические волны, особенно УЗ-диапазона, широко используют в технике. Мощные УЗ-колебания применяют для локального разрушения хрупких материалов (УЗ-долбёжка); диспергирования (тонкого измельчения твёрдых или жидких тел в какой-либо среде, например жиров в воде); коагуляции (от лат. *coagulatio* – свёртывание, сгущение), т.е. укрупнения частиц вещества, например дыма, и других целей. Другая область применения акустических колебаний и волн – контроль и измерение. Сюда относят звуковую и УЗ-локацию, УЗ-медицинскую диагностику, контроль уровня жидкости, скорости потока, давления, температуры в сосудах и трубопроводах, а также использование акустических колебаний и волн для НК.

Для контроля применяют колебания частотой от 50 Гц (Н. Hertz – немецкий физик, 1857 – 1894) до 50 МГц. Интенсивность колебаний при этом невелика, не более 1 Вт/см<sup>2</sup>. Существуют разные типы акустических волн, отличающихся скоростью распространения, направлением колебания частиц и другими признаками. Их называют модами (от лат. *modus* – образец, способ).

Для передачи колебаний от преобразователя с чувствительным элементом к ОК используют различные способы акустического контакта. Обычно промежуток между преобразователем и изделием заполняют жидкостью. Если толщина слоя жидкости меньше половины длины акустической длины волны, то говорят о контактном способе, а если толщина больше нескольких длин волн – то об иммерсионном (от лат. *immersio* – погружение).

В отличие от этого в преобразователях бесконтактного типа возбуждают упругие колебания точек на поверхности (или вблизи поверхности) ОК под воздействием поля другой физической природы. Чаще всего для этого применяют электромагнитное поле. Такие преобразователи называют электромагнитно-акустическими. Они позволяют возбудить упругие колебания твёрдого тела по требуемому закону, т.е. в требуемом направлении в каждом участке поверхности изделия, чтобы получить нужную моду. Работа приёмников акустических волн основана на эффектах, обратных используемым для возбуждения.

Для получения информации обо всём ОК преобразователь обычно перемещают по его поверхности. Этот процесс называют сканированием (от англ. *scan* – рассматривать, разглядывать). Поверхность изделия, через которую вводят акустические волны, называют поверхностью ввода.

Упругие колебания в жидкостях и газах характеризуются одной из следующих величин: изменением давления или плотности, смещением частиц из положения равновесия, скоростью колебательного движения, потенциалом (от лат. *potentia* – сила) смещения или колебательной скорости.

В методах акустического контроля используют волны малой амплитуды. Это область линейной акустики, где напряжение (или давление) пропорционально деформации. Область колебаний с большими амплитудами или интенсивностями, в которой пропорциональность отсутствует, относится к нелинейной акустике.

Звуковая энергия складывается из кинетической энергии движения частиц среды и внутренней (потенциальной энергии деформации). Плотность кинетической энергии равна  $\rho |v|^2/2$ . В бегущей волне плотность внутренней энергии равна плотности кинетической энергии, поэтому полная плотность  $E$  определяется уравнением

$$E = \rho |v|^2, \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность вещества;  $v$  – колебательная скорость.

Плотность потока энергии

$$W = cE = c\rho |v|^2 = |pp| = \frac{|p|}{\rho c}, \quad (12)$$

где  $c$  – скорость распространения акустических волн;  $p$  – давление.

Среднее по времени значение плотности потока энергии называют интенсивностью акустической волны  $J$ . Для плоской бегущей гармонической волны интенсивность равна

$$J = \frac{|p|^2}{2\rho c} = \frac{\rho c |v|^2}{2}. \quad (13)$$

В сферической волне интенсивность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния

$$J = \frac{2\pi^2 a^4 |p_0|^2}{\lambda^2 \rho c r^2}, \quad (14)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $r$  – расстояние;  $a$  – радиус сферы.

Интенсивность плоской волны, распространяющейся вдоль оси  $x$ , с учётом затухания

$$J = J_0 e^{-2\delta x}, \quad (15)$$

где  $\delta$  – коэффициент затухания.

При акустическом контроле приходится сравнивать между собой амплитуды (реже – интенсивности) акустических сигналов, причём они изменяются в очень широких пределах. Для этого используют логарифмические единицы – децибелы (А. Bell – американский учёный, 1847 – 1922). Число децибел  $N$ , на которое сигнал интенсивностью  $J$  с амплитудой  $A$

отличается от некоторого уровня с интенсивностью  $J_0$  и амплитудой  $A_0$ , равно

$$N = 10 \lg \frac{J}{J_0} = 20 \lg \frac{A}{A_0}. \quad (16)$$

Основные физико-механические свойства среды: плотность, упругость, структурное строение – определяют постоянные, характеризующие распространение в среде упругих волн, т.е. акустические свойства среды.

Скорость распространения акустических волн для жидкостей или газов определяют при заданном состоянии среды (температуре, давлении) постоянной

$$c = \sqrt{\left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} = \sqrt{K \rho}, \quad (17)$$

где  $K$  – модуль всестороннего сжатия, равный отношению давления к деформации изменения объёма с обратным знаком. Индекс  $s$  показывает, что производную принимают при постоянной энтропии. *Энтропия* – функция состояния системы, изменение которой  $dS$  в равновесном процессе равно отношению количества теплоты  $dQ$ , сообщённого системе или отведённого от неё, к термодинамической температуре  $T$  системы.

Акустические волны при взаимодействии со средой испытывают отражение, т.е. переизлучение волн препятствиями с изменением направления их распространения; преломление (изменение направления распространения излучения при его прохождении через границу раздела двух сред); дифракцию (от лат. *diffractus* – разломанный) – отклонение волн от геометрических законов распространения и рефракцию (от позднелат. *refractio* – преломление) – в широком смысле то же, что и преломление волн, а в узком – непрерывное изменение направления оптического луча в неоднородной среде, скорость волн в которой зависит от координат.

Методы акустического контроля делят на две большие группы: активные, использующие излучение и приём акустических колебаний и волн, и пассивные, реализующие только приём колебаний и волн. В каждой группе выделяют методы, основанные на возникновении в ОК бегущих и стоячих волн (или колебаний), объекта в целом или его части.

Активные методы, в которых применяют бегущие волны, делят на следующие подгруппы: методы, использующие прохождение, отражение волн, и комбинированные методы, в которых применяют как отражение, так и прохождение.

Методы прохождения предполагают наличие двух преобразователей – излучающего и приёмного, расположенных по разные стороны ОК или контролируемого участка.

Различают следующие виды акустического (ГОСТ 23829–85) НК:

- прохождения, основанный на излучении и приёме волн, однократно прошедших через ОК в любом направлении, и анализе их параметров;
- теневой, при котором анализируют уменьшение амплитуды прошедшей волны, обусловленной наличием дефекта;
- временной, основанный на анализе увеличения времени прохождения упругих колебаний, обусловленного наличием дефекта в ОК;
- велосиметрический (от лат. *velox, velocis* – быстрый и *...метр*), при котором анализируют изменение скорости упругих волн, обусловленного наличием дефекта в ОК;
- отражения, основанный на излучении акустических колебаний, отражении их от поверхности раздела двух сред и анализе параметров отражённых импульсов;
- эхоимпульсный, при котором анализируют параметры акустических импульсов, отражённых от дефектов и поверхностей ОК;
- реверберационный (от средневеков. лат. *reverberatio* – отражение), основанный на анализе времени объёмной реверберации в ОК;
- эхозеркальный, при котором анализируют параметры акустических импульсов, отражённых от дефекта и донной поверхности ОК;
- зеркально-теневой, основанный на анализе акустических импульсов после двукратного или многократного их прохождения через ОК и регистрации дефектов по обусловленному ими изменению амплитуды сигнала, отражённого от донной поверхности;
- резонансный, основанный на возбуждении вынужденных упругих колебаний в ОК или его части и анализе параметров колебаний системы ОК – преобразователь при резонансах или вблизи них;
- свободных колебаний, при котором возбуждают свободно затухающие упругие колебания в ОК или его части и анализируют параметры этих колебаний;
- вибрационно-диагностический, основанный на анализе параметров вибрации, возникающей при работе ОК;
- шумодиагностический, основанный на анализе акустических шумов, возникающих при работе ОК;
- импедансный, основанный на возбуждении в ОК упругих колебаний и анализе изменения механического импеданса участка поверхности этого объекта;
- акустико-эмиссионный, основанный на анализе упругих волн акустической эмиссии;
- акустоупругости, при котором измеряют скорость распространения упругих колебаний, зависящую от физико-механических свойств или напряжённо-деформированного состояния;

– акустико-топографический, основанный на возбуждении в ОК упругих колебаний и регистрации распределения их амплитуд на поверхности объекта.

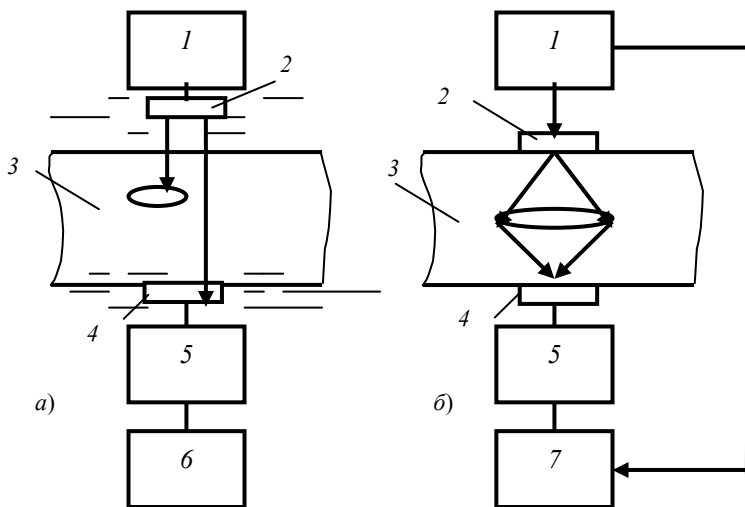
**Теневой (или амплитудно-теневой) метод** основан на регистрации изменения амплитуды прошедшей волны, так называемого сквозного сигнала, под влиянием дефекта (рис. 6, а). При этом применяют как импульсное, так и (реже) непрерывное излучение.

Главная причина этого – изменение сквозного сигнала под влиянием помех. Площадь выявляемого дефекта составляет  $100 \dots 200 \text{ мм}^2$ . При контроле тонких изделий, когда принимают все меры к стабилизации прохождения ультразвука, удаётся снизить порог чувствительности до уровня, близкого к уровню эхометода ( $5 \dots 10 \text{ мм}^2$ ).

Суть временного **теневого метода** (рис. 6, а) состоит в измерении запаздывания импульсов, вызванного огибанием дефекта. При этом выявляют дефекты площадью  $0,5 \dots 1,0$  от площади излучателя (приёмника).

Порог чувствительности теневого метода, достигаемый на практике, выше, чем у эхометода.

УЗ прибор (рис. 7) контролирует прочность и однородность бетона (ГОСТ 17624–87), кирпича (ГОСТ 24332–88), строительных и КМ, конструкций, мостов, гидротехнических сооружений и др.



**Рис. 6. Методы прохождения:**

*а* – теневой; *б* – временной;

1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – ОК; 4 – приёмник; 5 – усилитель;

6 – измеритель амплитуды; 7 – измеритель времени пробега



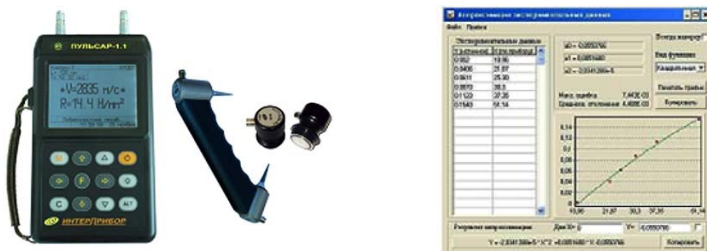


Рис. 7. Ультразвуковой прибор для контроля прочности

Прибор позволяет:

- обнаруживать пустоты, трещины и дефекты, возникшие в процессе производства и эксплуатации конструкций (при технологическом контроле и обследовании объектов);
- измерять глубину трещин в изделиях, конструкциях и других объектах;
- определять плотность и модуль упругости углеграфитов и стеклопластика;
- определять звуковой индекс абразивов и строительной керамики;
- оценивать пористость, трещиноватость и анизотропию материалов;
- оценивать степень зрелости бетона при монолитном бетонировании.

Работа прибора основана на измерении времени прохождения УЗ-импульса в материале изделия от излучателя к приёмнику. Скорость ультразвука вычисляют делением расстояния между излучателем и приёмником на измеренное время. Для повышения достоверности в каждом измерительном цикле проводят шесть измерений и результат формируется путём их статистической обработки и отбраковки выбросов. Скорость распространения УЗ-волны в материале зависит от его плотности и упругости, наличия дефектов (трещин и пустот), определяющих прочность и качество материала или конструкции.

**В методах отражения** используют как один, так и два преобразователя, и применяют, как правило, импульсное излучение. К этой группе относят следующие методы дефектоскопии.

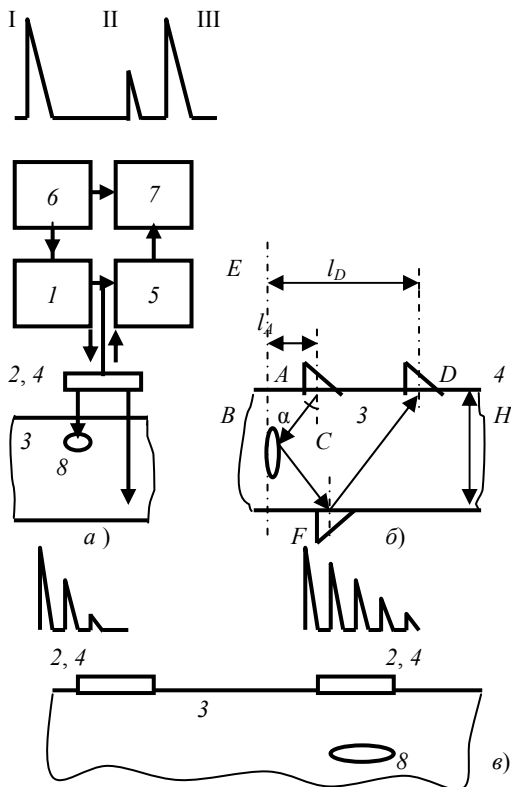
**Эхометод** (рис. 8, а) основан на регистрации эхосигналов от дефектов. На экране индикатора наблюдают посланный (зондирующий) импульс I, импульс II, отражённый от противоположной поверхности (дна) ОК (донный сигнал), и эхосигнал от дефекта III. Время прихода импульсов II и III пропорционально глубине залегания дефекта и толщине ОК. Область оптимального применения – дефектоскопия листов толщиной 20...60 мм, где с помощью этого метода обнаруживают дефекты диаметром 3...5 мм и более.

**Эхозеркальный метод** – метод, в котором анализируют сигналы, испытавшие зеркальное отражение от донной поверхности ОК и дефекта, т.е. прошедшие путь  $ABCD$  (рис. 8, б).

Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов (в плоскости  $EF$  на рисунке), называют **тандем-методом**.

Для его реализации при перемещении преобразователей  $A$  и  $D$  поддерживают постоянные значения  $l_A$  и  $l_D$ . Для получения зеркального отражения от неvertикальных дефектов значение  $l_A + l_D = 2Htg\alpha$  варьируют.

**Реверберационный метод** основан на анализе времени объёмной реверберации – процесса постепенного затухания звука в некотором объёме – ОК. Например, при контроле двухслойной конструкции время реверберации в слое, с которым контактирует ИП, будет меньше в случае качественного соединения слоёв, так как часть энергии переходит в другой слой (рис. 8, в). Применяют также другие варианты.



**Рис. 8. Методы отражения:**

$a$  – эхометод;  $б$  – зеркальный эхометод;  $в$  – реверберационный;  
 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – ОК; 4 – приёмник; 5 – усилитель;  
 6 – синхронизатор; 7 – генератор развёртки; 8 – дефект

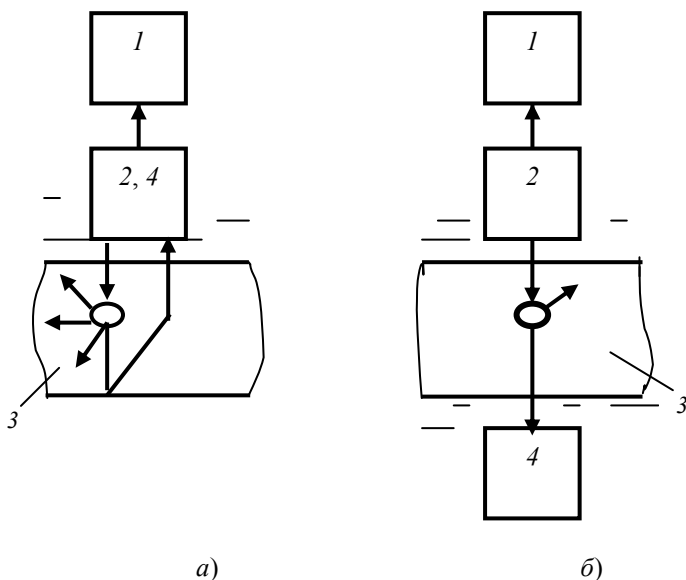
В **комбинированных методах** используют принципы прохождения и отражения акустических волн, к ним относят:

– **зеркально-теневой**, основанный на измерении амплитуды донного сигнала. На рисунке 9, *а* отражённый луч условно смещён в сторону. По технике выполнения (фиксируется эхосигнал) – это метод отражения, а по физической сущности контроля (измеряют ослабление сигнала, дважды прошедшего ОК в зоне дефекта) он близок к теневому;

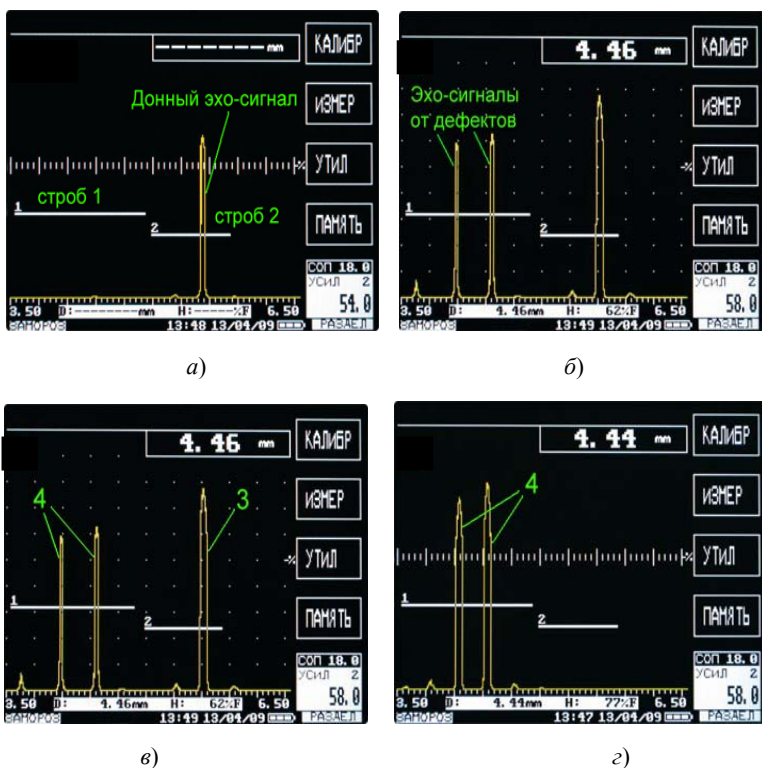
– **эхотеневой**, основанный на анализе прошедших и отражённых волн (рис. 9, *б*).

Типичные изображения на экране УЗ-дефектоскопа показаны на рис. 10.

Горизонтальные стробирующие сигналы *1* и *2* показывают области потенциального расположения дефекта (зона контроля) и донного эхосигнала для контроля качества акустического контакта. При наличии в дефектной зоне небольших по площади дефектов (непроклеев), расположенных на разной глубине (рис. 10, *в*) наряду с эхосигналами от дефектов *4* отражается также донный эхосигнал *2*. С увеличением площади непрочлея пропадает донный сигнал и наблюдаются только эхосигналы от непрочлеев (рис. 10, *в*).



**Рис. 9. Комбинированные методы:**  
*а* – зеркально-теневой; *б* – эхотеневой; *1* – генератор;  
*2* – излучатель; *3* – ОК; *4* – приёмник



**Рис. 10. Изображение на экране дефектоскопа:**

*а* – бездефектная зона изделия из композиционного углестеклопластикового материала; *б* – дефектная зона изделия; *в* – отображение двух небольших по площади расслоений материала; *г* – дефекты увеличенной площади; 1, 2 – строб-импульсы; 3 – донный сигнал; 4 – эхосигналы от дефектов

Макрошлиф дефектного участка, выявленного термографическим и подтверждённым УЗ эхоимпульсным методами в конструкции из композиционного стеклопластикового материала, показан на рис. 11.

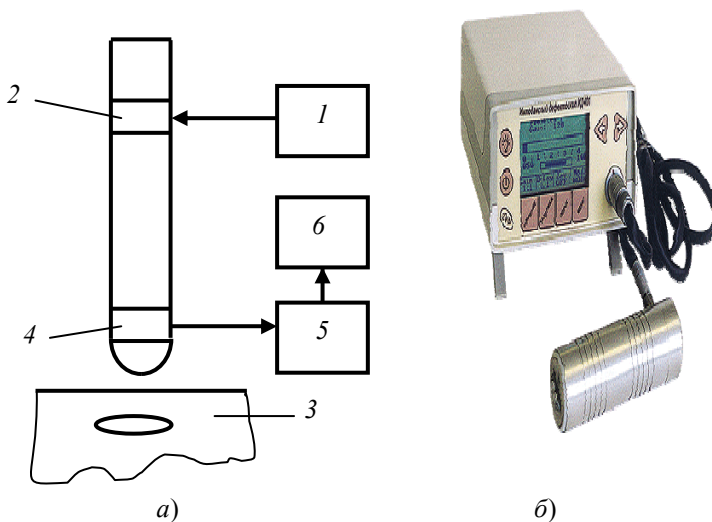
От рассмотренных методов существенно отличается **импедансный**. Он основан на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка поверхности ОК, с которым взаимодействует преобразователь. Термин «импеданс» (от лат. *impedio* – препятствовать) означает сопротивление. Акустический импеданс определяют как отношение комплексного звукового давления к объёмной колебательной скорости. С физической точки зрения акустический (и механический) импеданс показывает, насколько трудно «раскачать» систему, степень неподатливости системы воздействию колебаний.



**Рис. 11. Макрошлиф дефектного участка конструкции из стеклопластика**

В **НЧ-импедансном методе** измерительным преобразователем является колеблющийся стержень, прижатый к поверхности ОК (рис. 12).

Появление подповерхностного дефекта 3 в виде расслоения уменьшает механический импеданс ОК, делает расположенный над дефектом участок поверхности более гибким, в нём легче возбуждаются изгибные колебания. В результате изменяется режим колебаний стержня, в частности, уменьшаются механические напряжения на приёмнике 4, что служит признаком дефекта.



**Рис. 12. Импедансный метод (а) и дефектоскоп (б):**  
 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – ОК; 4 – приёмник;  
 5 – усилитель; 6 – вторичный прибор

Импедансный дефектоскоп (рис. 12, б) обнаруживает такие дефекты изделий из КМ, как расслоение, непрочней, нарушение сплошности.

Минимальная площадь выявляемых дефектоскопом дефектов – 1,2 см<sup>2</sup>, несущая частота импульсов – 4...16 кГц, частота следования импульсов 100 Гц.

В **ВЧ-импедансном методе** преобразователь излучает продольную волну. Условия этого возбуждения зависят от акустического импеданса участка поверхности ОК, с которым контактирует преобразователь. Акустический импеданс в свою очередь зависит от наличия или отсутствия дефекта вблизи поверхности.

**При использовании методов колебаний** возбуждают свободные или вынужденные колебания либо в ОК в целом (интегральные методы), либо в его части (локальные методы). Свободные колебания возбуждают путём кратковременного внешнего воздействия на изделие, например удара, после чего оно колеблется свободно. Вынужденные колебания предполагают постоянную связь (через преобразователь) колеблющегося ОК с возбуждающим генератором, частоту которого изменяют. Измеряемыми величинами служат частоты свободных колебаний либо резонансов вынужденных колебаний, которые несколько отличаются от свободных под влиянием связи с возбуждающим генератором. Эти частоты связаны с геометрией изделия и скоростью распространения ультразвука в его материале. Иногда измеряют изменение амплитуды колебаний при вариации частоты в широком диапазоне частот, т.е. амплитудно-частотную характеристику, или величины, связанные с затуханием колебаний: амплитуды свободных или резонансных колебаний, добротность колебаний, ширину резонансного пика. Методы вынужденных колебаний, основанные на анализе колебаний системы ОК–ИП при резонансных частотах или вблизи них, называют **резонансными**.

На рисунке 13 показан УЗ-прибор, который на основании измерений времени и скорости распространения ультразвука в материалах при сквозном и поверхностном просвечивании вычисляет прочность, плотность, модуль упругости материалов и звуковой индекс абразивов. Диапазон измерений времени распространения ультразвука составляет 10...+ 999.90 мкс, а предел основной абсолютной погрешности равен  $\pm(0,01t + + 0,1)\%$ .

На рисунке 14 показан УЗ-твёрдомер, принцип работы которого основан на определении изменений частот свободных колебаний индентора (от англ. indent – вдавливать, акустического резонатора с алмазной пирамидой Виккерса, по названию английского военно-промышленного концерна «Виккерс», Vickers Limited), находящегося под действием постоянного усилия 1,5 кг. Он имеет следующие диапазоны измерений и погрешности: 20...70 HRC (1,5 HRC), 75...650 HB (10 HB), 75...1000 HV (12 HV), 23...102 HSD (2 HSD).



Рис. 13. Ультразвуковой прибор



Рис. 14. Ультразвуковой твердомер

К пассивным методам акустического контроля относят **акустико-эмиссионный**, в котором используют бегущие волны. Явление акустической эмиссии состоит в излучении упругих волн материалом изделия в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры. Такие явления, как возникновение и развитие трещин, превращения кристаллической структуры, движение скоплений, дислокаций – наиболее характерные источники акустической эмиссии. Контактующие с ОК ПИП принимают упругие волны и позволяют установить наличие источника эмиссии, а при обработке сигналов, приходящих от нескольких датчиков, – также расположение источника.

Акустико-эмиссионный анализатор (рис. 15) позволяет:

- диагностировать технологическое состояние оборудования, которое находится в рабочем процессе;
- диагностировать трещины, а также расслоения сварных швов, коррозионные процессы;
- обнаруживать сквозные дефекты, зоны протечек.



Рис. 15. Акустико-эмиссионный анализатор

К пассивным методам акустического контроля, основанным на возбуждении упругих колебаний в изделии, относят также **вибрационно-диагностический** и **шумодиагностический**. В первом из них анализируют параметры вибраций какой-либо отдельной детали или узла (ротора, барабана, подшипника) с помощью приёмников контактного типа. Во втором изучают спектр шумов работающего механизма в целом на слух или с помощью микрофонных и других приёмников и приборов – анализаторов спектра.

**УЗ-дефектоскопия** металлических ОК отличается многообразием методов, типов применяемых волн, широким диапазоном частот. Реализация его возможностей применительно к дефектоскопии конкретных видов изделий составляет задачу разработки методики контроля. Она включает в себя следующие основные вопросы.

Выбор схемы контроля: метода дефектоскопии, типа волн, поверхности, через которую вводят УЗ-волны, угла ввода.

Подготовка изделий к контролю: требования к качеству поверхности, разделение крупногабаритных и изделий разной толщины на участки для последовательного контроля.

Рекомендации по подготовке аппаратуры: проверка аппаратуры, выбор и настройка частоты, чувствительности, скорости и развёртки.

Составление правил поиска дефектов: выбор пути, шага и скорости сканирования.

Оценка результатов контроля: определение местоположения дефектов, измерение их размеров, оценка характера.

УЗ-дефектоскоп показан на рис. 16.

Методы и средства дефектоскопии неметаллических материалов и многослойных конструкций в значительной степени зависят от характера контролируемых материалов, прежде всего от степени их анизотропности.

Дефектоскоп



Рис. 16. Ультразвуковой дефектоскоп



Изотропные материалы – это материалы, свойства которых не зависят от направления. Из неметаллических материалов, чаще всего подвергаемых контролю, выделяют гомогенные (от греч.  $\eta\omicron\mu\omicron\upsilon\gamma\epsilon\nu\epsilon\sigma$  – однородный) материалы, в том числе аморфные (стекло, резина, пластмасса) и мелкодисперсные (керамика, металлокерамика). От них существенно отличаются гетерогенные (от греч.  $\eta\epsilon\tau\epsilon\rho\sigma$  – другой и  $\dots\gamma\epsilon\nu\sigma$  – род) (разнородные) и материалы с крупнозернистой структурой: горные породы, бетон, асфальт (от греч.  $\alpha\sigma\tau\eta\alpha\lambda\tau\sigma$  – горная смола).

Трансверсально-изотропные (*изо...* и греч.  $\tau\rho\omicron\tau\omicron\sigma$  – поворот, направление) – это материалы, свойства которых существенно отличаются в двух взаимно перпендикулярных направлениях (фанера, древесностружечная плита, гетинакс и т.п.).

Ортотропные материалы характеризуются разными свойствами по всем трём направлениям. Особенно большое значение для промышленности имеют КМ.

Основное назначение акустических приборов для измерения размеров ОК состоит в измерении толщины стенок труб, сосудов, резервуаров и других изделий, доступ к которым имеется только с одной стороны.

**Резонансными методами** можно измерять толщину изделий от минимального значения, равного

$$h_{\min} = \frac{c}{2f_{\max}}, \quad (18)$$

где  $f_{\max}$  – максимальная частота СИ.

Повышение этой частоты до 30 МГц позволяет измерять толщину стальных изделий, начиная от 0,06 мм. Измерять такую толщину другими методами не удаётся. Погрешность при этом составляет 1...2%.

УЗ-толщиномер (рис. 17) имеет диапазон измеряемой толщины  $H$  по стали 0,6...300,0 мм, допускаемая абсолютная погрешность  $\pm(0,1 + 0,005H)$ .



Рис. 17. Ультразвуковой толщиномер

**Эхометод** (по имени греческой нимфы Эхо,  $N\chi\omega$ ) – основной способ измерения толщины. Минимальную толщину изделий определяет «мёртвая» зона толщиномера (18 мм). Обычно максимальную толщину (для материалов с небольшим затуханием) ограничивают размером 200... 1000 мм. Большую толщину измеряют импульсными дефектоскопами и механическими средствами.

Контроль физико-механических свойств материалов акустическими методами – одно из важнейших направлений НК качества материалов, деталей, изделий и конструкций. Контроль основан на установлении взаимосвязи физико-механических, технологических, структурных характеристик материалов и изделий с акустическими характеристиками.

К основным физико-механическим свойствам материалов, определяемым акустическими методами, относят: упругость (модуль нормальной упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона (S. Poisson – французский учёный, 1781 – 1840), прочность (прочность при растяжении, сжатии, изгибе, кручении, срезе и др.), технологичность (плотность, пластичность, влажность, содержание отдельных компонентов, гранулометрический состав и др.), структуру (анизотропия материала, кристалличность и размеры кристаллов, размеры и содержание включений и др.).

По частотному признаку все рассмотренные акустические методы делят на низко- и высокочастотные. К первым относят методы, использующие колебания в звуковом и НЧ (до 100 кГц) УЗ-диапазонах частот. Ко вторым – методы, использующие колебания в ВЧ УЗ-диапазоне: обычно от нескольких сотен килогерц до 50 МГц. ВЧ-методы обычно называют ультразвуковыми.

Из рассмотренных методов акустического контроля наибольшее практическое применение находит эхометод. Около 90% объектов, контролируемых акустическими методами, проверяют эхометодом. С его помощью решают задачи дефектоскопии поковок, литья, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхометод используют также для определения геометрических параметров изделия: измеряют время прихода донного сигнала и, зная скорость ультразвука в материале, находят толщину ОК при одностороннем доступе. Если длина участка изделия, через который проходит ультразвук, известна, то по времени прихода донного сигнала измеряют скорость, а по его амплитуде оценивают затухание ультразвука. Это позволяет определить физико-механические свойства материалов.

Другие методы акустического контроля применяют, когда использование эхометода невозможно, либо в качестве дополнительных к эхометоду для более полного обнаружения и исследования дефектов.

Измерительная установка (рис. 18) предназначена для экспрессного (англ. *express*, от лат. *expressus* – усиленный) измерения динамического модуля упругости и логарифмического декремента затухания образцов акустическим методом.

Принцип её работы основан на ударном возбуждении в ОК собственных изгибных колебаний и измерении периода и числа колебаний, совершённых образцом до их затухания.

Требование обеспечения высокого качества деталей из композитов на заключительной стадии изготовления настоятельно диктует введение средств непрерывного контроля структурных превращений материала, позволяющих диагностировать и оптимизировать процессы формования. В особой степени сказанное относится к автоклавному формованию, качество структуры в котором критично к моменту подачи давления в систему.

Для получения качественной структуры деталей необходимо подавать давление в систему только после того как связующее достигнет точки минимальной вязкости, в противном случае значительная часть связующего будет выдавлена и полученная деталь будет обладать пониженными эксплуатационными характеристиками. Ситуация здесь однако осложняется тем, что точка минимальной вязкости сопровождается сравнительно быстрым наступлением стадии гелеобразования (от лат. *gelare* – мерзнуть, застывать и ...*образование*), где формирование пространственной сшивки молекул приводит к чрезвычайно резкому росту вязкости и потере связующим текучести. Поэтому для качественной структуры формируемых деталей давление следует подавать в промежутке между моментами достижения минимальной вязкости и гелеобразования. Однако положение этих критических точек нестабильно и может изменяться в зависимости как от состояния связующего в препреге в момент поставки, так и от условий его последующего хранения.



**Рис. 18. Установка для измерения динамического модуля упругости и логарифмического декремента затухания**

Характер изменения кинетических кривых изменения скорости  $v$  и коэффициента затухания  $\alpha$  УЗ-импульсов в процессе формования органо-пластика на стадиях нагрева, выдержки и охлаждения позволяет надёжно фиксировать точку минимальной вязкости по максимуму затухания или минимуму скорости, точку гелеобразования по точке перегиба затухания и скорости, а также степень полимеризации по изменению скорости прохождения УЗ-колебаний.

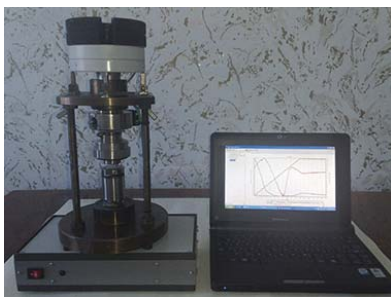
Установка состоит из измерительного микропроцессорного блока и блока формования с встроенными датчиками, в котором осуществляется формование образцов при заданных температуре и давлении (рис. 19).

Микропроцессорный блок управляет температурой печи и режимом измерения в соответствии с программой, а также обрабатывает информацию и выводит её на графический дисплей и внешнее регистрирующее устройство. Информация выводится в форме кинетических кривых изменения модуля упругости, коэффициента затухания, толщины и температуры образца, наблюдаемых на экране дисплея одновременно с таблицей их мгновенных значений. Для диэлектрических материалов можно измерять активную и реактивную составляющие полной электропроводности.

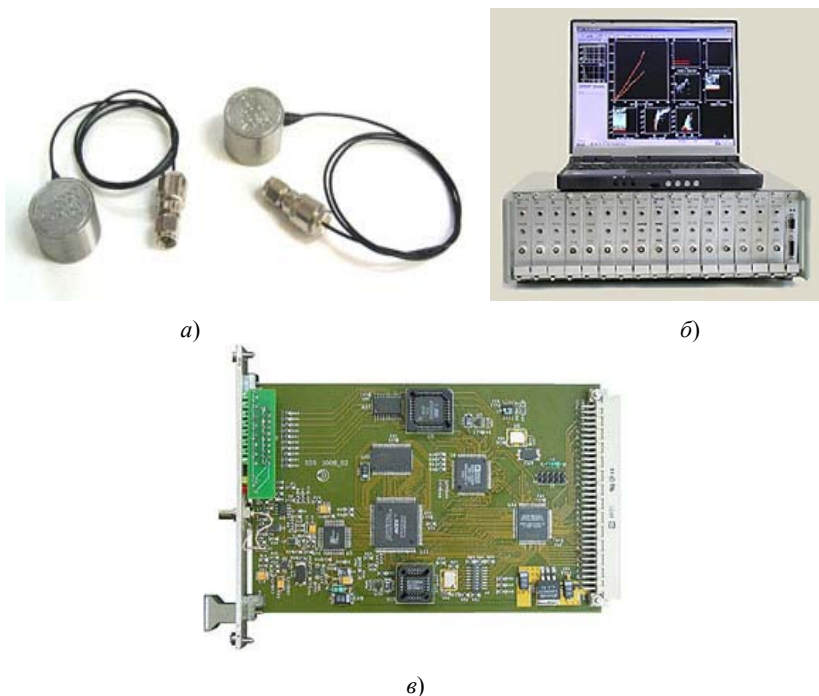
Акустико-эмиссионная многоканальная цифровая система сбора и обработки акустико-эмиссионной информации показана на рис. 20.

Она представляет собой аппаратно-программный комплекс для регистрации, обработки и анализа акустико-эмиссионных сигналов. Система построена по принципу параллельной многоканальной цифровой регистрации параметров акустико-эмиссионных сигналов. Каналы регистрации акустико-эмиссионных сигналов идентичны по своим техническим характеристикам и включают в себя:

- преобразователь (датчик) акустико-эмиссионных сигналов;
- предварительный усилитель акустико-эмиссионных сигналов;
- цифровой блок регистрации и измерения параметров акустико-эмиссионных сигналов.



**Рис. 19.** Внешний вид установки для определения вязкости, точки гелеобразования и степени полимеризации



**Рис. 20. Акустико-эмиссионная система:**  
*а* – датчики системы; *б* – 24-канальный системный блок;  
*в* – цифровой канал регистрации

Акустико-эмиссионные системы отличаются большим амплитудным динамическим диапазоном – 90 дБ (до 80 дБ для акустико-эмиссионных сигналов) с дискретностью измерения амплитуд 0,5 дБ во всём диапазоне, что позволяет одновременно с регистрацией сигналов акустической эмиссии измерять уровни электрических и акустических шумов, выявлять течи. Число независимых каналов – до 64.

## 5. МАГНИТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Магнитный НК применяют для изделий, включающих ферромагнитные материалы и поэтому существенно изменяющих свои свойства при воздействии внешнего магнитного поля. Для контроля параметров ферромагнитных частей объекта этот вид контроля используют в том случае, когда происходит взаимодействие магнитного ПИП с ферромагнитными частями объекта, а немагнитные части, находящиеся на пути магнитного потока, влияют на его величину. Степень влияния зависит от размеров немагнитных частей. В зависимости от конкретных задач используют те

или иные информативные параметры, определяемые по магнитным характеристикам материала ОК.

*Магнетизм* – это особая форма взаимодействия между электрическими токами, между токами и магнитами, т.е. телами с магнитным моментом, и между магнитами.

В зависимости от модуля и знака магнитной восприимчивости  $\chi_m$ , характеризующей способность вещества приобретать определённую намагничённость под действием внешнего магнитного поля, все вещества условно делят на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

*Диамагнетики* (от греч. *δια* – приставка, означающая здесь расхождение (силовых линий) и ...*магнетики*) – термин, применяемый ко всем веществам при рассмотрении их магнитных свойств. Они имеют отрицательную магнитную восприимчивость  $\chi_m = -(10^{-7} \dots 10^{-5})$ , т.е. это вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном вектору напряжённости внешнего поля. К диамамагнетикам относят кремний, фосфор, цинк, медь и другие элементы, а также некоторые органические и неорганические соединения. В технике диамагнитный эффект практически не используют.

*Парамагнетики* (от греч. *παρά* – возле, рядом и ...*магнетик*) – это вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля, т.е. имеющие положительную магнитную восприимчивость  $\chi_m = 10^{-5} \dots 10^{-1}$ . К ним относят, например, щелочные металлы, металлы группы железа, палладия, платины, соли этих металлов, а также ферромагнетики при температурах, превышающих температуру Кюри (Р. Curie – французский физик, 1859 – 1906).

*Ферромагнетики* (от лат. *ferrum* – железо и ...*магнетик*) – это вещества, в которых при температуре, меньшей точки Кюри, устанавливается состояние самопроизвольной намагничённости. Характерным признаком ферромагнетиков является высокое значение магнитной восприимчивости ( $\chi_m = 1 \dots 10^5$ ) и её сильная зависимость от напряжённости магнитного поля. Эта зависимость всегда неоднозначна, т.е. наблюдается магнитный гистерезис. Ферромагнитными свойствами обладают железо, кобальт, никель, редкоземельные металлы, многочисленные сплавы и соединения указанных металлов между собой и с неферромагнитными элементами, а также соединения хрома и марганца с неферромагнитными элементами и некоторые другие. Ферромагнетиками являются большинство конструкционных сталей. Изделия из ферромагнетиков – это основной объект магнитного НК.

Различают следующие методы магнитного (ГОСТ 24450–80) НК:

– магнитопорошковый, основанный на использовании в качестве индикатора магнитного порошка;

- индукционный, при котором регистрируют магнитные поля ОК индукционными преобразователями;
- феррозондовый, регистрирующий магнитные поля контролируемого объекта феррозондовыми преобразователями
- основанный на эффекте Холла (на регистрации магнитных полей ОК преобразователями Холла);
- магнитографический, при котором записывают магнитные поля ОК на магнитный носитель;
- магниторезистивный, основанный на регистрации магнитного поля ОК магниторезистивными преобразователями;
- пондеромоторный, основанный на пондеромоторном взаимодействии регистрируемого магнитного поля ОК и магнитного поля постоянного магнита, электромагнита или рамки с током;
- магнитополупроводниковый, регистрирующий магнитные поля ОК магнитополупроводниковыми приборами.

Различают следующие режимы регистрации параметров магнитного поля при магнитном НК:

- остаточной намагниченности, т.е. после снятия приложенного поля;
- приложенного поля – одновременно с его намагничиванием приложенным полем;
- импульсной индикации – с последующей визуализацией сечений рельефа магнитного поля;
- яркостной индикации, когда параметры магнитного поля, зафиксированные на магнитном носителе, воспроизводят отпечатки одновременно ряда сечений его рельефа в виде плоского полутонового изображения.

К основным задачам магнитного НК относят:

- контроль сплошности – дефектоскопия;
- измерение размеров – обычно толщинометрия;
- контроль физико-механических свойств – структуроскопия.

В зависимости от конкретных задач и условий контроля (требуемой производительности, свойств материала, разрешающей способности) используют те или иные информативные параметры и первичные преобразователи.

К информативным параметрам в магнитном контроле относятся: коэрцитивная (от лат. *coercitio* – удерживание) сила  $H_0$ , намагниченность  $M$ , остаточная магнитная индукция  $B_r$ , магнитная проницаемость  $\mu$  (начальная либо максимальная), параметры петли гистерезиса  $B(H)$  или гармонический состав ЭДС индуктивного преобразователя, параметры скачков Баркгаузена, параметры магнитооптического эффекта и т.п.

Действие магнитных приборов НК основано либо на регистрации магнитных полей вблизи ОК, либо на оценке магнитного потока внутри самого объекта. Например, магнитная дефектоскопия осуществляется путём регистрации магнитных потоков рассеяния, создаваемых дефектами. В магнитной структуроскопии используют несколько способов. Разбраковка может осуществляться по значению коэрцитивной силы, в этом случае оценивается напряжённость магнитного поля на некотором участке поверхности ОК. Возможен контроль по остаточной намагниченности, и тогда измеряют напряжённость поля в воздухе вблизи какой-то точки объекта. Если оценивается форма петли гистерезиса, то одновременно с оценкой напряжённости магнитного поля измеряют магнитный поток на участке контролируемого изделия. В толщинометрии учитывают тот факт, что при намагничивании объекта напряжённость магнитного поля либо магнитный поток вблизи него зависят как от толщины ОК, так и от зазора между изделием и магнитопроводом ПИП. Кроме того, иногда применяют силовое действие магнитного поля.

**Магнитная дефектоскопия** – это частный случай магнитного НК, представляющий способ обнаружения дефектов в виде нарушений сплошности в объектах из ферромагнитных материалов путём регистрации магнитных полей рассеяния вблизи этих дефектов. Магнитная дефектоскопия является одним из наиболее чувствительных методов среди всех видов НК, поэтому этот вид контроля целесообразно использовать в самых ответственных случаях.

Принцип магнитной дефектоскопии иллюстрирует рис. 21. Если ферромагнитный объект, не имеющий резких изменений сечения, помещён в однородное магнитное поле, то магнитный поток, проходя через объект, практически не выходит за его пределы, так как магнитная индукция  $B_0$  в воздухе в  $\mu_r$  раз меньше, чем индукция  $B_M$  в ферромагнетике (рис. 21, а). Если же в ОК есть нарушения сплошности, например трещина, то происходит перераспределение магнитного потока и появляется поток  $\Delta\Phi_d$ , выходящий из объекта в воздух над трещиной (рис. 21, б). Возникает также поток  $\Phi_M$ , огибающий трещину снизу.

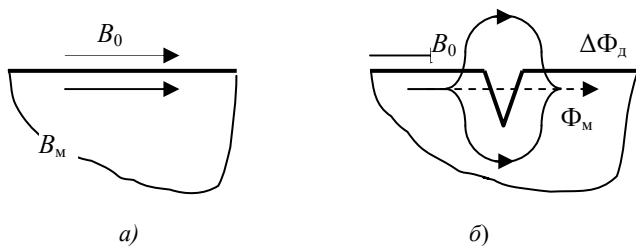


Рис. 21. Принцип магнитной дефектоскопии





**Рис. 22. Вид поверхности детали с трещиной**

Для регистрации магнитных полей рассеяния от дефектов используют различные типы ПИП, однако наибольшее применение для этой цели нашли магнитные порошки, обеспечивающие наивысшую среди всех видов НК чувствительность. Такой метод называют **методом магнитопорошковой дефектоскопии** (рис. 22).

В зависимости от размеров выявляемых дефектов устанавливаются три условных уровня чувствительности (табл. 12).

С учётом воздействия магнитного поля на ОК различают способы приложенного магнитного поля и остаточной намагниченности.

**Контроль в приложенном магнитном поле** заключается в том, что деталь намагничивают и одновременно контролируют. Достоинство этого способа состоит в возможности создания достаточно большой индукции, вплоть до насыщения, что позволяет получить значительные поля рассеяния дефектов и повысить их выявляемость. Но сильное магнитное поле, действующее на изделие, воздействует также на магнитный ПИП, создавая мощную помеху, что затрудняет контроль.

**Способ остаточной намагниченности** заключается в том, что изделие сначала намагничивают, затем выключают источник намагничивающего поля и после этого осуществляют контроль (рис. 23). Из-за меньших значений индукции чувствительность этого способа ниже, но здесь исключено мешающее влияние намагничивающего поля, что частично компенсирует потерю чувствительности. Этот способ применяют для контроля магнитотвёрдых материалов с большой остаточной индукцией.

## 12. Уровни чувствительности

Условный уровень чувствительности	Минимальная ширина раскрытия условного дефекта, мкм	Минимальная протяжённость условного дефекта, мм
А	2,0	0,5
Б	10,0	
В	25,0	

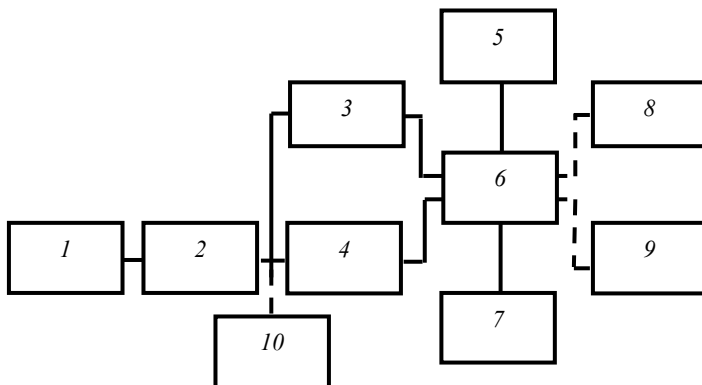


**Рис. 23. Магнитометр для контроля остаточной намагниченности**

**Магнитопорошковые дефектоскопы** – это устройства для выявления нарушений сплошности в ОК, использующие в качестве индикаторов полей рассеяния дефектов магнитные порошки (рис. 24).

Магнитопорошковый дефектоскоп (рис. 25) предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов с  $\mu \geq 40$ . Он также позволяет размагничивать детали после контроля.

**Магнитографический метод** основан на записи магнитных полей рассеяния на магнитную ленту и последующем считывании и расшифровке этой записи. Здесь процесс контроля разделён на два этапа, разнесённых во времени.



**Рис. 24. Структурная схема дефектоскопа:**

- 1 – питание намагничивания; 2 – кабель; 3 – устройство циркулярного намагничивания; 4 – устройство продольного намагничивания;
- 5 – устройство нанесения порошка; 6 – ОК;
- 7 – осветительное устройство; 8 – устройство сортировки; 9 – измеритель напряжённости магнитного поля; 10 – измеритель тока



**Рис. 25. Магнитопорошковый дефектоскоп**

Метод нашёл широкое применение при контроле сварных швов в процессе монтажа трубопроводов. Информацию на магнитную ленту записывают в полевых условиях по методикам, почти не требующим знаний в области дефектоскопии, а запись расшифровывает опытный дефектоскопист в лабораторных условиях. Информацию на ленте можно сохранять в качестве документа и повторно расшифровывать. К недостаткам метода относится низкая производительность из-за необходимости укладки магнитной ленты на контролируемую поверхность.

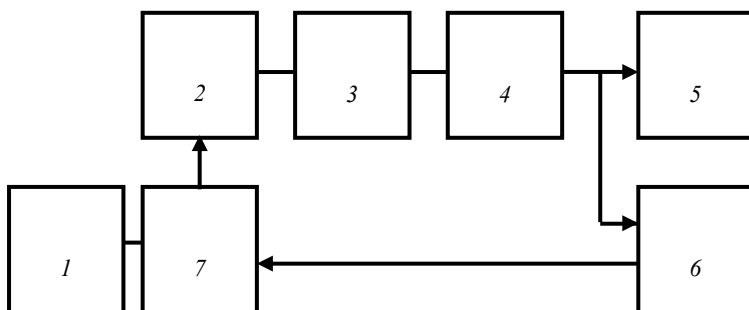
Для первого этапа магнитографического контроля необходимы устройство намагничивания и приспособления для крепления ленты на ОК, а для второго – считывающие устройства, т.е. собственно магнитографические дефектоскопы.

В **индукционных дефектоскопах** в качестве ПИП используют пассивные индукционные катушки. Достоинство этих приборов – простота устройства и удобство эксплуатации.

Все индукционные приборы – это дефектоскопы динамического контроля, который ведут при перемещении датчика относительно поверхности объекта. Необходимость перемещения преобразователей делает механический блок сканирования важной частью дефектоскопа. Структурная схема магнитоиндукционного дефектоскопа показана на рис. 26.

Дефектоскоп состоит из механического и электронного блоков и системы намагничивания.

Механический блок предназначен для перемещения преобразователей относительно ОК. Он включает в себя систему сканирования, блок бесконтактного индукционного съёма сигнала с вращающихся преобразователей.



**Рис. 26. Структурная схема**

**магнитоиндукционного дефектоскопа:**

- 1 – блок намагничивания; 2 – система сканирования; 3 – блок съёма сигнала с вращающихся преобразователей; 4 – электронный блок отстройки от неинформативных сигналов; 5 – блок индикации; 6 – система сопровождения забракованного изделия; 7 – ОК

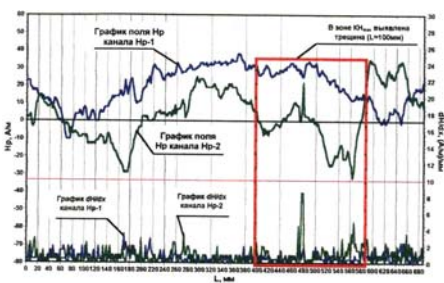
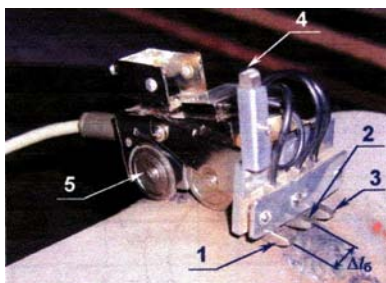
В электронном блоке осуществляется частотная отстройка сигналов от влияния помех, т.е. разделение по спектрам частот, и амплитудная обработка для выделения сигналов, соответствующих дефекту.

**Феррозондовые дефектоскопы** регистрируют поля рассеяния дефектов. В них с помощью феррозонда напряжённость магнитного поля преобразуется в электрический сигнал, что позволяет исключить трудоёмкую операцию осмотра детали и автоматизировать процесс обработки результатов контроля. Поскольку датчик находится на некотором расстоянии от поверхности ОК, чувствительность здесь меньше, чем в магнитопорошковом методе. Удаление ПИП от контролируемой поверхности позволяет сканировать поверхность с большими скоростями, исключая опасность повреждения датчика и детали.

Контроль дефектоскопами с феррозондовыми преобразователями мало отличается от магнитопорошкового контроля. Вначале деталь намагничивают, затем сканируют поверхность феррозондовым преобразователем. Сигнал с выхода ПИП поступает на блок обработки информации, где он фильтруется для отделения от помех и сравнивается с некоторыми фиксированными уровнями сигналов, при этом возможна автоматическая разбраковка ОК.

В настоящее время основное применение феррозондовые дефектоскопы нашли для контроля линейно протяжённых объектов – труб и рельсов.

Четырёхканальный феррозондовый дефектоскоп, предназначенный для контроля стыковых сварных соединений труб, показан на рис. 27, а, а результаты этого контроля – на рис. 27, б.



а)

б)

**Рис. 27. Феррозондовый дефектоскоп (а) и результаты контроля стыковых сварных соединений (б):**

1 – 3 – феррозондовые преобразователи сканирующего устройства для регистрации поля  $H_p$  на поверхности сварного шва; 4 – феррозондовый преобразователь для отстройки от внешнего магнитного поля  $H_p$ ; 5 – колёса привода измерителя длины;  $\Delta l_0$  – базовое расстояние между феррозондовыми преобразователями

**Магнитные толщиномеры** предназначены для измерения толщины защитных покрытий на ОК из ферромагнитных материалов либо для измерения толщины ферромагнитных листов. В магнитных толщиномерах используют зависимость магнитного сопротивления участка магнитной цепи от зазора. При малом зазоре  $\delta$  поле в магнитопроводе и зазоре однородно и тогда по закону полного тока

$$H_{ст}l_{ст} + H_0\delta = Iw, \quad (19)$$

где  $l_{ст}$  – длина магнитопровода;  $w$  – число витков обмотки;  $I$  – ток, протекающий по обмотке;  $H_{ст}$ ,  $H_0$  – магнитная напряжённость в стали и воздушном зазоре соответственно.

Если зазор мал ( $\delta \ll l_{ст}$ ),  $B_{ст} = B_0$  и  $H_{ст} = B_0/\mu_r\mu_0$ , зависимость магнитной индукции от зазора имеет вид

$$B_0 = \frac{Iw\mu_r\mu_0}{l_{ст} + \mu_r\delta}. \quad (20)$$

где  $B_0$  – магнитная индукция в воздушном зазоре;  $\mu_0$ ,  $\mu_r$  – абсолютная и относительная магнитные проницаемости соответственно.

По принципу действия магнитные толщиномеры можно разделить на три группы: магнитоотрывные, т.е. пондемоторного действия (от лат. *pondus*, родит. падеж *ponderis* – вес, тяжесть и ...*motor* – приводящий в действие), магнитоэстатические и индукционные.

**Работа магнитоотрывных толщиномеров** (рис. 28) основана на измерении силы отрыва или притяжения постоянных магнитов и электро-

магнитов к ОК. Сила притяжения пропорциональна квадрату магнитной индукции  $B_0$  в зазоре между постоянным магнитом и поверхностью ферромагнитного материала, которая в соответствии с формулой (20) в свою очередь пропорциональна зазору.

Диапазон измерений магнитоотрывных толщиномеров составляет 0...400 мкм, при этом основная погрешность – 1,5 мкм до толщины 30 мкм и 5% для толщин больше 30 мкм.

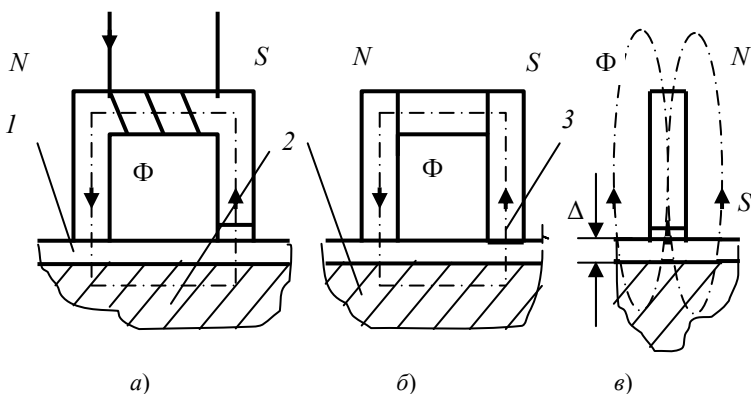
Эти приборы очень просты в применении и дешёвы, не требуют источника питания, однако их недостаток заключается в необходимости точного измерения силы отрыва магнита, что затрудняет автоматизацию контроля.

Этот недостаток устранён в **толщиномерах магнитоэлектрического типа**. Их действие основано на измерении напряжённости магнитного поля в цепи электромагнита или постоянного магнита при изменении зазора между ним и поверхностью ферромагнитного ОК, обусловленного наличием неферромагнитного покрытия. На рисунке 29 схематично показано устройство магнитоэлектрических толщиномеров: с П-образным магнитопроводом и электромагнитом (а), постоянным магнитом (б) и стержневым магнитопроводом (в), который всё же чаще выполняют в виде постоянного магнита. Рабочий магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый катушкой или постоянным магнитом, замыкается по магнитопроводу или по воздуху (в случае в), ОК с неферромагнитным покрытием, толщина которого  $\Delta$  измеряется. По величине магнитного потока судят о толщине неферромагнитного покрытия, а магнитный поток определяют, измеряя магнитную индукцию с помощью ПИП, в качестве которого используют: датчик Холла, феррозонд, рамку с током и др.

К недостаткам магнитоэлектрических толщиномеров отнесут то, что, во-первых, из-за большого расстояния между полюсами с их помощью невозможно контролировать малогабаритные детали, во-вторых, в них сильно сказывается влияние края детали, так называемый краевой эффект, поскольку область, где распределяется постоянное магнитное поле в ферромагнетике, весьма значительна.



Рис. 28. Магнитоотрывной толщиномер

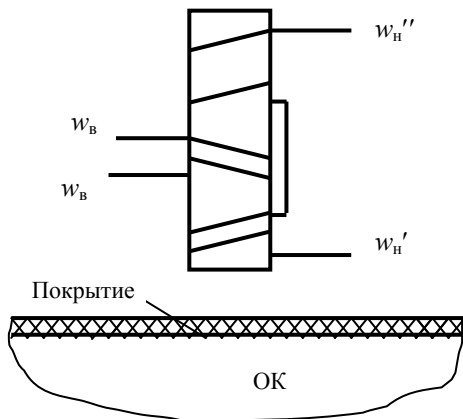


**Рис. 29. Схемы магнитостатических дефектоскопов:**  
 1 – ферромагнитное покрытие; 2 – ОК; 3 – ПИП

Эти недостатки устранены в **индукционных толщиномерах**, использующих одностержневой магнитопровод и переменное электромагнитное поле, благодаря чему краевой эффект перестаёт проявляться на расстояниях в несколько миллиметров.

На рисунке 30 показана схема ПИП индукционного толщиномера.

Ферритовый стержень расположен перпендикулярно поверхности ОК. На стержне размещены катушка  $w_B$ , возбуждающая переменное электромагнитное поле, а также две идентичные измерительные катушки  $w_H'$  и  $w_H''$ , соединённые встречно.



**Рис. 30. Схема ПИП индукционного толщиномера**

## 6. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

**Методы теплового контроля** основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термодинамическими чувствительными элементами (термопарой, фотоприемником, жидкокристаллическим индикатором и т.д.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста, лучистости и др.) в электрический сигнал и передаче его на регистрирующий прибор.

Различные виды теплового воздействия показаны на рис. 31.

**По характеру изменения во времени внешнего теплового воздействия** на исследуемый образец различают следующие виды нестационарных методов и приборов для измерения теплофизических свойств:

1) *со ступенчатым изменением* температуры (теплового потока) во времени (рис. 2.31, а, б);

2) *с импульсным изменением* температуры (теплового потока) на поверхности образца во времени (рис. 2.31, в, г);

3) *с линейным изменением* температуры поверхности образца во времени (рис. 2.31, д);

4) *с периодическим* (гармоническим или импульсным) изменением температуры поверхности образца (рис. 2.31, е, ж);

5) *с тепловым воздействием* на исследуемый образец за счёт изменения объёмной плотности  $W$  [Вт/м<sup>3</sup>] внутренних источников тепла, действующих внутри образца, например за счёт пропускания электрического тока:

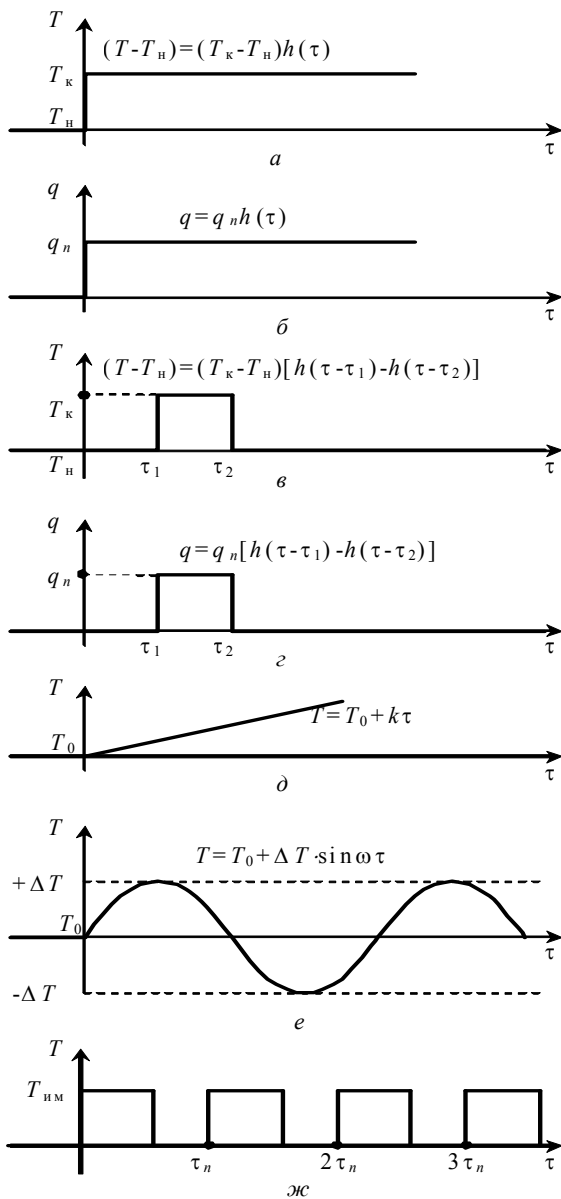
- через электропроводный образец;
- через электронагреватель, рассматриваемый в качестве одного из слоёв многослойного образца и т.п.

Достоинствами теплового контроля являются: дистанционность (для ИК-систем: тепловизоров, тепловых дефектоскопов), высокая скорость обработки информации; высокая производительность испытаний; высокое линейное разрешение; возможность контроля при одно- и двустороннем подходе к изделию; теоретическая возможность контроля любых материалов; многопараметрический характер испытаний; возможность взаимодополняющего сочетания теплового неразрушающего контроля (ТНК) с другими видами неразрушающего контроля; сочетаемость со стандартными системами обработки информации; возможность поточного контроля и создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами.

Контроль теплофизических характеристик объектов является частным случаем активного теплового неразрушающего контроля (АКТК). В свою очередь в АТНК можно выделить три основных направления развития:

- а) тепловая дефектоскопия (ТД);
- б) тепловая дефектометрия (ТД);
- в) тепловая томография (ТТ).





**Рис. 31. Характер изменения тепловых воздействий на внешние поверхности исследуемых образцов**

**Тепловая дефектоскопия** состоит в определении факта наличия дефекта и его расположения в ОК. Метод основан на зависимости характера распределения температурного поля на поверхности объекта от факта наличия в нём различных дефектов (трещин, несплошностей и т.д.). В настоящее время это наиболее разработанное направление.

**Тепловая дефектометрия** – направление АТНК, представляющее методы и средства количественной оценки глубины залегания дефектов, их толщины и поперечных размеров. С математической точки зрения ТД требует решения обратных теплофизических задач.

**Тепловая томография** является последующим развитием ТД и состоит в послойном синтезе внутренней структуры ОК на основе использования методов проективной компьютерной томографии.

Пассивный тепловой неразрушающий контроль не нуждается во внешнем источнике теплового воздействия (ИТВ) – тепловое поле в ОК возникает при его эксплуатации (изделия радиоэлектроники, энергетическое оборудование, металлургические печи и т.п.) или изготовлении (закалке, отжиге, сварке и т.п.).

## 6.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

Для измерения температуры можно использовать тепловое излучение, так как известно, что различные свойства (параметры) теплового излучения нагретых тел зависят от их температуры. При этом, естественно, нет необходимости в непосредственном контакте средства измерения и объекта измерения. Таким образом, методы, основанные на различных принципах преобразования теплового излучения объекта измерения в непосредственно измеряемую физическую величину, называют бесконтактными или **пирометрическими методами измерения** температуры, а средства измерения, реализующие эти методы, – пирометрами.

Раздел температурных измерений, который изучает методы и средства измерения температуры бесконтактным способом, называют пирометрией.

Тепловое излучение – излучение, возникающее в результате теплового возбуждения частиц вещества (атомов, молекул). Энергия такого излучения определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Тепловое излучение носит электромагнитный характер, т.е. представляет собой совокупность электромагнитных волн или фотонов. Оно, как и всякое излучение, описывается энергетическими и спектральными (частотными) характеристиками.

Область частот, в которой имеет место излучение, иными словами, спектр излучения может быть сплошным, линейчатым и полосовым. Спектр газов носит линейчатый или полосовой характер. Для твёрдых и жидких тел характерно наличие сплошного спектра излучения. В дальнейшем мы будем иметь в виду сплошной спектр.

В спектре электромагнитных излучений выделяют несколько областей, в том числе: оптическую, гамма-излучений, радиочастот. В пирометрии в основном используется оптическая область спектра и менее область радиочастот.

Оптическая область в свою очередь подразделяется на области ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения.

Диапазон ультрафиолетового излучения распространяется от 50 Å до 0,40 мкм. Видимая область спектра, т.е. область, в которой чувствительность человеческого глаза отлична от нуля, весьма узка – от 0,40 до 0,76 мкм. Инфракрасная область спектра распространяется от 0,76 до 1000 мкм.

*Монохроматическим* называют излучение, соответствующее достаточно узкому интервалу частот, который может быть охарактеризован одним значением частоты (длины волны).

*Интегральное излучение* – это излучение, соответствующее всему спектру частот (длин волн) в пределах от нуля до бесконечности.

С энергетической точки зрения излучение могут характеризовать следующие величины: поток излучения, сила излучения, энергетическая светимость, энергетическая яркость.

*Поток излучения*  $\Phi$  (мощность излучения) равен энергии  $W$ , излучаемой поверхностью в полусферу в единицу времени:  $\Phi = dW/dt$ . Измеряется поток излучения в ваттах.

*Сила излучения*  $I$  – это пространственная плотность излучения, равная энергии, излучаемой телом в данном направлении за единицу времени внутри единичного телесного угла  $\Omega$ :  $I = d\Phi / d\Omega$ . Измеряется в ваттах на стерадиан.

*Энергетическая светимость*  $M$  равна потоку излучения, отнесённому к единице излучающей поверхности  $A$ :  $M = d\Phi / dA$ . Измеряется в ваттах на квадратный метр.

*Энергетическая яркость*  $L$  равна энергии излучения, испускаемого в единицу времени в единичный телесный угол в данном направлении площадкой, проекция которой на плоскость, перпендикулярную к данному направлению, равна единице площади.

Всякое тело, температура которого отлична от абсолютного нуля, излучает, и энергия этого излучения зависит от температуры тела и его оптических свойств. Широкое различие этих свойств приводит к тому, что излучение различных тел даже при одинаковой температуре будет весьма различно. Сравнить излучение этих тел удобно, вводя понятие коэффициента излучения, т.е. коэффициента, который характеризовал бы излучение интересующего нас тела по отношению к какому-либо принятому за образцовое (опорное). В этом случае коэффициент будет отражать различие в оптических свойствах тел.

В качестве образцового принимают так называемое «чёрное тело» или «абсолютно чёрное тело», излучение которого зависит только от его

температуры. Такие тела в природе не встречаются, приближением к ним являются различные виды сажи и металлической черни. Ещё лучшим приближением в широком диапазоне температур являются равномерно нагретые полости различной конфигурации, которые и используют на практике в качестве моделей «чёрного тела».

«Чёрное тело» поглощает всё падающее на него излучение (отсюда и его название) независимо от длины волны этого излучения, направления падения и его поляризации. Следовательно, излучение любого тела может оцениваться через коэффициент излучения как доля «чёрного» излучения. Различают спектральный и интегральный коэффициенты излучения, которые обычно обозначают соответственно через  $\varepsilon_\lambda = L_\lambda / L_\lambda^0$  и  $\varepsilon = L_\Sigma / L_\Sigma^0$ , где  $L_\lambda^0$  и  $L_\lambda$  – спектральные энергетические яркости «чёрного» и реального тел при одинаковой температуре и длине волны;  $L_\Sigma^0$  и  $L_\Sigma$  – интегральные энергетические яркости тех же тел.

Очень часто используется понятие «серое тело». Это неселективный излучатель с коэффициентом излучения, меньшим единицы. Характер спектрального распределения излучения таких тел подобен «чёрному». Обычно реальные тела имеют «серый» характер излучения в каком-либо ограниченном участке спектра. В этом случае говорят, что тело «серое» в данном участке спектра. С достаточным приближением «серым» излучением обладают некоторые диэлектрики в ИК-области спектра или окисленные и шероховатые металлические поверхности.

Распределение спектральной энергетической яркости «абсолютно чёрного тела» хорошо описывается законом Планка

$$L_\lambda^0 = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]^{-1},$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $T$  – абсолютная температура;  $c_1, c_2$  – константы излучения.

Изотермы излучения «абсолютно чёрного тела» приведены на рис. 32.

Для «абсолютно чёрного тела» (которое поглощает 100% падающего на него излучения) характерны следующие закономерности теплового излучения (см. рис. 32):

- при повышении температуры тела возрастает спектральная энергетическая яркость и светимость на всех длинах волн;
- при нагревании тела максимум спектральной светимости смещается в сторону более коротких длин волн (закон смещения Вина);
- с ростом температуры тела возрастает полная (интегральная) светимость поверхности объекта.

Данные закономерности положены в основу принципа действия яркостных, цветовых и радиационных пирометров.

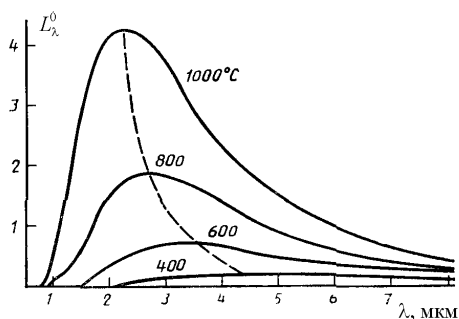


Рис. 32. Изотермы излучения «абсолютно чёрного тела»

## 6.2. ЯРКОСТНЫЕ ПИРОМЕТРЫ

Зависимость спектральной энергетической яркости теплового излучения тела от температуры этого тела положена в основу принципа **яркостных пирометров**, один из вариантов исполнения которых показан на рис. 33.

На рисунке 33 изображена схема оптического пирометра «с исчезающей нитью», принцип действия которого основан на сравнении яркости объекта измерения и яркости градуированного источника излучения в определённой длине волны.

Изображение излучателя 1 с линзой 2 и диафрагмой 4 объектива пирометра фокусируется в плоскости нити накаливания 5. Оператор через диафрагму 6, линзу окуляра 8, красный светофильтр 7 на фоне раскалённого тела видит нить лампы. Перемещая движок реостата 11, оператор изменяет силу тока, проходящего через лампу, и добивается уравнивания яркостей нити и излучателя. Момент «исчезания» нити на фоне объекта соответствует равенству яркостей нити и объекта излучения.

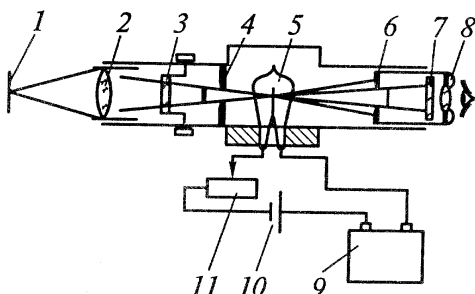


Рис. 33. Схема яркостного пирометра:

- 1 – излучатель; 2 и 3 – линзы; 4 и 6 – диафрагмы; 5 – нить накаливания;  
 7 – светофильтр; 8 – линза окуляра; 9 – регистрирующий прибор;  
 10 – источник питания; 11 – реостат

Регистрирующий прибор 9 фиксирует силу тока, соответствующую этому моменту, и позволяет произвести считывание результата измерения температуры объекта излучения, °С. Красный светофильтр 7 пропускает область излучения с шириной около 0,1 мкм и с эффективной длиной волны 0,65 мкм. Данный тип пирометров позволяет измерять температуры в интервале 700...8000 °С. Основная допустимая погрешность измерения для интервала температур 1200... 2000 °С составляет  $\pm 20$  °С.

Достоинством таких приборов является простота и удобство в работе. Недостатком – субъективизм, а также то, что измеряется так называемая яркостная температура, которая отличается от действительной. **Яркостная температура** – условная температура «нечёрного тела», численно равная такой температуре «чёрного тела», при которой их спектральные энергетические яркости равны. Для определения действительной температуры следует ввести поправку на степень черноты поверхности объекта.

### 6.3. ЦВЕТОВЫЕ ПИРОМЕТРЫ

Чем выше температура и интенсивней тепловое движение носителей заряда в теле объекта, тем на более высоких частотах идёт излучение. Растёт значение спектральной энергетической светимости на всех длинах волн, но преимущественно на коротких. Кривая спектра, поднимаясь, одновременно сдвигается в сторону коротких волн. Положение максимума  $\lambda_{\text{макс}}$  смещается по правилу  $\lambda_{\text{макс}} = b/T$ , где  $b$  – константа (закон Вина).

Таким образом, при увеличении температуры вместе с ростом интенсивности света, воспринимаемой зрением как яркость, меняется соотношение различных частотных составляющих. Меняется относительное возбуждение различных типов чувствительных клеток сетчатки – колбочек, меняется воспринимаемый зрением цвет. Очень условно можно предполагать, что железная кочерга, нагретая до температуры 1000 К, излучает только инфракрасное излучение. При дальнейшем увеличении температуры спектр переходит в видимый диапазон и тело начинает светиться тёмно-красным цветом (красное каление). Затем свет станет ярче, в спектре появятся оранжевый цвет, затем увеличится доля жёлтого, зелёного, голубого, синего и фиолетового (в соответствии с правилом *Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан*). Цвет перейдёт из тёмно-красного в красно-оранжевый = светло-красный, затем в красно-оранжево-жёлтый = рыжий, затем красно-оранжево-жёлто-зелёный = рыже-жёлтый, затем в красно-оранжево-жёлто-зелёно-голубой = светло-жёлтый, затем в красно-оранжево-жёлто-зелёно-голубо-синий = очень светло-жёлтый, затем в спектре будут почти в равном соотношении все цвета радуги, и цвет станет почти белым (белое каление). Температура рыжего пламени свечи – 1900 К, рыже-жёлтой нити накаливания – 3200 К, светло-жёлтой поверхности солнца – 5600 К.

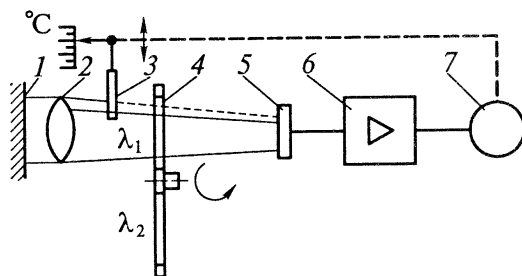
Таким образом, цвет нагретого объекта зависит от его температуры. Приборы, основанные на использовании данной закономерности, называются **цветовыми пирометрами**. Как правило, они определяют температуру по отношению светимостей для фиксированных длин волн излучения. Это отношение однозначно зависит от положения максимума спектральной энергетической светимости, а значит, и от температуры.

Функциональная схема цветового пирометра приведена на рис. 34.

Эти пирометры измеряют цветовую температуру объекта по отношению интенсивностей излучения в двух определенных участках спектра. Основное преимущество таких пирометров заключается в независимости их показаний от излучательной способности объекта, а также от наличия дыма, пыли и испарений в пространстве между объектом и пирометром.

Световой поток от объекта измерения *1* прерывается obtюратором *4* с двумя светофильтрами, пропускающими излучение на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  к фотоэлементу *5*, что вызывает появление на выходе фотоприемника переменного сигнала, амплитуда которого пропорциональна отношению спектральных светимостей входных потоков света. Таким образом, амплитуда переменной составляющей выходного сигнала зависит от температуры поверхности ОК. Переменная составляющая выходного сигнала фотоприёмника усиливается в усилителе *6* и подаётся на реверсивный двигатель *7*, который перемещает уравнивающий фильтр *3* до тех пор, пока не уравниваются интенсивности излучения на обеих длинах волн. В положении равновесия переменная составляющая выходного сигнала фотоприёмника исчезает, а перемещение фильтра *3* является мерой измеряемой температуры.

Диапазон измерения от 1000 до 2500 °С. При использовании инфракрасных фотоприёмников нижний предел температурного диапазона может быть уменьшен до 20...50 °С. Достоинством таких приборов является то, что для «серых» тел измеряется действительная температура. Напомним, что серым называется тело, степень черноты поверхности которого можно принять постоянной в широком диапазоне длин волн излучения.



**Рис. 34. Функциональная схема цветового пирометра:**  
*1* – объект измерения; *2* – объектив; *3* – фильтр; *4* – obtюратор;  
*5* – фотоэлемент; *6* – усилитель; *7* – реверсивный двигатель

#### 6.4. РАДИАЦИОННЫЕ ПИРОМЕТРЫ (ПОЛНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ)

На использовании зависимости полной (интегральной) светимости теплового излучения тела от температуры основан принцип действия **радиационных пирометров**. Приборы такого типа широко используют для измерения низких температур  $-40...+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Приёмники полного излучения отличаются тем, что их спектральная чувствительность постоянна в широком диапазоне длин волн от дальней инфракрасной области до ближней ультрафиолетовой. Для увеличения поглощательной способности чувствительные поверхности приёмников излучения окрашивают в чёрный цвет. Для уменьшения теплоотвода в среду приёмник помещают и вакуумированные или газонаполненные корпуса. В качестве приёмников применяются термобатарей или болометры.

**Термобатарей** – последовательно соединённые термоэлектрические преобразователи (до 20 термопар). Их горячие спаи *1* (рис. 35) располагаются на узком участке зачернённой поверхности *2*, на который фокусируется излучение.

**Болометры** – это термометры сопротивления, изготовленные либо из фольги проводящих материалов, либо из полупроводников (термисторов).

Тепловые быстродействующие индикаторы выполняются в виде тонкослойной термопары или болометра, в которых активный слой имеет хороший тепловой контакт с основанием. Это даёт возможность повысить быстродействие (время успокоения до  $10^{-9}$  с). Они применяются для идентификации мощных сигналов, например лазерного излучения.

**Пироэлектрические приёмники** – это кристаллы с определённым видом симметрии, в которых в зависимости от изменения температуры проявляется эффект спонтанной поляризации.

Пирометры полного излучения подразделяются на пирометры с преломляющей оптической системой (рис. 36, *а*) и пирометры с отражающей оптической системой (рис. 36, *б*).

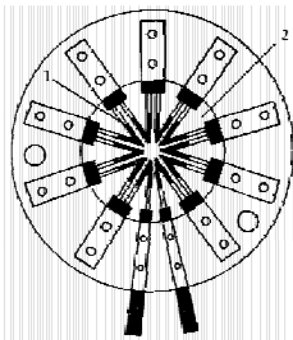
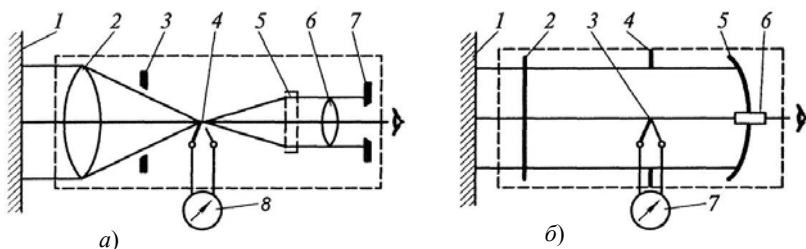


Рис. 35. Конструкция термобатарей





**Рис. 36. Схема пиromетров полного излучения**

В первом случае излучение от объекта измерения 1 через линзовый объектив 2 и диафрагму 3 поступает на приёмник полного излучения 4. Для наводки на объект измерения служит окуляр 6 с дымчатым светофильтром 5 и диафрагмой 7. Отсчётным устройством является милливольтметр 8.

В пиromетрах с отражающей оптической системой (рис. 36, б) излучение от объекта измерения 1 попадает на приёмник излучения 3 после прохождения через защитную полиэтиленовую плёнку 2, диафрагму 4 и зеркальный объектив 5. Для наводки на объект излучения служит зрительная труба 6. Отсчёт показаний производится по шкале милливольтметра 7. Полиэтиленовая плёнка прозрачна для инфракрасного излучения и служит для защиты оптической системы пиromетра от загрязнения потоков воздуха.

## 6.5. ТЕПЛОВИЗОРЫ

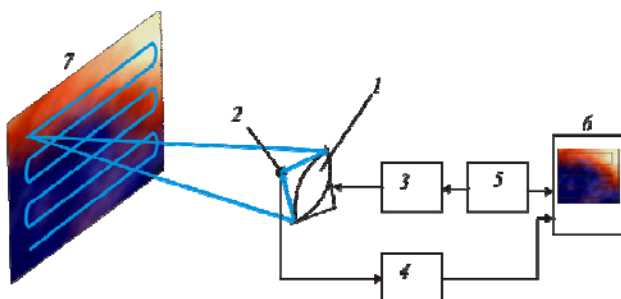
Пиromетры позволяют измерять температуру локальной точки объекта контроля. Для визуализации температурных полей применяют тепловизоры.

Принцип действия сканирующего тепловизора (рис. 37) заключается в просмотре по заданному закону движения поверхности объекта узким лучом, сформированным оптической системой. Обзор происходит с помощью сканирующей системы в пределах угла поля зрения за время, которое принято называть временем кадра. По такому же закону движения происходит перемещение луча по экрану кинескопа. При этом интенсивность луча и яркость изображения зависит от сигнала приёмника ИК-лучей, который в свою очередь зависит от температуры участка поверхности объекта. Таким образом, на экране кинескопа получают области с различной градацией яркости, которые и составляют тепловое изображение объекта.

Детектором современных тепловизоров (рис. 38) является матрица из неохлаждаемых микроболометров, на которую проецируется изображение объекта. По сигналам совокупности микроболометров, преобразованным в цифровой вид, можно восстановить тепловое изображение объекта. Использование микропроцессора в современных тепловизорах позволяет осуществить следующие функции:

- композитное отображение термограммы и видеоизображения;
- изменение уровня температур и чувствительности в режиме стоп-кадра;
- индикация температуры в нескольких точках объекта;
- индикация значения разности температур между двумя точками;
- индикация максимальной/минимальной температуры, измеряемой по всему изображению или по отдельной его части (с фиксацией максимальных значений);
- выделение нескольких областей измерений с индикацией максимальной, минимальной и средней температуры.

Современные тепловизоры имеют диапазон измерения от  $-40$  до  $2000$  °С и разрешение по температуре не больше  $0,1 \dots 0,3$  °С. Существенным неудобством является то, что приёмник ИК-излучения некоторых тепловизоров должен охлаждаться жидким азотом или термоэлектрическим микрохолодильником.



**Рис. 37. Структурная схема сканирующего тепловизора:**

1 – приёмная оптическая система; 2 – приёмник ИК-лучей;  
 3 – сканирующая система; 4 – усилитель; 5 – система синхронизации и развёртки; 6 – кинескоп; 7 – поверхность ОК



**Рис. 38. Внешний вид современного тепловизора**

В последние годы во многих странах тепловизоры внедрены для контроля за тепловым загрязнением водоёмов, для обнаружения утечек горячей воды и пара из тепловых коммуникаций, утечек тепла из зданий и сооружений. В железобетонных трубах тепловым контролем выявляются следующие дефекты: трещины, нарушения сцепления бетона с арматурой, места течей конденсата, разрушения швов бетонирования. Эти дефекты влияют на температурное поле трубы и вызывают повышенное потребление энергоносителя котлом. Обычный визуальный осмотр сопряжён со значительными трудностями при работе на высоте, требует остановки котлоагрегатов на 2–3 суток. А использование тепловизора позволяет найти дефекты в течение нескольких часов без остановки котла.

Тепловизор – дорогостоящий прибор: стоимость его от 25 до 80 тыс. \$. Но, по зарубежным данным, он окупает себя всего за 3 месяца, поскольку около 10% всех дымовых труб оказываются повреждёнными, один неисправный паровой кран может причинить ущерб до 1,5 тыс. \$ в год. Своевременное обнаружение и ликвидация этих повреждений уберёжёт предприятие от огромных убытков. В отдельных случаях за один день работы можно обнаружить столько дефектов, что это окупит стоимость тепловизора. Например, на химических, металлургических, машиностроительных заводах, не говоря уже об объектах атомной энергетики, стоимость ликвидации аварии может во много раз превышать стоимость тепловизора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для специалистов, работающих как в области неразрушающего контроля качества и испытаний промышленной продукции, так и в смежных областях. Оно может быть использовано специалистами организаций при разработке стандартов, методической и технической документации по неразрушающему контролю, а также студентами, аспирантами и инженерно-техническими работниками:

- при планировании, подготовке и проведении экспериментальных исследований;
- при написании отчётов о результатах выполненных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ;
- при подготовке докладов, статей, книг и других материалов.

При производстве промышленной продукции требования проведения различных видов контроля устанавливаются на большинстве стадий производственного процесса, начиная с контроля качества используемых сырья и материалов и заканчивая определением соответствия выпущенной продукции техническим требованиям (характеристикам и параметрам), установленным в нормативно-технической документации.

Цель подготовки настоящего учебного пособия – оказать помощь преподавателям, студентам, аспирантам и специалистам при решении задач формирования комплекса знаний о видах и методах неразрушающего контроля качества и испытаниях промышленной продукции.

В настоящее время существует множество определений понятия «неразрушающий контроль». Каждый источник, посвящённый контролю качества продукции, предлагает свою собственную трактовку данному термину.

Обычно неразрушающий контроль рассматривается и как метод испытаний, и как важный элемент промышленной безопасности, и как средство оценки надёжности параметров объекта, и как способ получения информации о продукции.

В ГОСТ 16504–81, который устанавливает терминологию, применяемую в области испытаний и контроля качества продукции, термин «контроль неразрушающий» отсутствует. Этот факт говорит не о том, что понятие не применяется, и не о том, что оно не имеет толкования, а указывает на тот факт, что необходимые и достаточные признаки этого понятия уже содержатся в буквальном его значении.

Можно смело и на законном основании утверждать, что можно использовать следующее основное определение рассматриваемого понятия: неразрушающий контроль – это контроль, который не разрушает проверяемый объект. Второе официальное определение гласит, что неразрушающий контроль является областью науки и техники, которая охватывает исследования физических принципов, лежащих в основе методов, тех-

нологий и средств контроля, не ухудшающих пригодность объектов к эксплуатации и не нарушающих их целостность.

Неразрушающие методы контроля дают уникальную возможность – испытывать то изделие, которое впоследствии будет использоваться по своему первоначальному назначению. Изделие/объект/деталь можно проверять как полностью – исследовать как целостную систему, так и испытывая только «опасные» участки, которые с точки зрения эксплуатационной надёжности вызывают наибольшие опасения. Разнообразие неразрушающих методов, каждый из которых чувствителен к определённому свойству проверяемых продукции, изделия или материала, позволяет получить сведения о множестве характеристик объектов неразрушающего контроля.

Желаем читателям успехов в изучения методов и средств неразрушающего контроля, рассматриваемых в данном учебном пособии, а затем – и в деле использования приобретённых знаний при решении практических задач, возникающих в производственных организациях.

## РУССКО-АНГЛИЙСКИЙ СЛОВАРЬ

- Физические методы неразрушающего контроля**  
Сигнал – signal  
Импульс – pulse  
Качество – quality  
Нормативный технический документ – technical standard  
Техническое условие – specification  
Стандарт – standard  
Национальный стандарт – national standard  
Несплошность – discontinuity  
Государственный стандарт Российской Федерации – state standard of Russian Federation  
Межгосударственный стандарт – international standard  
Сертификат соответствия – certificate of conformance  
Стандартный образец (СО) – calibration block  
Технический регламент – technical rules  
Техническая диагностика – technical diagnostics  
Техническое состояние объекта – technical condition of an object  
Контроль технического состояния – testing condition, inspection  
Средство измерений – measuring equipment  
Испытание – test  
Неразрушающий контроль – NDT  
Метод неразрушающего контроля – NDT method  
Вид неразрушающего контроля – kind of NDT  
Лаборатория НК – NOT firm  
Дефект – defect, imperfection  
Брак – rejected part  
Капиллярный метод контроля  
Длина несплошности – discontinuity length  
Глубина несплошности – discontinuity depth  
Индикаторный след – indicator trace  
Индикаторный пенетрант – indicator penetrant  
Контроль проникающими веществами (капиллярный) – liquid penetrant testing  
Поверхностная несплошность – surface discontinuity  
Удаление излишков пенетранта – penetrant excess removal  
Ширина раскрытия несплошности – discontinuity opening width  
Метод течеискания  
Герметичность – leak tightness  
Индикаторное средство – indikator means  
Натекание – inleakage  
Пробное вещество – tracer fluid

Течеискание – leak testing  
 Течеискатель – leak detector  
 Течь – leak  
 Утечка – leakage  
 Акустический метод контроля  
 Акустическая эмиссия – acoustic emission  
 Акустический импеданс – acoustic impedance  
 Акустический метод – acoustic method  
 Акустический толщиномер – acoustic thickness gauge  
 Амплитуда – amplitude  
 Амплитудный метод прохождения – through transmission method  
 (technique)  
 Временной метод прохождения, временной теневой метод –  
 through transmission method (technique)  
 Затухание волны – wave attenuation  
 Иммерсионный метод – immersion technique  
 Импедансный метод – mechanical impedance analysis method, MIA method  
 Колебание – oscillation  
 Метод отражения, эхометод – reflection method, echo method  
 Метод прохождения – through transmission method (technique),  
 transmission technique  
 Механический импеданс – mechanical impedance  
 Поглощение – absorption  
 Преломлённая волна – refracted wave  
 Пьезоэлектрический преобразователь – piezoelectric probe  
 Рассеяние – scattering  
 Рефракция – refraction  
 Реверберационный метод, метод многократных отражений –  
 reverberation method, multiple-echo technique  
 Теневой метод – through transmission method (technique)  
 Ультразвуковая волна – ultrasonic wave  
 Ультразвуковой дефектоскоп – ultrasonic flaw detector  
 Ультразвуковой метод – ultrasonic method  
 Ультразвуковой твёрдомер – ultrasonic hardness meter, UCI hardness  
 meter  
 Ультразвуковой структуроскоп – ultrasonic structure analyzer  
 Частота колебаний, частота – oscillation frequency, frequency  
 Электроакустический преобразователь – electro-acoustical transducer  
 Магнитный метод контроля  
 Дефект объекта магнитопорошкового контроля – discontinuity of  
 object magnetic particle nondestructive inspection

Магнитный дефектоскоп – nondestructive testing magnetic instrument

Магнитопорошковая структуроскопия – magnetic structure supervision particle examination

Магнитный неразрушающий контроль – magnetic nondestructive testing

Магнитный структуроскоп – magnetic structure meter

Магнитный толщиномер – magnetic thickness meter

Намагниченность – magnetic polarization, magnetic moment density, intensity of magnetism

Ферромагнитный материал, магнитный материал – ferro-magnet, ferromagnetic, magnetic material

Тепловой контроль

Температурный сигнал – temperature signal

Тепловая томограмма – thermal tomogram

Тепловой неразрушающий контроль – thermal NDT

Термограмма – thermogram

Термография – thermography



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 18353–79.** Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
2. **ГОСТ 21105–87.** Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
3. **ГОСТ 18442–80.** Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
4. **ГОСТ 21104–75.** Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод.
5. **ГОСТ 25313–82.** Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения.
6. **ГОСТ 25314–82.** Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения.
7. **ГОСТ 24289–80.** Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения.
8. **ГОСТ 23667–85.** Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров.
9. **Баранов, В. М.** Испытания и контроль качества материалов и конструкций : учеб. пособие для вузов / В. М. Баранов, А. М. Карасевич, Г. А. Сарычев. – М. : Высш. шк., 2004. – 360 с.
10. **Клюев, В. В.** Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник. В 2 кн. / под. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
11. **Неразрушающий контроль** и диагностика : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др. ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2005. – 656 с.
12. **Машиностроение** : энциклопедия. В 40 т. Т. 3 (7): Измерения, контроль, испытания и диагностика / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. – М. : Машиностроение, 1996. – 464 с.
13. **Неразрушающий контроль** : справочник. В 7 т. ; под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М. : Машиностроение, 2004. – 864 с.
14. **Пономарев, С. В.** Теоретические и практические основы тепловых физических измерений : под ред. С. В. Пономарева / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин, В. А. Вертоградский, А. А. Чуриков. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ .....	7
2. КАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ .....	13
3. МЕТОД ТЕЧЕЙСКОГО КОНТРОЛЯ .....	22
4. АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ .....	34
5. МАГНИТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ .....	51
6. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ .....	62
6.1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕСКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ .....	64
6.2. ЯРКОСТНЫЕ ПИРОМЕТРЫ .....	67
6.3. ЦВЕТОВЫЕ ПИРОМЕТРЫ .....	68
6.4. РАДИАЦИОННЫЕ ПИРОМЕТРЫ (ПОЛНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ) .....	70
6.5. ТЕПЛОВИЗОРЫ .....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	74
РУССКО-АНГЛИЙСКИЙ СЛОВАРЬ.....	76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	79

Учебное электронное издание

ЛАТЫШЕНКО Константин Павлович  
ЧУРИКОВ Александр Алексеевич  
ПОНОМАРЕВ Сергей Васильевич  
ДИВИН Александр Георгиевич  
КОНЫШЕВА Наталия Александровна

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

**Часть I**

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова  
Инженер по компьютерному макетированию М. С. Анурьева

ISBN 978-5-8265-1565-5



Подписано к использованию 04.04.2016.  
Тираж 100 шт. Заказ № 157

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел. 8(4752) 63-81-08  
E-mail: [izdatelstvo@admin.tstu.ru](mailto:izdatelstvo@admin.tstu.ru)

