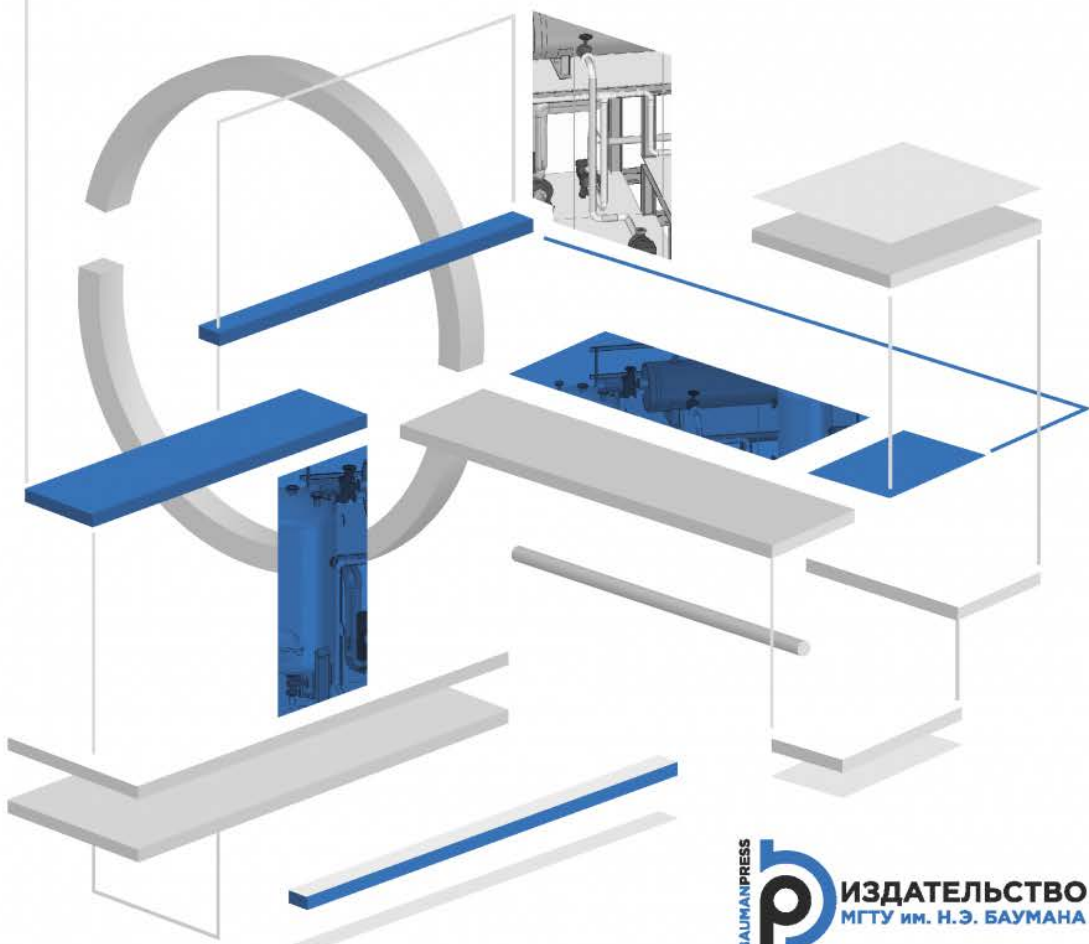


УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

ТРУБОПРОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ: ИНЖЕНЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Трубопроводные системы: инженерный практикум

Учебное пособие



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2022

УДК 681.321 (075.8)
ББК 32.971
Т77

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/7376/>

Факультет «Информатика и системы управления»
Кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Авторы:

*Б.В. Артемьев, И.Б. Артемьев, А.И. Власов, В.П. Жалнин, А.В. Косовский,
А.Е. Курносенко, К.В. Селиванов, Т.А. Цивинская*

Рецензенты:

заслуженный деятель науки Российской Федерации,
заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры»
Пензенского государственного университета;
д-р техн. наук, профессор *Н.К. Юрков*,
заведующий кафедрой «Информационные технологии конструирования РЭУ»
Московского авиационного института (национального исследовательского
университета), д-р техн. наук, профессор *А.В. Назаров*

Трубопроводные системы: инженерный практикум : учебное пособие /
Т77 [Б. В. Артемьев и др.]. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана,
2022. — 104, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5807-3

В учебном пособии приведены основные сведения о методах и средствах инженерных исследований, которые используются для неразрушающего контроля трубопроводных систем. Изложены базовые методики измерения характеристик трубопроводных систем. Представлены основные направления автоматизации измерений и подходы к построению и эксплуатации гибких измерительных систем, средств неразрушающего контроля и диагностики.

Пособие подготовлено в рамках развития Центра компетенций «Газпром — МГТУ им. Н.Э. Баумана», направленного на реализацию основных и дополнительных профессиональных образовательных программ подготовки специалистов, магистров и бакалавров в интересах ПАО «Газпром».

Для студентов высших технических учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 11.03.04 «Конструирование и технология электронных средств» (уровень бакалавриата) и изучающих дисциплину «Научно-исследовательская работа студента: производственная практика».

Материалы учебного пособия имеют свободный доступ, их можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные или частичные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии CC: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

УДК 681.321 (075.8)
ББК 32.971



*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте:
info@bmstu.press*

ISBN 978-5-7038-5807-3

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

Предисловие

Трубопроводные системы находят применение в жилищно-коммунальном хозяйстве, в промышленности, при транспортировке углеводородов и т. п. Роль и значение работ, связанных с исследованием состояния трубопроводных систем, постоянно возрастают. Расширяются сферы их применения, что требует использования в процессе их создания и эксплуатации современных методов контроля и технической диагностики, обеспечивающих наилучшее сочетание эксплуатационных и экономических характеристик.



В учебном пособии кратко изложена теория, касающаяся трубопроводных систем, а также дано описание семи экспериментальных работ инженерного практикума. Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля и диагностики трубопроводных систем: радиационные, магнитные, вихретоковые, электрические, оптические, вибрационные, акустические, а также комплексные системы управления качеством трубопроводных систем.

Даны рекомендации по выбору и применению методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики, рассмотрены характеристики отечественных измерительных и диагностических приборов, технологии и методики их эксплуатации, мобильные средства контроля трубопроводных систем.

В учебном пособии приведены базовые понятия, относящиеся к области неразрушающего контроля и технической диагностики трубопроводных систем, показана связь между решением инженерных задач и компонентами естественно-научных дисциплин.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для использования студентами и учащимися, проходящими целевую подготовку по тематике «Исследования трубопроводных систем» в МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках развития Центра компетенций «Газпром — МГТУ им. Н.Э. Баумана». Обучение направлено на реализацию основных и дополнительных профессиональных образовательных программ подготовки специалистов, магистров и бакалавров в интересах ПАО «Газпром».

Учебное пособие заинтересует не только специалистов по трубопроводным системам; оно будет весьма полезным и для широкого круга инженеров, специалистов в области управления качеством, неразрушающего контроля и технической диагностики.

Академик РАН *В.В. Клюев*,
ЗАО «Научно-исследовательский институт
интроскопии МНПО «Спектр»

От авторов

Основной задачей учебного пособия является ознакомление учащихся с ключевыми понятиями, характеристиками трубопроводных систем и инженерными методиками их анализа и проектирования.

Учебное пособие включает теоретический и экспериментально-практический разделы. Экспериментальные исследования трубопроводных систем осуществляются на базе специализированного стенда, созданного в МГТУ им. Н.Э. Баумана в сотрудничестве с ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр». Этот стенд позволяет исследовать строение трубопроводных систем, проводить измерения и моделировать отдельные проблемы, возникающие при эксплуатации трубопроводных систем, такие как автоматизация контроля при обслуживании трубопровода, износ трубопровода снаружи (вследствие воздействия окружающей среды) и изнутри (вследствие контакта с транспортируемой средой), необходимость повышения пропускной способности трубопровода и т. п.

В каждой из семи экспериментальных работ раскрывается одна проблема. Экспериментальная работа № 1 посвящена ознакомлению с характеристиками и структурой трубопроводной системы и исследованию ее основных параметров (приложение 1).

В экспериментальной работе № 2 объясняются принципы измерения параметров трубопроводной системы, а также приводится алгоритм калибровки электронных датчиков, которые в настоящее время являются наиболее перспективными устройствами для измерения параметров системы.

Экспериментальная работа № 3 позволяет освоить базовые навыки работы с расходомером, что необходимо для более точного определения количества вещества, проходящего через трубопроводную систему.

В экспериментальных работах № 4–6 затрагивается проблема износа трубопроводных систем, показаны способы выявления неполадок в их работе. В них даются базовые знания для работы с дефектоскопом и другими устройствами, используемыми в промышленных трубопроводных системах.

Вопросам автоматизации проектирования трубопроводных систем посвящена экспериментальная работа № 7.

Учебное пособие предназначено для студентов и учащихся, проходящих целевую подготовку по тематике «Исследования трубопроводных систем», а также студентов, обучающихся по направлению подготовки «Конструирование и технология электронных средств» (уровень бакалавриата) и изучающих дисциплину «Научно-исследовательская работа студента: производственная практика». Пособие может быть использовано при выполнении экспериментальных исследований в рамках научно-исследовательских работ студентов по указанной специализации.

Подготовка к изданию данного пособия была бы невозможной без всесторонней и доброжелательной поддержки сотрудников кафедры ИУ-4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (приложение 2), помощи магистрантов вышеназванной ка-

федры С.П. Присяжнюка, А.И. Корчагина, И.В. Иванова, сотрудников ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр».

Глубокую благодарность авторы выражают рецензентам: заслуженному деятелю науки Российской Федерации, заведующему кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского государственного университета, д-ру техн. наук, профессору Н.К. Юркову и заведующему кафедрой «Информационные технологии конструирования РЭУ» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д-ру техн. наук, профессору А.В. Назарову.

Авторы будут признательны читателям за все замечания по содержанию учебного пособия, которые следует направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ-4.

Словарь терминов

Видимое излучение, свет (visible radiation, light) — излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение; границы спектральной области видимого излучения условны, нижней границей обычно считается длина волны 380...400 нм, верхней — 760...780 нм.

Визуально-измерительный контроль (visual measurement control) — метод неразрушающего контроля, основанный в первую очередь на возможностях зрения; объект контроля исследуется в видимом излучении. Контроль проводится с использованием простейших измерительных средств, таких как лупа, рулетка, универсальный шаблон сварщика, штангенциркуль и т. д.

Градуировка средства измерений (gauge calibration) — определение зависимости между значениями величин на входе и выходе средства измерений, представленной в виде таблицы, графика или формулы.

Калибровка средств измерений (measuring instruments calibration) — совокупность операций, выполняемых для определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средств измерений, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору.

Измерение (measurement) — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств, которые называются средствами измерений (measuring instruments); на выбор измерительных средств оказывают влияние их метрологические показатели: цена деления шкалы, диапазон измерений, предел допустимой погрешности средств измерений, а также на нормативные условия контроля объекта.

Метрологическая аттестация средств измерений / аттестация (metrological certification of measuring instruments / certification) — исследование средства измерений, выполняемое метрологическим органом для определения метрологических свойств этого средства измерений, и выдача документа с указанием полученных данных.

Мера (measure) — средство измерений в виде какого-либо тела, вещества или устройства, предназначенное для воспроизведения и хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которой выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Неразрушающий контроль (non-destructive testing) — составная часть технического контроля. Метод, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта контроля к применению с соблюдением требований безопасности.

Номинальный размер (nominal size) — размер, который служит началом отсчета отклонения и относительно которого определяются предельные размеры; номинальные размеры указывают на чертежах деталей и сборочных единиц.

Нормальные условия (normal conditions) — для линейных измерений в пределах 1...500 мм и измерений углов с длиной меньшей стороны до 500 мм это означает следующее:

- температура окружающей среды 20 °С;
- атмосферное давление 101 324,72 Па (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающего воздуха 58 % (нормальное парциальное давление водяных паров 1333,22 Па);
- ускорение свободного падения 9,8 м/с²;
- направление линии измерения линейных размеров до 160 мм наружных поверхностей — вертикальное, в остальных случаях — горизонтальное;
- положение плоскости измерения углов — горизонтальное;
- относительная скорость движения внешней среды равна нулю;
- значения внешних сил равны нулю.

Образцовое средство измерений (standard test gauge) — мера, измерительный прибор или измерительный преобразователь, служащий для проверки по нему других средств измерений и утвержденный в качестве образцового.

Отклонение (deviation) — алгебраическая разность между действительным, предельным размером и т. п. и соответствующим номинальным размером.

Погрешность измерений (measurement error) — отклонение результата измерений от истинного значения измеряемой величины.

Проверка средств измерений (measuring instruments verification) — совокупность операций, выполняемых органом государственной метрологической службы или другими уполномоченными на то органами (организациями) в целях определения и подтверждения соответствия средств измерений установленным техническим требованиям; оформление результатов проверки средства измерений — составление официального документа о результатах проверки средства измерений и (или) его клеймения.

Рабочее средство измерений (shop instrument) — средство измерений, применяемое для измерений, не связанных с указанием единиц.

Эталон единицы / эталон (unit standard / gauge) — средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы в целях передачи ее нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона.

Электромагнитное излучение (electromagnetic radiation) — излучение, разновидностью которого является видимый свет, представляет собой электромагнитные волны, испускаемые источником, свободно распространяющиеся в пространстве со скоростью света и ничем не связанные с источником, образовавшим эти волны.

Юстировка средств измерений (gauge adjustment) — совокупность операций по доведению погрешностей средств измерений до значений, соответствующих техническим требованиям.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

1.1. Трубопроводные системы и их характеристики

Под *системой трубопроводов* понимают совокупность отдельных трубопроводов, взаимосвязанных в едином технологическом процессе [1]. Существуют магистральные трубопроводы — крупнейшие инженерные сети для перекачки веществ на дальние расстояния от места добычи до газгольдера заказчика, разветвляющиеся на более мелкие участки, а также технологические, например, установки для крекинга нефти, разделения воздуха в химической промышленности, которые целиком состоят из трубопроводов различных диаметров.

По сложности проектирования выделяют простые и сложные трубопроводы. *Простые* — уложенные по прямой без дополнительных конструкций, *сложные* — крупные наземные инженерные системы с насосными станциями подкачки, переходами и изгибами или подводные.

По температуре передаваемого вещества трубопроводы подразделяют на *холодные* (температура ниже 0 °С), *среднетемпературные* (+1...+45 °С), *горячие* (свыше 45 °С).

По создаваемому давлению трубопроводы бывают: *низкого давления* (ниже 12 атм), *среднего давления* (12...25 атм), *высокого давления* (более 25 атм) [1]. Кроме воздействия внешней среды трубопровод испытывает воздействие агрессивной среды транспортируемого вещества.

Трубопровод — инженерное сооружение, состоящее из установок создания давления, труб различных диаметров, изготовленных из металлов или высокопрочного пластика, которые соединяются между собой либо сварным швом, либо с помощью фланцев с прокладками. Трубы разного диаметра соединяются с помощью сгонов, переходников, муфт. Для регулирования потока в трубопровод врезают элементы запорной арматуры: задвижки, вентили, краны. Поскольку трубопровод — это объект, работающий под давлением, необходимо постоянно контролировать давление внутри трубы. С этой целью монтируют механические манометры. В случаях, когда требуется не только контролировать давление, но и управлять им в системе в автоматическом режиме, устанавливают электромеханические манометры или электронные датчики давления. На трубопроводах высокого давления или предназначенных для перекачки взрывоопасных веществ устанавливают предохранительные устройства [2–4].

Внешняя среда и агрессивная внутренняя среда создают идеальные условия для возникновения коррозии металла, которая постепенно разрушает металл и в конечном итоге приводит к разрыву трубопровода. Для борьбы с коррозией поверхности труб снаружи и внутри покрывают защитными составами. Для предотвращения аварии проводят мониторинг состояния труб с помощью дефектоскопа. В настоящее время отрабатываются системы ав-

томатического контроля состояния поверхности стенок труб с использованием технологий беспроводной сенсорной связи.

Технологические трубопроводы работают в разнообразных условиях, находятся под действием значительных давлений и высоких температур, подвергаются коррозии и претерпевают периодические охлаждения и нагревы. Их конструкция становится все более сложной за счет возрастания рабочих параметров транспортируемого продукта, увеличения диаметров трубопроводов, ужесточения требований к надежности эксплуатируемых систем.

По виду транспортируемых сред трубопроводы подразделяют на несколько видов, основные из которых представлены на рис. 1.1 [1]; описание трубопроводов приведено в табл. 1.1.



Рис. 1.1. Классификация трубопроводов по видам транспортируемых сред

Таким образом, название трубопроводной системы напрямую зависит от перемещаемой по нему среды. К трубопроводам, предназначенным для транспортировки огне- и взрывоопасных, а также токсичных или радиоактивных сред, предъявляются высокие требования по безопасности, непроницаемости и долговечности материалов корпусных деталей и герметичности по отношению к внешней среде [1].

По расположению относительно зданий и сооружений выделяют *наружные* и *внутренние* трубопроводы. В зависимости от длины, диаметра и количества передаваемой энергии трубопроводы классифицируют следующим образом:

– *магистральные* (от источника энергии до микрорайона или предприятия);

Таблица 1.1

Описание трубопроводов, классифицируемых по видам транспортируемых сред

Наименование трубопровода	Описание
Аммиакопровод	Предназначен для транспортировки аммиака. В России и Украине функционирует экспортный магистральный аммиакопровод
Водопровод	Предназначен для обеспечения водой населения, промышленных предприятий, транспорта. В зависимости от видов потребления бытовых и промышленных нужд трубопроводы водоснабжения различают по органолептическим свойствам и пригодности для питья: хозяйственно-питьевые, производственные, противопожарные, поливные
Воздухопровод	Часто создается на промышленном предприятии для обеспечения производства сжатым воздухом
Газопровод	Предназначен для транспортировки попутного нефтяного, природного и искусственного газа. Стратегические газопроводы предназначены для передачи на дальние расстояния больших объемов газа — на экспорт к предприятиям, осуществляющим газовый синтез
Конденсатопровод	Технологический трубопровод, предназначенный для сбора конденсата
Мазутопровод	Осуществляет транспортировку тяжелых нефтепродуктов, отходов крекинга. Такие продукты могут использоваться в качестве топочного мазута, перерабатываться в дизельное топливо или использоваться для дальнейшего отделения легких углеводородов
Массопровод	Предназначен для транспортировки гидроторфа на торфоразработках, различных сыпучих материалов на складах и промышленных предприятиях, удаления золы на теплоэлектростанциях и т. п.
Нефтепровод	Предназначен для транспортировки сырой нефти. Нефть подогревается, что препятствует затвердеванию входящих в ее состав парафинов
Нефтепродуктопровод	Предназначен для транспортировки нефтепродуктов, в том числе бензина и керосина, полученных в результате крекинга. Доставка осуществляется до предприятий, производящих нефтепродукты более высокой переработки. Такие трубопроводы чаще всего применяются в пределах одного предприятия. Для транспортировки нефтепродуктов на большие расстояния используются специальные автомобильные или железнодорожные цистерны
Паропровод	Технологический трубопровод, предназначенный для передачи под давлением пара, используемого для отопления помещений или работы сторонних механизмов

Окончание табл. 1.1

Наименование трубопровода	Описание
Продуктопровод	В общем смысле трубопровод, предназначенный для транспортировки искусственно синтезированных веществ, чаще всего — продуктов нефтяного синтеза. В частном случае может означать систему, предназначенную для доставки по трубам любых продуктов
Теплопровод	Предназначен для передачи теплоносителя (вода, водяной пар) от источника тепловой энергии в жилые дома, общественные здания и на промышленные предприятия
Этиленопровод	Инфраструктура, предназначенная для транспортировки по трубам специфического синтезированного промышленного сырья — этилена

– *распределительные* (от магистральных до трубопроводов, идущих к отдельным зданиям);

– *ответвления* (от распределительных трубопроводов до узлов присоединения местных потребителей тепла).

Трубопроводы могут быть проложены на земле, в земле и над землей. При любом способе монтажа трубопроводов необходимо обеспечить наибольшую надежность работы системы при наименьших капитальных и эксплуатационных затратах.

В настоящее время основными видами прокладки трубопроводов являются подземная и надземная. *Подземная* прокладка трубопроводов наиболее распространена. Выделяют прокладку трубопроводов непосредственно в земле (*бесканальная*) и в каналах. При *надземной* прокладке трубопроводы должны находиться на земле или над землей на таком уровне, чтобы не препятствовать движению транспорта. *Надземную* прокладку применяют на загородных магистралях при пересечении оврагов, рек, железнодорожных путей и других сооружений.

Классификация трубопроводных систем по видам прокладки приведена на рис. 1.2, описание трубопроводов — в табл. 1.2.

Если исходить из удобства монтажа и обслуживания, то прокладка труб над землей является более выгодной, чем прокладка под землей. Также это требует меньших материальных затрат. Однако это портит внешний вид окружающей среды, и поэтому такой вид прокладки труб не везде может применяться.

Важно помнить о правилах установки при монтаже открытых и закрытых технических коммуникаций. Их несоблюдение может привести к раннему выходу из строя трубопровода, возникновению протечек, крупных засоров и прочих проблем. Также нельзя забывать о требованиях безопасности.

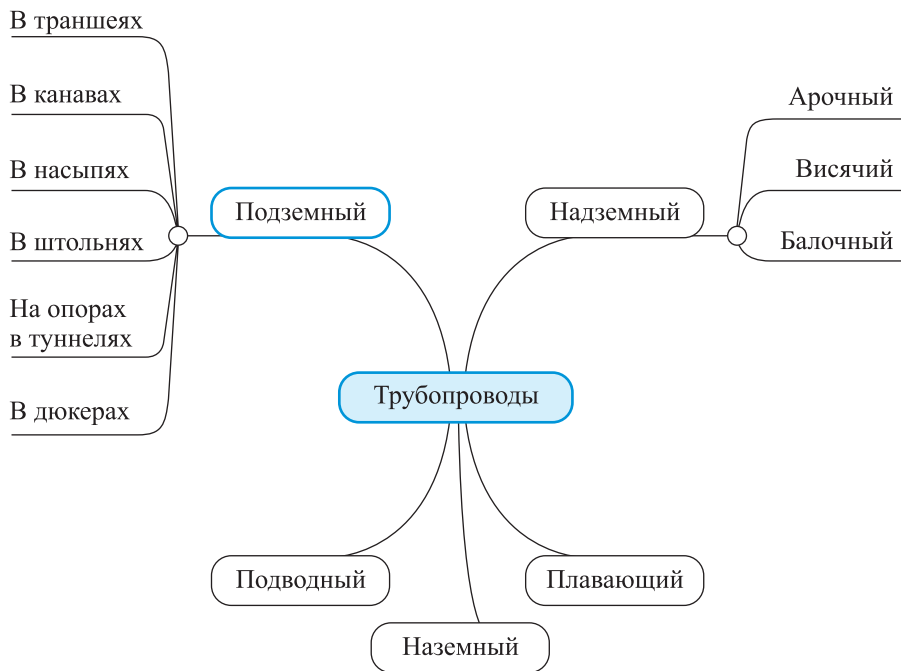


Рис. 1.2. Классификация трубопроводных систем по видам прокладки

Таблица 1.2

Описание трубопроводов в зависимости от вида прокладки

Наименование трубопровода	Описание
Подземный	Прокладывается траншейным способом с последующей засыпкой грунтом; предназначен для транспортировки газа, нефти, нефтепродуктов, угля, железной руды и т. д. от мест добычи, переработки и хранения к местам потребления. Подземная прокладка обеспечивает защиту трубопровода от механических повреждений и более благоприятный температурный режим его эксплуатации
Наземный	Участок трубопровода, расположенный на поверхности земли; трубы могут быть полностью закрыты грунтовой засыпкой или заключены в короб
Плавающий	Состоит из секций, каждая из которых представляет собой резинотканевую трубу с закрепленными на ней поплавками. Плавающие трубопроводы произведены с использованием современных полимерных материалов, что обеспечивает возможность их эксплуатации в условиях отрицательных температур и сохранность при вмерзании в лед

Окончание табл. 1.2

Наименование трубопровода	Описание
Надземный	Комплекс сооружений для транспортировки газообразных, жидких или твердых продуктов, прокладываемый на отдельных опорах или эстакадах на расстоянии от грунта не менее 25 см. Надземные трубопроводы сооружают на участках с любым рельефом местности. Наиболее целесообразно их применение на трассах, пересекающих территории с изрезанным рельефом, большим числом рек, озер, водотоков и т. п., в районах оползней, горных выработок, на просадочных, мерзлых грунтах и в других сложных условиях
Подводный	Магистраль из труб для транспортировки жидких и газообразных веществ под действием разности давлений в различных ее сечениях. Подводные трубопроводы прокладывают непосредственно по морскому дну или укладывают в подготовленную траншею. Они соединяют морские нефтепромыслы с хранилищами нефти и газа, с точечными причалами для танкеров и газозавозов или с береговыми либо плавучими перерабатывающими установками

1.2. Конструктивная реализация трубопроводных систем

Трубопроводные системы включают непосредственно трубы и трубопроводную арматуру. К основным параметрам собственно труб относятся (рис. 1.3) [2, 5]:

- диаметр трубы наружный D , мм;
- толщина стенки трубы b , мм;
- диаметр трубы внутренний d , мм;
- площадь поперечного сечения трубы S , мм²;
- длина трубы L , мм;
- объем материала трубы V , м³;
- плотность материала трубы ρ , кг/м³;
- масса трубы m , кг.

Для расчета массы трубы необходимо знать ее плотность ρ , кг/м³, и объем материала трубы V , м³: $m = \rho V$. Плотность материала трубы можно найти в справочном пособии [1].

Для нахождения объема необходимо знать площадь поперечного сечения трубы S , мм², и длину трубы L , мм: $V = SL$.

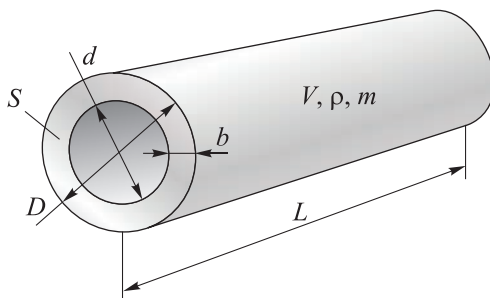


Рис. 1.3. Основные параметры труб

Расчет силы и давления пневмо- или гидросистемы позволяет узнать силу, развиваемую системой: $F = PS$, где P — разность рабочих давлений, Па ($P = P_1 - P_2$); S — площадь поперечного сечения трубы, мм².

Трубопроводная арматура — конструктивный элемент трубопроводной системы, который позволяет формировать сечение проводящего просвета трубопровода для организации движения (регулирование, отключение, смешивание, сброс, распределение) одного или нескольких потоков передаваемых сред согласно техническим требованиям (давление, температура, мощность, направление и физико-химическое состояние рабочей среды) [1].

Классификация трубопроводной арматуры приведена на рис. 1.4, ее описание в соответствии с классификацией — в табл. 1.3, примеры элементов трубопроводной арматуры — в табл. 1.4 [1, 3].



Рис. 1.4. Классификация трубопроводной арматуры

Таблица 1.3

Описание трубопроводной арматуры в соответствии с классификацией





Наименование арматуры	Описание
<i>По выполняемым функциям</i>	
Запорная	Герметично перекрывает движение вещества в магистрали в момент закрытия, обеспечивает проходимость без сопротивления при открытии механизма (кран, вентиль, заслонка, задвижка). Необходимость в этом процессе возникает периодически по техническим требованиям. К запорным элементам относится устройство для спуска рабочей среды из емкости или подачи в контрольно-измерительные приборы
Регулирующая	Позволяет изменять параметры транспортируемого вещества: температуру, давление, напор, уровень, расход (вентиль, самодействующий клапан, конденсатоотводчик, регулятор уровня). Редукционная или дроссельная арматура трубопроводов позволяет регулировать давление посредством гидравлического сопротивления
Предохранительная	Автоматически срабатывает на открывание клапана при давлении, превышающем норму, в результате чего происходит сброс избытка проводимой массы (предохранительный клапан, мембранный предохранитель, перепускной клапан)
Защитная	Отключает оборудование, участок трубопровода при аварийном изменении показателей проводимого вещества или блокирует обратный ток рабочей среды, защищая трубопровод и оборудование от аварийных ситуаций (обратный клапан, пневмозадвижки, отсечный клапан)
Фазоразделительная	Разделяет проводимую среду, находящуюся в разных фазах состояния, позволяет удалять конденсат, выполнять масло-, газо-, воздухоотделение
Распределительно-смесительная	Распределяет поток вещества в заданных направлениях либо смешивает потоки в единый (распределительный кран (клапан), смеситель, трехходовая арматура)
Контрольная	Определяет уровень, движение проводимой массы (датчик уровня, пробко-спускные краны)
<i>По способу соединения с трубопроводом</i>	
Муфтовая	Соединение муфтой с резьбой внутри возможно при диаметрах труб не более 80 мм и рабочем давлении 10 атм; пригодна для металлопластиковых, полиэтиленовых, полипропиленовых трубопроводов
Фланцевая	Прочное соединение с болтовой стяжкой; фланцевая стыковка может многократно разбираться и собираться для ремонта, прочистки арматуры. Необходим периодический контроль креплений, так как они могут ослабевать

Окончание табл. 1.3

Наименование арматуры	Описание
Под приварку	Детали стыкуются сварочным швом в раструб или встык; соединение считается самым надежным и герметичным, применяется для проводимости опасных веществ; возможно использование подкладного кольца, чтобы исключить перекося стыковки деталей; такой способ используют при прокладке трубопроводов для атомных электрических станций
Цапковая	Соединение элементов небольшого размера, работающих под высоким давлением (контрольно-измерительные приборы и аппаратура), посредством присоединительных патрубков с наружной резьбой и буртиком
Штуцерная	Используется для арматуры диаметром не более 15 мм в лабораторных трубопроводах; соединение резьбовое
<i>По способу герметизации</i>	
Сальниковая	Достигается уплотнением контакта штока и шпинделя сальниковой набивкой (шнуры из асбестовых или пеньковых волокон, пропитанные герметизирующим составом, фторопластовая набивка)
Мембранная	Уплотнение за счет мембраны (упругий эластичный диск), которая зажимается между крышкой и корпусом арматуры
Шланговая	В конструкцию арматуры включен эластичный шланг, который пережимается, герметично отсекая поток
Сильфонная	Подвижные элементы уплотнены сильфонным узлом (гофрированная трубка)
<i>По способу управления</i>	
Управляемая	Приводится в действие посредством манипуляции вручную или с помощью механического (пневматического, гидравлического, электрического, электромагнитного) привода. Дистанционное управление может осуществляться отдельно установленным от трубопроводной арматуры приводом, соединяемым подшипниками, валами, тросом, зубчатыми колесами. Большая часть изделий, рассчитанная на трубы диаметром не более 400 мм, управляется ручным приводом, процесс медленный, требуется приложение значительных усилий
Автоматическая	Действует автономно под влиянием рабочей среды или с помощью устройств автоматического срабатывания

Таблица 1.4

Примеры элементов трубопроводной арматуры

Наименование арматуры	Внешний вид
<i>По выполняемым функциям — запорная</i>	
Задвижка	 A blue gate valve with a handwheel on top and two flanged ends.
Запорный кран	 A blue stopcock with a red handwheel and a black actuator box on top.
Кран	 A grey ball valve with a blue handle and two flanged ends.
Дисковый затвор	 A blue butterfly valve with a handwheel on top and a large circular flange.

Продолжение табл. 1.4

Наименование арматуры	Внешний вид
<i>По способу соединения с трубопроводом</i>	
Муфтовая	
Фланцевая	
Под приварку	
Цапковая	
Штуцерная	

Окончание табл. 1.4

Наименование арматуры	Внешний вид
<i>По способу герметизации</i>	
Сальниковая	
Сильфонная	
Мембранная	
Шланговая	

Основными параметрами трубопроводной арматуры являются условный диаметр и условное давление рабочей среды (табл. 1.5). Стандартизация условных диаметров и давлений, определяющих число типоразмеров арматуры, позволяет осуществлять ее серийное производство и выполнять замену отдельных видов арматуры [1, 3, 4].

Таблица 1.5

Основные параметры трубопроводной арматуры

Параметр	Описание	Обозначение
Условный (внутренний, номинальный) диаметр	Соответствует диаметру просвета трубопровода и обеспечивает сохранение или возрастание пропускной способности между его отдельными элементами	d_N , мм
Условное давление	Расчетное рабочее давление среды (температура 20 °С), при котором гарантируются заявленные эксплуатационные характеристики	p , Па
Рабочее давление	Максимальное избыточное давление, которое выдерживает оборудование при сохранении всех эксплуатационных характеристик	P , Па
Рабочая среда (газообразная, жидкая, сыпучая)	Характеризует транспортируемые по трубопроводу вещества	—
Температура эксплуатаций	Максимальные и минимальные значения температуры, при которых гарантируется надежное выполнение запорных функций	°С

Трубопроводную арматуру различают по рабочей температуре.

Арматура	Рабочая температура
Криогенная.....	–150 °С и ниже
Холодильного оборудования.....	–60...–150 °С
Низкой температуры	–20...–60 °С
Средней температуры	До 400 °С
Высокой температуры	До 600 °С
Жаростойкая	600 °С и выше

Представленные справочные данные являются основой для дальнейшего анализа и проектирования трубопроводных систем.

1.3. Материалы трубопроводных систем

При изготовлении труб в течение долгого времени традиционно использовались чугуны и стали различных марок [3–6] (рис. 1.5). В настоящее время все более широкое применение находят изделия из пластика. Такой выбор оправдан, поскольку пластиковые трубы имеют ряд преимуществ перед металлическими аналогами. Пластиковые трубы изготовлены из материала, который не подвержен губительному действию внешних факторов и образованию коррозии. Это означает, что пластиковые трубы прослужат намного дольше металлических. Несмотря на то, что пластиковые трубы соединяют с помощью сварки, их гораздо проще монтировать, чем металлические,

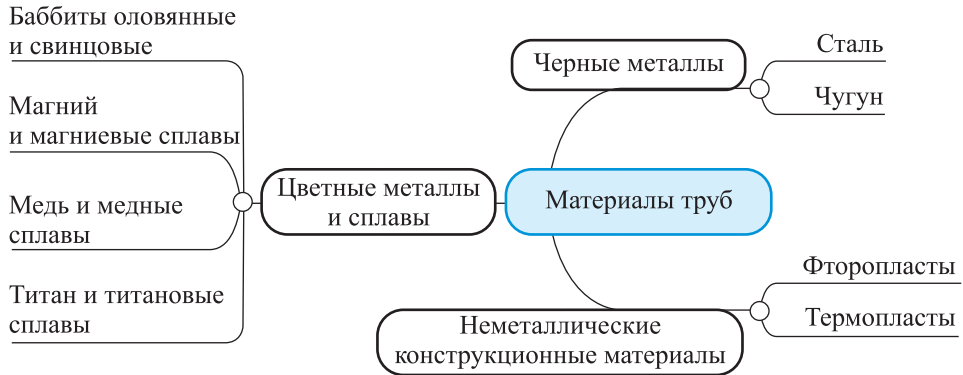


Рис. 1.5. Классификация труб по материалам

поскольку пластик гораздо более мягкий и податливый материал, нежели металл, — работать с такими трубами проще.

Применяемые в промышленности материалы для труб с указанием плотности ρ материалов приведены ниже [1].

Наименование материала	ρ , кг/м ³
<i>Черные металлы</i>	
Сталь 10 ГОСТ 1050—88.....	7856
Сталь 20 ГОСТ 1050—88.....	7859
Сталь 40 ГОСТ 1050—88.....	7850
Сталь 60 ГОСТ 1050—88.....	7800
С235—С375 ГОСТ 27772—88.....	7850
Ст3пс ГОСТ 380—2005.....	7850
Чугун ковкий КЧ 70-2 ГОСТ 1215—79.....	7000
Чугун высокопрочный ВЧ35 ГОСТ 7293—85.....	7200
Чугун серый СЧ10 ГОСТ 1412—85.....	6800
Чугун серый СЧ20 ГОСТ 1412—85.....	7100
Чугун серый СЧ30 ГОСТ 1412—85.....	7300
<i>Цветные металлы и сплавы</i>	
Силумин АК12ж ГОСТ 1583—93.....	2700
Сплав АК12 ГОСТ 1583—93.....	2710
Сплав АК5М ГОСТ 1583—93.....	2640
Сплав АК7 ГОСТ 1583—93.....	2700
Сплав АО9-1 ГОСТ 14113—78.....	2700
<i>Баббиты оловянные и свинцовые</i>	
Б83 ГОСТ 1320—74.....	7380
Б87 ГОСТ 1320—74.....	7300
БН ГОСТ 1320—74.....	9550
<i>Магний и магниевые сплавы</i>	
Сплав МЛ10—МЛ19 ГОСТ 2856—79.....	1810
Сплав ВМЛ5.....	1890
Сплав ВМЛ9.....	1850

Медь и медные сплавы

Бронза оловянная БрО10С10	8800
Бронза оловянная БрО19.....	8600
Бронза оловянная БрОС10-10.....	9100
Бронза оловянная БрОА10-1.....	8750
Бронза БрА10ЖЗМч2 ГОСТ 493—79	8200
Бронза БрА9ЖЗЛ ГОСТ 493—79.....	8200
Бронза БрМц5 ГОСТ 18175—78.....	8600
Латунь Л60 ГОСТ 15527—2004.....	8800
Латунь ЛА ГОСТ 1020—97.....	8500
Медь М0, М1, М2, М3 ГОСТ 859—2001	8940
Медь МСр1 ГОСТ 16130—90.....	8900

Титан и титановые сплавы

BT1-0 ГОСТ 19807—91.....	4500
BT14 ГОСТ 19807—91	4500
BT20Л ГОСТ 19807—91.....	4470

*Неметаллические конструкционные материалы**Фторопласты*

Ф-4 ГОСТ 10007-80 Е	2100
Фторопласт-1 ГОСТ 13744—87	1400
Фторопласт-2 ГОСТ 13744—87	1700
Фторопласт-3 ГОСТ 13744—87	2710
Фторопласт-4Д ГОСТ 14906—77	2150

Термопласты

Дакрил-2М ТУ 2216-265-057 57 593—2000	1190
Полиметилметакрилат ЛПТ ТУ 6-05-952—74	1180
Полиметилметакрилат суспензионный ЛСОМ ОСТ 6-01-67—72 ...	1190
Винипласт УВ-10 ТУ 6-01-737—72	1450
Поливинилхлоридный пластикат ГОСТ 5960—72	1400
Полиамид ПА6 блочный Б ТУ 6-05-988—87	1150
Полиамид ПА66 литьевой ОСТ 6-06-369—74	1140
Капролон В ТУ 6-05-988	1150
Капролон ТУ 6-06-309—70	1130
Поликарбонат.....	1200
Полипропилен ГОСТ 26996—86	900
Полиэтилен СД.....	960
Лавсан литьевой ТУ 6-05-830—76	1320
Лавсан ЛС-1 ТУ 6-05-830—76	1530
Стиролпласт АБС 0809Т ТУ 2214-019-002 03521—96	1050
Полистирол блочный ГОСТ 20282—86.....	1050
Сополимер стирола МСН ГОСТ 12271—76	1060
Полистирол ударопрочный УПС-0505 ГОСТ 28250—89.....	1060
Стеклопластик ВПС-8	1900
Стеклотекстолит конструкционный КАСТ-В ГОСТ 10292—74.....	1850
Винилискожа-НТ ГОСТ 10438—78.....	1440
Резина 6Ж ТУ 38-005-1166—98	1050
Резина ВР-10 ТР 18-962.....	1800
Стекло листовое ГОСТ 111—2001	2500
Стекло органическое техническое ТОСН ГОСТ 17622—72	1180

Стальные трубы для газоснабжения отлично переносят внутреннее давление. Стальной трубопровод полностью герметичен, что сводит риск утечки газа к нулю. Подбор труб осуществляется с учетом рабочего давления в газовой магистрали.

Условия в трубопроводах могут быть следующими:

- трубопроводы низкого давления — до 0,05 кгс/см²;
- среднего давления — 0,05...3,0 кгс/см²;
- высокого давления — 3...6 кгс/см².

Трубопроводы-отводы могут различаться не только тем, какие материалы были использованы при строительстве основного трубопровода, сроком службы, но и тем, какое давление газа подается по этим трубам.

Исходя из этого, выделяют несколько категорий трубопроводов [1]:

- трубопроводы высокого давления, давление газа в трубах будет колебаться порядка 0,3...1,2 МПа;
- трубопроводы среднего давления, давление будет колебаться в пределах 0,3...0,6 МПа;
- трубопроводы среднего давления 0,005...0,3 МПа;
- трубопроводы низкого давления, значения этого низкого давления — не более 0,005 МПа.

Однозначного ответа на вопрос, из какого именно материала должны изготавливаться трубопроводы-отводы, нет, поскольку при выборе материала должны учитываться многочисленные факторы.

Основные виды стальных труб приведены на рис. 1.6.

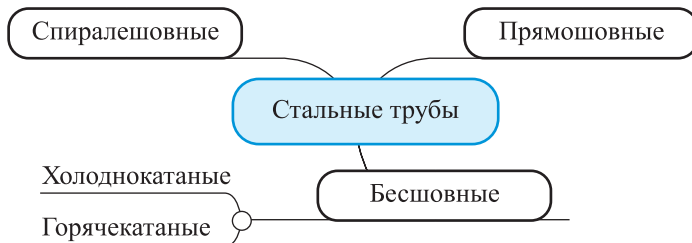


Рис. 1.6. Классификация стальных труб по виду швов

Бесшовные трубы производят путем «прошивки» металлического цилиндра (заготовки). Способ изготовления трудоемок, что сказывается на себестоимости получаемых изделий. Бесшовные трубы подразделяют на следующие подвиды:

- *холоднокатаные* (заготовка после процесса обрабатывается без воздействия температуры);
- *горячекатаные* (заготовка проходит дальнейшую обработку под действием высокой температуры).

Горячекатаные трубы в силу большой толщины стенки отличаются прочностью. Они используются преимущественно в холодном климате или для трубопроводов, по которым проходит газ под высоким давлением.

Прямошовные (линия сварного шва проходит вдоль трубы) трубы отличаются невысокой стоимостью и приемлемыми техническими параметрами. Основной недостаток — небольшой запас прочности, так как под действием давления шов может «лопнуть» или деформироваться.

Спиралешовные (линия шва в виде спирали проходит по всей поверхности трубы) трубы являются более прочными, чем прямошовные, и практически не отличаются от них по стоимости.

При выборе параметров труб следует учитывать:

- диаметр труб для газа;
- толщину трубной стенки.

Выбор диаметра труб проводится после проведения предварительных расчетов, при этом учитываются:

- расход газа в час;
- длина трубопровода;
- тип трубопровода (низкого, среднего или высокого давления).

Для строительства распределительных трубопроводных систем обычно используются трубы диаметром от 50 мм. Разводка внутри жилого помещения, как правило, выполняется трубами диаметром 25 мм.

Толщина трубной стенки имеет существенное значение при строительстве трубопроводов, так как именно от нее зависит прочность трубы. Производителями выпускаются трубы со стенками толщиной 1,8...5,5 мм (ГОСТ 3262—75 «Трубы стальные водогазопроводные»).

Толщину стенки рекомендуется выбирать в зависимости от места прокладки газового трубопровода:

- если газоснабжение проводится под землей (подземные коммуникации), то толщина стенки должна быть не менее 3 мм;
- если сооружается надземный трубопровод, то применяются менее прочные трубы с толщиной стенки 2 мм.

1.4. Маркировка

Определить качественные характеристики труб можно на основании маркировки, которая наносится на поверхность и имеется в технической документации к выпущенной партии (рис. 1.7 и 1.8) [1].

В маркировке указываются (ГОСТ 14202—69 «Трубопроводы промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки»):

- наименование предприятия-изготовителя;
- марка стали, из которой изготовлена продукция;
- наружный диаметр и толщина трубной стенки;



Рис. 1.7. Условные обозначения основных характеристик трубы

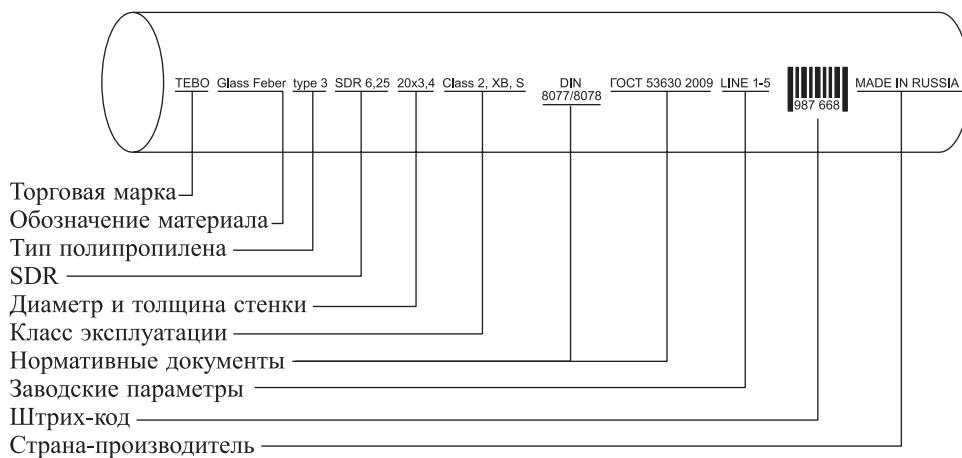


Рис. 1.8. Расшифровка маркировки

- номинальное давление, которое труба может выдерживать без каких-либо проблем и в различных климатических условиях;
- ГОСТ или иные технические условия, в соответствии с которыми изготовлена данная труба.

Дополнительно могут указываться:

- дата изготовления;
- номер партии при поставке;
- номер заказа, по которому производились трубы;
- общая масса трубы;
- общая масса всей партии.

1.5. Расчет трубопроводных систем

Характер течения среды в трубопроводе и при обтекании препятствий различается в зависимости как от вида передаваемой среды, так и от конкретной ее марки. Важным показателем является вязкость среды, характеризующаяся *коэффициентом вязкости*. Ирландский инженер-физик О. Рейнольдс в 1880 г. провел серию опытов, по результатам которых вывел безразмерную величину, характеризующую поток вязкой жидкости; эта величина называется *числом Рейнольдса* и обозначается Re [2, 5]:

$$Re = \frac{vL\rho}{\mu},$$

где v — скорость потока; L — характерная длина элемента потока; ρ — плотность жидкости; μ — динамический коэффициент вязкости.

Таким образом, число Рейнольдса характеризует отношение сил инерции к силам вязкого трения в потоке жидкости. Изменение значения этого числа отображает изменение соотношения указанных сил, что влияет на характер потока жидкости. В связи с этим принято выделять три режима потока в зависимости от значения числа Рейнольдса.

При $Re < 2300$ наблюдается так называемый *ламинарный* поток, при котором жидкость движется тонкими слоями, почти не смешивающимися друг с другом, при этом наблюдается постепенное увеличение скорости потока по направлению от стенок трубы к ее центру.

Дальнейшее увеличение числа Рейнольдса приводит к дестабилизации такой структуры потока, и значениям $2300 < Re < 4000$ соответствует *переходный* режим, при котором отдельные слои начинают смешиваться друг с другом.

При $Re > 4000$ наблюдается устойчивый режим, характеризующийся беспорядочным изменением скорости и направления потока в каждой отдельной его точке, что в сумме дает выравнивание скоростей потока по всему объему. Такой режим называется *турбулентным*. Число Рейнольдса зависит от задаваемого насосом напора, вязкости среды при рабочей температуре, а также от площади и формы сечения трубы, через которую проходит поток (рис. 1.9) [2, 5].

Число Рейнольдса является критерием подобия для течения вязкой жидкости, т. е. с его помощью возможно моделирование реального процесса в уменьшенном размере, удобном для изучения. Это крайне важно, поскольку зачастую бывает сложно, а иногда и вовсе невозможно изучать характер потоков жидкости в реальных аппаратах вследствие их большого габарита.

Если трубопровод не теплоизолированный, т. е. возможен обмен тепловой между перемещаемой и окружающей средами, то характер потока в нем может изменяться даже при постоянной скорости (расходе). Такое бывает, если на входе перекачиваемая среда имеет довольно высокую температуру и течет в турбулентном режиме. По длине трубы температура перемещаемой

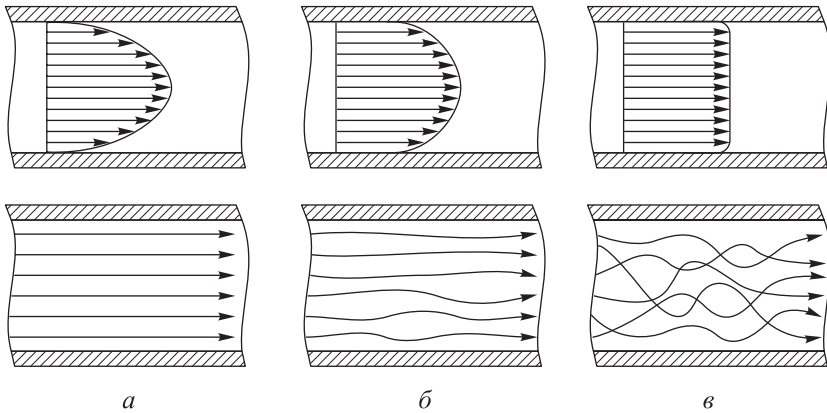


Рис. 1.9. Профиль скоростей в потоке (вверху) и характер течения (внизу) для различных режимов:

a — ламинарного; *б* — переходного; *в* — турбулентного

среды будет снижаться вследствие тепловых потерь в окружающую среду, что может повлечь за собой смену режима потока на ламинарный или переходный. Температура, при которой происходит смена режима, называется *критической*. Вязкость жидкости напрямую зависит от температуры, поэтому для подобных случаев используют такой параметр, как *критическая кинематическая вязкость*. Она соответствует точке смены режима потока при критическом значении числа Рейнольдса:

$$v_{\text{кр}} = \frac{(vD)}{\text{Re}_{\text{кр}}} = \frac{4Q}{\pi d \text{Re}_{\text{кр}}},$$

где $v_{\text{кр}}$ — критическая кинематическая вязкость; v — скорость потока; D — наружный диаметр трубы; $\text{Re}_{\text{кр}}$ — критическое значение числа Рейнольдса; Q — расход; d — внутренний диаметр трубы.

Трение возникает между стенками трубы и движущимся потоком. Коэффициент трения во многом зависит от шероховатости стенок трубы. Взаимосвязь между коэффициентом трения, числом Рейнольдса и шероховатостью стенок устанавливается *диаграммой Мууди*, позволяющей определить один из параметров, зная два других (рис. 1.10) [2–5].

Формулу Коулбрука — Уайта применяют для вычисления коэффициента трения турбулентного потока. На основании этой формулы возможно построение графиков, по которым устанавливается коэффициент трения:

$$(\sqrt{\lambda})^{-1} = -2 \log \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d},$$

где λ — коэффициент трения турбулентного потока; k — коэффициент шероховатости трубы; d — внутренний диаметр трубы.

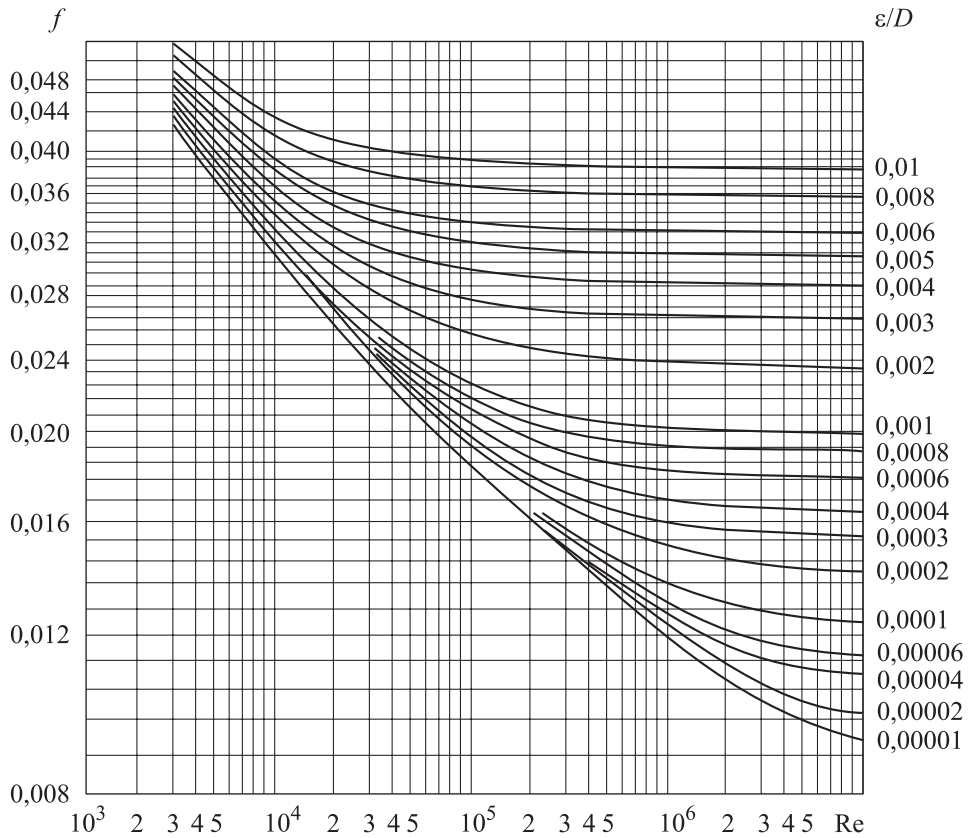


Рис. 1.10. Диаграмма зависимости между коэффициентом трения f , числом Рейнольдса Re и относительной шероховатостью ϵ/D стенок трубы

Известны и другие аналитические модели приближенного расчета потерь на трение при напорном течении жидкости в трубах. Одним из наиболее часто используемых уравнений в этом случае считается уравнение *Дарси — Вейсбаха* [2]. Оно базируется на эмпирических данных и используется в основном при моделировании трубопроводных систем.

Потери на трение — это функция скорости жидкости и сопротивления трубы движению жидкости, выражаемая через значение шероховатости стенок трубопровода:

$$\Delta H = \lambda \frac{L v^2}{d 2g},$$

где ΔH — потери на трение; λ — коэффициент трения; L — длина участка трубы; d — внутренний диаметр трубы; v — скорость потока; g — ускорение свободного падения.

Потери давления вследствие трения для воды рассчитывают по формуле Хайзена — Вильямса [2]:

$$\Delta P = 11,23L \frac{1}{C^{1,85}} \frac{Q^{1,85}}{d^{4,87}},$$

где ΔP — потери давления; L — длина участка трубы; C — коэффициент шероховатости Хайзена — Вильямса; Q — расход; d — внутренний диаметр трубы.

Рабочее давление трубопровода (P_A) — это наибольшее избыточное давление, обеспечивающее заданный режим работы трубопровода. Решение о выборе трубопровода и числе насосных станций обычно принимают, опираясь на рабочее давление трубопровода, производительность насоса и показатели расхода. Максимальное и минимальное значения давления трубопровода, а также свойства рабочей среды — параметры, определяющие расстояние между насосными станциями и требуемую их мощность.

Номинальное давление (P_N) — номинальная величина, соответствующая максимальному давлению рабочей среды при температуре 20 °С, при котором возможна продолжительная эксплуатация трубопровода с заданными параметрами.

При увеличении температуры нагрузочная способность трубы понижается, как и допустимое избыточное давление. Значение P_e показывает максимальное (избыточное) давление в трубопроводной системе при увеличении рабочей температуры. График допустимых избыточных давлений представлен на рис. 1.11 [2].

Падения давления в трубопроводе рассчитывают по формуле

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho}{2} v^2,$$

где ΔP — падение давления на участке трубы; λ — коэффициент трения; L — длина участка трубы; d — внутренний диаметр трубы; ρ — плотность перекачиваемой среды; v — скорость потока.

В России трубопроводные системы являются основой национального благосостояния, поскольку они широко применяются при добыче и транспортировке углеводородов. Для дальнейшего развития трубопроводных систем требуются специалисты все более высокой квалификации в данной области.

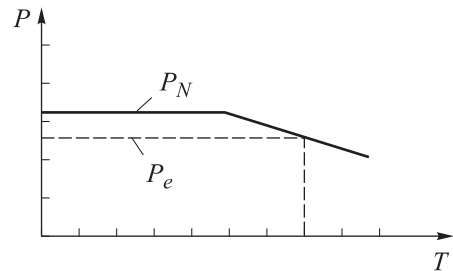


Рис. 1.11. График допустимых избыточных давлений [4]

1.6. Визуально-измерительный метод неразрушающего контроля

Визуально-измерительный контроль (ВИК) — наиболее простой, но очень полезный и самый старый метод неразрушающего контроля, применяемый для всех типов объектов контроля (рис. 1.12) [6]. Неразрушающий контроль объектов обычно начинают с проведения ВИК для быстрого обнаружения поверхностных дефектов в изделиях и сварных соединениях. Простая технология контроля, несложное оборудование, малая трудоемкость — основные достоинства этого метода.



Рис. 1.12. Классификация систем визуально-измерительного контроля

Метод ВИК позволяет оценить техническое состояние объектов по внешним признакам на основе определения:

- геометрических размеров конструкций и их сечений;
- наличия трещин, отколов и разрушений;
- состояния защитных покрытий (лакокрасочных, штукатурок, защитных экранов и др.);
- прогибов и деформаций конструкций;
- нарушения сцепления арматуры с бетоном;
- наличия разрыва арматуры;
- состояния анкеровки продольной и поперечной арматуры;
- степени коррозии бетона и арматуры.

Минимальный размер дефектов, обнаруживаемых невооруженным глазом, составляет несколько десятых долей миллиметра, а при использовании оптических систем уменьшается до десятков микрон.

Ввиду того что некоторые технические средства ВИК широко доступны, а процедура контроля кажется довольно простой, ошибочно предполагать, что освоение этого метода может быть легким и быстрым. Фактически ВИК является современным сложным методом контроля.

Основной физической принцип ВИК — обследование объекта с применением оптических и измерительных средств.

Область применения ВИК — обнаружение различных поверхностных дефектов, измерение их параметров и геометрических размеров.

Специальные требования — наличие освещения на месте проведения контроля.

Для успешного проведения визуального и измерительного контроля специалист-дефектоскопист должен обладать следующими особенностями:

- ближним зрением остротой 1,0 (хотя бы в очках);
- умением организовать оптимальное по интенсивности и направлению освещение зоны контроля;
- способностью обеспечить надлежащую подготовку контролируемой поверхности;
- умением пользоваться средствами ВИК;
- знанием критериев допустимости дефектов в различных отраслях промышленности.

Достоинства ВИК:

- простота контроля;
- несложное оборудование;
- низкая стоимость;
- сравнительно небольшая трудоемкость.

Недостатки ВИК:

- невозможность обнаружения скрытых дефектов;
- необходимость доступа для визуального осмотра объекта или для применения оптического приспособления;
- более низкая чувствительность, чем у других методов контроля поверхности.

От других методов неразрушающего контроля ВИК отличается границами спектральной области электромагнитного излучения, используемого для получения информации об объекте. Так, для радиационного контроля используются коротковолновое рентгеновское и гамма-излучения, для теплового контроля — более длинноволновый инфракрасный диапазон, а для ВИК — промежуточное по длине волны видимое излучение (обычный свет), т. е. излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение (рис. 1.13). Поэтому это единственный неразрушающий метод контроля, который может выполняться и часто выполняется без какого-либо оборудования и проводится с использованием простейших измерительных средств.

При визуально-измерительном контроле оперируют с видимым излучением (рис. 1.14). Практическое значение при визуальном контроле имеют световые фотометрические характеристики.

Освещенность рабочего места при визуально-измерительном контроле — важная величина, ее значение должно быть не менее 500 лк. Рабочую поверхность на стационарном рабочем месте целесообразно покрывать светлым пластиком, при этом наиболее благоприятным фактором является полуотраженное освещение. При выборе освещенности на рабочем месте учитывают наименьший размер дефекта, который требуется обнаружить, и контраст дефекта на поверхности объекта контроля. Расстоянием наи-

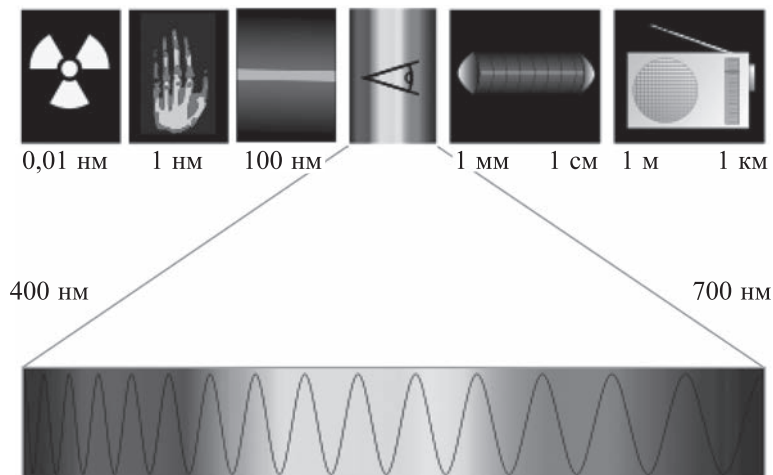


Рис. 1.13. Диапазоны электромагнитного излучения и соответствующие длины волн (слева направо): гамма-, рентгеновское, ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное и радиоизлучение

лучшего зрения от нормального невооруженного глаза до объекта контроля считается 250 мм.

Эффективность применения метода ВИК зависит от правильности выбора геометрических, спектральных, светотехнических, временных характеристик и условий освещения и наблюдения объекта контроля. Для большей эффективности следует обеспечить максимальный контраст дефекта подбором углов освещения и наблюдения, спектра и интенсивности источника, а также состояния поляризации и степени когерентности света. Также учитывают различия в оптических свойствах дефекта и окружающей его области фона.

Контраст определяют по формуле

$$K = \frac{L_o - L_{\phi}}{L_o + L_{\phi}},$$

где L_o , L_{ϕ} — яркость объекта и фона соответственно.

Средства визуальных измерений выбирают с учетом метрологических, эксплуатационных и экономических показателей. Каждое измерительное средство позволяет проводить измерения с предельной погрешностью (точностью), указываемой в паспортных данных. Средства измерений выбирают в зависимости от допустимой погрешности измерений. При подсчете допустимой погрешности измерений ее принимают равной 1/5...1/3 допуска на размер.

Для повышения точности измерений необходимо:

- использовать более точное измерительное средство;
- устанавливать шкалу в нулевое положение по концевой мере более высокого разряда;



Рис. 1.14. Физические характеристики, используемые при работе с видимым излучением

- доверять измерения специалистам высокого уровня;
- выравнять температуру измерительного средства и измеряемого изделия при температуре 20 °С;
- проводить измерения несколько раз и принимать за действительное значение среднее значение размера;
- выполнять рекомендации по обращению с измерительными средствами.

Перед началом работы измерительное средство необходимо протереть чистой мягкой тканью, особенно тщательно — измерительные поверхности, и проверить установку измерительных элементов на нуль. При измерении

не допускается проводить измерительными поверхностями по поверхностям деталей, не рекомендуется долго держать измерительный инструмент в руке, так как нагрев его частей вызывает дополнительную погрешность измерений.

Средства визуально-измерительного контроля относят к классам оптических и оптико-механических приборов. Они бывают контактными и бесконтактными, проекционными, интерференционными, лазерными и основанными на других физических принципах [7].

Простым и удобным средством измерений являются накладные (контактные) *измерительные лупы* (ЛИ-3-10^x, ЛИ-4-10^x и др.). Они содержат стеклянную плоскую шкалу (обычно длиной 15 мм, цена деления 0,1 мм) и лупу с увеличением 10^x.

Измерительные микроскопы (в том числе портативные накладные) содержат набор измерительных шкал, расположенных в плоскости изображения микрообъектива и позволяющих контролировать линейные размеры деталей, радиусы, углы и т. п. Точность измерения с помощью окулярного винтового микрометра типа МОВ-15^x достигает 0,5...1,0 мкм при увеличении 10^x...20^x. Поле зрения микроскопов 1...20 мм.

Промышленные *оптические* и *видеоэндоскопические системы* применяются для дистанционного наблюдения. Они обеспечивают измерения как с наружной, так и с внутренней стороны изделий, однако доступ во внутренние полости некоторых объектов бывает ограничен. Такими объектами в первую очередь являются химические реакторы, теплообменники, сосуды высокого давления, компрессоры, двигатели газоперекачивающих установок, узлы и агрегаты энергоустановок, парогенераторов.

Особое значение придается приборам, позволяющим выполнять высокоточные измерения линейных размеров и глубин в зоне контроля. Такие приборы дают возможность не только обнаружить дефект, но и определить скорость его развития и степень опасности.

Промышленные эндоскопические системы бывают следующих типов:

- жесткие эндоскопы (бороскопы), в том числе составные (секционные);
- гибкие оптоволоконные эндоскопы;
- видеоэндоскопы.

Жесткие эндоскопы [8] предназначены для визуального контроля узлов, к которым возможен прямолинейный доступ (особенно когда эндоскопический контроль запланирован на стадии проектирования изделия). Они используются для осмотра газоздушного тракта авиадвигателей, полостей машин и механизмов, пустот в стенах зданий, каналов и труб малого диаметра, полостей отливок, шлифовальных и хонингованных отверстий.

Жесткий эндоскоп (оптическая трубка) содержит визуальную и осветительную системы. Визуальная система состоит из линзовой, стержневой или градиентной оптики, заключенных во внутреннюю металлическую трубку. Осветительная система включает в себя оптическое волокно, которое расположено между двумя металлическими трубками — наружной и внутренней.

Для освещения зоны контроля применяют стандартные источники света с ксеноновыми, галогенными или ультрафиолетовыми лампами мощностью 150, 200, 300 Вт. Результаты осмотра можно фиксировать с помощью фото- или видеокамеры либо передавать на монитор с высокой разрешающей способностью.

Диаметр рабочей части приборов может составлять 1,7...10 мм; длина обычно варьируется в пределах 100...1000 мм. Основные углы направления наблюдения 0, 30, 45, 75, 90 и 110°. Угол направления наблюдения может быть и плавно изменяемым — в эндоскопах с качающейся поворотной призмой, положение которой варьируют дистанционно с помощью регулировочного кольца, установленного вблизи окуляра. Угол поля зрения, как правило, составляет 50...90°. Необходимо учитывать, что увеличение поля зрения приводит к уменьшению детализации, т. е. можно видеть много и мелко или мало и крупно. Основное преимущество жестких эндоскопов — высокая разрешающая способность (до 25 линий/мм).

Гибкие оптоволоконные эндоскопы применяются, когда объект имеет сложную геометрию (например, газотурбинные, электрические двигатели, турбогенераторы, котлы, теплообменники, трубы водоснабжения, канализации, промышленные коммуникации). В этом случае для визуального контроля применяют гибкие эндоскопы, в которых визуальная система и система передачи света состоят из волоконной оптики, смонтированной внутри гибкой трубки с управляемым *дистальным* (т. е. находящимся на расстоянии от оператора) концом.

Канал для передачи изображения представляет собой линзовый объектив, который строит изображение исследуемого объекта на торце оптоволоконного кабеля передачи изображения. Изображение, полученное на конце кабеля, рассматривается через окуляр. Гибкие эндоскопы имеют управляемый дистальный конец, изгибающийся в одной или двух плоскостях, что, как правило, определяется диаметром рабочей части. Обычно в эндоскопах малого диаметра (6 мм и менее) изгиб осуществляется в одной плоскости, в более крупных — в двух плоскостях. Эндоскопы могут комплектоваться насадками или объективами бокового наблюдения. Это важно для осмотра, например, стенок труб малого диаметра, где изгиб дистального конца невозможен.

Основные характеристики гибких эндоскопов: длина рабочей части 0,5...3,0 м, диаметр зонда 2,4...12,4 мм, углы поля в пространстве предметов 60, 90°, направление обзора 0, 90° (с объективом бокового обзора), визуальная разрешающая способность на расчетном рабочем расстоянии 6 линий/мм и более, диапазон рабочих температур рабочей части эндоскопа –10...+80 °С, *артикуляция* (изгиб дистального конца прибора) — двух- или четырехсторонняя, материал оплетки зонда — вольфрам, стойкий к агрессивным средам. Основным недостатком гибких эндоскопов по сравнению с жесткими является более низкая разрешающая способность.

Видеоэндоскопы — переносные гибкие приборы, предназначенные для оптико-визуального контроля деталей в труднодоступных местах механиз-

мов, машин и оборудования. Дистальный конец эндоскопов оснащен цветной видеокамерой с высокой разрешающей способностью, изображение от которой передается на цветной жидкокристаллический экран. В сочетании с высококачественным световодом и галогенной лампой видеоэндоскоп обеспечивает яркость и четкость изображений рассматриваемых объектов на экране монитора. Набор сменных объективов, а также насадка бокового наблюдения позволяют выбрать наиболее приемлемые параметры оптической системы для конкретных целей обследования.

Видеоэндоскопы изготавливают диаметром 4...10 мм, длиной 1,5...30 м. Зона контроля освещается внешним источником света по оптоволоконному каналу, освещенность регулируется вручную или автоматически. Направление осмотра изменяется дистанционно путем артикуляции.

К основным дефектам трубопроводных систем, регистрируемых средствами ВИК, относятся коррозия, деформация, трещины и неоднородности сварных соединений.

Трещины выявляют путем осмотра поверхностей конструкций, а также выборочного снятия с конструкций защитных или отделочных покрытий. Следует определить положение, форму, направление трещин, распространение по длине, ширину раскрытия, глубину, а также установить, продолжается или прекратилось их развитие. Расположение трещин схематично наносят на чертежи общего вида развертки стен здания, отмечая номера и даты. На каждую трещину составляют график ее развития и раскрытия.

Ширину раскрытия трещин рекомендуется измерять в первую очередь в местах их максимального раскрытия и на уровне растянутой зоны элемента. Для этого используют, например, микроскоп МПБ-2 с ценой деления 0,02 мм, пределом измерения 6,5 мм, лупы с масштабным делением или другие приборы и инструменты, обеспечивающие точность измерений не хуже 0,1 мм.

Глубину трещин устанавливают, применяя иглы и проволочные щупы, а также с помощью ультразвуковых и электромагнитных приборов.

Визуальный контроль сварных соединений, как правило, выполняют невооруженным глазом или с помощью лупы. Увеличение луп должно быть четырех–семикратным при контроле основного материала и сварных соединений в процессе изготовления, монтажа и ремонта и до двадцатикратного при техническом диагностировании. Контролируемая зона сварного соединения должна включать в себя весь объем металла шва, а также примыкающие к нему участки основного металла по обе стороны от шва шириной не менее 20 мм.

Перед проведением ВИК поверхность объекта в зоне контроля подлежит зачистке до чистого металла от ржавчины, окалины, грязи, краски, масла, шлака, брызг расплавленного металла, продуктов коррозии и других загрязнений, препятствующих проведению контроля. На поверхности сварных соединений и наплавов, прошедших контроль, не допускаются: трещины всех видов и направлений, поры, свищи, подрезы, непровары, несплавления, наплывы, прожоги, незаплавленные кратеры.

1.7. Магнитные методы неразрушающего контроля

Приборы, используемые для неразрушающего контроля методом *конструктивной геолокации*, позволяют обнаруживать сигналы, отраженные от различных структур, расположенных в относительной близости от поверхности. Исследуемой средой могут быть земля, вода, стены зданий и т. п.

Георадар — радиолокатор, который, в отличие от классического радара, применяется для зондирования не воздушного пространства, а исследуемой среды, и получения разрезов грунта без бурения или раскопок.

Прибор просвечивает грунт на глубину до 20...30 м. Часто георадар применяют для составления карт подземных коммуникаций, в том числе трубопроводов, и уровня грунтовых вод.

Передающая антенна георадара излучает короткие импульсы высокочастотных (обычно поляризованных) радиоволн и направляет их в землю. Когда волна падает на находящийся под землей предмет или на границу раздела материалов с разными диэлектрическими константами, в отраженном сигнале обнаруживаются изменения параметров, которые улавливаются и фиксируются принимающей антенной.

Глубина действия георадара ограничена электрической проводимостью земли, частотой и мощностью излучения:

- с возрастанием электрической проводимости глубина проникания уменьшается, поскольку увеличивающиеся тепловые потери приводят к потере сигнала на глубине;

- излучение более высокой частоты затухает быстрее, чем низкочастотное, но дает лучшее разрешение изображения.

Хорошее проникание (до 15 м) можно получить в сухих песчаных почвах или в сухих материалах типа гранита, известняка и бетона (для льда была достигнута глубина проникания до нескольких сотен метров). Во влажных и (или) глиноземных почвах, а также в почвах с высокой электрической проводимостью глубина проникания иногда может составлять лишь несколько сантиметров.

Антенна георадара обычно находится в контакте с поверхностью земли для получения максимальной силы сигнала, но может быть расположена и над землей. Современный георадар — сложный геофизический прибор. Основной блок георадара состоит из электронных компонентов, выполняющих следующие функции: формирование импульсов, излучаемых передающей антенной; обработка сигналов, поступающих с приемной антенны; синхронизация работы всей системы. Таким образом, георадар состоит из трех основных частей: антенной части, блока регистрации и блока управления. Антенная часть включает в себя передающую и приемную антенны. Под блоком регистрации понимают ноутбук или другое записывающее устройство, а роль блока управления выполняет система кабелей и оптоэлектрических преобразователей.

Достоинства метода геолокации:

- универсальность — возможность использования в геологии, транспортном строительстве, промышленном и гражданском строительстве, экологии, археологии, оборонной промышленности и т. д.;
- отсутствие необходимости бурения или раскопок.

Недостатки метода геолокации:

- невозможность использования во влажных почвах и почвах с высокой электрической проводимостью (например, в глине или засоленной почве);
- ограничения, связанные с рассеиванием сигнала на неоднородностях (например, в каменистых почвах);
- сложность толкования полученных изображений неопытным исследователем, необходимость профессиональной экспертизы для эффективного планирования и интерпретирования показаний георадара;
- относительно высокое потребление энергии в случае обширных площадей исследования.

Для исследования полей механических напряжений возможно применение приборов класса *электромагнитных измерителей напряжений*. Принцип их действия основан на использовании магнитоупругого эффекта, под которым понимается свойство ферромагнитных материалов изменять магнитное состояние под влиянием механических напряжений. На магнитоупругом эффекте основан принцип действия магнитоупругих и магнитоанизотропных преобразователей. В отличие от тензометрии, позволяющей определять механические напряжения лишь в точках расположения датчиков, данный метод дает возможность оценивать распределение механических напряжений по всей контролируемой площади объекта.

Магнитоанизотропный метод базируется на применении специальных преобразователей, в которых используется анизотропия магнитных свойств, возникающая в ферромагнетике при его нагружении внешней силой.

Магнитная анизотропия — зависимость магнитных свойств (в узком смысле — намагниченности) от выделенного направления в образце, т. е. неодинаковость магнитных свойств объекта по разным направлениям. Она существенно влияет на процессы намагничивания и перемагничивания, на магнитную доменную структуру и другие свойства магнетиков. Существуют различные виды магнитной анизотропии:

- зависимость намагниченности от ее направления относительно кристаллографических осей в кристаллах, называемая *естественной кристаллографической* магнитной анизотропией;
- магнитная анизотропия, возникающая вследствие магнитоупругих деформаций при наличии внешних или внутренних напряжений, а также вследствие анизотропии формы образца.

Магнитоанизотропный метод применим для исследования ферромагнитных металлов и их сплавов. Метод используется не только для оценки механических напряжений, но и для поиска дефектов и обнаружения мест их возможного образования. Максимальная глубина эффективного обнаружения составляет 9...12 мм.

Индикатор механических напряжений предназначен для определения параметров напряженно-деформированного состояния ферромагнитного металла в исследуемой зоне, обнаружения зон концентрации механических напряжений и градиентов разности главных механических напряжений, которые являются причиной образования дефектов.

Магнитоанизотропный метод пока используется в дополнение к традиционным методам неразрушающего контроля для получения оперативной информации о напряженном состоянии металла.

Данный метод основывается на регистрации условий разрушения твердого тела, обусловленных наличием местной концентрации механических напряжений и высоким градиентом разности главных механических напряжений. Зарождение дефекта происходит в точке концентрации напряжений, его развитие — в направлении градиента. Если нет концентратора напряжений или достаточно высокого градиента напряжений, то трещина не зарождается и не развивается. Если дефект есть, но нет высокого градиента напряжений, то трещина не развивается. При наличии названных условий в точке, где на данный момент нет дефекта, он непременно появится в ближайшем будущем, что и наблюдается на практике.

Таким образом, для гарантирования безопасной работы конструкции требуются не констатация наличия дефекта и измерение его параметров, а определение условий, в которых находится исследуемый участок конструкции. Следовательно, первыми операциями диагностирования должны быть поиск и оценка концентраторов механических напряжений и высоких уровней разностей главных механических напряжений. Затем (но не ранее!) следует применять методы дефектоскопии для исследования выявленных участков. В результате исключаются случаи так называемых внезапных и непредсказуемых разрушений конструкций в местах, успешно выдержавших испытания методами дефектоскопии, а также исключаются затраты на ремонт конструкций со «спящими» дефектами.

Высокие значения погрешностей, получаемые при стандартном подходе к решению задачи, и игнорирование некоторых физических явлений долгое время оставались препятствиями для внедрения электромагнитных методов контроля на практике. Известно, что верхний слой металла (глубиной до 0,2 мм) находится в нехарактерном для конструкции напряженном состоянии (наклеп, азотирование, цементация, механические микроцарапины и пр.).

Другими причинами низкой достоверности контроля механических напряжений с помощью электромагнитных полей являются магнитомеханический гистерезис и попытки получения результата по одному параметру петли гистерезиса (например, только по коэрцитивной силе или только по остаточной индукции). Для этого служат, например, измерители механических напряжений, в которых используется эффект так называемой магнитной памяти металла. А поскольку при монтаже стальных конструкций применяется исходный материал, испытывавший в процессе подготовки и монтажа многочисленные знакопеременные механические воздействия, в том числе

и местные пластические деформации, измерения по одному параметру петли гистерезиса нередко приводят к ложным результатам.

Описанный метод основан на факте, что полезная информация содержится в нескольких параметрах петли гистерезиса. При этом используют специальный алгоритм обработки информации. Любая зависимость между магнитной индукцией B и механическим напряжением $\bar{\sigma}$ имеет точку инверсии, после которой связь между B и $\bar{\sigma}$ становится обратной, т. е. один и тот же уровень выходного сигнала может быть получен для двух различных механических напряжений. Это явление магнитомеханического гистерезиса.

Детальный учет физической природы явления, а также того факта, что полезная информация содержится не в одном, а в нескольких параметрах петли гистерезиса, позволили разработать особую модификацию способа электромагнитного измерения напряжений. Специальная программа для обработки информации и ее представления в виде карт механических напряжений устанавливается в персональный компьютер.

Основные отличия магнитоанизотропного метода от известных методов неразрушающего контроля заключаются в следующем.

1. Для применения магнитоанизотропного метода не требуется дополнительного нагружения объекта контроля, как, например, при использовании акустоэмиссионного метода. При нагружении испытательным давлением возможно развитие концентраторов механических напряжений, которые до испытания были безопасны, но получили развитие в результате действия дополнительной нагрузки. Это может привести к разрушению при последующей эксплуатации. Кроме того, акустоэмиссионный метод является более дорогостоящим и трудоемким.

2. Тестовое магнитное поле, создаваемое магнитоанизотропным датчиком, не оказывает влияния на структуру металла и не вызывает остаточной намагниченности в отличие от большинства магнитных методов.

3. Приборы на основе ультразвукового и рентгеновского методов имеют предел минимальных размеров выявляемых дефектов. На точность оценки размеров дефектов существенно влияют качество подготовки поверхности и наличие экранов. А ведь известно, что величина дефекта и степень его опасности слабо связаны между собой (например, самое опасное место — вершина трещины, которая не всегда выявляется такими приборами). Магнитоанизотропный метод позволяет оценивать степень концентрации механических напряжений, поэтому размеры дефектов на его показания не влияют, важны лишь параметры поля механических напряжений.

4. В отличие от ультразвукового метода магнитоанизотропный метод не требует зачистки поверхности и снятия слоя изоляции толщиной до 4 мм.

5. Приборы на основе магнитоанизотропного метода нейтральны к воздействию внешних магнитных полей на исследуемый объект контроля и имеют высокую воспроизводимость результатов. Результат их работы — *картограммы* распределения параметров полей механических напряжений, а не гистограммы магнитных полей, как у некоторых других приборов, предназначенных для измерения концентрации напряжений.

6. Сигнал, получаемый на выходе магнитоанізотропного датчика, предоставляет информацию о повороте вектора магнитных моментов доменов, а потому количественно связан именно с механическими напряжениями, точнее — с разностью главных механических напряжений. Поверхность контролируемой зоны измеряется датчиком с шаговыми движениями, результаты сканирования сохраняются в компьютере. Программа сканирования требует выполнять не менее 25 замеров по сетке площадью не менее 10×10 см. В соответствии со специальной программой строятся и выводятся на дисплей компьютера карты концентраций и градиентов. По этим картам в соответствии с установленной процедурой оценивается уровень опасности в контролируемой зоне. Критерии приемки объекта зависят от расположения участка контроля и условий эксплуатации объекта.

1.8. Радиографический метод неразрушающего контроля

Радиографический (от лат. *radio* — излучаю и греч. *grapho* — пишу) контроль — метод неразрушающего контроля сплошности твердых тел, основанный на просвечивании объекта ионизирующим излучением и регистрации прошедшего через объект излучения. Основной физический принцип радиографического метода неразрушающего контроля состоит в том, что ионизирующее излучение, проходя сквозь объект, ослабляется пропорционально его плотности и толщине. По результатам измерений интенсивности излучения за объектом определяют наличие в нем дефектов.

Область применения метода — обнаружение внутренних дефектов.

Специальные требования — обеспечение защиты людей от ионизирующего излучения; обеспечение доступа к обеим сторонам объекта.

Достоинства радиографического метода:

- лучший метод для обнаружения внутренних объемных дефектов;
- наличие объективного документа о результате контроля (радиограмма);
- возможность контроля объектов из любых материалов;
- отсутствие необходимости калибровки на рабочем месте.

Недостатки радиографического метода:

- риск в работе с ионизирующим излучением;
- невозможность определения глубины дефекта;
- критичность ориентации плоскостных дефектов для обнаружения;
- высокая стоимость;
- ограничение объектов по толщине;
- необходимость доступа к обеим сторонам объекта.

Метод широко применяется для обнаружения, локализации и определения параметров поверхностных и внутренних дефектов сварных изделий, отливок, изделий из композиционных материалов, бетона и т. п. Радиография используется в случае контроля объектов сложных форм, при невозможности применения контактных методов, в случае многослойных структур. Результаты радиографического контроля легко интерпретируются.

Радиографический метод отличается от других методов неразрушающего контроля границами спектральной области электромагнитного излучения, используемого для получения информации об объекте. Так, для визуального контроля используют видимое излучение (обычный свет), для теплового — более длинноволновый инфракрасный диапазон, а для радиографического контроля — коротковолновые рентгеновское и гамма-излучения. При этом человеческий глаз может воспринимать только узкую часть спектра — видимый диапазон, а все, что находится левее и правее него на шкале диапазонов электромагнитного излучения, зрительных ощущений у человека не вызывает. Поэтому, в то время как ВИК можно выполнять без какого-либо специального оборудования или с помощью простейших оптических средств, для теплового и радиационного контроля необходимы приборы, чувствительные к излучению в инфракрасной и рентгеновской или гамма-областях спектра соответственно.

Ионизирующее излучение — поток частиц или квантов электромагнитного излучения, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации и возбуждению его атомов и молекул (рис. 1.15).

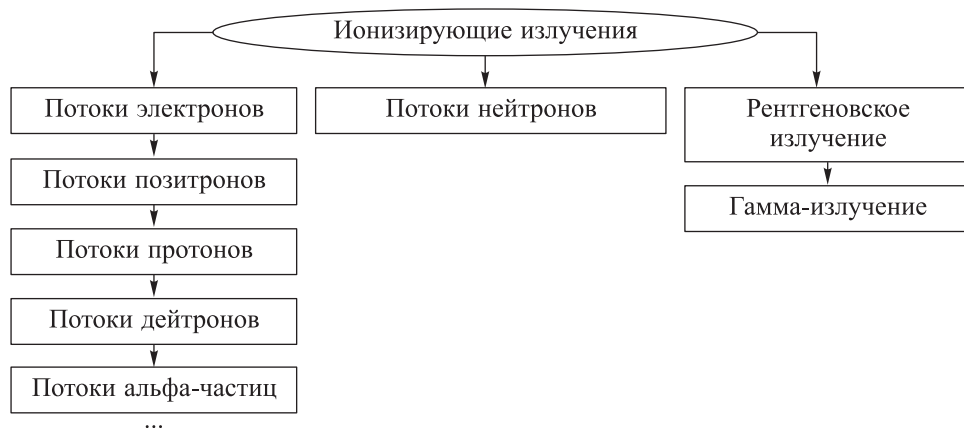


Рис. 1.15. Виды ионизирующих и косвенно ионизирующих излучений

Ионизация — образование положительных и отрицательных ионов и свободных электронов из электрически нейтральных атомов и молекул. Термином «ионизация» обозначают как элементарный акт (ионизация атома, молекулы), так и совокупность множества таких актов (ионизация газа, жидкости). Ионизация происходит при поглощении электромагнитного излучения (фотоионизация), при нагревании (термическая ионизация), при воздействии сильного электрического поля (полевая ионизация), при столкновении частиц с электронами и возбужденными частицами (ударная ионизация) и др.

К ионизирующему излучению относятся потоки электронов, позитронов, протонов, дейтронов, альфа-частиц и других заряженных частиц, а также потоки нейтронов, рентгеновское и гамма-излучения. Последние два на-

зывают *фотонными* ионизирующими излучениями. В радиографии обычно используются фотонные и нейтронное излучения.

Рентгеновское (X-rays) и гамма-излучения (γ -rays), как и остальные виды электромагнитного излучения, такие как видимый свет и ультрафиолетовое излучение, являются волнами и характеризуются их длиной и частотой. Они лежат в коротковолновой (высокочастотной) области электромагнитного спектра. Однако, согласно современным научным представлениям, любое электромагнитное излучение одновременно является потоком невесомых частиц (корпускул), называемых *квантами* или *фотонами*. Это свойство носит название *корпускулярно-волнового дуализма*.

Таким образом, фотон, являясь как бы «кусочком» волны, несет энергию, пропорциональную ее частоте ν : $E = h\nu$, где h — постоянная Планка. Именно поэтому рентгеновское и гамма-излучения, имеющие высокую частоту, обладают большими энергиями, что дает им возможность проходить сквозь твердое вещество. Это свойство используется в радиографии. Проникая в вещество, излучение рассеивается и поглощается, а глубина проникновения зависит от свойств материала и энергии фотонов.

Рентгеновское и гамма-излучения с физической точки зрения близки и имеют достаточно широкую область перекрытия с одинаковыми длинами волн. Однако гамма-излучение имеет внутриядерное происхождение, т. е. образуется при ядерных превращениях, например при распаде радиоактивного элемента, а рентгеновское излучение в основном возникает при торможении заряженных частиц в веществе (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Сравнительная характеристика рентгеновского и гамма-излучений

Ионизирующее электромагнитное излучение	Длина волны λ , м	Частота ν , Гц	Источник
Рентгеновское	$5 \cdot 10^{-12} \dots 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{16} \dots 6 \cdot 10^{19}$	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
Гамма-излучение	$< 5 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{16} \dots 6 \cdot 10^{19}$	Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад

Свойства рентгеновского и гамма-излучений:

- не ощущаются человеческими органами чувств (не могут быть увидены, услышаны и т. п.);
- движутся по прямой со скоростью света;
- траектория их движения не искажается электрическим или магнитным полем;
- могут дифрагировать на границах раздела сред;
- перемещаются внутри вещества до тех пор, пока не потеряют энергию при взаимодействии квантов с материалом объекта;

– степень их проникания в вещество зависит от его состава и их энергии;
– обладают достаточной энергией, чтобы ионизировать вещество, и могут повредить или разрушить живые клетки.

Для радиографического контроля используются различные рентгеновские аппараты [9].

По функциональным характеристикам рентгеновские аппараты подразделяют на *стационарные* (работающие в рентгеновских кабинетах, лабораториях, специальных помещениях и т. п.), *передвижные* (работающие в полевых условиях, временно оборудуемых помещениях и т. п.) и *переносные* (портативные).

По типу питания рентгеновской трубки аппараты можно классифицировать на импульсные, полупериодные, постоянного потенциала низкочастотные (500 Гц и менее), постоянного потенциала среднечастотные (1...10 кГц) и постоянного потенциала высокочастотные (более 10 кГц) .

В *импульсных* аппаратах питание рентгеновской трубки осуществляется кратковременными импульсами напряжения малой длительности, следующими с малой или средней частотой. Эффективность мощности таких аппаратов самая низкая, что обуславливает низкое качество изображения. Действие импульсного аппарата можно сравнить с фотографической вспышкой, которая дает большую мгновенную силу света, но практически нулевую среднюю эффективность. Однако импульсные аппараты имеют очень малые массу и размеры, а также низкую стоимость.

Полупериодные рентгеновские аппараты более совершенны, они содержат повышающий трансформатор, но не имеют умножителя. Выпрямителем напряжения служит рентгеновская трубка. Эффективность таких аппаратов как минимум в 2 раза хуже, чем аппаратов *постоянного потенциала*, работающих на аналогичной частоте. К полупериодным аппаратам относятся известные в России аппараты Balto (www.balteau-ndt.com) и Teledyne ICM (www.teledyneicm.com).

Низко- и среднечастотные аппараты постоянного потенциала содержат умножитель напряжения и обеспечивают питание рентгеновской трубки напряжением, приближенным к постоянному. Следует отметить, что эффективность работы умножителя зависит от частоты. При низкой частоте увеличиваются пульсации выходного напряжения и уменьшается эффективность аппарата. Примером низкочастотного аппарата является переносной аппарат РАП150.

Высокочастотные аппараты постоянного потенциала являются вершиной развития. В связи с высокой частотой преобразования напряжение на трубке таких аппаратов можно считать почти постоянным. Эффективность выхода рентгеновского излучения самая высокая и ограничивается только физическими характеристиками рентгеновской трубки. Представителями этого семейства являются аппараты Eresco, Smart, МСТ.

Аппараты с постоянной нагрузкой выпускают двух типов — *аппараты-моноблоки* и *аппараты кабельного типа*. У первых рентгеновская трубка и высоковольтный трансформатор смонтированы в единые блок-трансфор-

маторы, залитые маслом или заполненные газом. Вторые состоят из самостоятельного генераторного устройства, рентгеновской трубки и пульта управления.

Рентгеновские аппараты классифицируют по углу выхода рабочего пучка излучения: с *направленным* выходом и с *панорамным* выходом. К первой группе относятся аппараты, в которых направленный пучок излучения распространяется от анода рентгеновской трубки в конусе с углом раствора около 40° , при этом ось конуса перпендикулярна продольной оси трубки. Эти аппараты используются для контроля изделий с малой кривизной по участкам.

У вторых излучающий блок вынесен из трубки таким образом, что форма выходного пучка представляет собой полусферу. Панорамный способ просвечивания удобно применять при радиографическом контроле кольцевых сварных швов.

В зависимости от размеров фокусного пятна рентгеновские трубки подразделяют на нанофокусные, микрофокусные и стандартные. Типичные размеры фокусных пятен современных микрофокусных трубок находятся в пределах 1...100 мкм, стандартных — более 0,4 мм.

Радиографический метод неразрушающего контроля основан на том, что прошедшее через объект контроля излучение от источника излучения несет информацию о внутренней структуре объекта, например, о внутренних полостях или уплотнениях. Эта информация отображается на специальном детекторе в виде черно-белого изображения, называемого *рентгенограммой*, если изображение было получено с помощью рентгеновского излучения, или *радиограммой* в общем случае. В этой схеме могут быть использованы разные детекторы. По типу детекторов существующие методы радиографического контроля подразделяют на два класса — *плёночную* радиографию, в которой детектором является радиографическая пленка, и *цифровую*, в которой применяются цифровые приемники излучения (рис. 1.16).

Плёночная радиография позволяет получать радиограммы высокого качества, однако этот метод имеет ряд существенных недостатков:

- низкая эффективность, обуславливающая продолжительное время экспозиции;
- необходимость в регулярной закупке радиографической пленки;
- продолжительность и затратность проявки пленки;
- сложность проявки пленки в полевых условиях;
- подверженность персонала действию химикатов во время проявки пленки;
- сложность хранения большого числа отснятых снимков;
- ухудшение качества снимков со временем;
- субъективность при анализе радиограмм (отсутствуют цифровые возможности анализа).

В то же время цифровая радиография характеризуется рядом явных преимуществ:

- меньшие радиационная доза и время экспозиции, что уменьшает риск для оператора;

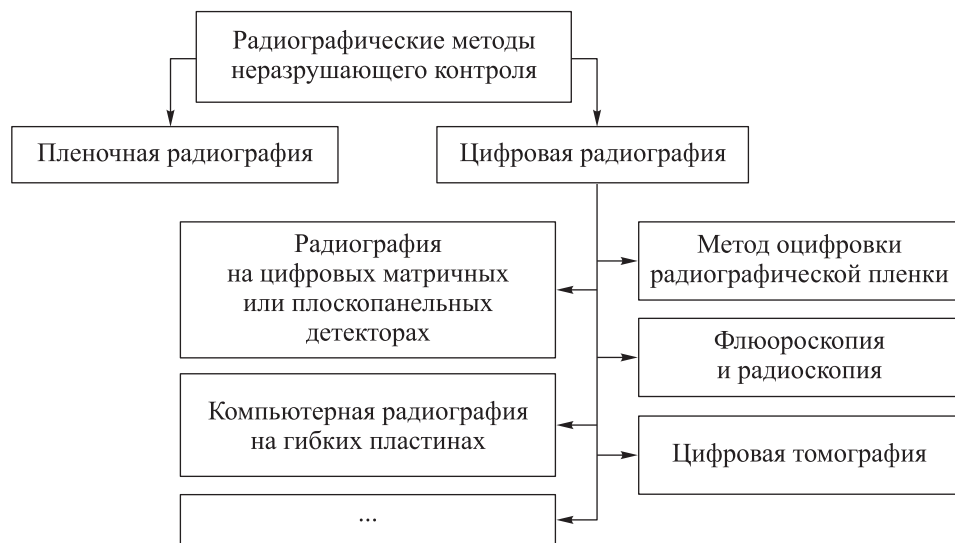


Рис. 1.16. Классификация радиографических методов неразрушающего контроля

- меньшие временные затраты на проведение контроля и большая продуктивность;
- отсутствие химикатов, а значит, их влияния на персонал и затрат на их хранение;
- хорошая сохранность цифровых радиограмм (не портятся со временем);
- удобство контроля в полевых условиях;
- цифровые возможности анализа радиограмм, удобство их хранения и пересылки;
- возможность использования многократных цифровых детекторов;
- существенное снижение затрат на проведение контроля.

Следует отметить, что в настоящее время организация на производстве цифровой радиографии требует немалых финансовых вложений, в основном вследствие стоимости соответствующего оборудования, в связи с чем пленочная радиография распространена гораздо больше.

1.9. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля

Ультразвуковой метод относится к акустическим методам контроля. *Акустические* методы подразделяют на две большие группы (рис. 1.17): в которых используются излучение и прием акустических волн (*активные* методы) и которые основаны только на приеме (*пассивные* методы). В каждой группе можно выделить методы, базирующиеся на возникновении в объекте контроля бегущих и стоячих волн или колебаний. Активные акустические методы основаны на использовании прохождения и отражения волн.

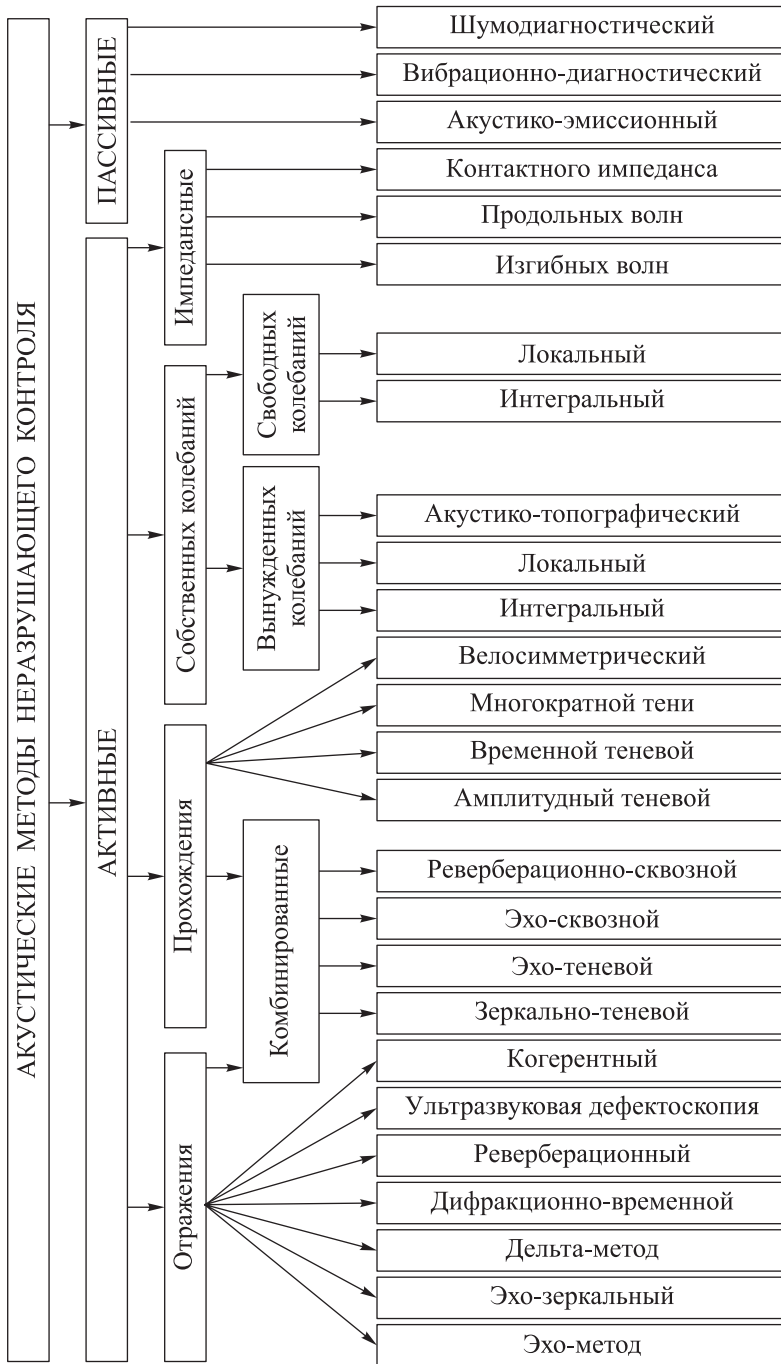


Рис. 1.17. Классификация акустических методов неразрушающего контроля

Комбинированные методы содержат признаки как методов отражения, так и методов преломления.

Рассмотрим подробнее методы *ультразвуковой дефектоскопии*. Для этого применяются ультразвуковые колебания частотой 0,1...10,0 МГц. Для получения таких частот используют пьезоэлектрические, магнитострикционные, электромагнитоакустические и другие преобразователи. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи, в которых активным элементом являются пьезоэлементы, изготовленные из монокристалла кварца или пьезокерамических материалов — титаната бария, цирконат-титаната свинца и др.

На поверхности пьезоэлементов наносят слои серебра, служащие электродами. При подведении к электродам переменного электрического напряжения пьезоэлемент совершает вынужденные механические колебания (растягивается и сжимается) с частотой электрического напряжения (*обратный пьезоэффект*). При воздействии на пьезоэлемент упругих механических колебаний на его электродах возникает переменное электрическое напряжение с частотой воздействующих механических колебаний (*прямой пьезоэффект*).

Амплитуда колебаний пьезоэлемента зависит от напряжения на электродах и соотношения частоты переменного напряжения и собственной частоты колебаний пьезоэлемента. Амплитуда максимальна при резонансе, когда собственная частота колебаний пьезоэлемента совпадает с частотой возбуждающего переменного напряжения. Подавая на пьезоэлемент переменное напряжение с частотой, отличной от собственной частоты колебаний, можно получить вынужденные колебания пьезоэлемента с любой частотой. Однако в этом случае излучаемая энергия будет меньше, чем при резонансной частоте.

В ультразвуковых дефектоскопах применяются преобразователи, рассчитанные на работу по *контактному* и *иммерсионному* способам, с возбуждением в контролируемом изделии преимущественно продольных, сдвиговых, поверхностных и нормальных волн.

По конструктивному исполнению преобразователи бывают прямыми и наклонными, отдельными, совмещенными и отдельно-совмещенными, с плоской или фигурной контактной поверхностью. Они могут посылать ультразвуковые колебания в изделие по нормали к его поверхности, под углом к нормали или по самой поверхности.

Все преобразователи имеют следующие элементы: корпус, пьезоэлемент, электроды, демпфер, защитное доньшко и контактное устройство. В состав преобразователя могут входить дополнительные элементы для стабилизации силы его прижатия к поверхности контролируемого изделия, подачи контактной среды, изменения угла наклона пьезоэлемента, фиксирования преобразователя относительно детали и т. п.

Пьезоэлемент является одним из основных элементов преобразователя. Его изготавливают из естественных или искусственных пьезоэлектрических материалов — *сегнетоэлектриков*. Известно, что мощность излучаемых ультра-

звуковых колебаний пропорциональна площади пьезоэлемента, поэтому для повышения чувствительности контроля эту площадь стремятся увеличить.

Иногда размеры пьезоэлемента увеличивают для повышения производительности контроля. Так, при контроле листового материала выгодно применять широкозахватные преобразователи, позволяющие исследовать большие площади, чем обычными преобразователями. Однако в некоторых случаях желательно, чтобы габариты преобразователя, а следовательно, и пьезоэлемента, были минимальными, например, при контроле небольших деталей или изделий, имеющих сложную конфигурацию. От диаметра пьезоэлемента существенно зависит протяженность ближней зоны, величина угла расхождения пучка ультразвуковых колебаний и характеристика направленности.

Основной физический принцип ультразвукового метода неразрушающего контроля — анализ отражения и преломления ультразвуковых колебаний, создаваемых датчиком, на границе раздела двух сред, чем фактически является дефект или поверхность контролируемого объекта.

Область применения — определение геометрических параметров и обнаружение в изделиях поверхностных и внутренних дефектов типа нарушений сплошности и однородности структуры.

Специальные требования — поверхность контролируемого объекта должна быть очищена и обработана до достижения параметра шероховатости не хуже $R_z 20$.

Достоинства ультразвукового метода:

- лучший метод для обнаружения внутренних плоскостных дефектов;
- возможность контроля как металлов, так и неметаллов;
- немедленный результат;
- не требует расходных материалов;
- мобильность аппаратуры;
- возможность применения при одностороннем доступе к изделию.

Недостатки ультразвукового метода:

- необходимость обработки поверхности;
- сложность интерпретации результатов;
- необходимость регулярной калибровки прибора;
- невозможность получения реальных размеров дефектов;
- необходимость «притертых» датчиков для контроля объектов диаметром менее 200 мм;
- сложность контроля материалов с крупнозернистой структурой.

Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов и металлоконструкций основана на принципах отражения и преломления акустических волн на границе раздела двух сред. Методы ультразвуковой толщинометрии, а также измерение размеров и координат дефектов основаны на измерении времени прохождения импульса между конкретными точками.

Этот метод незаменим при обнаружении пустот, трещин и дефектов, возникших в процессе производства и эксплуатации конструкций, при технологическом контроле и обследовании сложных объектов.

Импульс ультразвуковых продольных колебаний испускается электроакустическим преобразователем, прижатым к поверхности контролируемого изделия. Для улучшения проникания ультразвукового импульса в испытываемую среду используют специальную контактную смазку типа циатина или целлюлозной пасты. Импульс ультразвуковых колебаний подвергается многократным отражениям от конструкционных границ и неоднородностей. Отраженный звуковой импульс отображается на дисплее прибора как функция времени, и дефектоскопист может получить представление о поперечном сечении образца и расположении элементов, отражающих звук.

Для ультразвукового контроля обычно используют не непрерывные колебания, а кратковременные сигналы — импульсы. Их амплитуды должны быстро нарастать и через несколько микросекунд резко спадать до нуля. Основные параметры импульсов:

- амплитуда импульса — наибольшее по абсолютной величине отклонение колебательной величины за время действия импульса;
- длительность импульса — промежуток времени между началом и концом импульса, в течение которого отклонение колебательной величины превышает определенный уровень (например, 10 %) от максимальной амплитуды.

Для генерации излучения и приема упругих колебаний и волн применяют различные способы. Все они основаны на преобразовании энергии. В простейшем случае такое преобразование может происходить без изменения вида энергии: например, возбуждение акустических импульсов в бетоне ударом молотка. При этом кинетическая механическая энергия молотка преобразуется в механическую энергию упругой волны. Однако чаще возбуждение и прием упругих волн сопровождаются изменением вида энергии, например, переходом из электрической в механическую, и наоборот. В некоторых случаях используют многократные преобразования видов энергии. Так, при лазерном способе возбуждения ультразвуковая электрическая энергия генератора импульсов преобразуется сначала в световую, затем в тепловую и наконец в механическую энергию упругих волн. Устройства, служащие для возбуждения и приема упругих волн, называют *преобразователями*.

Различают обратимые и необратимые преобразователи. *Обратимые* преобразователи могут как излучать, так и принимать упругие волны (примеры — пьезоэлемент, электромагнитоакустический (ЭМА) преобразователь), *необратимые* — только излучать или только принимать их. Одни преобразователи (например, пьезоэлектрические) обычно требуют наличия между ними и объектом контроля промежуточной материальной среды (жидкости, слоя мягкого пластика). Другие (лазерные излучатели и приемники ультразвуковых колебаний, ЭМА-преобразователи) в такой среде не нуждаются и могут работать даже в вакууме.

Рассмотрим основные типы преобразователей, применяемых для генерации излучения и приема упругих колебаний при акустических методах контроля и диагностики.

Наибольшее распространение при акустических методах неразрушающего контроля и диагностики получили пьезоэлектрические преобразователи. Они обратимы, т. е. используются как для генерации излучения, так и для приема упругих колебаний и волн. Активным элементом преобразователя служит пьезоэлемент.

Пьезоэлементы изготавливают из материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами (некоторые кристаллы, специальная керамика). Эти материалы, называемые *пьезоэлектриками*, обладают пьезоэффектом (прямым и обратным). Прямой пьезоэффект (*direct piezoelectric effect*) состоит в появлении электрических зарядов при деформации пьезоэлемента, обратный (*inverse piezoelectric effect*) — в его деформации под действием электрического поля. Таким образом, пластина излучает благодаря обратному пьезоэффекту, а принимает — благодаря прямому.

Импульсные дефектоскопы (аналоговые и цифровые) широко применяют в промышленности. В дефектоскопах первой группы вся получаемая информация обрабатывается в аналоговой форме.

Амплитуды сигналов измеряют с помощью калиброванного делителя напряжения — *аттенюатора*. Процесс измерения состоит в сравнении амплитуд двух или нескольких сигналов, выраженных в относительных единицах или децибелах. В настоящее время применяют автоматические измерители амплитуды с цифровой индикацией. Иногда в них амплитуда пересчитывается в величину, характеризующую размер дефекта — эквивалентную площадь, и представляется на цифровом табло. Поскольку пересчет должен выполняться по разным законам в зависимости от типа преобразователя и характеристики материала объекта контроля, требуется предварительная настройка измерителя.

Современные дефектоскопы — цифровые приборы. В них принимаемый электрический сигнал после минимального усиления преобразуется в цифровой код, который подвергается дальнейшей обработке. Это повышает точность измерений, помехоустойчивость, позволяет получать больше информации. Вместо электронно-лучевой трубки в цифровых дефектоскопах используют катодно-люминесцентные или жидкокристаллические индикаторы. Они экономичнее, что позволяет применить автономное питание от аккумуляторной батареи. Основные потребительские возможности цифровых дефектоскопов значительно шире, а габариты и массы намного меньше, чем у их аналоговых предшественников. Существенно отличается и порядок работы с цифровыми дефектоскопами.

На экран *цифрового дефектоскопа* выводится меню, позволяющее выбирать нужные режимы настройки, изображения в виде А-, В- или С-сканов, параметры режима — рабочую частоту, уровень сигнала (в децибелах) и прочие необходимые сведения. Цифровые дефектоскопы обладают обширной памятью, позволяющей хранить данные о результатах многих предыдущих испытаний (включая параметры настройки, время проведения контроля и соответствующие изображения на экране). Иногда настройку выполняют в режиме диалога, когда прибор задает вопросы,

а дефектоскопист вводит ответ или выбирает один из предложенных вариантов ответа.

В памяти цифрового дефектоскопа можно хранить несколько предварительно подготовленных вариантов программы контроля и выбирать требуемый простым переключением. Возможны также первичная статистическая обработка и документирование результатов ранее выполненного контроля, а также обмен информацией с компьютером более высокого уровня.

Необходимость измерения толщин различных объектов (труб, стенок котлов, корпусов судов и т. п.) при одностороннем доступе к объекту контроля актуальна для большинства отраслей промышленности. Диапазон этих толщин 0,1...1000,0 мм, однако в большинстве случаев он составляет 0,5...50,0 мм.

Для измерения толщины при одностороннем доступе можно использовать эхо-дефектоскопы общего назначения. Однако целесообразнее пользоваться упрощенными специализированными портативными приборами — *ультразвуковыми толщиномерами*. Они разнообразны по исполнению и выпускаются в больших количествах многими отечественными и зарубежными фирмами. Все они портативны, имеют автономное питание и цифровые индикаторы. Современные толщиномеры снабжены жидкокристаллическими или люминесцентными дисплеями для представления дополнительной информации в графическом (А-развертка), цифровом и текстовом виде. Многие толщиномеры обладают памятью, сохраняющей результаты многочисленных измерений. Предусматривается также связь с внешним компьютером, используемым для обработки и документирования результатов измерений.

Приборы для контроля толщины объекта контроля с корродированными поверхностями часто не имеют экрана с временной разверткой. Отсчет толщины выполняют по цифровому табло.

Приборы, измеряющие многократное прохождение импульса в объекте контроля, часто снабжают экраном с разверткой типа А, используемой для выбора оптимального интервала донных сигналов и предотвращения возможной ошибки при измерении малых толщин. Когда толщина объекта контроля меньше минимального значения, измеряемого прибором, прибор может зафиксировать не первый донный сигнал (который слился с начальным импульсом), а второй. Наблюдая на экране серию донных сигналов, этой грубой ошибки можно избежать.

Для измерения толщины применяют прямые, отдельно-совмещенные и (редко) наклонные преобразователи. При работе с толщиномерами следует использовать только преобразователи, указанные в технических описаниях используемых приборов. Преобразователи должны иметь жесткий протектор, чтобы интервал времени распространения импульса в возможно меньшей степени зависел от силы прижатия преобразователя к объекту контроля.

При измерении толщины в процессе эксплуатации контролируемого оборудования возникает задача контроля при повышенной температуре.

Разработан цифровой преобразователь для контроля при температуре до 600 °С. В нем применены кварцевые призмы. Электроакустический экран выполнен из стальной фольги с прокладкой из миканита. Приемный и передающий отсеки заключены в цилиндрическую капсулу, которая перемещается в корпусе и прижимается к объекту контроля пружиной с нормированной силой. Благодаря этим мерам за 15 с работы при температуре объекта контроля 700 °С температура в зоне пьезоэлементов не поднимается выше 30 °С.

Как и цифровые дефектоскопы, в последние годы все больше используются новейшие *цифровые толщиномеры*. Их преимущества аналогичны преимуществам цифровых дефектоскопов: более высокая, чем у аналоговых, точность измерений, помехоустойчивость и информативность.

Становится все более популярным использование толщиномеров с ЭМА-преобразователями. Широкополосность таких преобразователей позволяет формировать короткие импульсы, что важно для достижения высокой точности. Электромагнитоакустические преобразователи возбуждают горизонтально поляризованные поперечные волны, скорость распространения которых примерно вдвое меньше, чем продольных. Это увеличивает измеряемый интервал времени и соответственно уменьшает погрешность измерений и минимальную измеряемую толщину.

1.10. Тепловизионный метод неразрушающего контроля

Тепловизионный метод неразрушающего контроля основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов.

Промышленные установки и технические системы, находящиеся в удовлетворительном рабочем состоянии, обладают характерным тепловым распределением, которое рассматривают в качестве эталона. Отклонения температуры от этого эталона могут быть вызваны скрытыми дефектами конструкций или материалов, которые снижают эффективность функционирования установок и систем, а также могут приводить к отказам. При функционировании технических установок и систем, при нагреве или охлаждении материалов дефекты различного типа проявляются на поверхности объектов контроля в виде зон повышенной или пониженной температуры. Существует два вида тепловизионного метода неразрушающего контроля — *пассивный* и *активный* (рис. 1.18).

В первом случае регистрируется собственная температура объекта в процессе его эксплуатации, во втором используется дополнительная тепловая стимуляция объектов контроля. Нагрев объектов при этом осуществляют оптическим излучением, микроволнами, электрическим током, вихревыми токами, газами или ультразвуком.

В настоящее время пассивные методы тепловизионного контроля широко применяются на практике, поскольку температура является важной

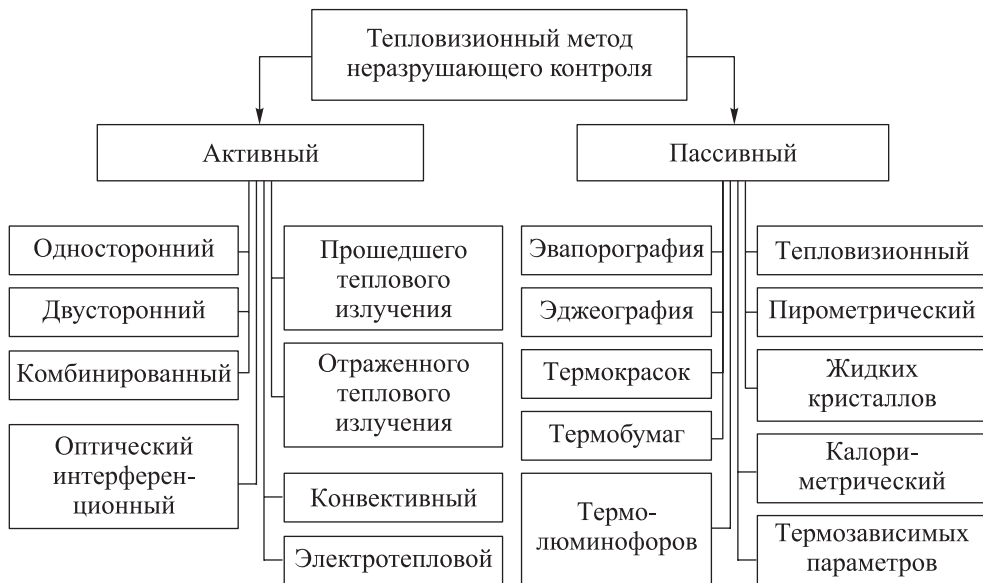


Рис. 1.18. Виды тепловизионного метода неразрушающего контроля

характеристикой качества работы промышленных установок, в которых непрерывно происходят процессы генерации, преобразования, передачи и потери тепловой энергии, например, при утечках из нефтепровода изменяется тепловая картина прилегающих территорий (рис. 1.19).

Аппаратурная база тепловизионного метода неразрушающего контроля включает контактные и бесконтактные средства регистрации температуры, однако на практике современные успехи этого метода связаны с использованием быстродействующих инфракрасных термометров, которые измеряют



а

б

Рис. 1.19. Место утечки продукта:

а — тепловая картина; *б* — видимый диапазон

температуру в отдельных точках объекта, и тепловизоров, измеряющих температуру во многих точках одновременно и составляющих карты температурных полей, называемых *термограммами*.

В соответствии с законом Планка все объекты с температурой выше абсолютного нуля ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) испускают электромагнитное излучение различных длин волн. Основная мощность излучения объектов с температурой $-40\dots+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ находится в невидимом для человеческого глаза инфракрасном спектральном диапазоне (человеческий глаз способен регистрировать свечение тел с температурой выше $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Тепловизор является прибором, регистрирующим оптическое излучение инфракрасного диапазона и преобразующим его в видимое изображение. Область спектральной чувствительности типичных тепловизоров находится в диапазоне $2\dots 14\text{ }\mu\text{m}$, при этом диапазон длин волн $2,0\dots 5,5\text{ }\mu\text{m}$ называется *средневолновым*, а наиболее часто используемый при тепловом контроле диапазон $7\dots 14\text{ }\mu\text{m}$ — *длинноволновым* [10–13].

Номенклатура современных тепловизионных устройств исключительно разнообразна: от компактных точечных термометров до высококачественных тепловизионных систем с форматом кадра 640×480 элементов и более. Тепловизоры различаются форматом кадра, частотой смены термоизображений, диапазоном измеряемых температур, температурным разрешением, размером, интерфейсом и программным обеспечением и т. п.

В электротехнике появление дефектов в виде окисления контактов, разрыва обмоток, коротких замыканий, трещин в электроизоляторах и т. п. приводит к аномальным тепловым сигналам, которые надежно фиксируются тепловизорами.

Инфракрасная термография позволяет оценивать уровень жидкого продукта в закрытых резервуарах с высокой точностью на больших расстояниях.

2. ИНЖЕНЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТРУБОПРОВОДНЫМ СИСТЕМАМ

Структура и состав стенда

для экспериментальных исследований трубопроводных систем

Для проведения экспериментальных исследований трубопроводных систем в практикуме используется лабораторный стенд. Условные обозначения для пневмо- и гидравлических схем регламентированы ГОСТ 2.784—96 «Обозначения условные графические. Элементы трубопроводов» (см. приложение 1).

Структурная схема лабораторного стенда представлена на рис. 1.1, 3D-модель стенда — на рис. 1.2.

В экспериментально-практическом разделе пособия нумерация рисунков и таблиц дана в соответствии с нумерацией экспериментальных работ.

Приведем определения элементов трубопроводных систем, которые используются в лабораторном стенде.

Воздушный компрессор — специальное устройство, которое используется для подачи и сжатия газов под давлением (паров хладагента, воздуха и т. д.). Воздушные компрессоры имеют широкий спектр применения.

Быстросъемное соединение — элемент соединения шлангов, рукавов, различных частей промышленного оборудования, позволяющий произвести быстрое соединение энергоконтуров.

Игольчатый кран — многооборотная запорная арматура, которую обычно устанавливают на вспомогательном отрезке трубопровода. Эти краны служат для контроля расхода жидкости, которая протекает по трубопроводу и для дросселирования пара.

Манометр — прибор для измерения избыточного давления.

Алгоритм включения и выключения стенда:

а) *подготовка к включению*

- 1) подключить быстросъемное соединение к компрессору;
- 2) закрыть игольчатый кран на стенде и компрессоре;
- 3) включить компрессор и накачать давление до 2 бар;

б) *выключение стенда*

- 1) выключить компрессор;
- 2) открыть игольчатый кран на стенде и компрессоре;
- 3) открыть спусковой клапан.

Экспериментальная работа № 1 Измерение давления в трубопроводных системах

Введение

В экспериментальной работе рассматриваются базовые положения курсов «Физика» и «Электрорадиоизмерения и метрология», касающиеся исследования давления в пневматических и гидравлических системах [7]. Уча-

щиеся закрепляют практические навыки по применению средств измерений давления, на макетах знакомятся с различными трубопроводными системами, анализируют их характеристики.

Данная экспериментальная работа направлена в первую очередь на получение опыта работы с манометрами (механическими и электронными), изучение погрешности манометров, а также калибровку электронного манометра с помощью второго, эталонного манометра.

Цель работы — закрепление учащимися теоретических знаний и приобретение практических навыков контроля и диагностики трубопроводных систем.

Основное внимание сконцентрировано на формировании и закреплении навыков самостоятельного расчета, построения гидравлических и пневматических каналов, непосредственного сбора экспериментальных данных и их обработки.

В рамках практикума в доступной форме учащиеся знакомятся с условиями эксплуатации трубопроводных систем и применением измерительных приборов. Получают навыки компоновки трубопроводных систем. Осваивают базовые расчетные модели. Учащиеся имеют возможность проверить результаты аналитических расчетов экспериментально.

Подготовка к работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности при работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.

2. Экспериментальная работа выполняется группами из двух-трех человек.

3. Получите у преподавателя допуск к экспериментальному стенду. Проверьте его комплектность.

4. Проанализируйте схемы, представленные в журнале лабораторной работы.

5. Убедитесь, что стенд обесточен: все выключатели, автоматы, рубильники находятся в положении «выключено».

6. Приступайте к выполнению работы только с разрешения преподавателя.

Структурная схема лабораторного стенда представлена на рис. 1.1, 3D-модель стенда — на рис. 1.2.

Проведение эксперимента

Получение показаний манометра

1. Перед началом работы необходимо проанализировать структурную и электрическую схемы устройства, сделать необходимые теоретические расчеты согласно журналу лабораторной работы.

По ходу выполнения работы надо вписать номера элементов по схеме (см. рис. 1.1 и 1.2).

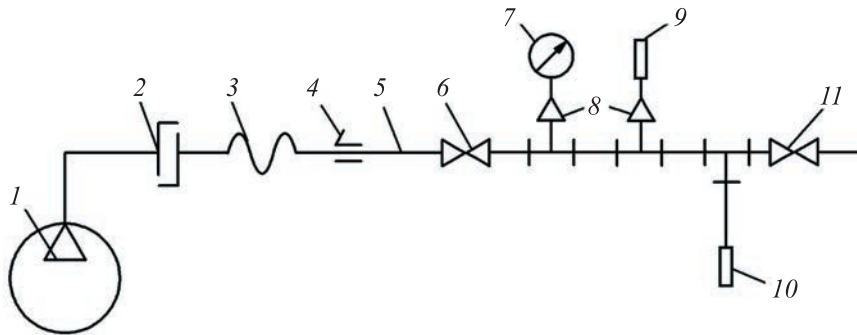


Рис. 1.1. Структурная схема лабораторного стенда:

1 — компрессор; 2 — быстросъемное резьбовое соединение; 3 — воздушный шланг; 4 — цанговое соединение 10 мм (муфта); 5 — труба 10 мм; 6 — регулируемый игольчатый кран; 7 — механический (эталонный) манометр (M1); 8 — переходник прямой с внутренней резьбой G1/4 — цанга 10 мм; 9 — цифровой манометр (M2); 10 — подключение контрольного датчика; 11 — кран цанга 10 мм

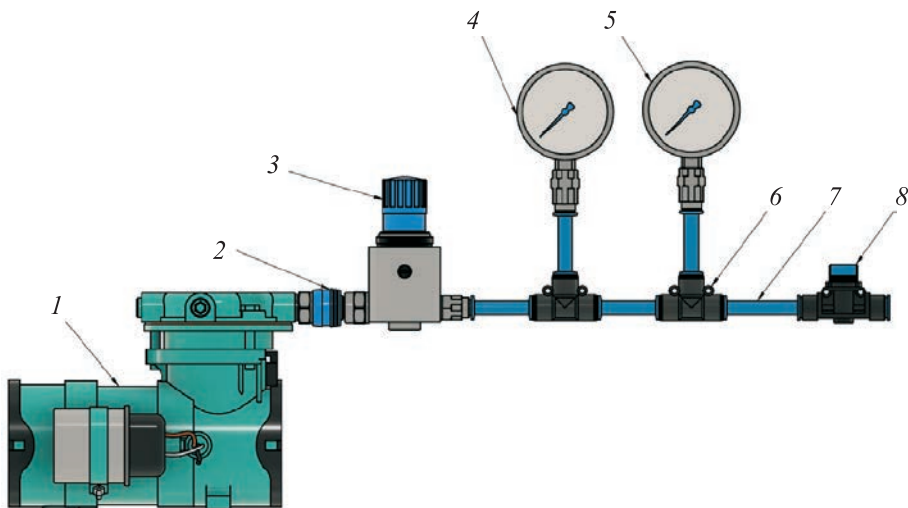


Рис. 1.2. 3D-модель лабораторного стенда:

1 — компрессор; 2 — быстросъемное резьбовое соединение; 3 — игольчатый кран; 4 — механический (эталонный) манометр (M1); 5 — цифровой манометр (M2); 6 — цанговый тройник; 7 — соединительная трубка; 8 — спусковой клапан

2. Изобразить пневматическую схему, состоящую из компрессора 1 (см. рис. 1.2), механического (M1) и цифрового (M2) манометров и запорной арматуры.

3. Включить питание стенда (для этого необходимо включить пилот, расположенный в правом верхнем углу стенда).

4. Убедиться, что выключатель компрессора 1 (см. рис. 1.2) находится в положении «0» и вилка его кабеля отключена от розетки.

5. Повернуть ручку регулятора давления против хода часовой стрелки и установить стрелку на манометре 4 (см. рис. 1.2) в нулевое положение.

Внимание! При вращении ручки игольчатого крана 3 (см. рис. 1.2) против хода часовой стрелки давление воздуха на выходе увеличивается, а при вращении по ходу часовой стрелки уменьшается.

6. Подсоединить воздушный шланг 3 (см. рис. 1.1) к муфте 4 (см. рис. 1.1) компрессора 1 (см. рис. 1.2).

7. Собрать пневматическую схему.

8. Закрыть краны (входной игольчатый и выходной шаровой) на трубопроводе.

9. Подсоединить компрессор 1 (см. рис. 1.2) к источнику питания на 220 В.

10. Поставить выключатель в положение «I».

11. Установить давление в ресивере 8 бар, контроль осуществлять по манометру 5 (см. рис. 1.2).

12. Установить вращением ручки регулятора давления на манометре 4 (см. рис. 1.2) 6 бар.

13. Перевести единицы измерения бар в килопаскали (1 бар = 100 кПа).

14. Открыть кран на переходнике 8 (см. рис. 1.1) к механическому манометру.

15. Медленно открыть игольчатый кран 6 (см. рис. 1.1), соединяющий компрессор 1 (см. рис. 1.2) с трубопроводом.

16. Записать показания механического манометра (М1) трубопровода в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Показания механического манометра

$P_{1,2,3,4,5,6}$, кПа	0	80	160	240	320	400
Показания						

Показания механического (эталонного) манометра (М1) рассчитывают по формуле

$$P_0 = \frac{n_0 P_{в.п.}}{n_{шк}},$$

где n_0 — показания манометра в делениях; $P_{в.п.}$ — верхний предел измерений манометра, кПа; $n_{шк}$ — общее число делений на шкале манометра.

17. Закрыть кран подачи давления 3 (см. рис. 1.2) от компрессора и открыть шаровой кран сброса давления в атмосферу 8 (см. рис. 1.1).

18. Повторить действия, описанные в пп. 12, 14–17, устанавливая давление 2 бар, 4 бар.

Проверка погрешности цифрового манометра

1. Подключить к сети электропитания источник питания, включить источник питания в работу и выставить рабочее напряжение 24 В с помощью встроенного регулятора.

2. Подключить к сети электропитания мультиметр, включить его в работу и выставить по шкале постоянное напряжение.

3. Включить персональный компьютер и подключить к нему через разъем RS-232 мультиметр.

4. Подключить цифровой манометр (M2) согласно схеме (см. рис. 1.2): привести схему, нагрузка 500 Ом (для удобного изменения напряжения в цепи).

5. Определить диапазон измерений:

$$D_{\text{изм}} = U_{\text{вых}} - U_{\text{н}},$$

где $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение, В; $U_{\text{н}}$ — напряжение нагрузки, В.

6. Определить $\Delta U_{\text{расч}}$:

$$\Delta U_{\text{расч}} = \frac{U_{\text{д}}}{5},$$

где $U_{\text{д}}$ — действующее значение напряжения.

В табл. 1.2 привести значения напряжения по точкам.

Таблица 1.2

Зависимость напряжения от давления

$P_{1,2,3,4,5,6}$, кПа	0	80	160	240	320	400
U , В						
$\Delta U_{1,2,3,4,5}$, В						

Определить разность (ΔU) между действительными $\Delta U_{1,2,3,4,5}$ и расчетными $\Delta U_{\text{расч}}$ значениями по формуле

$$\Delta U = \Delta U_{1,2,3,4,5} - \Delta U_{\text{расч}}.$$

Определить погрешность измерений:

$$\gamma = \frac{\Delta U}{D_{\text{изм}}} \cdot 100 \%,$$

где γ — относительная погрешность; ΔU — изменение напряжения, В; $D_{\text{изм}}$ — диапазон измерений, В.

7. Построить график изменения напряжения от давления.

Расчет абсолютной погрешности измерений

1. Для расчета абсолютной погрешности принять показания механического манометра (M1) за эталон. Вычислить значение абсолютной погрешности по формуле

$$\Pi_a = \frac{(P_N - P_0)}{P_0} \cdot 100 \%,$$

где P_N — показания цифрового манометра, кПа; P_0 — показания эталонного манометра, кПа;

Замеры проводить, как в п. 6, в диапазоне 0...400 кПа.

Записать полученные данные в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Расчет абсолютной погрешности измерений

$P_{1,2,3,4,5,6}$, кПа	0	80	160	240	320	400
P_N , кПа						
P_0 , кПа						
Π_a по точкам						

Рассчитать среднюю погрешность по диапазону измерений по формуле

$$\Pi_{\text{аср}} = \frac{\Pi_a^1 + \Pi_a^2 + \Pi_a^3 + \Pi_a^4 + \Pi_a^5 + \Pi_a^6}{6}.$$

По окончании расчета с помощью шарового крана *II* (см. рис. 1.1) сбросить давление в системе до нуля.

Записать результаты измерений в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Результаты измерений

№ п/п	Показания манометра, бар		Напряжение на цифровом манометре, В		Погрешность, %	
	механического P_1	электронного P_2	расчетное	измеренное	по диапазону Π_N	абсолютная Π_a
1						
2						
3						
4						
5						

Завершение работы

После проведения измерений выключить оборудование, соблюдая приведенный ниже порядок.

1. Проверить по манометру отсутствие давления в системе.

2. Установить напряжение источника питания на нуль и выключить его.
3. Переключатель положения измерения мультиметра установить в исходное положение («выключено»).
4. Разобрать лабораторный стенд до начального состояния.

Порядок оформления отчета

В отчете о выполненной работе должно быть представлено следующее.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и теоретические расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно журналу лабораторной работы.
7. Расчеты погрешностей.
8. Графики экспериментальной и теоретической зависимостей напряжений на датчике от давления.
9. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятия «трубопроводная система».
2. Назовите основные параметры трубопроводных систем.
3. Что такое давление?
4. Какие приборы используются для измерения давления?
5. Чем можно объяснить различия между результатами теоретических расчетов и показаниями прибора?
6. Каков порядок поверки манометров?
7. В чем состоит принцип работы манометра?
8. По каким параметрам делается вывод о соответствии манометра его классу точности?
9. Чем обусловлено различие показаний механического и цифрового манометров?

Экспериментальная работа № 2

Использование физических законов Бойля — Мариотта и Бернулли на практике

Введение

В данной экспериментальной работе рассматриваются базовые положения курса «Физика» (раздел «Гидроаэродинамика»), без усвоения которых невозможно понять устройство и основы эксплуатации трубопровода, а также объяснить процессы, окружающие нас в повседневной жизни [5].

Закон Бойля — Мариотта:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1}.$$

При постоянной температуре при увеличении объема газа уменьшается давление, а при повышении давления уменьшается объем. Процесс изменения состояния газа при постоянной температуре называется *изотермическим*. Закон Бойля — Мариотта описывает изотермическое состояние газа. Средняя скорость движения молекул при постоянной температуре не изменяется. Изменение объема газа вызывает изменение числа ударов молекул о стенки сосуда. Это и служит причиной изменения давления газа.

Закон Бернулли:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const},$$

где ρ — плотность жидкости; v — скорость потока; g — ускорение свободного падения; h — высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости; p — давление.

Константу в правой части закона Бернулли обычно называют *напором* (или *полным давлением*), а также *интегралом Бернулли*. Размерность всех слагаемых — единица энергии, приходящаяся на единицу объема жидкости. Для горизонтальной трубы ($h = 0$) уравнение примет вид

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}.$$

Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока из-за возрастания скорости, т. е. динамического давления, статическое давление падает. Это является основной причиной *эффекта Магнуса*. Закон Бернулли справедлив и для ламинарных потоков газа. Явление понижения давления при увеличении скорости потока лежит в основе работы различного рода расходомеров, водо- и пароструйных насосов. Закон Бернулли справедлив в чистом виде только для жидкостей, вязкость которых равна нулю, т. е. таких жидкостей, которые не прилипают к поверхности трубы.

Цель работы — получение экспериментального подтверждения закона Бойля — Мариотта и закона Бернулли.

В рамках практикума учащиеся знакомятся с устройством трубопроводной системы, правилами техники безопасности при работе со сжатыми газами, учатся использовать контрольно-измерительные приборы. Приобретают практический опыт внедрения научных разработок в решение производственных проблем, имея возможность проверить результаты аналитических расчетов экспериментально.

Подготовка к работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности при работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.

2. Работы выполняются группами из двух-трех человек.

3. Получите у преподавателя допуск к экспериментальному стенду. Проверьте его комплектность.

4. Убедитесь, что стенд обесточен: все выключатели, автоматы, рубильники находятся в положении «выключено».

5. Приступайте к выполнению работы только с разрешения преподавателя.

Проведение эксперимента

Закон Бойля — Мариотта. Определение давления газа в изотермическом процессе

1. Собрать схему, состоящую из электронного манометра, шприца объемом 500 мл, герметично соединенным со штуцером манометра.

Внимание! Поршень шприца должен находиться в крайнем верхнем положении.

2. Включить электропитание стенда.

3. Собрать схему подключения цифрового манометра (см. рис. 1.1 и 1.2 в работе № 1).

4. Включить питание манометра.

5. Проверить показания манометра: стрелка должна быть установлена на нуль.

6. Прогреть прибор в течение 5 мин.

7. Заполнить табл. 2.1.

8. Поставить поршень шприца на отметку 400 мл и записать следующее показание манометра.

9. Повторить действия, описанные в п. 8, до получения отметки 0 мл.

10. Построить по данным табл. 2.1 зависимость давления от объема.

11. Умножить объем на давление и внести в табл. 2.1 полученный результат.

12. Построить график зависимости давления от объема.

13. Описать результаты выполненной работы и сделать выводы.

Таблица 2.1

Результаты измерений

№ п/п	V , мл	P , кПа	VP
1	500		
2	400		
3	300		
4	200		
5	100		
6	0		

Закон Бернулли. Определение расхода по переменному перепаду давления

1. Проверить готовность компрессора к работе: стрелки манометров стоят на нуле, кран слива конденсата закрыт, шланг подачи сжатого воздуха подключен к штуцеру, вентиль регулировочный закрыт.

2. Нарисовать пневматическую схему, состоящую из следующих элементов: компрессор, запорный кран, сужающее устройство, механический манометр, электронный манометр, кран сброса давления в атмосферу. Механический манометр установлен на широкой части устройства, электронный — на узкой.

3. Собрать схему.

4. Подключить питание стенда.

5. Подать питание на цифровой манометр и прогреть прибор в течение 5 мин.

6. Проверить показания манометров: стрелки должны быть установлены на нуль.

7. Включить вилку на кабеле электропитания компрессора в розетку на щитке стенда.

8. Поставить выключатель на компрессоре в положение «I».

9. Заполнить ресивер компрессора до автоматического отключения компрессора.

10. Выставить на манометре расхода значение 4 бар.

11. Открыть кран подачи воздуха в собранную пневмосистему.

12. Установить на механическом манометре давление 400 кПа, открыв кран «сброс в атмосферу».

13. Записать показания давления механического и цифрового манометров.

14. Повторить пп. 11–13 с шагом 80 кПа.

15. Закрыть кран подачи воздуха в систему.

16. Поставить выключатель на компрессоре в положение «0».

17. Отключить кабель питания компрессора от щитка стенда.

18. Сбросить давление из системы: стрелки манометров должны показывать нуль.

19. Заполнить табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты измерений

Диаметр диафрагмы D , м	
Давление на механическом (эталонном) манометре (M1), Па	
Давление на цифровом манометре (M2), Па	
Плотность воздуха, кг/м ³	

20. Объемный и массовый расход воздуха можно рассчитать по уравнению Бернулли:

– объемный расход

$$Q = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}};$$

– массовый расход

$$Q_M = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\rho\Delta P}.$$

Здесь Q — объемный расход, м³/с; Q_M — массовый расход, кг/с; α — коэффициент расхода, позволяющий учесть неравномерное распределение скоростей по сечению потока; ε — поправочный множитель на расширение измеряемой среды; d — диаметр сужающего устройства, м; ΔP — перепад давления, Па; ρ — плотность измеряемой среды в рабочих условиях, кг/м³.

Значения коэффициентов α и ε принять за единицу.

21. Рассчитать объемный и массовый расход.

22. Заполнить табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты расчета

№ п/п	ΔP , кПа	Q_M , кг/с	Q , м ³ /с
1			
2			
3			
4			
5			
6			

23. Оценить результаты расчетов и сделать выводы о различии между объемным и массовым расходом.

Завершение работы

После завершения измерений выключить оборудование и разобрать лабораторный стенд до первоначального состояния.

Порядок оформления отчета

В отчете о выполненной работе должно быть представлено следующее.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и теоретические расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно журналу лабораторной работы.

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте и объясните закон Бойля — Мариотта.
2. Сформулируйте и объясните закон Бернулли.
3. Приведите примеры применения этих законов на практике.
4. В чем различие между объемным и массовым расходом?
5. Какими приборами измеряется расход? Приведите примеры и перечислите возможные принципы измерений.
6. Дайте определение плотности вещества.

Экспериментальная работа № 3 Определение расхода газа с помощью расходомера VA520

Введение

Во всех сферах, где используются нефть и нефтепродукты, необходим контроль за их расходом, поскольку от этого во многом зависит прибыль компаний. Именно для этого предназначены расходомеры. С их помощью можно проследить за расходом бензина, дизельного топлива, масла или, как в нашем случае, — газа [14, 15].

В настоящее время существует множество расходомеров: от самых простых, принцип работы которых основан на измерении перепада давления в системе при прокачке через нее газа, до сложных устройств, работа которых строится на использовании зависимости оптических эффектов от скорости движения жидкости или газа (*оптические расходомеры*). Если прибор имеет интегрирующее устройство (счетчик) и служит для одновременного измерения также и количества вещества, то его называют *счетчиком-расходомером*.

Цель работы — определение расхода газа с использованием цифрового расходомера VA520.

Устройство и принцип работы расходомера VA520

В данной экспериментальной работе используется врезной расходомер газов и сжатого воздуха с цифровым интерфейсом — VA520 (рис. 3.1). Работа этого расходомера основана на термоанемометрическом принципе измерения.



Рис. 3.1. Врезной расходомер газов и сжатого воздуха с цифровым интерфейсом — VA520

Суть метода измерений заключается в следующем: нагреваемый датчик охлаждается проходящим мимо него потоком воздуха. Степень охлаждения, выступающая в качестве индикатора расхода, напрямую зависит от массы проходящего газа, скорости протекающего потока, физических свойств газа (теплопроводности, температуры и плотности), от разности температур преобразователя и газа.

Основным преимуществом этого метода является высокая чувствительность, поэтому не требуется дополнительное измерение температуры и давления. Компактное исполнение датчика позволяет использовать его

для мониторинга любых систем сжатого воздуха: от компрессоров до совсем небольших приборов (диаметром от 1/4 до 2 дюймов).

Основные преимущества расходомера VA520 [15]:

- простота установки;
- возможность выбора единиц измерения: м³/ч, м³/мин, л/мин, л/с, кг/ч, кг/мин, кг/с, cfm (Cubic Feet per Minute);
- наличие счетчика сжатого воздуха и газов объемом до 1,999,999,999 м³ с возможностью обнуления результатов с дисплея;
- аналоговый выход 4...20 мА, импульсный выход (гальванически развязанный);
- цифровой интерфейс RS485 (Modbus-RTU);
- высокая точность измерений, в том числе при низком расходе (идеален для измерения утечек);
- пренебрежимо малые потери давления;
- термоанемометрический принцип измерения, что не требует дополнительного измерения давления и температуры;
- отсутствие подвижных частей;
- удобный выбор типа газов через программное обеспечение (азот, кислород, углекислый газ, оксид азота, аргон).

Подготовка к работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности при работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.

2. Экспериментальные работы выполняются группами из двух-трех человек.

3. Получите у преподавателя допуск к экспериментальному стенду. Проверьте его комплектность.

4. Убедитесь, что стенд обесточен: все выключатели, автоматы, рубильники находятся в положении «выключено».

5. Приступайте к выполнению работы только с разрешения преподавателя.

Проведение эксперимента

1. Проверить готовность компрессора к работе: стрелки манометров стоят на нуле, кран слива конденсата закрыт, шланг подачи сжатого воздуха подключен к штуцеру, вентиль регулировочный закрыт.

2. Подключить питание стенда.

3. Включить питание на электронный манометр и прогреть прибор в течение 5 мин.

4. Проверить показания манометров: стрелки должны указывать на нуль.

5. Включить вилку на кабеле электропитания компрессора в розетку на щитке стенда.

6. Поставить выключатель на компрессоре в положение «I».

7. Заполнить ресивер компрессора до автоматического отключения компрессора.

8. Выставить на манометре расхода (расположен на самом компрессоре) давление 4 бар.

9. С помощью элементов управления (правая кнопка) выставить на дисплее режим измерения расхода газа «Кислород» и единицу измерения «л/с».

10. Открыть кран подачи воздуха в собранную пневмосистему.

11. Установить на механическом манометре давление 400 кПа, открыв кран сброса в атмосферу.

12. Обнулить показания расходомера. Для этого нажать правую кнопку расходомера и удерживать ее в течение 7 с.

13. Открыть кран сброса в атмосферу и сбросить давление в системе.

14. Записать показания расходомера в табл. 3.1.

15. Повторить действия, описанные в пп. 10–14 для значений 600 и 800 кПа и внести результаты измерений в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты измерений

№ п/п	Давление в системе, кПа	Расход, л/с	Расход теоретический объемный, л/с	Напряжение на выводах расходомера, В
1	400			
2	600			
3	800			

16. Описать результаты выполненной работы и сделать выводы.

Завершение работы

После завершения измерений выключить оборудование и разобрать лабораторный стенд до первоначального состояния.

Порядок оформления отчета

В отчете о выполненной работе должно быть представлено следующее.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и теоретические расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно журналу лабораторной работы.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое расходомер и какова область его применения?
2. Какие принципы измерения расхода газа существуют и какой из них наиболее распространен? Какой наиболее эффективен?
3. Объясните принцип работы термоанемометрического расходомера.
4. Как состав газа влияет на показания расходомера?
5. Возможно ли использование эффекта Доплера для бесконтактного измерения скорости газа?
6. Влияет ли изменение температуры газа на погрешность измерения его расхода?
7. Какой элемент необходимо добавить в состав расходомера, чтобы он одновременно позволял измерять и количество вещества?

Экспериментальная работа № 4

Исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, изготовленных из ферромагнитной стали

Введение

В экспериментальной работе практикума рассматриваются базовые положения курса «Физика» применительно к исследованию напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, изготовленных из ферромагнитной стали. Учащиеся закрепляют практические навыки по применению средств, позволяющих выявить дефекты, которые связаны с напряженно-деформированным состоянием, на конкретных макетах знакомятся с различными трубопроводными системами, анализируют их характеристики.

Цель работы — закрепление учащимися теоретических знаний и приобретение практических навыков при контроле и диагностике трубопроводных систем.

Основное внимание сконцентрировано на выявлении дефектов, связанных с напряженно-деформированным состоянием металлоконструкций, изготовленных из ферромагнитной стали (грузоподъемные механизмы, трубопроводы, эскалаторы, лифты, подъемники, котлы, сосуды, работающие под давлением); контроле качества термообработки, химико-термического упрочнения, закалки, наклепа поверхностно упрочненных слоев изделий из стали и чугуна.

В рамках практикума в доступной форме учащиеся знакомятся с условиями определения дефектов при помощи магнитного структуроскопа [16, 17].

Устройство и принцип работы структуроскопа

Структуроскоп предназначен для неразрушающего контроля качества термообработки, механических свойств и структуры изделий металлургии и машиностроения из углеродистых и легированных сталей по установленным корреляционным связям между измеряемым значением коэрцитивной силы и контролируемыми параметрами. Структуроскоп может эксплуатироваться как в помещениях, так и в полевых условиях.

В основу работы структуроскопа положена зависимость тока размагничивания участка изделия от коэрцитивной силы материала, из которого оно изготовлено [17].

Структуроскоп позволяет измерять ток, необходимый для размагничивания предварительно намагниченного до насыщения локального участка поверхности изделия, образующего замкнутую магнитную цепь с сердечником электромагнита преобразователя (рис. 4.1).

Цикл измерения коэрцитивной силы состоит из двух основных операций.

1. *Магнитная подготовка.* Производится намагничивание контролируемого участка изделия путем пропускания через обмотку электромагнита двух разнополярных намагничивающих импульсов. Мощность импульсов достаточна для технического насыщения материала. В результате этой операции участок изделия под полюсами преобразователя приобретает остаточную намагниченность.

2. *Компенсация остаточной намагниченности.* В обмотке электромагнита создается импульсный ток такой величины, чтобы компенсировать остаточ-

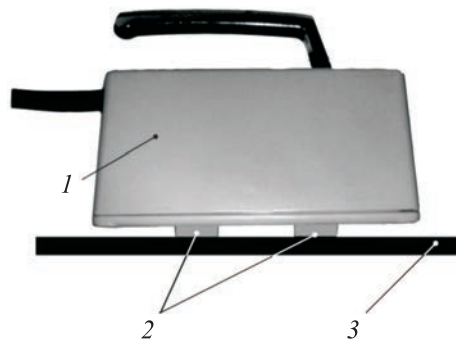


Рис. 4.1. Взаиморасположение преобразователя и объекта контроля:
1 — преобразователь; 2 — полюса электромагнита; 3 — объект контроля

ную намагниченность изделия. Измеряется интегральное значение тока, которое пропорционально коэрцитивной силе материала изделия.

Основные функциональные узлы магнитного структуроскопа приведены на рис. 4.2 [16].

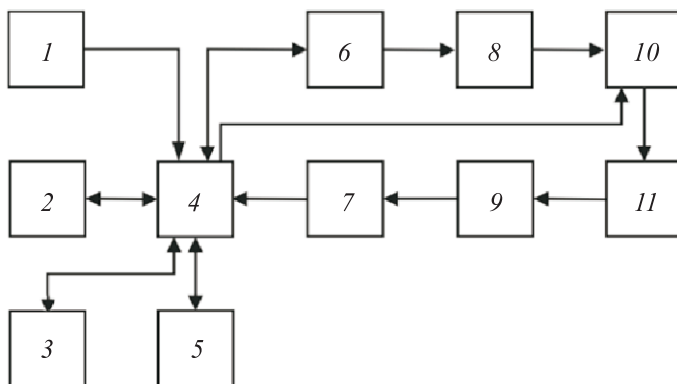


Рис. 4.2. Структурная схема магнитного структуроскопа МС-10:

1 — клавиатура; 2 — блок памяти; 3 — дисплей; 4 — микропроцессор; 5 — блок беспроводного приемопередатчика; 6 — контроллер заряда емкостей; 7 — аналого-цифровой преобразователь; 8 — блок накопительных емкостей; 9 — блок обработки сигналов; 10 — блок коммутации; 11 — преобразователь

После включения питания микропроцессор 4 осуществляет проверку уровня напряжения аккумуляторной батареи и состояние ее заряда, затем формирует разрешающий сигнал для контроллера заряда емкостей 6, который осуществляет заряд блока накопительных емкостей 8 до заданного микропроцессором 4 уровня напряжения. По окончании заряда микропроцессор 4 выдает на дисплей 3 сигнал готовности к началу измерений. По сигналу с клавиатуры 1 микропроцессор 4 подает команду блоку коммутации 10, который поочередно разряжает элементы блока накопительных емкостей 8 на обмотки электромагнита преобразователя 11, формируя два электромагнитных импульса для перемагничивания участка контролируемого изделия по предельной петле гистерезиса.

После перемагничивания микропроцессор 4 посредством блока коммутации 10 формирует в обмотке электромагнита преобразователя 11 серию размагничивающих импульсов так, чтобы суммарная индукция электромагнитного поля преобразователя 11 и намагниченного участка была равна нулю. Значение индукции микропроцессор 4 определяет на основании сигналов с датчиков Холла, расположенных в полюсах преобразователя 11. Сигналы с датчиков Холла поступают в блок обработки сигналов 9, где очищаются от шумов и масштабируются, затем оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя 7. По окончании цикла измерения

микропроцессор 4 на основании заложенной в нем программы рассчитывает значение, пропорциональное коэрцитивной силе контролируемого материала, и выдает его на дисплей 3. Внешний вид структуроскопа с преобразователем показан на рис. 4.3.

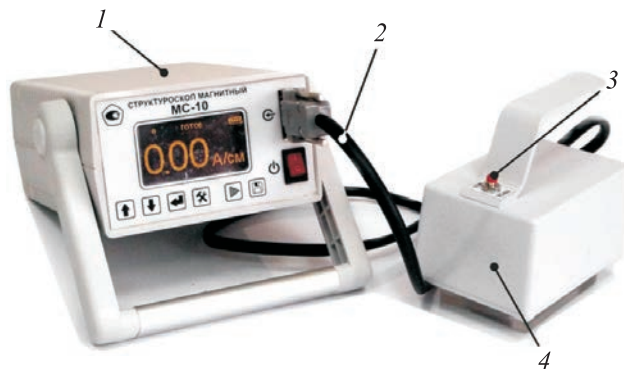


Рис. 4.3. Структуроскоп с преобразователем:

1 — электронный блок; 2 — гибкий кабель; 3 — кнопка запуска измерений; 4 — преобразователь

Структуроскоп состоит из электронного блока 1 и преобразователя 4, соединенных гибким кабелем 2 (см. рис. 4.3).

На задней панели электронного блока расположен разъем для подключения зарядного устройства. Преобразователь выполнен в виде электромагнита с П-образным сердечником, изготовленным из электротехнической стали. В качестве измерителя индукции магнитного поля выбран преобразователь Холла. На сердечнике размещены катушки для намагничивания контролируемого участка изделия и компенсации поля остаточной индукции. Полюса сердечника закрыты защитными пластинами. На корпусе преобразователя расположена кнопка 3 (см. рис. 4.3) запуска процесса измерения.

Назначение органов индикации и управления структуроскопа:

— дисплей 1 служит для отображения информации в процессе работы структуроскопа (рис. 4.4);

— кнопки «↑», «↓», «←» 2–4 служат для перемещения по меню структуроскопа и изменения параметров его работы;

— кнопка «✖» 5 предназначена для вызова меню структуроскопа;

— кнопка «▷» 6 предназначена для запуска процесса измерения;

— кнопка «☐» 7 предназначена для сохранения в память результата последнего измерения;

— тумблер ПИТАНИЕ 8 предназначен для включения/выключения питания структуроскопа;

— разъем 9 служит для подключения преобразователя к электронному блоку.

Нормальные условия эксплуатации структуроскопа:

— температура окружающего воздуха 15...25 °С;



Рис. 4.4. Органы управления магнитного структуроскопа МС-10:

1 — дисплей; 2 — кнопка ВВЕРХ; 3 — кнопка ВНИЗ; 4 — кнопка ВВОД; 5 — кнопка МЕНЮ; 6 — кнопка ПУСК; 7 — кнопка ЗАПИСЬ; 8 — тумблер ПИТАНИЕ; 9 — разъем преобразователя

- относительная влажность 30...80 % при температуре 20 °С;
- атмосферное давление 84...106 кПа.

Рабочие условия применения:

- температура окружающего воздуха –20...+40 °С;
- относительная влажность до 90 % при температуре 30 °С;
- атмосферное давление 70...106 кПа.

Технические характеристики структуроскопа:

- диапазон измерений $\Delta_0 = \pm(0,04H_c + 0,1)$, А/см, где H_c — измеренное значение коэрцитивной силы;
- пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерений, $\Delta_{\text{доп}} = 0,5\Delta_0$, А/см;
- предел допускаемой дополнительно погрешности измерений коэрцитивной силы, вызванной изменением температуры окружающего воздуха на каждые 20 °С в интервале рабочих значений, А/см;
- зазор между полюсами преобразователя структуроскопа и поверхностью контролируемого изделия — не более 0,5 мм;
- межполюсное расстояние 45 мм;
- электрическое питание структуроскопа осуществляется от встроенной аккумуляторной батареи напряжением 12 В;
- максимальный импульсный ток — не более 5 А;
- время установления рабочего режима после включения питания структуроскопа — не более 2 мин;
- время одного измерения — не более 6 с;
- габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм, не более:
 - блока электронного 210×180×120;
 - преобразователя 150×80×120;

- длина соединительного кабеля преобразователя 1,5 м;
- масса структуроскопа — не более 4 кг, в том числе:
 - блока электронного 2,3 кг;
 - преобразователя 1,5 кг;
 - зарядного устройства 0,2 кг.

Подготовка к работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности при работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.
2. Получите у преподавателя допуск к экспериментальному стенду. Проверьте его комплектность.
3. Проанализируйте информацию, представленную в журнале лабораторной работы.
4. Ознакомьтесь с предоставленными образцами.
5. Используя магнитный структуроскоп, выполните намагничивание локального участка заготовок до насыщения.
6. Используя магнитный структуроскоп, выполните размагничивание локальных участков заготовок, чтобы оценить необходимую для этого процесса силу тока. Полученные данные занесите в табл. 4.1.
7. Опишите последовательность работы.
8. После окончания экспериментов отключите электропитание. Сдайте рабочее место преподавателю.

Проведение эксперимента

1. Перед началом работы необходимо ознакомиться с принципом работы магнитного структуроскопа (внимательно изучить прилагающуюся к устройству инструкцию).
2. Ознакомьтесь с предоставленными образцами (заготовки 1 и 2). Зафиксировать полученные данные в отчете.
3. Выполнить с помощью магнитного структуроскопа намагничивание локального участка заготовок путем пропускания через обмотку электромагнита двух разнополярных намагничивающих импульсов.
4. Выполнить с помощью магнитного структуроскопа размагничивание локального участка заготовок путем создания в обмотке электромагнита импульсного тока такой силы, чтобы компенсировать остаточную намагниченность изделия.

Таблица 4.1

Значения силы тока, необходимые для размагничивания заготовок

Заготовки	Сила тока, А
1	
2	

5. Зафиксировать и записать в табл. 4.1 полученные результаты — значения силы тока, необходимые для размагничивания заготовок, и сделать выводы по проделанной работе.

Завершение работы

После завершения измерений выключить оборудование и разобрать лабораторный стенд до первоначального состояния.

Порядок оформления отчета

В отчете о выполненной работе должно быть представлено следующее.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и теоретические расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно журналу лабораторной работы.
7. Выводы по итогам сравнения расчетных и экспериментальных показателей.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего нужен магнитный структуроскоп?
2. Расскажите о принципе работы магнитного структуроскопа.
3. Какие существуют операции измерения коэрцитивной силы?
4. Нарисуйте структурную схему магнитного структуроскопа.
5. Из чего состоит магнитный структуроскоп?
6. Назовите нормальные условия использования магнитного структуроскопа.
7. Что выводится на дисплей структуроскопа по окончании цикла измерений?

Экспериментальная работа № 5

Измерение поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из ферромагнитных и немагнитных материалов и сплавов

Введение

В экспериментальной работе рассматриваются базовые положения курса «Физика», касающиеся измерения поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из ферромагнитных и немагнитных материалов и сплавов. Учащиеся закрепляют практические навыки по применению средств

измерений поверхностных и поверхностных трещин, на макетах знакомятся с различными дефектами в ферромагнитных и немагнитных материалах и сплавах. Учатся настраивать вихретоковый дефектоскоп и проводить оценку его работоспособности.

Данная экспериментальная работа направлена на получение опыта работы с вихретоковым дефектоскопом и его настройки, изучение поверхностных и подповерхностных трещин в деталях, представленных в качестве образцов [18–21].

Цель работы — закрепление учащимися теоретических знаний и приобретение практических навыков при настройке вихретокового дефектоскопа по эталонной детали и измерении поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из ферромагнитных и немагнитных материалов и сплавов.

Устройство и принцип работы вихретокового дефектоскопа ВД-90НП

Принцип работы вихретокового дефектоскопа основан на возбуждении в контролируемом изделии вихревых токов и последующем выделении на выходе преобразователя сигнала, амплитуда и фаза которого определяются действующим вторичным полем вихревых токов, и регистрации изменений электромагнитного поля вихревых токов, вызванных наличием дефектов в этом объекте.

С помощью вихретокового дефектоскопа обнаруживают поверхностные дефекты в деталях из ферромагнитных материалов и сплавов, а также поверхностные и подповерхностные дефекты в деталях из немагнитных материалов и сплавов.

Вихретоковый дефектоскоп выполнен в виде портативной переносной конструкции, что позволяет использовать его как в цеховых или лабораторных условиях, так и на открытом воздухе.

В полевых условиях, в том числе и в зимнее время года, вихретоковый дефектоскоп может применяться на магистральных трубопроводах. Его



Рис. 5.1. Вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП

также применяют в цеховых условиях депо и ремонтных заводов, на судостроительных и судоремонтных верфях, в авиационной промышленности и в других отраслях машиностроения. Получить представление о чувствительности дефектоскопа дает возможность табл. 5.1 [19].

Таблица 5.1

**Порог чувствительности вихретокового дефектоскопа ВД-90НП
на стандартном образце**

Материал образца	Пространственные характеристики искусственного дефекта	Порог чувствительности*, мм, при шероховатости поверхности, мкм, не более		
		Rz40	Rz160	Rz320
Ферромагнитный	Глубина	0,50±0,03	—	1,0±0,1
	Ширина	0,03...0,07	—	0,05...0,15
Немагнитный	Глубина	0,50±0,03	10±0,1	—
	Ширина	0,03...0,07	0,05...0,15	—

* Порог чувствительности дефектоскопа — минимальная глубина обнаруживаемого поверхностного протяженного искусственного дефекта в виде риски на образцах искусственных дефектов.

Максимальный рабочий зазор между преобразователем и изделием (за счет неметаллических покрытий), т. е. максимальная толщина непроводящего покрытия, при которой обеспечивается отстройка дефектоскопа от данного параметра, в случае ферромагнитного материала объекта контроля составляет не более 11 мм, в случае немагнитного материала — не более 3 мм.

Технические характеристики вихретокового дефектоскопа ВД-90НП приведены ниже.

Скорость сканирования изделия, м/с	0,02...0,10
Частота тока возбуждения преобразователя	1 кГц...2 МГц
Диапазон работы фазовращателя, град	0—360°
Шаг фазовращателя, град.....	0,1
Отклонение преобразователя от нормали к контролируемой поверхности, град, не более	60
Встроенная память:	
максимальное число записей протоколов контроля.....	1000
максимальное число программ пользователя.....	300
Рабочий диапазон температуры окружающей среды, °С.....	—30...+50 °С
Степень защиты дефектоскопа от проникания твердых тел и воды	IP54
Дальность передачи по радиоканалу, м	До 20
Электропитание	Четыре элемента АА, 220 В, 50 Гц
Время установления рабочего режима, мин, не более	1

Продолжительность непрерывной работы, ч, не менее:	
при выключенном радиоканале.....	16
при включенном радиоканале	12
Масса электронного блока (с элементами питания), кг, не более	0,40
Габаритные размеры электронного блока (длина×ширина× ×глубина), мм	140×72×40

Источником возбуждающего поля и приемником поля вихревых токов является преобразователь — одна или несколько катушек индуктивности, намотанных на цилиндрическом ферритовом сердечнике. При проведении контроля источник возбуждающего поля устанавливают торцевой частью к обследуемой поверхности.

Такие преобразователи характеризуются полным комплексным сопротивлением, или *импедансом*, который обычно представляют годографом на комплексной плоскости:

$$Z = R_L + j\omega h,$$

где R_L — активное сопротивление преобразователя, Ом; $j\omega h$ — индуктивное сопротивление преобразователя, Ом.

Наводимые вихревые токи замыкаются по траекториям в форме концентрических окружностей. Средний диаметр траектории вихревых токов, или эффективный диаметр преобразователя, соответствует реальному пятну токов и равен 1,0–1,6 диаметра преобразователя. С увеличением зазора h в месте контроля эффективный диаметр увеличивается, а при $h = 0$ становится равен диаметру преобразователя.

Дефекты изменяют траекторию вихревых токов, приводя к дополнительному изменению активного и индуктивного сопротивлений преобразователя. Выявляемость дефектов зависит от глубины проникания вихревых токов, размеров преобразователя и чувствительности прибора. Большое влияние на выявляемость дефектов оказывают также электрофизические характеристики контролируемого материала (электрическая проводимость δ и магнитная проницаемость μ).

Устройство вихретокового дефектоскопа поясняет структурная схема (рис. 5.2).

Принцип работы вихретокового дефектоскопа основан на возбуждении в контролируемом изделии вихревых токов и последующем выделении на выходе преобразователя сигнала, амплитуда и фаза которого определяются действующим вторичным полем вихревых токов.

Синусоидальное напряжение с генератора 1 подается на входы формирователей 9 и 10 . На основании команд микропроцессора формирователь сигнала возбуждения 9 вырабатывает синусоидальный сигнал необходимой амплитуды и частоты, который поступает на обмотку возбуждения преобразователя 2 .

Выход преобразователя 2 подключен к усилителю 3 с блоком автоматической регулировки усиления 11 , который эффективно действует в диапазоне допустимого изменения зазора между наконечником преобразователя и контролируемой поверхностью.

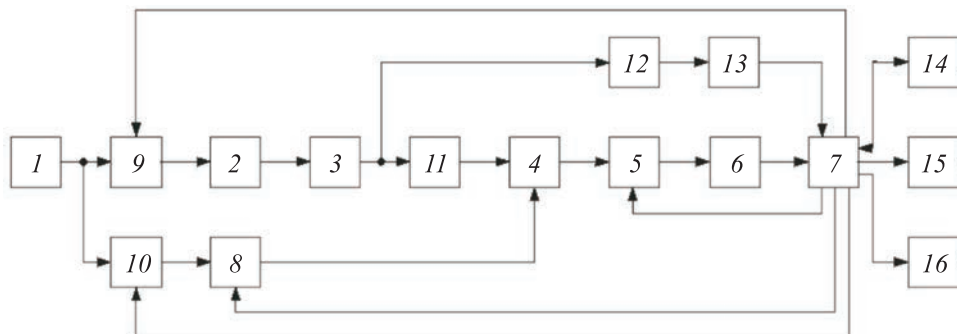


Рис. 5.2. Структурная схема вихретокового дефектоскопа ВД-90НП:

1 — генератор; 2 — преобразователь; 3 — усилитель; 4 — фазовый детектор; 5 — программируемый усилитель; 6 — аналого-цифровой преобразователь фазы сигнала; 7 — микропроцессор; 8 — фазовращатель; 9 — формирователь сигнала возбуждения; 10 — формирователь опорного сигнала; 11 — блок автоматической регулировки усиления; 12 — амплитудный детектор; 13 — аналого-цифровой преобразователь амплитуды сигнала; 14 — блок памяти; 15 — дисплей; 16 — звуковой индикатор

Сигнал с выхода усилителя 3 поступает на один из входов фазового детектора 4. Синусоидальное напряжение несущей частоты с формирователя опорного сигнала 10, совмещенного с фазовращателем 8, подается на второй вход фазового детектора 4, в котором проводится измерение фазы между двумя сигналами.

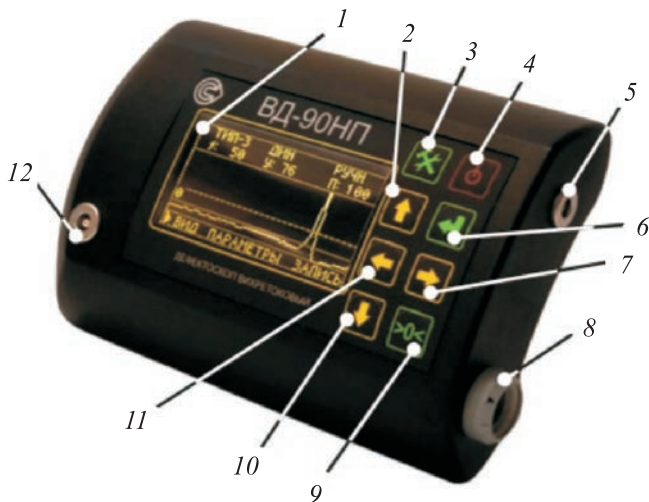


Рис. 5.3. Органы индикации и управления вихретокового дефектоскопа ВД-90НП:

1 — дисплей; 2 — кнопка ВВЕРХ; 3 — кнопка МЕНЮ; 4 — кнопка ПИТАНИЕ; 5 — разъем для подключения внешнего питания (опция); 6 — кнопка ВВОД; 7 — кнопка ВПРАВО; 8 — разъем для подключения преобразователей; 9 — кнопка УСТАНОВКА НУЛЯ; 10 — кнопка ВНИЗ; 11 — кнопка ВЛЕВО; 12 — разъем для подключения головного телефона

Также сигнал с выхода усилителя 3 через амплитудный детектор 12 поступает на вход аналого-цифрового преобразователя амплитуды сигнала 13. Полученное значение амплитуды передается в микропроцессор 7.

Сигнал с выхода фазового детектора 4 через программируемый усилитель 5 и аналого-цифровой преобразователь 6 передается в микропроцессор 7.

Микропроцессор 7 осуществляет обработку выходного сигнала аналого-цифровых преобразователей 6 и 13, вывод информации на дисплей 15, хранение данных в блоке памяти 14 и передачу их в персональный компьютер по интерфейсу Bluetooth.

В качестве звукового индикатора 16 используется пьезоэлектрический звонок.

На рис. 5.3 представлен общий вид органов индикации и управления вихретокового дефектоскопа ВД-90НП [19].

Подготовка к работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности при работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.

2. Получите у преподавателя доступ к экспериментальному стенду. Проверьте его комплектность.

3. Проанализируйте информацию, представленную в журнале лабораторной работы.

4. Проведите предварительный осмотр предоставляемых заготовок на наличие внешних, видимых дефектов.

5. Используя вихретоковый дефектоскоп, проведите анализ предоставленных заготовок на наличие дефектов, не видимых глазом, и заполните табл. 5.2.

6. Опишите последовательность работы.

7. После окончания экспериментов отключите электропитание. Сдайте рабочее место преподавателю.

Проведение эксперимента

1. Перед началом работы необходимо ознакомиться с принципом работы вихретокового дефектоскопа (внимательно изучить прилагающуюся к устройству инструкцию).

2. Провести предварительный осмотр представленных заготовок (ферромагнитной, немагнитной, эталонной) на наличие дефектов, видимых глазом. Зафиксировать полученные данные в отчете.

3. Провести настройку вихретокового дефектоскопа на эталонном образце с визуальной фиксацией показаний прибора. Кабель преобразователя разместить в зоне контроля и задать оптимальный режим работы прибора.

4. Убедиться, что настройка прибора выполнялась на участке заготовки, не имеющем дефектов. Для этого датчик установить в три соседние точки и визуально фиксировать отклонения на дисплее прибора. Если таковых не наблюдается, значит, настройка проведена правильно.

5. Осмотреть ферромагнитную и немагнитную заготовки на наличие дефектов с помощью вихретокового дефектоскопа.

6. Полученные данные занести в табл. 5.2 и сделать выводы по проделанной работе.

Таблица 5.2

Анализ представленных заготовок на наличие дефектов

Материал заготовки	Число дефектов
Ферромагнитный	
Немагнитный	

Завершение работы

После завершения измерений выключить оборудование и разобрать лабораторный стенд до первоначального состояния.

Порядок оформления отчета

В отчете о выполненной работе должно быть представлено следующее.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.
2. Схема стенда и ее описание.
3. Краткий конспект теоретической части и теоретические расчеты.
4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.
7. Выводы по итогам экспериментальных показателей.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего нужен вихретоковый дефектоскоп?
2. Перечислите состав экспериментального стенда.
3. Назовите максимальный рабочий зазор между преобразователем и изделием.
4. Что такое преобразователь и для чего он нужен?
5. Чем характеризуется преобразователь (дайте полное объяснение)?
6. Что такое порог чувствительности дефектоскопа?
7. Нарисуйте структурную схему вихретокового дефектоскопа.
8. В чем состоит принцип работы вихретокового дефектоскопа?
9. Чему равен средний диаметр поля вихревых токов?

Экспериментальная работа № 6 Исследование защитных покрытий трубопроводов

Введение

В экспериментальной работе рассматриваются базовые положения курса «Физика», касающиеся исследования защитных покрытий трубопроводов [22]. Учащиеся закрепляют практические навыки использования магнитного толщиномера покрытий МТП-01, а именно измерения толщины пенополиуретановой изоляции в полиэтиленовой оболочке на стальных трубопроводах и отклонения осевой линии стальной трубы от оси полиэтиленовой оболочки [23–25]. Кроме того, в процессе выполнения экспериментальной работы учащиеся настраивают прибор и проводят оценку его работоспособности.

Данная экспериментальная работа направлена на получение опыта работы с магнитным толщиномером, навыков его настройки, исследования защитных покрытий трубопроводов.

Цель работы — закрепление учащимися теоретических знаний и приобретение практических навыков при измерении и оценке толщины защитных покрытий предоставленных заготовок с помощью магнитного толщиномера МТП-01.

Устройство и принцип работы магнитного толщиномера МТП-01

Принцип работы толщиномера основан на создании постоянного магнитного поля в немагнитном зазоре между измерительным преобразователем и ферромагнитным материалом основы. Величина зазора в первую очередь определяется толщиной измеряемого покрытия. Изменение толщины покрытия приводит к изменению магнитного поля, что регистрируется измерительным преобразователем.

Толщиномер предназначен для измерения толщины защитных покрытий на трубах нефте- и газопроводов, а также для измерения толщины любого немагнитного покрытия на ферромагнитном основании при температуре окружающей среды $-10...+40$ °С и влажности воздуха до 90 % при температуре $+25$ °С.

Прибор МТП-01 состоит из индуктивного датчика и электронного блока.

Принцип действия прибора заключается в регистрации изменения электромагнитного поля датчика при взаимодействии его с элементами стальных труб. Этот сигнал воспринимается электронным блоком и преобразуется по заложенному в программу алгоритму в значение толщины теплоизоляции [6].

Прибор состоит из электронного блока, имеющего на лицевой панели клавиатуру и графический дисплей. В верхней торцевой части корпуса установлен разъем для подключения датчика, слева от разъема расположены элементы инфракрасного канала связи с компьютером для передачи и



Рис. 6.1. Магнитный толщиномер покрытий труб МТП-01

обработки информации. Доступ к аккумуляторам осуществляется через крышку батарейного отсека на нижней стенке корпуса.

Клавиатура состоит из девяти клавиш:

«1/0» — для включения и выключения прибора. Если измерения не выполняются, то происходит автоматическое отключение прибора через заданное оператором время;

« ∇ » — для входа в режим настройки толщиномера перед проведением измерений;

« \odot » — для подтверждения установленных параметров;

« \uparrow » — для изменения устанавливаемых параметров в сторону увеличения их значений;

« \downarrow » — для изменения устанавливаемых параметров в сторону уменьшения их значений;

«Чт.» — для входа в режим чтения данных из памяти толщиномера;

«Зап.» — для входа в режим записи данных в память толщиномера;

«Пер.» — для входа в режим передачи данных из памяти толщиномера в компьютер;

«Оч.» — для входа в режим очистки памяти.

Структурная схема магнитного толщиномера МТП-01 приведена на рис. 6.2.

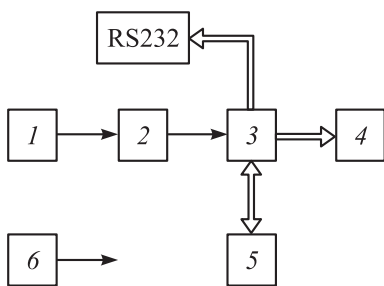


Рис. 6.2. Структурная схема магнитного толщиномера МТП-01:

1 — измерительный преобразователь; 2 — масштабирующий усилитель; 3 — процессорный блок; 4 — блок цифровой индикации; 5 — блок памяти; 6 — стабилизированный блок питания

Толщиномер состоит из последовательно соединенных измерительного преобразователя 1, масштабирующего усилителя 2, процессорного блока 3, блока цифровой индикации 4, блока памяти 5, а также стабилизированного блока питания 6. Измерительный преобразователь, в качестве которого используется датчик Холла, установленный в зазоре между постоянным магнитом и объектом контроля, регистрирует значение индукции проходящего через его кристалл магнитного поля, которая зависит от толщины контролируемого покрытия.

Сигнал с выхода измерительного преобразователя 1 поступает в масштабирующий усилитель 2, где происходит его преобразование для максимального использования

динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя процессорного блока 3. Процессорный блок 3 преобразует входное напряжение в цифровой код, производит его обработку по заданному алгоритму, передает информацию о толщине измеряемого покрытия в блок индикации 4 и, при необходимости, — в блок памяти 5. Блок индикации 4 высвечивает информацию об измеряемой толщине покрытия или об измеренной ранее толщине, которая была внесена в блок памяти 5. Кроме того, на дисплее блока индикации 4 может отображаться информация о выполнении толщиномером той или иной операции. Блок памяти 5 позволяет запоминать результаты измерений. Электропитание всех узлов толщиномера осуществляется от стабилизированного блока питания 6.

На рис. 6.3 представлен общий вид магнитного толщиномера МТП-01.

Особенности магнитного толщиномера МТП-01:

- малогабаритный отечественный магнитный толщиномер;

- возможность ввода пользователем градуированных характеристик, в том числе для оцинкованных труб;

- малые габариты и масса.

Основные функции:

- измерение толщины защитных теплоизоляционных покрытий труб;

- вычисление межосевого смещения стальных труб и оболочек;

- автоматизированная калибровка прибора на объекте;

- отображение результатов на графическом дисплее с подсветкой;

- архивация 2000 результатов и условий измерений в реальном времени;

- USB-интерфейс и сервисная компьютерная программа.



Рис. 6.3. Общий вид магнитного толщиномера МТП-01:

1 — гибкий кабель; 2 — инфракрасный передатчик; 3 — цифровой индикатор; 4 — панель управления толщиномером; 5 — электронный блок; 6, 9, 10 — комплект принадлежностей измерительного преобразователя, состоящий из призмы, пружины и крышки соответственно; 8 — преобразователь

Подготовка к работе

1. Внимательно прослушайте инструктаж по технике безопасности при работе с электронными приборами и электрооборудованием. Распишитесь о прохождении инструктажа.

2. Получите у преподавателя доступ к экспериментальному стенду. Проверьте его комплектность.

3. Изучите и проанализируйте информацию, представленную в журнале лабораторной работы и инструкции к устройству.

4. Проведите предварительный осмотр предоставляемых заготовок на наличие внешних, видимых дефектов, грязи и пыли.

5. Очистите поверхность изделия от пыли и грязи, так как их наличие может привести к искажению показаний толщиномера.

6. Используя магнитный толщиномер, проведите измерения толщины покрытия предоставленных заготовок, заполните табл. 6.1.

7. Опишите последовательность работы.

8. После окончания экспериментов отключите электропитание. Сдайте рабочее место преподавателю.

Проведение эксперимента

1. Перед началом работы необходимо ознакомиться с принципом работы магнитного толщиномера (внимательно изучить прилагающуюся к устройству инструкцию).

2. Провести предварительный осмотр представленных заготовок на наличие дефектов, грязи и пыли. Зафиксировать полученные данные в отчете.

3. Очистить поверхность изделия от пыли и грязи, так как их наличие может привести к искажению показаний толщиномера.

4. Выполнить измерения толщины покрытия предоставленных заготовок, для чего установить измерительный преобразователь на контролирующую поверхность.

5. Провести считывание показаний цифрового индикатора. Полученные данные занести в табл. 6.1 и сделать выводы о проделанной работе.

Таблица 6.1

Толщина защитного покрытия заготовок 1 и 2

Заготовки	Толщина защитного покрытия, мм
1	
2	

Завершение работы

После завершения измерений выключить оборудование и разобрать лабораторный стенд до первоначального состояния.

Порядок оформления отчета

В отчете по выполненной работе должно быть представлено следующее.

1. Цель и задачи экспериментального исследования.

2. Схема стенда и ее описание.

3. Краткий конспект теоретической части и теоретические расчеты.

4. Комплектность собираемой схемы (перечень элементов).
5. Методика проведения измерений.
6. Результаты экспериментальных исследований, оформленные согласно журналу лабораторной работы.
7. Выводы по итогам экспериментальных показателей.

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего нужен магнитный толщиномер?
2. В чем заключается принцип действия прибора?
3. Из чего состоит магнитный толщиномер?
4. Каково назначение каждой клавиши на клавиатуре прибора?
5. Из чего состоит измерительный преобразователь?
6. Перечислите особенности магнитного толщиномера.
7. Нарисуйте структурную схему прибора (с кратким объяснением).
8. Перечислите основные функции магнитного толщиномера.

Экспериментальная работа № 7 Моделирование трубопроводных систем

Введение

В экспериментальной работе рассматриваются базовые положения моделирования и проектирования трубопроводных систем в современных САПР. Учащиеся получают практические навыки по автоматизированной разработке принципиальных схем, созданию ассоциативных 3D-моделей и построению изометрических чертежей трубопроводных систем.

Работа ведется в конструкторской САПР Solid Edge и специализированном пакете Modular Plant Design [26, 27]. Построение схем выполняется в модуле P&ID Design, 3D-моделирование трубопроводов — в модулях Piping Design и среде «Трубопровод» (Xpress Route), создание конструкторской документации — в модуле Isometric.

Цель работы — применение учащимися полученных теоретических знаний для создания на практике схем, 3D-моделей и чертежей трубопроводных систем, а также получение практических навыков работы в современной отраслевой САПР.

Основное внимание уделено формированию навыков самостоятельной работы в САПР, построения гидравлических (пневматических) схем с использованием базы данных стандартных компонентов трубопроводных систем, параллельной работы в редакторе схем и САПР 3D-моделирования, внесения корректирующих изменений в существующую трубопроводную систему с обеспечением целостности модели, автоматизированного оформления конструкторской документации.

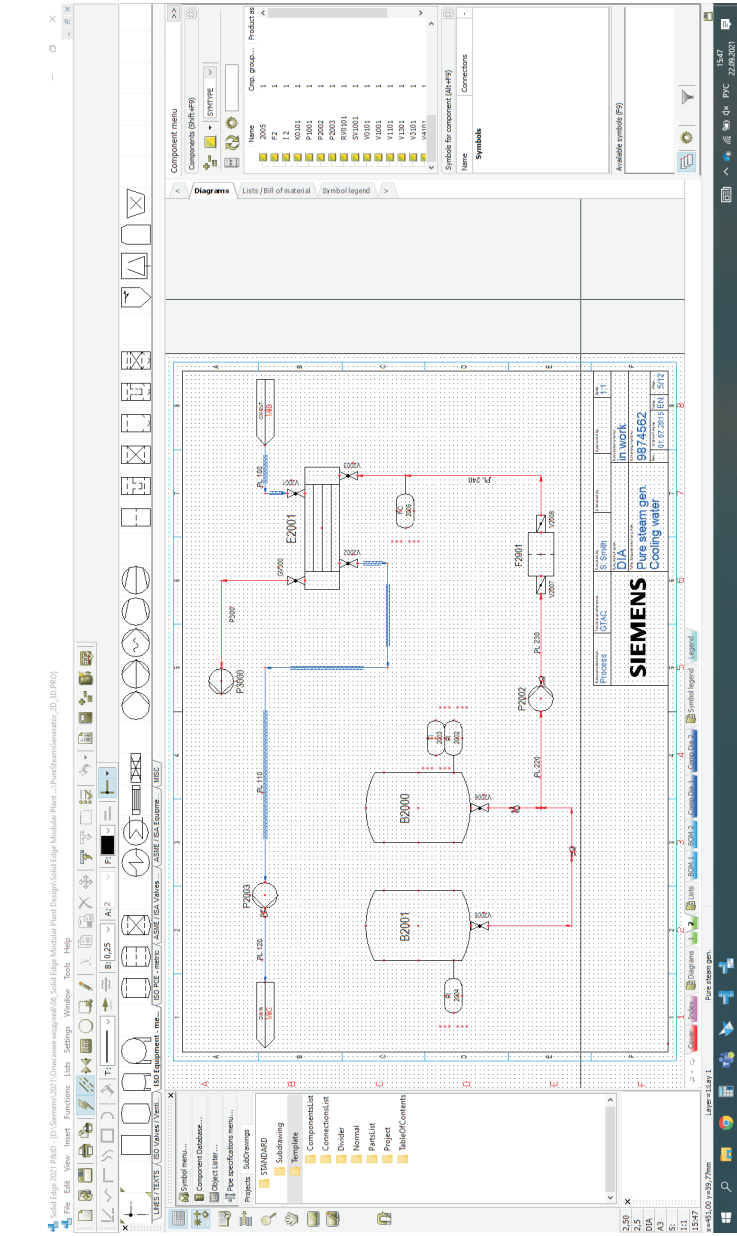


Рис. 7.1. Общий вид окна модуля P&ID Design с открытой исходной схемой

Подготовка к работе

1. Запустите редактор схем — модуль P&ID Design. Откройте уже созданную исходную схему трубопроводной системы. Ознакомьтесь с интерфейсом редактора, основными командами и приемами построения схем (рис. 7.1).
2. Запустите САПР Solid Edge (рис. 7.2). Откройте связанную с открытой схемой 3D-модель трубопроводной системы. Запустите модуль Piping Design и откройте список интеграции компонентов P&ID To-Do List.
3. Проанализируйте состав и структуру схемы, компоновку 3D-модели, получите у преподавателя задание по модификации схемы (модели).
4. С разрешения преподавателя приступайте к выполнению работы.

Проведение моделирования

Требуется выполнить модификацию схемы и 3D-модели согласно заданию, полученному от преподавателя. Пример модификации рассмотрен ниже.

1. Дополнить исходную схему фрагментом, приведенным на рис. 7.3, используя модуль P&ID Design.

Добавляемые компоненты:

- трубопроводы P300 класса Spec10CA;
- насос P3000 Grundfos NBE 80-250/247 AF2AEBAQE;
- вентиль GV300 ARI-STOBU PN16-40 12.006.

2. Дополнить 3D-модель трубопроводной системы в САПР Solid Edge согласно модифицированной схеме (рис. 7.4).

3D-построения необходимо выполнять в среде «Трубопровод» (Xpress Route) Solid Edge (рис. 7.5). Компоненты для добавления в 3D-модель следует брать из библиотеки стандартных изделий Piping Library.

3. Выполнить изометрический чертеж добавленного фрагмента трубопроводной системы с помощью модуля Isometric.

Задать шаблон чертежа. Загрузить данные трубопроводной системы. Выбрать стили чертежей для представления. Автоматически создать изометрический чертеж (рис. 7.6) и чертеж соединений построенного фрагмента трубопровода с таблицами элементов, сварных соединений и длин резки (рис. 7.7).

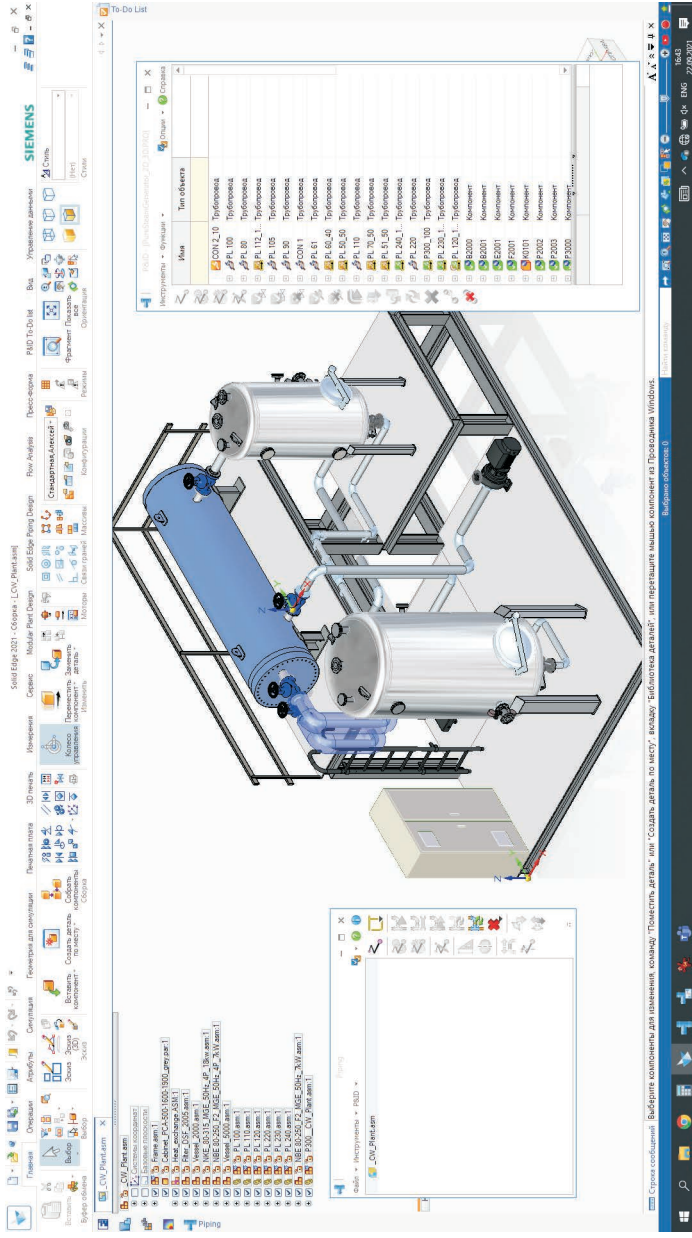


Рис. 7.2. Общий вид окна Solid Edge с исходной 3D-моделью

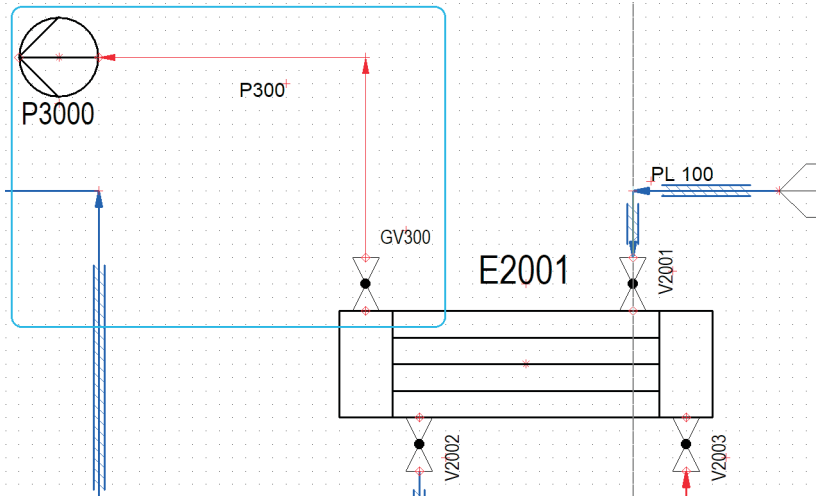


Рис. 7.3. Модифицированный фрагмент исходной схемы

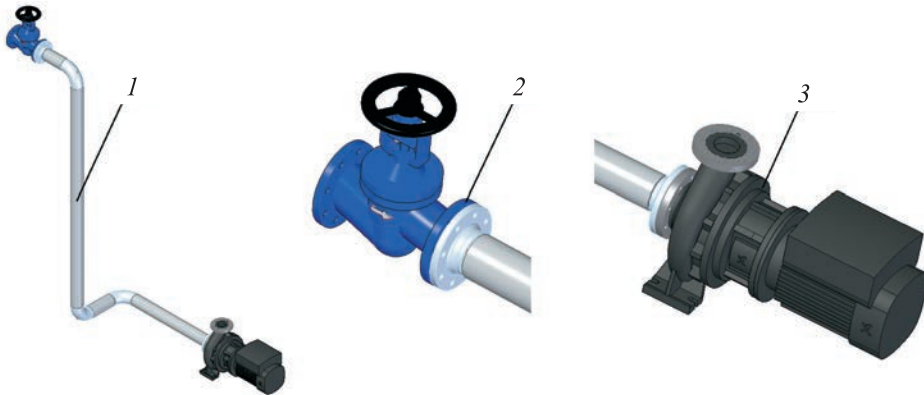


Рис. 7.4. Модифицированный фрагмент 3D-модель трубопроводной системы:
 1 — достроенные элементы трубопровода; 2 — добавленный вентиль; 3 — добавленный насос

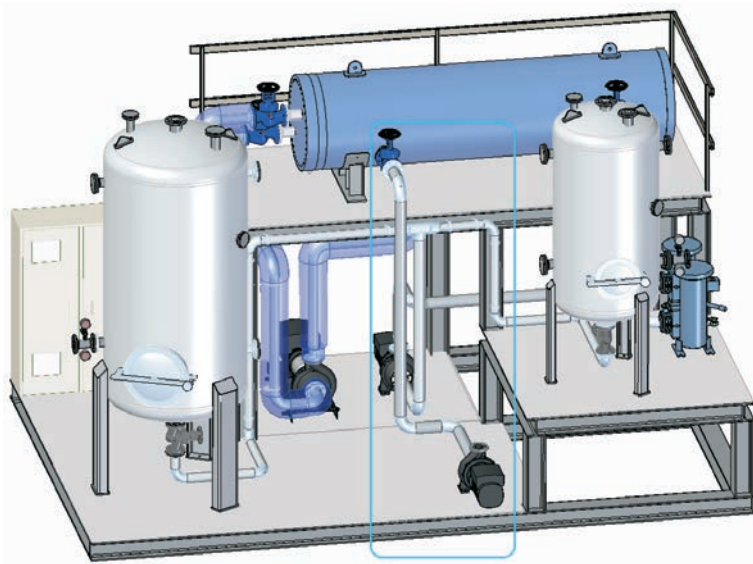


Рис. 7.5. Полная модифицированная 3D-модель трубопроводной системы с добавленным фрагментом

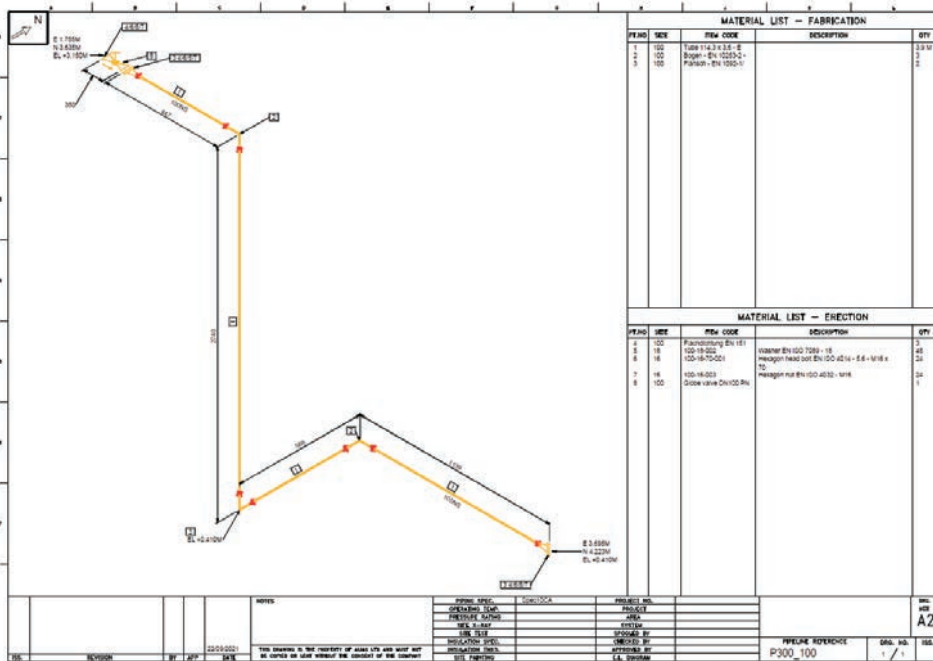


Рис. 7.6. Изометрический чертеж добавленного фрагмента трубопроводной системы

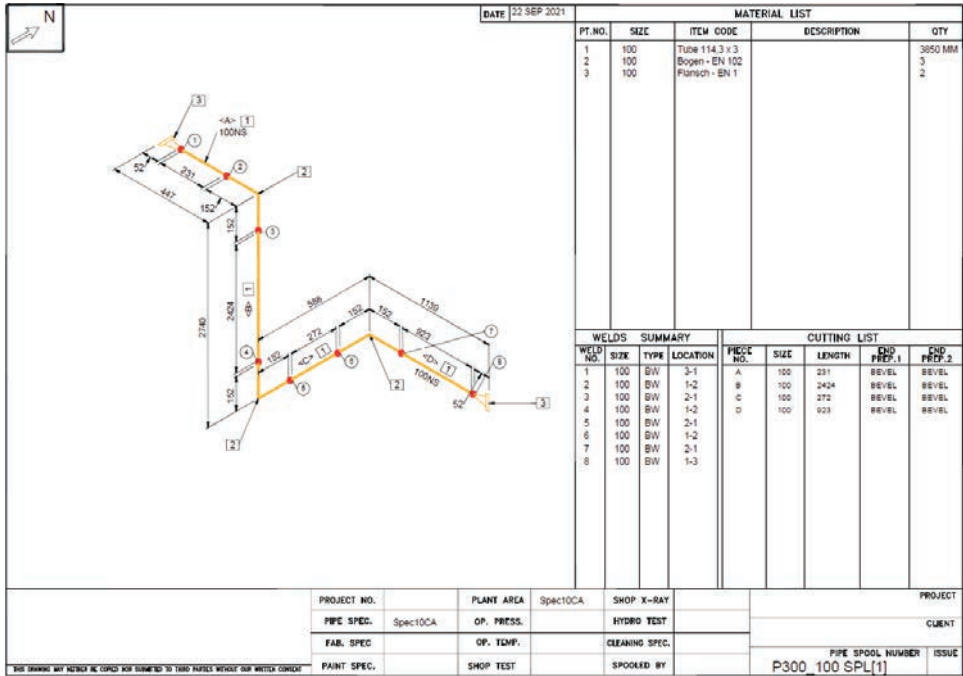


Рис. 7.7. Чертеж соединений добавленного фрагмента трубопроводной системы и таблицы элементов, сварных соединений и длин резки

Завершение работы

После завершения моделирования необходимо сохранить результаты работы над проектом — схему, 3D-модель трубопроводной системы, чертежи — в рабочей папке по указанию преподавателя.

Порядок оформления отчета

В отчете по выполненной работе должно быть представлено следующее.

1. Цель и задачи моделирования.
2. Общая схема трубопроводной системы и ее описание.
3. Схема модифицируемого/добавляемого фрагмента трубопроводной системы и его описание.
4. Методика проведения моделирования.
5. Результаты моделирования, включая модифицированную схему, 3D-модель и чертежи, оформленные согласно рабочей тетради к лабораторному практикуму.
6. Выводы по результатам моделирования.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие задачи моделирования решают модули P&ID Design, Piping Design, Xpress Route, Isometric?
2. Откуда извлекаются УГО элементов трубопроводных систем в модуле P&ID Design?
3. Что такое классы трубопроводов? Как они назначаются в САПР?
4. Как можно добавить стандартный компонент в трубопроводную систему?
5. Как поступить, если требуется добавить компонент, которого нет в БД стандартных изделий?
6. Как осуществляется связь между модулями схемотехнического и 3D-моделирования в рассмотренной САПР? Как синхронизировать проект трубопроводной системы?
7. Какие возможности по созданию конструкторской документации представляет модуль Isometric?
8. В каких форматах можно создавать чертежи в модуле Isometric?

Литература

1. *Гуревич Д.Ф.* Трубопроводная арматура: справ. пособие. 2-е изд.: М.: Машиностроение, 1981.
2. *Рудаченко А.В., Чухарева Н.В., Жилин А.В.* Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008.
3. *Тавастшерна Р.И., Бесман А.И., Позднышев В.С.* Технологические трубопроводы промышленных предприятий. М.: Стройиздат, 1991.
4. *Ямлеев Э.У.* Инженерные системы зданий и сооружений. Водоснабжение с основами гидравлики: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2018.
5. *Комина Г.П., Прошутинский А.О.* Гидравлический расчет и проектирование газопроводов: учеб. пособие. СПб.: СПбГАСУ, 2010.
6. Неразрушающий контроль в строительстве: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / И. Эйнав, Б. Артемьев, Е. Азизова, А. Азизова. М.: Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике, 2012.
7. *Журавлева Л.В.* Электрорадиоизмерения и метрология. М.: Издат. дом «Академия», 2019.
8. *Артемьев Б.В., Буклей А.А.* Радиационный контроль: учеб. пособие для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике. М.: Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике, 2011.
9. Nondestructive testing: In 8 vol. / V.V. Klyuev, V.F. Muzhitskiy, E.S. Gorkunov et al. Ed. by V.V. Klyuev. Vol. 1: in 3 books. М., 2010.
10. *Панфилова С.П., Власов А.И., Гриднев В.Н., Червинский А.С.* Бесконтактный тепловой контроль изделий электронной техники // Производство электроники. 2007. № 3. С. 25–30.
11. *Панфилова С.П., Власов А.И., Гриднев В.Н., Червинский А.С.* Бесконтактный тепловой контроль электронно-вычислительных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2007. № 6. С. 42–49.
12. *Гриднев В.Н., Сергеева М.Д., Чебова А.И.* Линейные модели распознавания тепловизионных изображений неисправностей электронных ячеек // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 57–66.
13. *Семенцов С.Г., Гриднев В.Н., Сергеева Н.А.* Тепловизионные методы оценки влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 1 (106). С. 3–14.
14. Виды современных расходомеров. URL: <http://npropramen.ru/information/other-flowmeters> (дата обращения 23.04.2020).
15. Руководство по эксплуатации VA520. URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/299165840> (дата обращения 23.04.2020).
16. Структуроскоп. URL: <https://www.ngpedia.ru/id490995p1.html> (дата обращения 23.04.2020)
17. Руководство по эксплуатации. Структуроскоп магнитный МС-10 / ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр»».

18. *Толмачев И.И.* Вихревая дефектоскопия ферромагнитных изделий: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008.

19. Вихревой дефектоскоп ВД-90НП. URL: <https://ntcexpert.ru/vihretokovuj-kontrol/vihretokovye-defektoskopy/1003-vihretokovuj-defektoskop-vd-90np> (дата обращения 23.04.2020).

20. *Власов К.В., Бобров А.Л.* Основы вихретокового неразрушающего контроля: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2019.

21. *Шубочкин А.Е.* Развитие методов и средств вихретокового и магнитного контроля металлопроката для оценки его остаточного ресурса: учеб. пособие. М.: Издат. дом «Спектр», 2018.

22. *Прилуцкий М.А.* Технология и технологические машины // Известия вузов. Сер. Машиностроение. 2008. № 4. С. 45–54.

23. *Толмачев И.И., Калиниченко А.Н.* Руководство по эксплуатации. Исследование магнитного толщинометра МТ2003: метод. пособие / ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр», 2018.

24. Толщинометры. URL: <http://sovitek.ru/page/94> (дата обращения 23.04.2020).

25. Руководство по эксплуатации. Магнитный толщиномер покрытий МТП-1 / Научно-производственное предприятие «ИнтерПрибор».

26. Проектирование модульных технологических установок с использованием решения Solid Edge Modular Plant Design. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/webinar/plant-design/57263> (дата обращения 23.04.2020).

27. Модульное проектирование технологических установок. URL: <https://solidedge.siemens.com/ru/solutions/products/3d-design/modular-plant-design/> (дата обращения 23.04.2020).

Нормативные документы

ГОСТ 2.784—96. Обозначения условные графические. Элементы трубопроводов.

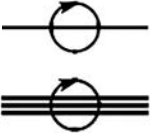
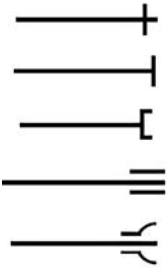
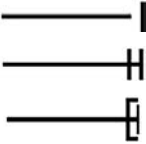
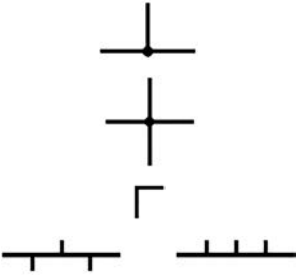

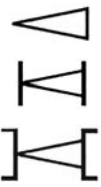
ГОСТ 31177—2003. Безопасность оборудования. Требования безопасности к гидравлическим и пневматическим системам и их компонентам. Гидравлика.

ГОСТ Р 54382—2011. Нефтяная и газовая промышленность. Подводные трубопроводные системы. Общие технические требования.

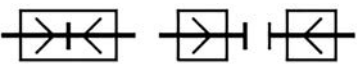

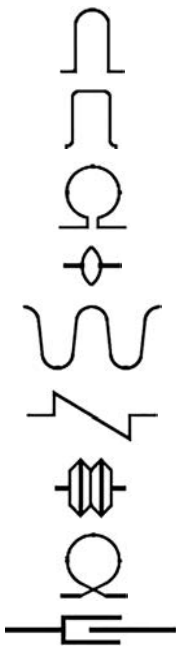
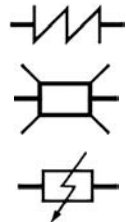
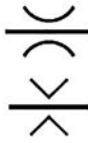
Условные графические обозначения пневмосистем в соответствии с ГОСТ 2.784—96
«Обозначения условные графические. Элементы трубопроводов»

Наименование	Обозначение
Трубопровод	
Соединение трубопроводов	
Пересечение трубопроводов без соединения	
Место присоединения (для отбора энергии или измерительного прибора): – несоединенное (закрыто) – соединенное	
Трубопровод с вертикальным стояком	
Трубопровод гибкий, шланг	
Изолированный участок трубопровода	
Трубопровод в трубе (футляре)	
Трубопровод в сальнике	
Соединение трубопроводов разъемное: – общее обозначение – фланцевое – штуцерное резьбовое – муфтовое резьбовое – муфтовое эластичное	

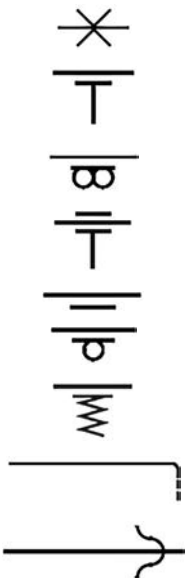


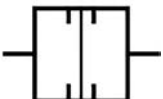
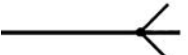
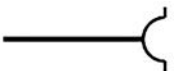
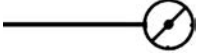
Продолжение

Наименование	Обозначение
Поворотное соединение: – однолинейное – трехлинейное	
Конец трубопровода под разъемное соединение: – общее обозначение – фланцевое – штуцерное резьбовое – муфтовое резьбовое – муфтовое эластичное	
Конец трубопровода с заглушкой (пробкой): – общее обозначение – фланцевый – резьбовой	
Детали соединений трубопроводов: – тройник – крестовина – отвод (колено) – разветвитель, коллектор, гребенка	
Сифон (гидрозатвор)	
Переход, патрубок переходный: – общее обозначение – фланцевый – штуцерный	

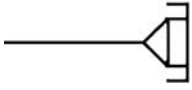
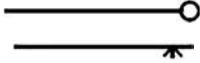
Продолжение

Наименование	Обозначение
Быстроразъемное соединение без запорного элемента (соединенное или разъединенное)	
Быстроразъемное соединение с запорным элементом (соединенное и разъединенное)	
<p>Компенсатор:</p> <ul style="list-style-type: none"> – общее обозначение – П-образный – лирообразный – линзовый – волнистый – Z-образный – сифонный – кольцеобразный – телескопический 	
<p>Вставка:</p> <ul style="list-style-type: none"> – амортизационная – звукоизолирующая – электроизолирующая 	
<p>Место сопротивления с расходом:</p> <ul style="list-style-type: none"> – зависящим от вязкости рабочей среды – не зависящим от вязкости рабочей среды (шайба дроссельная, сужающее устройство расходомерное, диафрагма) 	

Продолжение

Наименование	Обозначение
Опора трубопровода: – неподвижная – подвижная (общее обозначение) – шариковая – направляющая – скользящая – катковая – упругая – капельная – смазочное сопло	
Подвеска: – неподвижная – направляющая – упругая	
Гаситель гидравлического удара	
Мембрана прорыва	
Форсунка	
Заборник воздуха из атмосферы	
Заборник воздуха от двигателя	

Окончание

Наименование	Обозначение
Присоединительное устройство к другим системам (испытательным, промывочным машинам, кондиционерам рабочей среды и т. п.)	
Точка смазывания: – общее обозначение – разбрызгиванием	

Сведения о базовой кафедре, обеспечивающей инженерный практикум

Кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» (ИУ-4) была образована в 1938 г. на факультете «Приборостроение» под названием «Технология точного приборостроения» (П8), которую возглавил профессор А.Б. Яхин (1901–1957). В то время кафедра не являлась выпускающей и проводила общетехнологическую подготовку студентов факультета. Коллектив кафедры стоял у истоков нового направления науки и техники, связанного с глубокой проработкой вопросов точности, надежности и качества в точном приборостроении. Научные работы того времени были направлены на создание технологических процессов производства, сборки, контроля элементов приборных систем.

Можно считать, что научная школа в области технологии и конструирования приборов в МГТУ им. Н.Э. Баумана зародилась в начале 30-х годов XX в., когда на механическом факультете для специальности «Точная механика» профессор А.Б. Яхин начал читать курс «Технология приборостроения».

В 1958 г. кафедру возглавил профессор А.Н. Малов, при котором значительно расширились научные исследования в области конструирования и технологии приборов и радиоэлектронной аппаратуры, были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию новых методов расчета конструкций аппаратуры, отработке и внедрению новаторских технологических процессов. Впервые на междисциплинарной основе был разработан учебный план подготовки инженера-конструктора и инженера-технолога электронно-вычислительной и радиоэлектронной аппаратуры.

С 1976 г. на кафедре «Конструирование и технология производства ЭВА» (П8) стали активно развиваться направления, связанные с разработкой элементной базы ЭВМ и перспективных технологий ее производства в условиях комплексной информатизации. Были заложены основы нового научного направления «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике». Основное внимание уделялось проведению сквозного (комплексного) схемотехнического, конструкторского и технологического проектирования соответствующей аппаратуры при активном использовании автоматизированных средств.

В настоящее время базовое научное направление кафедры ИУ-4 — «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике». Научная деятельность кафедры нацелена на исследование методов и разработку средств решения конструкторских и технологических задач, касающихся электронных систем, в условиях комплексной информационной поддержки жизненного цикла изделий. В основе этого научного направления лежат три базовых компонента.

1. Конструкция (лат. constructio, англ. construction, нем. die Konstruktion, фр. construction — строение, устройство, построение, план, взаимное расположение частей).

2. Технология (греч. techne — искусство, мастерство + logos — понятие, учение, англ. technology, нем. die technologie, фр. technologie).

3. Информатика (нем. informatik, англ. information science, фр. informatique, англ. computer science в США — компьютерная наука, computing science в Великобритании — вычислительная наука) — наука о способах получения, накопления, хранения, преобразования, передачи, защиты и использования информации (в нашем случае конструкторско-технологической).

Под конструкцией электронных средств понимается совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящимися в определенной пространственной, механической, тепловой, электромагнитной и энергетической взаимосвязи. Эта взаимосвязь определяется системотехнической, схемотехнической, конструкторской и технологической документацией и обеспечивает выполнение электронной аппаратурой заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях воздействия на нее различных факторов: эксплуатационных, производственных, социальных.

Технология производства, или технологический процесс, — основная часть производственного процесса, заключающаяся в выполнении определенных действий, которые направлены на изменение исходных свойств объекта производства (в нашем случае — электронной аппаратуры) и достижение им определенного состояния, соответствующего технической документации. Конструирование и технология производства, с одной стороны, являются частями сложного процесса разработки электронной аппаратуры, а с другой — не могут выполняться по отдельности, без учета взаимосвязей между ними и с другими этапами разработки. Конструирование и технология, будучи этапами более общего процесса «разработка — производство — эксплуатация — утилизация» (жизненного цикла изделия), определяют в конечном итоге общие потребительские свойства электронной аппаратуры.

Информатика позволяет решать задачи обработки информации с использованием вычислительных машин и сетей. Термин «информатика» возник в 60-х годах XX в. во Франции для названия области науки, занимающейся автоматизированной переработкой информации, как слияние французских слов information и automatique (F. Dreyfus, 1972). Тематика исследований в информатике велика и постоянно расширяется: теория вычислимости и искусственный интеллект, теория сложности вычислений, информационные структуры и базы данных, языки программирования, представление знаний, социальный аспект развития информационных систем и т. п.

Научные исследования коллектива кафедры имеют междисциплинарный характер и охватывают область фундаментальной и прикладной науки и техники. Предметом исследований являются проектирование и совершенствование методов производства и применения интегрированных систем,

основанных на законах и принципах нано- и микросистемной техники в условиях сквозной информатизации жизненного цикла изделий. Результаты исследований научной школы формируются на основе последних достижений инженерных методов проектирования и системного анализа, физики твердого тела, квантовой электроники, физической химии, оптики и электронных технологий. Их содержание определяется необходимостью установления фундаментальных закономерностей, обуславливающих физико-химические особенности формирования микро- и наноразмерных структур, формирования заданных механических, электронных и оптических свойств данных структур и синтеза на основе микро- и наносистемной элементной базы функциональных средств и систем нового поколения.

Проводимые коллективом кафедры научные исследования важны для разработки новых принципов, а вместе с ними и нового поколения сверхминиатюрных супербыстродействующих систем обработки информации и управления. Исследования включают в себя разработку и создание функционально законченных сложных микро- и нанокomпонентов, материалов, элементной базы, синтез технологических процессов их изготовления, изучение физических и физико-химических явлений в процессах их получения, проектирование и конструирование приборов на основе современной элементной базы и перспективных материалов, методы разработки и применения диагностического и технологического оборудования, синтез математических моделей процессов электронных технологии и объектов электроники в рамках комплексной сквозной информатизации.

Коллектив кафедры неоднократно становился победителем конкурса на гранты Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

Кафедра сотрудничает с ведущими отечественными предприятиями: ОАО «Алмаз-Антей», ООО «МНПО «Спектр», ОАО «НИЦЭВТ», ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва» и др.

Лаборатории располагаются в ауд. 275 главного учебного корпуса МГТУ им. Н.Э. Баумана, тел.: 8(499)2636553, <https://vk.com/club242540>

Содержание

Предисловие	3
От авторов	4
Словарь терминов	6
1. Теоретические основы проектирования трубопроводных систем	8
1.1. Трубопроводные системы и их характеристики	8
1.2. Конструктивная реализация трубопроводных систем	13
1.3. Материалы трубопроводных систем	20
1.4. Маркировка	24
1.5. Расчет трубопроводных систем	26
1.6. Визуально-измерительный метод неразрушающего контроля	30
1.7. Магнитные методы неразрушающего контроля	37
1.8. Радиографический метод неразрушающего контроля	41
1.9. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля	46
1.10. Тепловизионный метод неразрушающего контроля	53
2. Инженерный практикум по трубопроводным системам	56
Структура и состав стенда для экспериментальных исследований трубопроводных систем	56
Экспериментальная работа № 1. Измерение давления в трубопроводных системах	56
Экспериментальная работа № 2. Использование физических законов Бойля — Мариотта и Бернулли на практике	63
Экспериментальная работа № 3. Определение расхода газа с помощью расходомера VA520	67
Экспериментальная работа № 4. Исследование напряженно- деформированного состояния металлоконструкций, изготовленных из ферромагнитной стали	70
Экспериментальная работа № 5. Измерение поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из ферромагнитных и немагнитных материалов и сплавов	76
Экспериментальная работа № 6. Исследование защитных покрытий трубопроводов	83
Экспериментальная работа № 7. Моделирование трубопроводных систем	87
Литература	95
Приложение 1. Условные графические обозначения пневмосистем в соответствии с ГОСТ 2.784—96 «Обозначения условные графические. Элементы трубопроводов»	97
Приложение 2. Сведения о базовой кафедре, обеспечивающей инженерный практикум	102

Учебное издание

Артемьев Борис Викторович
Артемьев Игорь Борисович
Власов Андрей Игоревич
Жалнин Владимир Петрович
Косовский Антов Владимирович
Курносенко Алексей Евгеньевич
Селиванов Кирилл Владимирович
Цивинская Татьяна Анатольевна

Трубопроводные системы: инженерный практикум

Редактор *Е.К. Кошелева*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Ю.Н. Морозова*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *Т.В. Батраковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 28.02.2022. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 8,61. Тираж 152 экз. Изд. № 1027-2021.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, к. 1.
info@bmstu.press
<https://bmstu.press>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, к. 1.
baumanprint@gmail.com