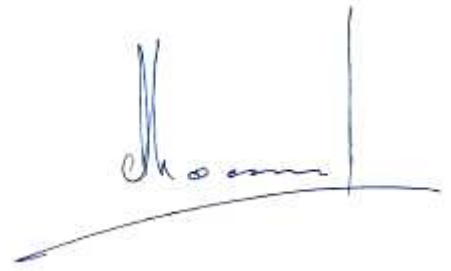


На правах рукописи



КОМАРОВ АЛЕКСЕЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ
НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ С ВНУТРЕННИМИ РАССЛОЕНИЯМИ
СТЕНОК ТРУБ**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2012

Работа выполнена в Ухтинском государственном техническом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Бирилло Игорь Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кучерявый Василий Иванович

кандидат технических наук
Александров Юрий Викторович

Ведущая организация: ОАО «Северные магистральные
нефтепроводы»

Защита состоится 22 марта 2012 г. в 10–00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 21 » февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, профессор

Н.М. Уляшева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В процессе диагностирования магистральных нефтегазопроводов обнаруживается многочисленное количество разнообразных дефектов стенок труб: коррозионные повреждения, растрескивание металла, вмятины, задиры, внутренние несплошности (расслоение) и т.п. Устранение всех выявляемых дефектов невозможно по причине ограниченности временных, трудовых и финансовых ресурсов предприятий, кроме того это и экономически неоправданно, так как не каждый выявляемый дефект представляет реальную угрозу для безопасного функционирования объекта. В этом случае работоспособность магистральных нефтегазопроводов обеспечивается путем выборочного устранения только тех дефектов, которые в процессе дальнейшей эксплуатации объекта приведут к невозможности осуществления безопасного транспорта продукта с заданными техническими параметрами.

Для обоснования степени опасности наиболее распространенных наружных дефектов стенок труб разработаны и успешно используются на практике специальные расчетные методики, но для внутренних расслоений стенок труб, являющихся распространенными дефектами магистральных нефтегазопроводов, расчетное обоснование их степени опасности в настоящее время не проводится. Отбраковку труб с внутренними расслоениями стенок выполняют на основе требований к положению и размерам дефектов, возникающих при производстве труб. Опыт эксплуатации объектов транспорта нефти и газа показывает, что такой подход оправдан при сооружении или реконструкции объектов, но нерационален в тех случаях, когда объект уже находится в работе, особенно в течение длительного периода времени, и становятся известны отклонения от проектных решений, технологические режимы, конкретные нагрузки и воздействия, информация об использовании материалах и их реальных свойствах. Вследствие того, что используемые нормы выбраковки труб с внутренними расслоениями стенки не учитывают опасность дефектов при эксплуатации, то некоторые элементы, подлежащие удалению, могут быть работоспособными. Для оценки работоспособности трубного элемента с внутренними расслоениями стенок необходимо иметь эксплуатационные критерии отбраковки, которые позволяют учесть опасность имеющихся дефектов для конкретной рассматриваемой конструкции. Поэтому комплексное расчетно-экспериментальное исследование работоспособности нефтегазопроводных труб с внутренним расслоением стенок является актуальной научно-практической задачей.

Цель работы: Расчетно-экспериментальная оценка работоспособности нефтегазопроводов при наличии в стенках труб внутренних расслоений.

Задачи исследования:

- проанализировать методы нормирования допустимой дефектности металлических конструкций и фактологический материал о наличии и особенностях внутреннего расслоения стенок нефтегазопроводных труб;

- адаптировать зависимости по расчету тонкостенных цилиндрических оболочек для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) и работоспособности нефтегазопроводных труб с внутренними расслоениями стенок, проанализировать особенности влияния внутреннего расслоения на НДС труб;

- оценить возможность идентификации внутренних расслоений стенок методом ультразвуковой толщинометрии;

- провести экспериментальные исследования по влиянию внутреннего расслоения металла на его механические свойства, на прочность трубы и сварного соединения;

- разработать методику оценки работоспособности нефтегазопроводных труб с внутренними расслоениями стенок на стадии эксплуатации объекта и оценить экономическую эффективность ее внедрения.

Научная новизна

1. На основе анализа 7500 данных установлен признак наличия внутреннего расслоения в стенке трубы: изменение в точке контроля показаний ультразвукового толщиномера не менее чем на 10 % при измерении толщины стенки двумя пьезоэлектрическими преобразователями с рабочими частотами 5,0 и 2,5 МГц, а площади поверхности с показаниями, составляющими 20...80 % от номинального значения толщины стенки, не менее чем в 1,5 раза.

2. По результатам испытания на статическое растяжение образцов из стали 17Г1С и Х70 установлено, что при протяженности внутренних расслоений до 90 % длины образцов не происходит снижения значений стандартных механических характеристик металла.

3. Теоретически обосновано, что при газообразном характере внутренней несплошности приращение напряжений в трубном элементе с расслоением стенки по сравнению с трубным элементом, не имеющим дефектов, составляет не менее 10 % и зависит от значений рабочего давления и радиальной величины дефекта, а при твердом характере несплошности приращение напряжений не превышает 5 %.

4. Установлено, что циклическое изменение внутреннего давления вызывает развитие внутренних расслоений в стенке трубы.

Защищаемые положения:

- аналитические зависимости, полученные для расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенной трехслойной цилиндрической оболочки, позволяют оценить работоспособность трубного элемента с внутренними несплошностями стенки;

- разработанный алгоритм проведения ультразвуковой толщинометрии с использованием двух пьезоэлектрических преобразователей с рабочими частотами 5,0 и 2,5 МГц позволяет определить наличие внутреннего расслоения в стенках эксплуатирующихся магистральных нефтегазопроводов;

- наличие и площадь внутренних расслоений металла не влияют на значения его стандартных механических характеристик и на прочность сварного соединения;

- разработанная методика оценки работоспособности элементов эксплуатирующихся нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенок позволяет учесть эксплуатационные и конструктивные особенности трубопровода и исключить необходимости замены «дефектных» фрагментов трубопровода, которые могут обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию объекта.

Достоверность полученных результатов определяется корректным применением современных теоретических и экспериментальных методов исследований, а также использованием поверенного исследовательского оборудования, приборов и средств измерений.

Практическая значимость работы заключается в том, что использование разработанной методики на реальных объектах позволяет учесть эксплуатационные и конструктивные особенности трубопровода и оптимизировать объемы ремонтных работ, исключив необходимость замены фрагментов трубопровода с внутренними расслоениями, которые позволяют осуществлять дальнейшую безопасную эксплуатацию объекта, что обеспечивает экономический эффект в размере не менее 1,5 млн. рублей для трубопроводной обвязки одного компрессорного цеха.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в работе, были использованы филиалом ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта при разработке рекомендаций по оценке работоспособности трубных элементов, имеющих внутренние расслоения стенки.

Методические указания по оценке работоспособности нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенок внедрены и используются в учебном процессе при подготовке магистров по программе 131006 – Надежность газонефтепроводов и хранилищ на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» Ухтинского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: научно-технических конференциях сотрудников и преподавателей УГТУ (г. Ухта, 2008, 2009, 2010 гг.); Межрегиональном семинаре «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2009, 2012 гг.); X Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех» (г. Ухта, 2009 г.); III Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири» (ТГНГУ, г. Тюмень, 2009 г.); V Международная конференция «Обслуживание и ремонт газонефтепроводов» (ДООАО «Оргэнергогаз», г. Москва, 2010 г.); девятой Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (РГУНГ, г. Москва, 2011 г.); четвертой Международной научно-технической конференции GTS – 2011 (г. Москва, 2011 г.); девятнадцатой международной деловой встрече «Диагностика 2011» (г. Геленджик, пос. Кабардинка, 2011 г.); VII Международной учебно-научно-практической конференции "Трубопроводный транспорт – 2011" (г. Уфа, 2011 г.); VII Международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (Республика Беларусь, г. Новополоцк, 2011 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (РГУНГ, г. Москва, 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 5 – в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 103 наименований. Работа изложена на 161 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков и 18 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе проанализированы методы нормирования допустимой дефектности металлических конструкций и фактологический материал о наличии и особенностях внутреннего расслоения стенок нефтегазопроводных труб, сформулированы цель и задачи исследования.

В общем случае назначение норм – гарантирование функциональных свойств конструкции, в том числе прочностных, за счет использования современных технологий изготовления, транспортировки, хранения и монтажа ее элементов. Различают технологические и эксплуатационные допустимости дефектов. Технологические нормы учитывают достигнутый уровень качества производства,

основываются на статистических данных о частоте и размерах появления дефектов и не связаны с анализом прочности конструкции. Эксплуатационные нормы разрабатываются на основе результатов экспериментов и расчетов. При экспериментальной оценке влияния дефектов на несущую способность трубных элементов осуществляют испытание элементов с дефектами. Расчетные методы основываются на математическом моделировании НДС конструкции с дефектом путем использования: аналитических зависимостей, численных методов, инженерных (полуэмпирических) зависимостей. Вопросам теоретического и экспериментального обоснования опасности разнообразных дефектов посвящены работы Н.А. Гафарова, К.М. Гумерова, А.Р. Даффи, Дж.М. Мак Клура, Л.А. Димова, О.М. Иванцова, В.Я. Кершенбаума, В.И. Кирноса, Н.А. Махутова, У.М. Мэкси, М. Руди, В.В. Харионовского, В.П. Черния, Ю.А. Чиркова, А.М. Шарыгина, В.М. Шарыгина, М.А. Широкова, Н.Р. Ямурова и других ученых. Эксплуатационные нормы позволяют учесть фактическую несущую способность конструкций и исключить необходимость замены дефектных, но работоспособных элементов, что в условиях эксплуатации весьма важно, так как связано с уменьшением потребности материально технических ресурсов и обеспечением непрерывности технологического процесса.

Одним из типов дефектов, обнаруживаемых в процессе диагностических обследований магистральных нефтегазопроводов, являются внутренние расслоения стенок труб. Характерным признаком внутреннего расслоения является наличие аномально низких значений толщины стенки, составляющих, как правило, половину ее номинального значения. Низкие значения обусловлены нарушением однородности металла неметаллическими включениями, пористостью, газовыми пузырями, но не уменьшением толщины стенки. Формируется такая неоднородность в процессе производства металла и труб, при этом полное исключение появления такой дефектности является практически невыполнимой задачей. Для эксплуатирующихся магистральных нефтегазопроводов внутреннее расслоение стенок является достаточно распространенным дефектом. Например, по результатам внутритрубной инспекции участка нефтепровода протяженностью 150 км, построенного и принятого в эксплуатацию в 1973 г., было зарегистрировано 7265 расслоений и включений, что составило 65,4 % от общего объема обнаруженных дефектов. При оценке технического состояния надземных технологических трубопроводов «высокой» стороны компрессорных станций фиксируется от 5 до 10 элементов с расслоением стенки практически на трубопроводах каждого компрессорного цеха. Внутренние расслоения зарегистрированы на трубах их сталей 17Г1С, 14Г2САФ, 17Г2СФ, а также из сталей контролируемой прокатки

производства Франции и Харцызского трубного завода. Размеры обнаруживаемых несплошностей (расслоений), как правило, превышают установленные нормативные значения. При этом все имеющиеся нормы регламентируют качество продукции, поставляемой потребителю, т.е. на стадии ее изготовления, а не в процессе последующей эксплуатации объекта. Методик оценки работоспособности магистральных нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенок на стадии их эксплуатации в настоящее время не разработано.

Во второй главе обоснована расчетная схема для оценки напряженно-деформированного состояния трубных элементов с расслоением стенки, получены аналитические зависимости для определения параметров НДС тонкостенных цилиндрических элементов при разном характере внутренней несплошности, проанализировано влияние внутреннего расслоения на НДС тонкостенной цилиндрической оболочки, получены зависимости для оценки работоспособности трубы, имеющей внутренние расслоения стенки.

В качестве расчетной схемы была принята бесконечная трехслойная цилиндрическая конструкция, нагруженная внутренним давлением p . Трехслойная конструкция состоит из внешней и внутренней оболочек, между которыми находится прослойка толщиной Δ . Прослойка располагается на всей протяженности оболочки, а в окружном направлении – по всему ее периметру. В процессе анализа было рассмотрено два вида прослойки: газообразная и твердая.

Для каждого из вышеназванных случаев были рассмотрены особенности работы трубной конструкции, выведены зависимости для вычисления максимальных механических напряжений и коэффициентов их концентрации, а также проанализировано влияние внутренних несплошностей на НДС трубы.

В первом случае, т. е. при газообразном характере прослойки, в процессе нагружения рассматриваемой конструкции внутренним давлением p было выделено два характерных этапа ее работы. На первом этапе, до тех пор, пока не закроется зазор Δ , давление воспринимается только внутренней частью трубного элемента. На втором этапе, т.е. после того, как радиальная деформация внутренней оболочки достигает величины Δ , нагрузка от дальнейшего повышения давления будет восприниматься обеими частями трубного элемента, т.е. в этом случае рассматривается оболочка с толщиной стенки, равной сумме толщин стенок обеих (наружной и внутренней) частей трубного элемента. Наибольшая величина напряжений для такой расчетной схемы определяется по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{p_{\Delta}(D_n - 2\delta)}{2(\delta - h)} + \frac{(p - p_{\Delta})(D_n - 2\delta)}{2\delta}, \quad (1)$$

где p_{Δ} – давление, при котором закроется зазор Δ , определяемое по формуле:

$$P_{\Delta} = \frac{4E(\delta - h)\Delta}{(D_n - 2\delta)^2(1 - 0,5\mu)}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала трубы, МПа; δ – толщина стенки трубы, мм; h – глубина залегания расслоения от наружной поверхности трубы, мм; Δ – размер внутренней несплошности в радиальном направлении, мм; D_n – наружный диаметр трубы, мм; μ – коэффициент Пуассона.

Коэффициент концентрации напряжений на первом этапе работы конструкции, т. е. до закрытия прослойки Δ и достижения внутреннего давления p_{Δ} , не изменяется и равен отношению толщины стенки трубного элемента к глубине залегания прослойки, измеренной от внутренней поверхности стенки:

$$K_{кц} = \delta/(\delta - h). \quad (3)$$

После закрытия радиального зазора Δ выражение для вычисления коэффициента концентрации напряжений имеет следующий вид:

$$K_{кц} = 1 + \frac{p_{\Delta}}{p} \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (4)$$

где α – относительная глубина залегания расслоения, равная $\alpha = h/\delta$.

Во втором случае, т. е. при твердом характере межбололочечной прослойки, она, испытывая сжатие, будет передавать часть давления от внутренней части трубного элемента на наружную. Поскольку величина сжимающих напряжений в прослойке мала (меньше величины внутреннего давления p), то прослойка была принята несжимаемой, а выражение для вычисления максимальных кольцевых напряжений в таком трубном элементе было получено исходя из условия совместности деформации его наружного и внутреннего слоев. Для такой расчетной схемы выражения для определения максимальных значений напряжений и коэффициента концентраций имеют следующий вид:

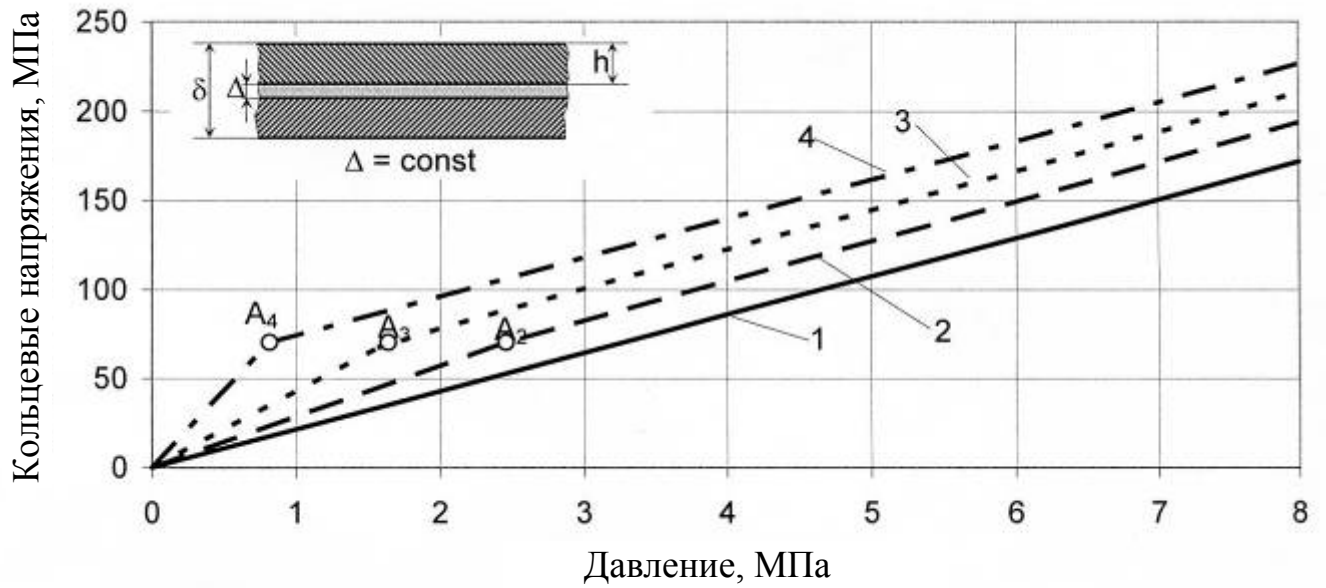
$$\sigma_{\max} = \frac{p(D_n - 2\delta)}{2(\delta - h) \left(1 + \frac{(D_n - 2\delta)^2 h}{(D_n - 2h)^2 (\delta - h)} \right)}; \quad K_{кц} = \frac{1}{(1 - \alpha) + \frac{\alpha}{\left[1 + \frac{2\delta(1 - \alpha)}{D_n - 2\delta} \right]^2}}. \quad (5)$$

Выполненный анализ влияния внутренних несплошностей на НДС трубы показал следующее.

1. При газообразном характере внутренней несплошности приращение напряжений в трубном элементе с расслоением стенки составляет не менее 10 % и зависит от значения рабочего давления и радиальной величины дефекта (рис. 1; 2). При твердом характере несплошности рост напряжений незначителен и

определяется только глубиной залегания дефекта. В рассмотренном примере (рис. 3) рост напряжений составил 2,3 %, при этом максимальное увеличение напряжений происходит в том случае, если дефект залегает посередине толщины стенки. При другом положении расслоения коэффициент концентрации напряжений снижается.

а



б

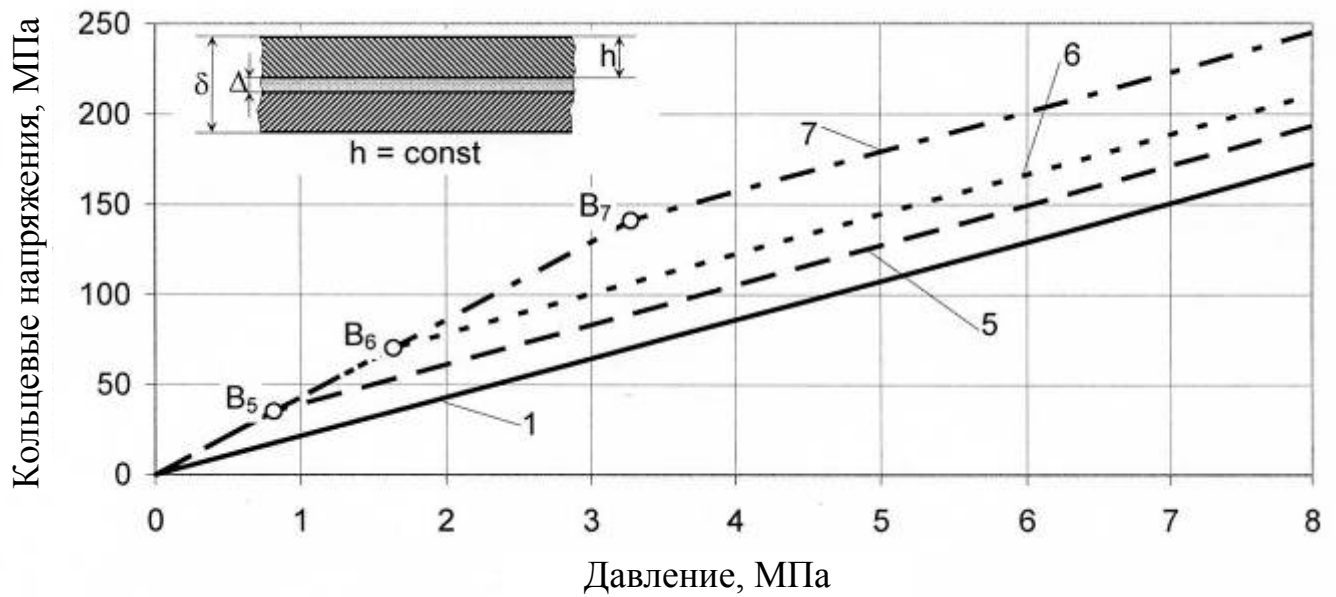
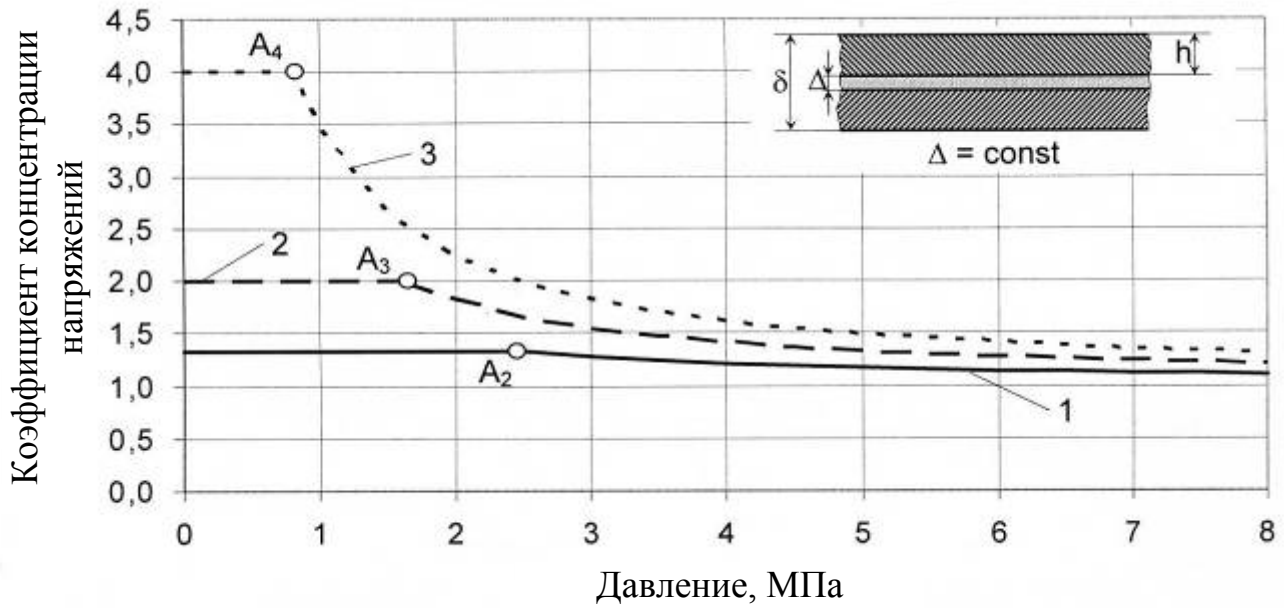


Рис.1. Влияние положения расслоения по высоте стенки (а) и его радиальной величины (б) на напряженно-деформированное состояние стенки трубы:

1 – при отсутствии расслоения; 2...7 – при наличии расслоения: 2 – $h = 4$ мм, $\Delta = 0,1$ мм; 3 – $h = 8$ мм, $\Delta = 0,1$ мм; 4 – $h = 12$ мм, $\Delta = 0,1$ мм; 5 – $\Delta = 0,05$ мм, $h = 8$ мм; 6 – $\Delta = 0,1$ мм, $h = 8$ мм; 7 – $\Delta = 0,2$ мм, $h = 8$ мм.

A_2 ; A_3 ; A_4 ; B_5 ; B_6 ; B_7 – точки, соответствующие закрытию расслоения Δ

а



б

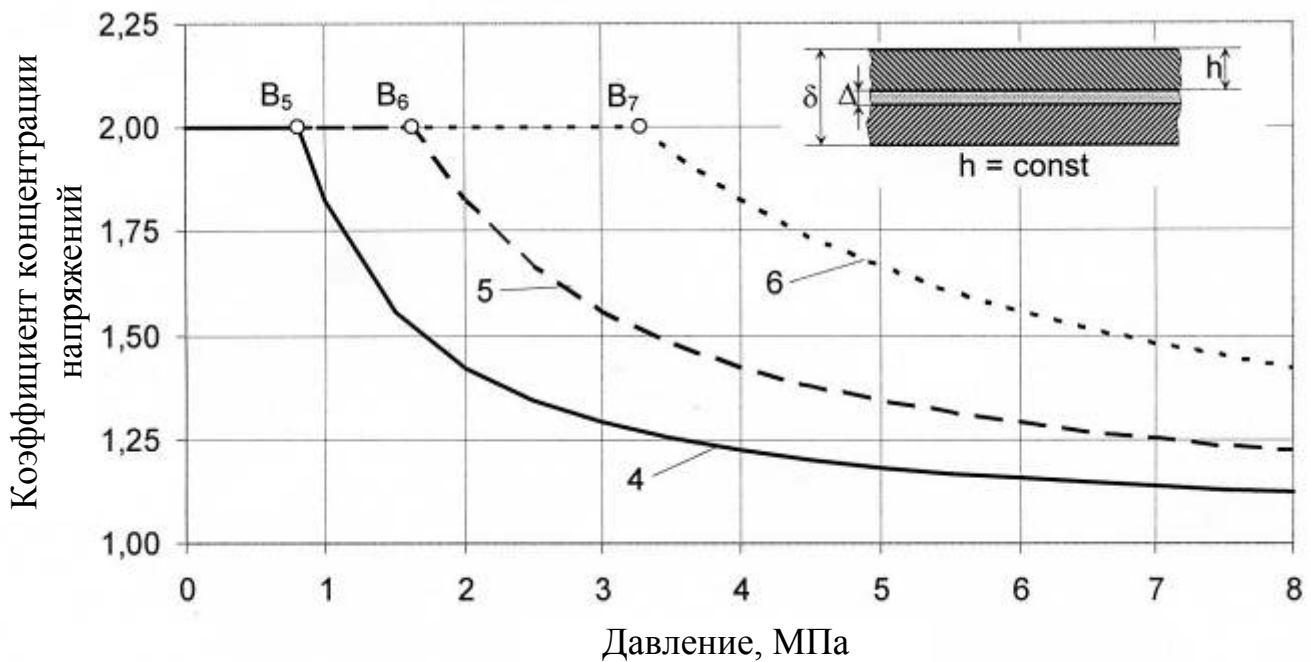


Рис.2. Влияние положения расслоения по высоте стенки (а) и его радиальной величины (б) на концентрацию кольцевых напряжений в стенке трубы:

1 – $h = 4$ мм, $\Delta = 0,1$ мм; 2 – $h = 8$ мм, $\Delta = 0,1$ мм; 3 – $h = 12$ мм, $\Delta = 0,1$ мм;
 4 – $\Delta = 0,05$ мм, $h = 8$ мм; 5 – $\Delta = 0,1$ мм, $h = 8$ мм; 6 – $\Delta = 0,2$ мм, $h = 8$ мм.

A_2 ; A_3 ; A_4 ; B_5 ; B_6 ; B_7 – точки, соответствующие закрытию расслоения Δ

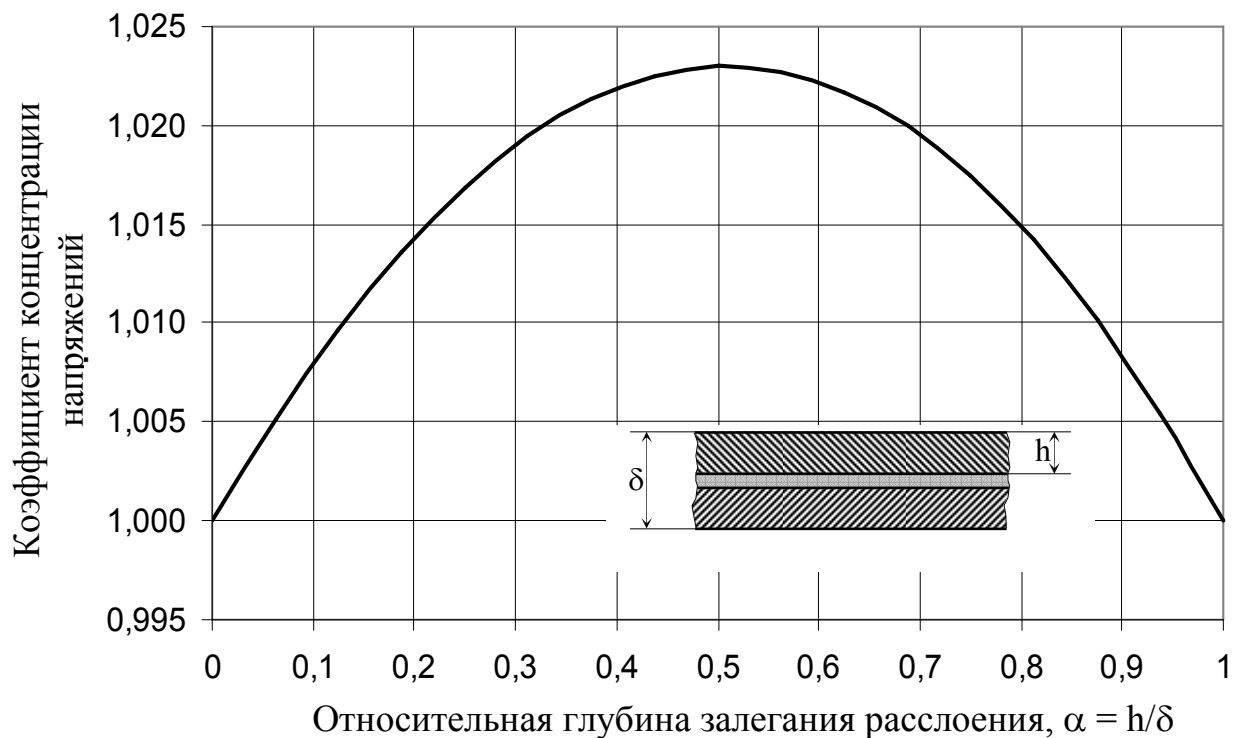


Рис. 3. Коэффициент концентрации напряжений в стенке трубы ($D_H=720$ мм, $\delta=16$ мм), имеющей внутренние расслоения стенки в виде твердой прослойки

2. При наличии газообразной несплошности абсолютная величина приращения напряжений определяется радиальной толщиной дефекта. После закрытия дефекта величина приращения напряжений остается постоянной, не зависящей от значения внутреннего давления (рис. 1).

3. Коэффициент концентрации напряжений до закрытия газообразной несплошности Δ не изменяется и равен отношению номинальной толщины стенки трубного элемента к глубине залегания дефекта, измеренной от внутренней поверхности стенки. После закрытия газообразной несплошности Δ происходит уменьшение коэффициента концентрации напряжений (рис.2).

4. При наличии газообразной несплошности более высокую опасность для трубы представляют расслоения, располагающиеся ближе к внутренней поверхности стенки (рис. 1; 2).

Критерий оценки работоспособности трубы на стадии эксплуатации объекта принят в следующем виде:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad (6)$$

где σ_{\max} – максимальные напряжения в стенке «дефектного» элемента; $[\sigma]$ – допустимые напряжения, определяемые по формуле:

$$[\sigma] = R_2^H \frac{m}{0,9k_H}, \quad (7)$$

где R_2^H – нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла труб, МПа, принимаемое равным минимальному значению предела текучести по государственным стандартам и техническим условиям на трубы; m – коэффициент условий работы трубопровода, принимаемый по СНиП 2.05.06-85*; k_H – коэффициент надежности по назначению трубопровода, принимаемый по СНиП 2.05.06-85*.

При этом если выполняется условие 6, т.е. когда фактические напряжения σ_{\max} не превышают значения, установленного нормами на проектирование нового объекта, то, несмотря на наличие расслоений, уровень надежности трубы достаточен для обеспечения ее безопасной эксплуатации, и нет необходимости в ее замене.

Далее следует отметить, что при эксплуатации нефтегазопроводов наиболее понятной критериальной оценкой работоспособности дефектной трубы является значение допустимого рабочего давления $[p]$. Из условия (6) с учетом зависимостей (1), (2), (5) и (7) для расчета этого параметра были получены следующие выражения:

- при газообразном характере несплошности:

$$[p] = R_2^H \frac{m}{0,45k_H} \frac{\delta}{D_H - 2\delta} - \frac{4E\Delta h}{(D_H - 2\delta)^2 (1 - 0,5\mu)}; \quad (8)$$

- при твердом характере несплошности:

$$[p] = R_2^H \frac{m}{0,45k_H} \frac{\delta - h}{D_H - 2\delta} \left(1 + \frac{(D_H - 2\delta)^2 h}{(D_H - 2h)^2 (\delta - h)} \right). \quad (9)$$

Третья глава посвящена исследованиям возможности идентификации наличия внутренних расслоений стенок труб методом ультразвуковой толщинометрии.

Для исследования использовали темплеты металла с внутренними расслоениями.

Результаты УЗ толщинометрии темплетов показали, что при наличии в металле внутренних несплошностей возможны два варианта интерпретации результатов контроля:

- остаточная толщина стенки после уменьшения ее номинального значения в процессе эксплуатации объекта внутренней коррозией, абразивным износом внутренней поверхности и т.п.;

- глубина залегания возможного нарушения сплошности материала без изменения его номинальной толщины.

Результаты УЗ толщинометрии металла с внутренними несплошностями зависят от положения ПЭП, от длины УЗ волны и от размеров внутренних

несплошностей. Влияние этих параметров на результаты толщинометрии было исследовано на 12 образцах (темплетах), вырезанных при проведении ремонтных работ на МГ и имеющих в объеме металла нарушения сплошности, которые являются отражателями УЗ колебаний. Контроль темплетов осуществляли толщиномером УТ-93П, комплектовавшимся датчиками с рабочими частотами 2,5 и 5,0 МГц, что обеспечивает уменьшение длины УЗ волны в 2 раза. Во всех случаях проводилось сканирование исследуемой поверхности путем перемещения ПЭП вдоль плоскости темплета с одновременным вращением датчика вокруг собственной оси. В процессе освидетельствований было установлено, что при использовании ПЭП с рабочей частотой 5,0 МГц фиксируется в десятки раз больше точек контроля с внутренними несплошностями, чем при использовании датчика с рабочей частотой 2,5 МГц (рис. 4).

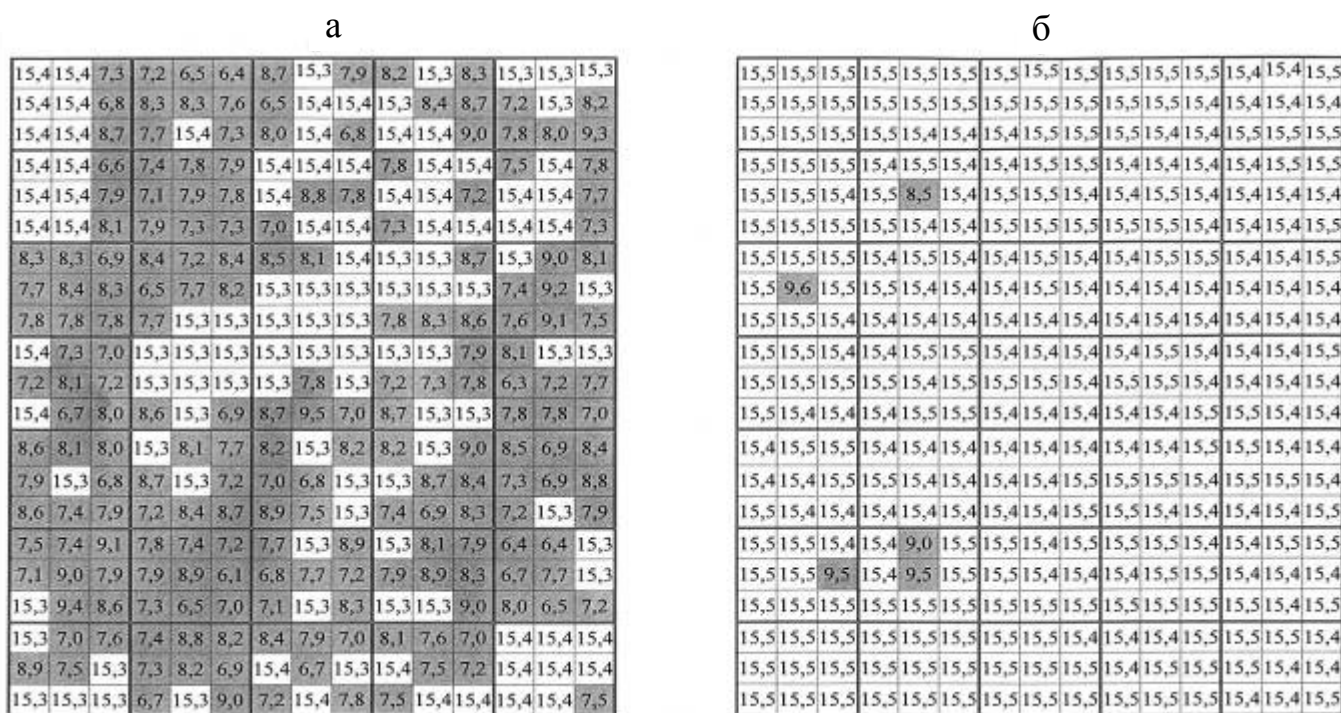


Рис.4. Результаты ультразвуковой толщинометрии (мм) темплета при использовании ПЭП с рабочими частотами 5,0 МГц (а) и 2,5 МГц (б)

Изменения показаний толщиномера $\Delta\delta$ (%) при использовании ПЭП с рабочими частотами 5,0 МГц и 2,5 МГц определяли по формуле:

$$\Delta\delta = \frac{|\delta_{5,0} - \delta_{2,5}|}{\min(\delta_{5,0}; \delta_{2,5})} 100 \%, \quad (10)$$

где $\delta_{5,0}$; $\delta_{2,5}$ – значение толщины стенки, зафиксированное в точке контроля толщиномером при использовании ПЭП с рабочими частотами 5,0 и 2,5 МГц соответственно.

Результаты обработки измерений в 7500 точках контроля представлены в виде гистограммы на рис. 5.

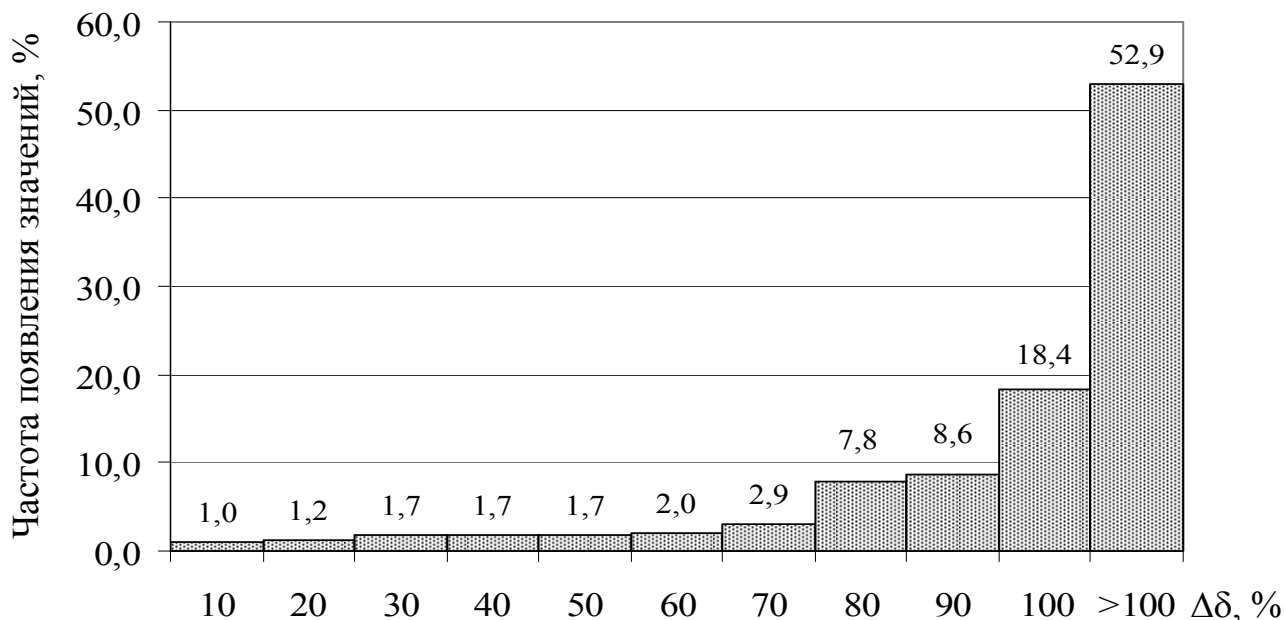


Рис.5. Гистограмма распределения изменений $\Delta\delta$ показаний ультразвукового толщиномера в точках контроля толщины металла с внутренним расслоением при использовании ПЭП с рабочими частотами 5,0 и 2,5 МГц

Анализ результатов измерений показал, что дефекты металла в виде внутренней несплошности (расслоения) можно фиксировать УЗ толщиномерами, следуя алгоритму, приведенному на рис. 6. Для идентификации характера дефекта (расслоение или утонение стенки) следует осуществлять двукратное сканирование зоны трубы с аномальными значениями толщины датчиками с рабочими частотами 2,5 и 5,0 МГц. Изменение значений толщины, регистрируемых в точке контроля двумя датчиками, не менее чем на 10 %, а площади поверхности с показаниями, составляющими 20...80 % от номинального значения толщины стенки, не менее, чем в 1,5 раза, является признаком наличия внутренней несплошности (расслоения), который позволяет идентифицировать 99 % неоднозначных результатов. При отсутствии внутреннего расслоения показания толщиномера в точке контроля датчиками с частотами 2,5 и 5,0 МГц отличаются не более 1,5 % и соответствуют погрешности измерительного прибора.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния внутреннего расслоения металла на его механические свойства, на

прочность сварного соединения и трубы.

Экспериментальные исследования включали испытания металла и гидравлические испытания труб. Для испытаний использовали фрагменты магистральных трубопроводов, имеющих участки на которых фиксировались значения толщины стенки, составляющие 30...70 % от номинального значения, но не имеющие поверхностных дефектов.

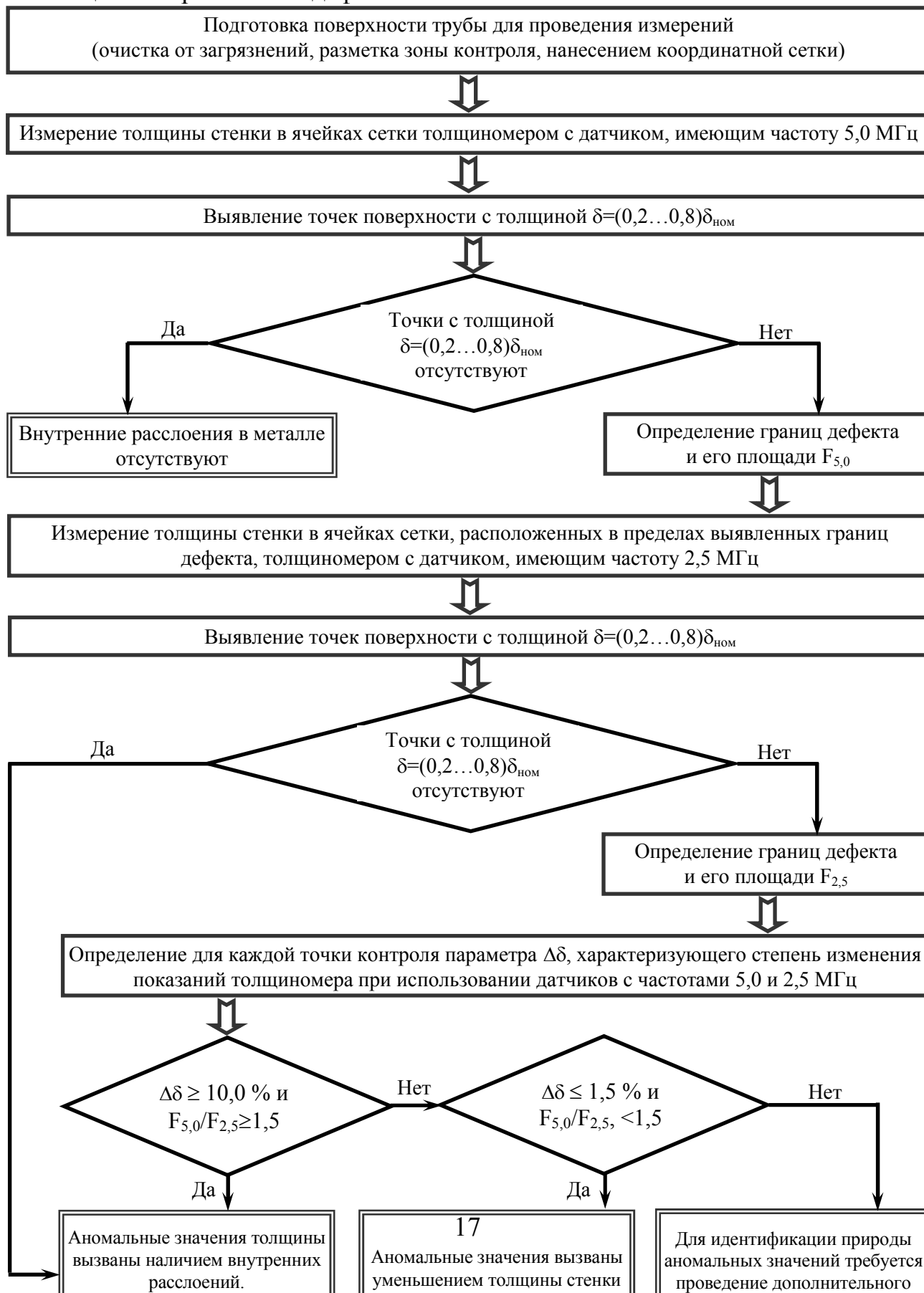


Рис. 6. Алгоритм идентификации внутренних расслоений методом
ультразвуковой толщинометрии

Оценку влияния внутренних расслоений стали на ее служебные характеристики (предел прочности σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ_5 , относительное сужение поперечного сечения ψ) выполняли путем разрушения плоских полнотолщинных образцов растягивающей нагрузкой. Из фрагментов магистрального газопровода (МГ) и трубопроводной обвязки компрессорной станции было подготовлено и испытано 56 образцов. Внутренние несплошности располагались посередине ширины образцов и распространялись на их всю толщину. Суммарная протяженность внутренних несплошностей по отношению к длине образцов составила 0...90,6 %, а именно: у 18 образцов 0...4,4 %, у 12 образцов 5,4...10,0 %, у пяти образцов 11,3...17,5 %, у шести образцов 22,9...29,2 %, у пяти образцов 31,3...50,0 %, у шести образцов 55,6...68,1 % и у четырех образцов 70,6...90,6 %. У образцов с относительной протяженностью внутренних несплошностей до 4,4 % дефекты располагались только на концевых участках, то есть механические характеристики этих образцов характеризовали служебные свойства стали.

Характерным признаком образцов с внутренними несплошностями после их разрушения явилось поверхностное или сквозное расщепление металла на 2...6 мм от линии разрыва (рис. 7). Несмотря на такую особенность, проявившуюся в процессе испытания образцов, у соответствующих значений механических характеристик не наблюдалось заметных различий (рис. 8). Все образцы, независимо от суммарной протяженности внутренних несплошностей, обладали высокой прочностью и пластичностью, и соответствовали по этим параметрам требованиям действующих норм. Таким образом, в процессе испытания образцов было установлено, что наличие в металле внутренних расслоений не вызывает снижения значений механических характеристик металла (предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, относительного сужения поперечного сечения).

Для оценки влияния внутренних несплошностей металла, примыкающих к сварным швам, на прочность сварного соединения было изготовлено 25 плоских продольных полнотолщинных образцов. Каждый образец в своей средней части содержал сварной шов, при этом валики усиления не удалялись.



Рис. 7. Характер линий разрушения образцов с внутренними несплошностями

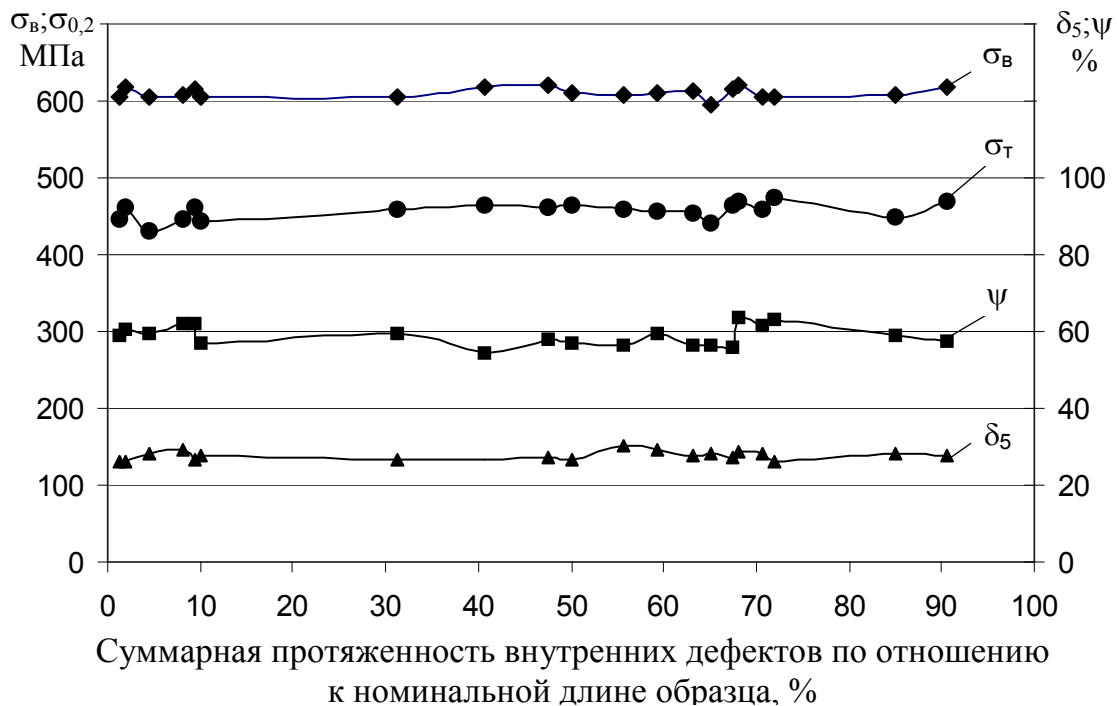


Рис. 8. Механические свойства образцов, изготовленных из фрагмента надземного участка магистрального газопровода

Внутренние расслоения были зафиксированы в металле только одного трубного элемента, входящего в сварное соединение. Суммарная протяженность внутренних дефектов по отношению к общей длине участков образцов трубного элемента с дефектами составила 60,9...89,5 %. В процессе испытаний 15 образцов разрушились по основному металлу, девять образцов – по сварному шву и один образец – по линии сплавления сваренных кромок. Все разрушившиеся сварные швы имели наружные и внутренние дефекты в виде утяжин, пор, газовых полостей и корневых непроваров по линии сплавления кромок. Проведенные испытания показали, что наличие внутренних несплошностей металла у сварных швов не оказывает влияния на прочность сварного соединения. Фактором, определяющим прочность сварного соединения является качество сварного шва.

Влияние внутренних расслоений стенки трубы на ее прочность исследовали путем проведения гидравлических испытаний полноразмерных фрагментов МГ.

Было испытано две трубы наружным диаметром 1420 мм с номинальной толщиной стенки 16,6 мм, демонтированные с надземного и подземного участков МГ после эксплуатации в течение 21 года. Испытываемые трубы имели многочисленные внутренние расслоения стенок, фиксируемые УЗ толщиномером. На локальных поверхностях труб размером 500 × 370 мм в процессе испытаний была исследована динамика расслоений. Доля аномальных значений на исследуемой поверхности трубы с надземного участка была в 6,0 раз выше, чем на исследуемой поверхности трубы с подземного участка МГ, и составила соответственно 41,8 и 7,0 % от общего объема измерений. Сравнение результатов измерений толщины стенки труб, полученных до приложения испытательной нагрузки и после 5, 10 и 14 циклов нагружения внутренним давлением в режиме $0 \rightarrow 7,5 \rightarrow 0$ МПа показало, что у трубы с надземного участка происходило увеличение доли аномальных значений на 14,0, 36,5 и 51,4 % соответственно, а у трубы с подземного участка количество аномальных значений не изменилось. С достоверностью 0,9976 увеличение площади расслоения на трубе № 1 описывается зависимостью $F=1,03^N F_0$ (N – номер цикла нагружения, F_0 – начальная площадь внутреннего расслоения).

Разрушение испытываемых труб № 1 и 2 произошло при внутреннем давлении 13,2 и 13,0 МПа соответственно. Значения фактического коэффициента запаса прочности труб составили 2,11 и 2,13, что на 12,2 и 13,3 % выше нормативного значения. Результаты гидравлических испытаний показали, что, несмотря на наличие в стенках труб внутренних расслоений, трубы могли и дальше находиться в эксплуатации.

В пятой главе представлена методика оценки работоспособности нефтегазопроводов, имеющих внутренние расслоения стенок и показана ее практическая значимость.

Оценку работоспособности трубопровода на участке с внутренним расслоением стенки выполняют в соответствии со схемой, приведенной на рис. 9.

Оценка работоспособности труб с расслоением стенок осуществляется исходя из уровня возникающих механических напряжений. Допустимое значение напряжений принимают в соответствии с требованиями норм, предъявляемым к аналогичным вновь проектируемым объектам.

Разработанная методика позволяет определить:

- возможность дальнейшей эксплуатации участка магистрального трубопровода, имеющего внутренние расслоения стенки, с уровнем надежности, обеспечивающим безопасное функционирование объекта на технологических режимах, предусмотренных проектом;

- предельный уровень рабочего давления, при котором возможна безопасная эксплуатация участка с внутренним расслоением стенки без проведения ремонтных мероприятий по его замене или усилению.

Использование разработанной методики на реальных объектах позволяет учесть эксплуатационные и конструктивные особенности трубопровода и оптимизировать объемы ремонтных работ, исключив необходимость замены фрагментов трубопровода с внутренними расслоениями стенок, которые позволяют осуществлять дальнейшую безопасную эксплуатацию объекта, что обеспечивает экономический эффект в размере не менее 1,5 млн. рублей для трубопроводной обвязки одного компрессорного цеха.



Рис. 9. Алгоритм оценки работоспособности трубы с внутренним расслоением стенки

Основные выводы

1. Установлено, что для труб эксплуатирующихся нефтегазопроводов дефекты в виде внутреннего расслоения стенок имеют значительную распространенность.

При оценке допустимости таких дефектов используют только технологические нормы, так как методик оценки работоспособности магистральных нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенок на стадии их эксплуатации в настоящее время не разработано.

2. Обоснована расчетная схема для оценки напряженно-деформированного состояния трубных элементов с расслоением стенки. Получены аналитические зависимости для определения параметров НДС тонкостенных цилиндрических элементов при разном характере внутренней несплошности. Проанализировано НДС трубных элементов с внутренними несплошностями, вызванными воздушными и твердыми прослойками. Установлены характерные особенности НДС для рассмотренных случаев.

3. На основе результатов выполненных исследований разработан алгоритм выявления внутренних расслоений на эксплуатирующихся магистральных нефтегазопроводах с использованием ультразвуковой толщинометрии. В частности, для выявления внутренних расслоений следует проводить двукратное сканирование зоны контроля, используя датчики с рабочими частотами 2,5 и 5,0 МГц, и сопоставлять регистрируемые значения толщины стенки и площади с аномальными значениями.

4. На основе комплекса экспериментальных исследований установлено:

- наличие внутренних расслоений, которые не выходят на поверхность металла и не примыкают к другим типам дефектов, не оказывает влияния на механические свойства металла и на прочность сварного соединения, а трубы с внутренними расслоениями стенок, имеющими сверхнормативные размеры, могут обладать запасом прочности, достаточным для обеспечения их безопасной эксплуатации;

- циклическое изменение внутреннего давления вызывает развитие расслоений в стенке трубы.

5. Разработана методика оценки работоспособности эксплуатирующихся нефтегазопроводов, имеющих внутренние расслоения стенок труб. Использование разработанной методики на реальных объектах позволяет учесть эксплуатационные и конструктивные особенности трубопровода и оптимизировать объемы ремонтных работ, исключив необходимость замены «дефектных» фрагментов трубопровода, которые позволяют осуществлять дальнейшую безопасную эксплуатацию объекта, что обеспечивает экономический эффект в размере не менее 1,5 млн. рублей для трубопроводной обвязки одного компрессорного цеха.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Петров С.В. Оценка изменений механических характеристик металла длительно эксплуатируемых трубопроводов, работающих в различных условиях прокладки / С.В. Петров, А.В. Комаров, А.С. Кузьбожев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе – 2009 – № 5. – С. 34-39.

2. Петров С.В. Определение характеристик механических свойств металла труб и сварных швов в надземных газопроводах из сталей обыкновенного качества / С.В. Петров, А.В. Комаров, А.С. Кузьбожев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе – 2009 – № 5. – С. 40-47.

3. Петров С.В. Особенности выявления и оценки дефектов в материале и монтажных сварных швах трубопроводов из стали обыкновенного качества / С.В. Петров, А.В. Комаров, А.С. Кузьбожев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе – 2009 – № 6. – С. 56-65.

4. Комаров А.В. Методы микроанализа и классификация неметаллических включений в низколегированных сталях для нефтегазопроводов / А.В. Комаров, О.И. Предин, Н.В. Князев, П.А. Колотовский // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 8. – С. 26-31.

5. Бирилло И.Н. Методика отбраковки труб с внутренним расслоением стенки на стадии эксплуатации объекта / И.Н. Бирилло, А.В. Комаров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 2. – С.12-15.

6. Комаров А.В. Особенности ультразвуковой дефектоскопии основного металла и монтажных сварных швов трубопровода / А.В. Комаров, С.В. Петров // Материалы X Международной молодежной научной конференции «Севергеотех-2009», г. Ухта, УГТУ, 18-20 марта 2009 г.: в 4 ч.; ч. 4 / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 153-157.

7. Усольцев М.Е. Совершенствование методов обработки результатов оптической металлографии / М.Е. Усольцев, А.В. Комаров // Сборник научных трудов [Текст]: материалы научно-технической конференции, г. Ухта, УГТУ, 14-17 апреля 2009 г.: в 2 ч.; ч. I / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 180-182.

8. Бирилло И.Н. Оценка работоспособности труб с внутренним расслоением стенки на стадии эксплуатации объекта / И.Н. Бирилло, А.В. Комаров. // Газотранспортные системы: настоящее и будущее. Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции и выставки GTS – 2011, г. Москва, 26-27 октября 2011 г. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. – С. 140.

9. Бирилло И.Н. Способ отбраковки труб с внутренним расслоением стенки на стадии эксплуатации нефтегазопроводов / И.Н. Бирилло, А.В. Комаров // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта:

материалы VII международной научно-технической конференции, Республика Беларусь, г. Новополоцк, Полоц. гос. ун-т, 22 – 25 ноября 2011 г. / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. К. Липского. – Новополоцк, 2011. – С. 59-61.

10. Бирилло И.Н. Способ отбраковки труб с внутренним расслоением стенки на стадии эксплуатации нефтегазопроводов / И.Н. Бирилло, А.В. Комаров // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. научн. тр. / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. К. Липского. – Новополоцк, 2011. – С. 194-199.

11. Комаров А.В. Способ оценки работоспособности труб с внутренним расслоением стенки на стадии эксплуатации нефтегазопроводов // Трубопроводный транспорт – 2011: материалы VII Международной учебно-научно-практической конференции, г. Уфа, УГНТУ, 10 – 11 ноября 2011 г. / редкол.: А.М. Шаммазов и др. – Уфа, Изд-во УГНТУ, 2011. – С. 52-54.

