

На правах рукописи

Игнатик А.А.

ИГНАТИК АНАТОЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ
НЕФТЕПРОВОДОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ДЕФЕКТАМИ
ТИПА «ВМЯТИНА С ПОТЕРЕЙ МЕТАЛЛА»**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ухта – 2020

Диссертация выполнена
в Ухтинском государственном техническом университете на кафедре
проектирования и эксплуатации магистральных газонефтепроводов

- Научный руководитель: Сальников Александр Викторович,
кандидат технических наук, доцент
- Официальные оппоненты: Мустафин Фаниль Мухаметович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Сооружение и ремонт
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»
- Бирилло Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, начальник
лаборатории надёжности объектов
газотранспортной системы,
Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет»

Защита состоится 4 сентября 2020 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета, а также на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука → Диссертации».

Автореферат разослан 20 июля 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д. А. Борейко

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. К объектам трубопроводного транспорта нефти предъявляются требования по обеспечению их надёжной и безопасной работы. В теории надёжности технических систем выделяются понятия работоспособность, прочность и долговечность, характеризующиеся количественными показателями.

Существуют дефекты магистральных нефтепроводов разных типов и происхождения, они имеют разные механизмы развития. Дефекты, как правило, изменяют значения количественных показателей надёжности в сторону ухудшения технического состояния трубопровода. В ходе диагностических обследований магистральных нефтепроводов обнаруживается большое число одиночных и комбинированных дефектов. Анализ отчётов по внутритрубной диагностике магистральных нефтепроводов показывает, что среди опасных дефектов большую долю имеют комбинированные дефекты типа «дефект геометрии с потерей металла», в том числе дефекты типа «вмятина с потерей металла». Поэтому актуальной практической задачей является научно обоснованное улучшение и развитие методик оценки работоспособности магистральных нефтепроводов с названными комбинированными дефектами.

Известны различные подходы к оценке работоспособности, прочности и долговечности магистральных трубопроводов с одиночными и комбинированными дефектами. В диссертационной работе развивается подход, связанный с вычислением таких количественных показателей, как разрушающее давление, предельное давление, предельный срок эксплуатации, где применяются расчётные деформационные критерии предельных состояний, производятся вычисления компонентов напряжённо-деформированного состояния в дефектных зонах труб. Результаты, полученные в ходе оценки работоспособности нефтепроводов, должны быть пригодны для планирования профилактических действий по поддержанию надёжной и безопасной работы магистрального нефтепровода. К таким действиям относятся ремонтные работы, диагностические обследования, уменьшение нагрузок на трубопровод.

Степень разработанности. Теоретические и экспериментальные исследования дефектных зон труб, анализ расчётов на прочность и долговечность трубопроводов представлены в работах В. В. Аладинского, И. Н. Бирилло, П. П. Бородавкина, И. Ю. Быкова, Е. С. Васина, Р. С. Гаспарянца, А. Г. Гумерова, А. Н. Колотовского, Г. Е. Коробкова, А. С. Кузьбожева, Ю. В. Лисина, Н. А. Махутова, Г. Х. Мурзаханова, Т. Р. Мустафина, Р. В. Садыкова, В. Н. Сызранцева, Ю. А. Теплинского, Г. М. Хажинского, В. В. Харионовского и других учёных. Известны зарубежные исследователи в области изучения прочности труб с дефектами, среди которых Т. Андерсон, П. Вит, С. Каруппанан, Дж. Кифнер, А. Кошам, Д. Кронин, З. Мустаффа, Г. Плювинаж, Ф. Хопкинс и другие.

Большое число работ посвящено изучению трубопроводов со следующими типами дефектов: коррозионная потеря металла, стресс-коррозионный дефект, трещина, риска, вмятина, дефекты сварного шва. В то же время требуется

развитие методик и алгоритмов оценки работоспособности магистральных нефтепроводов с комбинированными дефектами типа «вмятина с потерей металла», так как в имеющихся методиках расчёта этих комбинированных дефектов не наблюдается учёт взаимного влияния дефектов, литературные источники содержат различные критерии взаимодействия дефектов.

Цель работы – совершенствование методики оценки работоспособности магистральных нефтепроводов с комбинированными дефектами типа «вмятина с потерей металла» для обеспечения надёжного и безопасного функционирования системы магистрального трубопроводного транспорта нефти.

Идея работы. Совершенствование методики оценки работоспособности магистральных нефтепроводов с комбинированными дефектами типа «вмятина с потерей металла» достигается введением экспериментально обоснованного критерия взаимодействия дефектов вмятина и потеря металла, а также учётом принципа взаимного влияния этих дефектов, так как поля напряжений и деформаций в зоне близкорасположенных дефектов трубы вмятина и потеря металла перекрываются при некотором расстоянии между границами дефектов, что увеличивает концентрацию напряжений и деформаций, уменьшает разрушающее давление трубопровода.

Задачи исследования

1. Выполнить анализ существующих методик расчёта на прочность и долговечность магистральных трубопроводов с одиночными и комбинированными дефектами.

2. Разработать алгоритмы расчёта на прочность и долговечность магистральных нефтепроводов с комбинированными дефектами типа «дефект геометрии с потерей металла» с учётом взаимного влияния дефекта геометрии и дефекта потери металла.

3. Определить критерий взаимодействия дефектов трубы вмятина и потеря металла путём проведения экспериментального исследования напряжённо-деформированного состояния стенки трубы в зонах с вмятиной и потерей металла.

4. Разработать методику оценки работоспособности секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «вмятина с потерей металла» для её использования в процессе наружной диагностики трубопровода.

Научная новизна

1. Экспериментально установлено, что дефекты трубы вмятина и потеря металла взаимодействуют между собой и образуют комбинированный дефект, если минимальные расстояния между их границами как в осевом, так и в окружном направлениях трубопровода меньше (или равны) пяти толщин стенки бездефектной зоны трубы.

2. В зоне комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла» при воздействии на образец трубы внутреннего давления найдена экспериментальная линейная зависимость отношения средней интенсивности напряжений в области вмятины в осевом направлении трубы $\sigma_{i\text{ос}}^{\text{ср}}$ к

интенсивности напряжений в бездефектной зоне трубы $\sigma_{i \text{ ном}}$ от отношения минимального расстояния между границами дефектов вмятина и потеря металла в осевом направлении трубы S_z к толщине стенки в бездефектной зоне трубы δ для интервала S_z/δ от 0 до 5 в виде $\sigma_{i \text{ ос}}^{\text{cp}}/\sigma_{i \text{ ном}} = -0,082 \cdot (S_z/\delta) + 5,302$.

3. В зоне комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла» при воздействии на образец трубы внутреннего давления найдена экспериментальная линейная зависимость отношения интенсивности напряжений в области вмятины в окружном направлении трубы $\sigma_{i \text{ окр}}$ к интенсивности напряжений в бездефектной зоне трубы $\sigma_{i \text{ ном}}$ от отношения минимального расстояния между границами дефектов вмятина и потеря металла в окружном направлении трубы S_{Θ} к толщине стенки в бездефектной зоне трубы δ для интервала S_{Θ}/δ от 0 до 5 в виде $\sigma_{i \text{ окр}}/\sigma_{i \text{ ном}} = -0,029 \cdot (S_{\Theta}/\delta) + 1,657$.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны алгоритмы расчёта на прочность и долговечность магистральных нефтепроводов с одиночными и комбинированными дефектами, предназначенные для написания программ для электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Основные результаты исполнения алгоритмов – это значения предельного давления и предельного срока эксплуатации нефтепровода с дефектом. Первое значение позволяет оценить текущую прочность магистрального нефтепровода, а второе значение – планировать срок ремонтных работ по удалению дефектов. Алгоритмы содержат действия по вычислению компонентов напряжённо-деформированного состояния в упругой и в упруго-пластической стадиях работы материала трубы, поэтому имеется возможность теоретически исследовать напряжённо-деформированное состояние стенки трубопровода в дефектных зонах при различных исходных данных.

Создан лабораторный стенд для исследования напряжённо-деформированного состояния образцов трубы в дефектных и бездефектных зонах при помощи тензорезистивного метода измерения деформаций. Разработана методика проведения экспериментов. По итогам экспериментов получен критерий взаимодействия дефектов вмятина и потеря металла.

Методика оценки работоспособности секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «вмятина с потерей металла» позволяет по итогам диагностических обследований определить величины предельного давления и предельного срока эксплуатации (остаточный ресурс) дефектной секции нефтепровода. Методика предназначена для планирования сроков и объёмов ремонтных работ на линейной части магистральных нефтепроводов с комбинированными дефектами типа «вмятина с потерей металла».

Методология и методы исследования. В проведённом диссертационном исследовании применялись теоретические научные методы: абстрагирование, анализ, синтез, сравнение и эмпирические научные методы: эксперимент, физическое моделирование, измерение. Использовались приёмы численного решения уравнений, метод наименьших квадратов.

Положения, выносимые на защиту

1. Критерий взаимодействия дефектов трубы вмятина и потеря металла, состоящий из двух неравенств, вида

$$\left. \begin{aligned} S_z &\leq 5 \cdot \delta, \\ S_{\Theta} &\leq 5 \cdot \delta, \end{aligned} \right\}$$

где S_z – минимальное расстояние между границами дефектов в осевом направлении трубы; S_{Θ} – минимальное расстояние между границами дефектов в окружном направлении трубы; δ – толщина стенки в бездефектной зоне трубы, позволяющий выявлять комбинированный дефект типа «вмятина с потерей металла» по итогам внутритрубных и наружных диагностических обследований магистральных нефтепроводов.

2. Методика оценки работоспособности секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «вмятина с потерей металла», в которой учитывается взаимное влияние дефектов вмятина и потеря металла, предназначенная для применения в процессе наружной диагностики магистрального нефтепровода.

Степень достоверности и апробация результатов. В ходе теоретических изысканий использовались положения деформационной теории пластичности, механики разрушения, теории тонкостенной цилиндрической оболочки. В экспериментальных исследованиях применялись современные поверенные средства измерений, компьютерное программное обеспечение.

Результаты работы согласуются с имеющимися представлениями в науке, не противоречат результатам работ других авторов.

Положения диссертационной работы были представлены на Международной научной конференции «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 1–2 февраля 2017 г., 2–3 февраля 2018 г., 7–8 февраля 2019 г., 6–7 февраля 2020 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов» (г. Ухта, 2–3 ноября 2016 г.), Всероссийской научно-технической конференции (с международным участием) «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых углеводородов» (г. Ухта, 2–3 ноября 2017 г.), Международной молодёжной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ» (г. Ухта, 25–27 марта 2015 г., 23–25 марта 2016 г., 12–14 апреля 2017 г., 21–23 марта 2018 г.), Межрегиональном вебинаре «Актуальные вопросы транспорта нефти и газа» (г. Ухта, 2017–2019 гг.), Международной научно-практической конференции обучающихся, аспирантов и учёных «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (г. Нижневартовск, 20 апреля 2017 г.), Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 24–25 мая 2017 г., 23–24 мая 2018 г.).

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационного исследования внедрены в процесс обучения студентов Ухтинского государственного технического университета по дисциплине «Методы расчёта и

измерения напряжённо-деформированного состояния» (направление подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело», магистратура).

Публикации автора. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 5 – в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, 1 – в журнале, включённом в международную базу цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения, содержит 180 страниц, 54 рисунка, 16 таблиц, список литературы из 110 наименований.

Личный вклад автора. Автор проводил теоретические и экспериментальные исследования, самостоятельно разработал алгоритмы расчёта на прочность и долговечность трубопроводов с одиночными и комбинированными дефектами, разработал конструкцию лабораторного стенда и методику проведения экспериментов. Принимал участие в подготовке публикаций, в апробации полученных результатов.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно областям исследования: «Напряжённое состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчётов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ» (пункт 1); «Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования насосных и компрессорных станций, линейной части трубопроводов и методов защиты их от коррозии» (пункт б).

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, рассмотрены работы отечественных и зарубежных авторов и имеющиеся проблемы в области обеспечения надёжности магистральных трубопроводов с дефектами. Обозначены направления работы для решения поставленных задач.

В первой главе «Анализ существующих методик расчёта на прочность и долговечность магистральных трубопроводов с дефектами» дана классификация дефектов линейной части магистральных трубопроводов (МТ). Указано, что для обеспечения надёжной и безопасной работы МТ необходимо производить расчёты на прочность и долговечность трубопроводов с дефектами разных типов. В ходе расчётов МТ с дефектами на прочность и долговечность определяются следующие количественные показатели надёжности: разрушающее давление p_f , предельное давление $p_{пред}$, предельный срок эксплуатации $t_{пред}$, вероятность отказа V . Эти показатели позволяют обоснованно планировать сроки и объёмы ремонтных работ на линейной части МТ для восстановления несущей способности труб.

При расчётах на прочность и долговечность осуществляется определение компонентов напряжённо-деформированного состояния трубопровода в дефектных зонах. Поэтому в первой главе рассмотрены расчётные схемы, представляющие собой правила схематизации дефектов и нагрузок, формулы и последовательность проведения расчётов для определения компонентов напряжённого и деформированного состояний стенки трубы. Рассмотрены следующие расчётные схемы: бездефектной трубы, объёмного дефекта потери металла, объёмного дефекта, поверхностной трещины, одиночной вмятины, дефекта геометрии. Вводятся два расчётных деформационных критерия предельных состояний: критерий исчерпания несущей способности Θ_u и критерий разрушения Θ_c , которые вычисляются по формулам

$$\Theta_u = \frac{\varepsilon_i \cdot \cos\varphi_\varepsilon}{\varepsilon_{iu}} + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{0u}} \text{ и } \Theta_c = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ic}} + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{0c}}, \quad (1)$$

где ε_i – интенсивность деформаций; ε_0 – объёмная деформация; φ_ε – деформационный параметр; ε_{iu} – предельная интенсивность деформаций; ε_{0u} – предельная объёмная деформация; ε_{ic} – разрушающая интенсивность деформаций; ε_{0c} – разрушающая объёмная деформация.

Интенсивность деформаций ε_i , объёмная деформация ε_0 и деформационный параметр φ_ε зависят от величин из следующих групп исходных данных: 1) механические характеристики стали; 2) геометрические параметры трубы (наружный диаметр D , толщина стенки δ , радиус изгиба $R_{изг}$); 3) нагрузки и воздействия на трубопровод (внутреннее давление p , температурный перепад ΔT); 4) тип и геометрические параметры дефектов (длина L , ширина W , глубина H); 5) скорости изменения геометрических параметров дефектов, время эксплуатации трубопровода t .

Исчерпание несущей способности МТ происходит при выполнении неравенства $\Theta_u > 1$. Разрушение трубопровода происходит при выполнении неравенства $\Theta_c > 1$. Если верно одно из равенств $\Theta_u = 1$ или $\Theta_c = 1$, то трубопровод находится в предельном состоянии, недопустимом при эксплуатации.

Предлагается способ решения уравнений $\Theta_u = 1$ и $\Theta_c = 1$ по переменным p (внутреннее давление), t (время эксплуатации трубопровода), H (глубина дефекта) в среде электронной таблицы Excel для определения соответственно следующих величин: разрушающего давления p_f (и предельного давления $p_{пред}$), предельного срока эксплуатации $t_{пред}$, разрушающей глубины дефекта H_f .

Для каждого дефекта трубы вычисляется величина предельного давления $p_{пред}$, которая сравнивается с проектным давлением $p_{проект}$. Производится оценка текущей прочности трубопровода с дефектом. Если $p_{пред} \geq p_{проект}$, то дефект допустим. Если $p_{пред} < p_{проект}$, то дефект недопустим. Однако для развивающихся во времени дефектов оценки текущей прочности недостаточно для обеспечения надёжной и безопасной работы МТ в будущие моменты времени. Поэтому необходима оценка долговечности трубопровода с дефектом. Нужен расчёт на долговечность, чтобы определить предельный срок эксплуатации трубопровода с дефектом $t_{пред}$.

Во второй главе «Разработка алгоритмов расчёта на прочность и долговечность магистральных нефтепроводов с одиночными и комбинированными дефектами» приведены результаты анализа отчётов по внутритрубной диагностике (ВТД) участка магистрального нефтепровода (МН) «Ухта – Ярославль». Были рассмотрены опасные дефекты, требующие уменьшения давления и ремонт в ближайшие шесть лет, среди которых обнаружены одиночные и комбинированные дефекты. На рис. 1 представлено распределение доли комбинированных дефектов среди всех опасных дефектов в разные годы проведения ВТД. Рис. 2 содержит круговую диаграмму, где отображены доли разных типов комбинированных дефектов среди общего числа опасных комбинированных дефектов всех типов (данные за 2014 г.). Распространёнными типами комбинированных дефектов являются следующие: 1) дефект геометрии с риской; 2) дефект геометрии с потерей металла; 3) вмятина СМР (вмятина строительно-монтажных работ), вмятина СМР с потерей металла; 4) дефект геометрии с риской и потерей металла. Вмятина СМР – вмятина, нанесённая при проведении строительно-монтажных работ и, возможно, содержащая механические повреждения стенки трубы в области вмятины. Причиной образования дефекта потери металла в области дефекта геометрии может являться повреждение антикоррозионного покрытия.

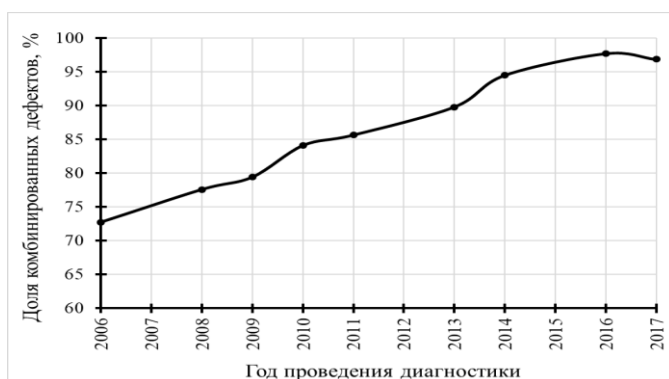


Рис. 1. Доля комбинированных дефектов среди общего числа опасных дефектов в разные годы проведения внутритрубной диагностики (участок МН «Ухта – Ярославль»)

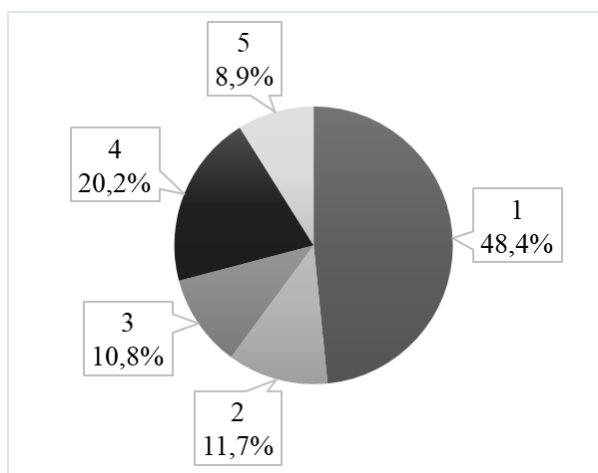


Рис. 2. Доли разных типов комбинированных дефектов среди общего числа опасных комбинированных дефектов (участок МН «Ухта – Ярославль», 2014 г.):
 1 – дефект геометрии с риской;
 2 – дефект геометрии с потерей металла; 3 – вмятина СМР, вмятина СМР с потерей металла; 4 – дефект геометрии с риской и потерей металла; 5 – другие

Исходя из документа РД-23.040.00-КТН-011-16 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами» для оценки прочности

и долговечности трубной секции с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла» выполняются по следующему принципу два расчёта: 1) расчёт трубы с дефектом геометрии с учётом наличия потери металла; 2) расчёт трубы с потерей металла с учётом наличия дефекта геометрии. Из двух значений предельного давления и предельного срока эксплуатации в качестве ответа принимается меньшее значение. В диссертации разработаны методики расчёта на прочность и долговечность секции МН с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла», в которых выполняется один расчёт и учитывается принцип взаимного влияния дефектов.

При расчёте секции МН с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла» приняты следующие исходные положения (принципы):

– расчёт каждого из двух дефектов, входящих в сочетание, выполняется отдельно: сначала рассчитывается дефект геометрии по расчётной схеме «Дефект геометрии», затем дефект потери металла по расчётной схеме «Объёмный дефект потери металла», причём учитывается взаимное влияние дефектов;

– влияние дефекта потери металла на дефект геометрии выражается в уменьшении толщины стенки трубы: при использовании расчётной схемы «Дефект геометрии» берётся толщина стенки трубы, уменьшенная на расчётное значение глубины дефекта потери металла;

– влияние дефекта геометрии на дефект потери металла учитывается следующим образом: номинальные напряжения при использовании расчётной схемы «Объёмный дефект потери металла» приравниваются местным напряжениям, полученным ранее при использовании расчётной схемы «Дефект геометрии»;

– долговечность трубопровода определяется изменением глубины и площади продольного сечения дефекта потери металла, эти геометрические параметры увеличиваются по коррозионному механизму с некоторой скоростью.

На рис. 3 и 4 представлены в виде блок-схем разработанные линейные алгоритмы расчёта на прочность и долговечность секции МН с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла».

Вычисления компонентов деформированного состояния в дефектной зоне трубопровода на четвёртом этапе алгоритмов в соответствии с деформационной теории пластичности производятся по формулам

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\Theta} &= \sigma_{\Theta} \cdot \left(\frac{1}{9 \cdot k} + \frac{1}{3 \cdot \mu_p} \right) + (\sigma_z + \sigma_r) \cdot \left(\frac{1}{9 \cdot k} - \frac{1}{6 \cdot \mu_p} \right), \\ \varepsilon_z &= \sigma_z \cdot \left(\frac{1}{9 \cdot k} + \frac{1}{3 \cdot \mu_p} \right) + (\sigma_r + \sigma_{\Theta}) \cdot \left(\frac{1}{9 \cdot k} - \frac{1}{6 \cdot \mu_p} \right), \\ \varepsilon_r &= \sigma_r \cdot \left(\frac{1}{9 \cdot k} + \frac{1}{3 \cdot \mu_p} \right) + (\sigma_{\Theta} + \sigma_z) \cdot \left(\frac{1}{9 \cdot k} - \frac{1}{6 \cdot \mu_p} \right), \end{aligned} \right\}$$

где ε_{θ} , ε_z , ε_r – кольцевая, продольная, радиальная деформации; σ_{θ} , σ_z , σ_r – кольцевое, продольное, радиальное напряжения, МПа; k – упругий модуль объёмного расширения, МПа; μ_p – упруго-пластический модуль сдвига, МПа.

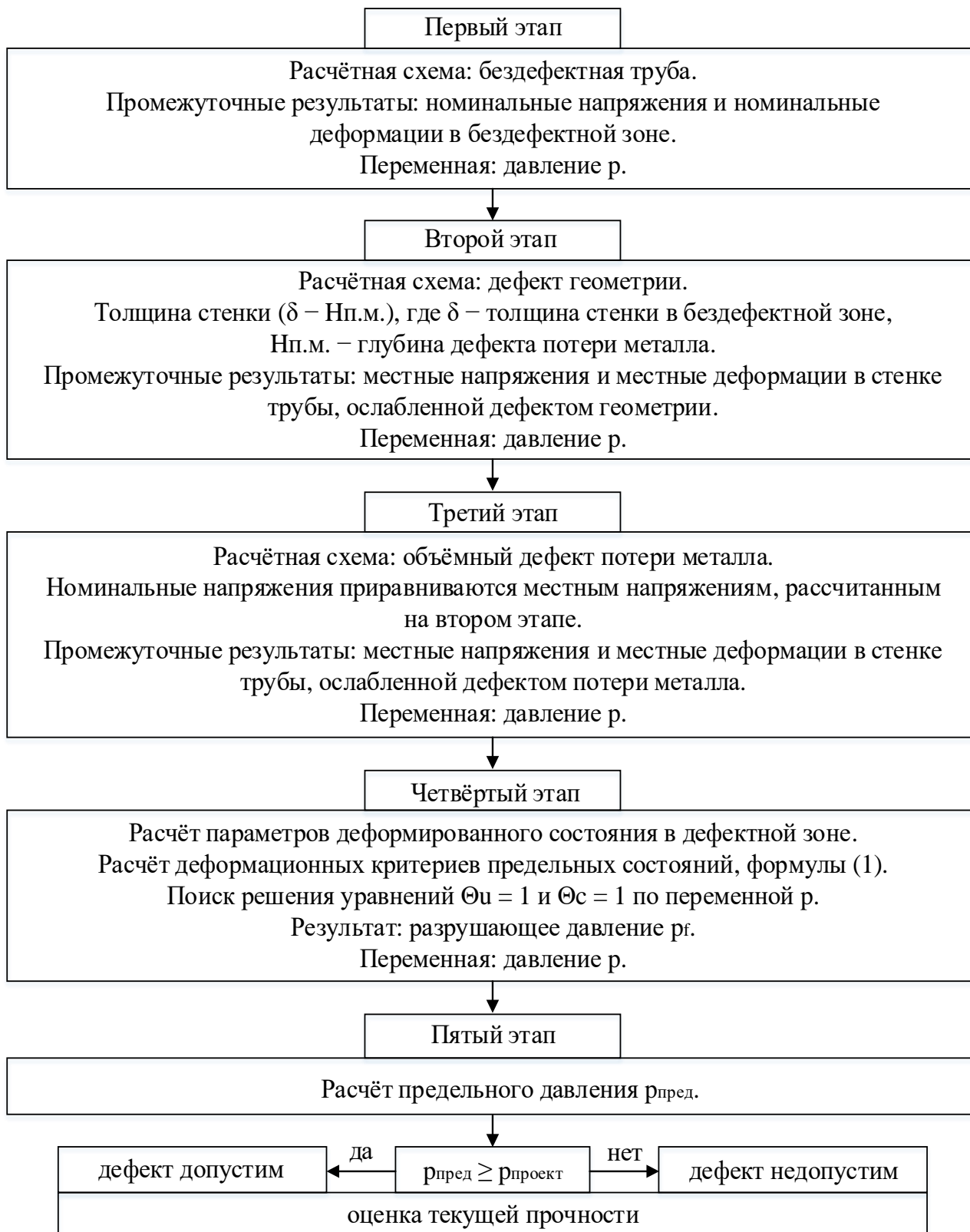


Рис. 3. Алгоритм расчёта на прочность секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла»



Рис. 4. Алгоритм расчёта на долговечность секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла»

В третьей главе «Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния в дефектных зонах трубы» рассмотрена конструкция лабораторного стенда для исследования напряжённо-деформированного состояния образца трубы в дефектных и бездефектных зонах, описана методика проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных. Схема стенда представлена на рис. 5, внешний вид стенда – на рис. 6.

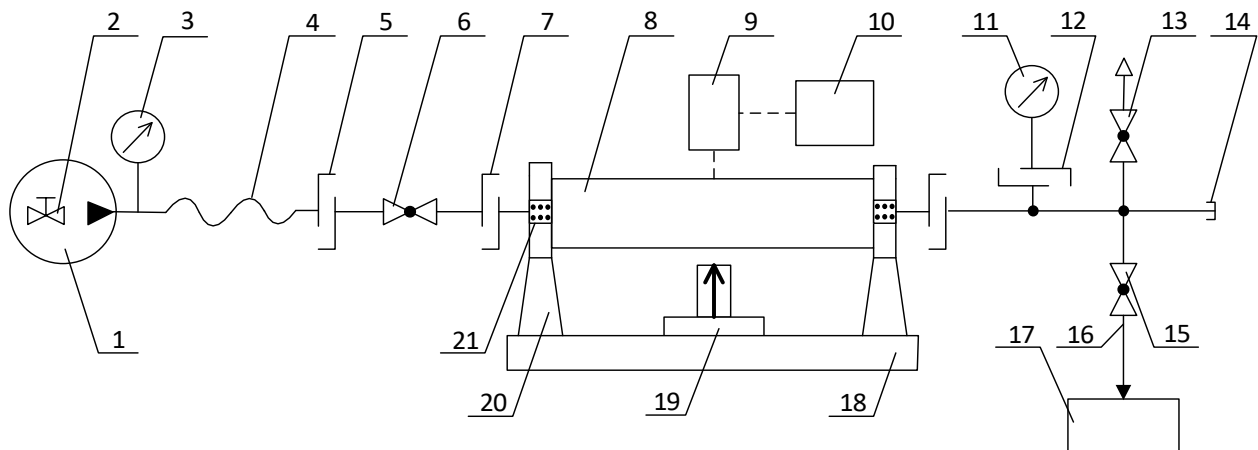


Рис. 5. Схема лабораторного стенда: 1 – опрессовочный насос; 2 – выпускной вентиль; 3, 11 – манометры; 4 – шланг высокого давления; 5, 7, 12 – резьбовые быстроразъёмные соединения; 6 – запорный кран; 8 – образец трубы (модель трубы); 9 – тензометрическое оборудование; 10 – ноутбук; 13 – кран для выпуска воздуха; 14 – заглушка; 15 – кран для слива воды; 16 – сливной шланг; 17 – бак для жидкости; 18 – основание; 19 – винтовой домкрат; 20 – опора; 21 – разъёмное соединение верхней и нижней частей опор

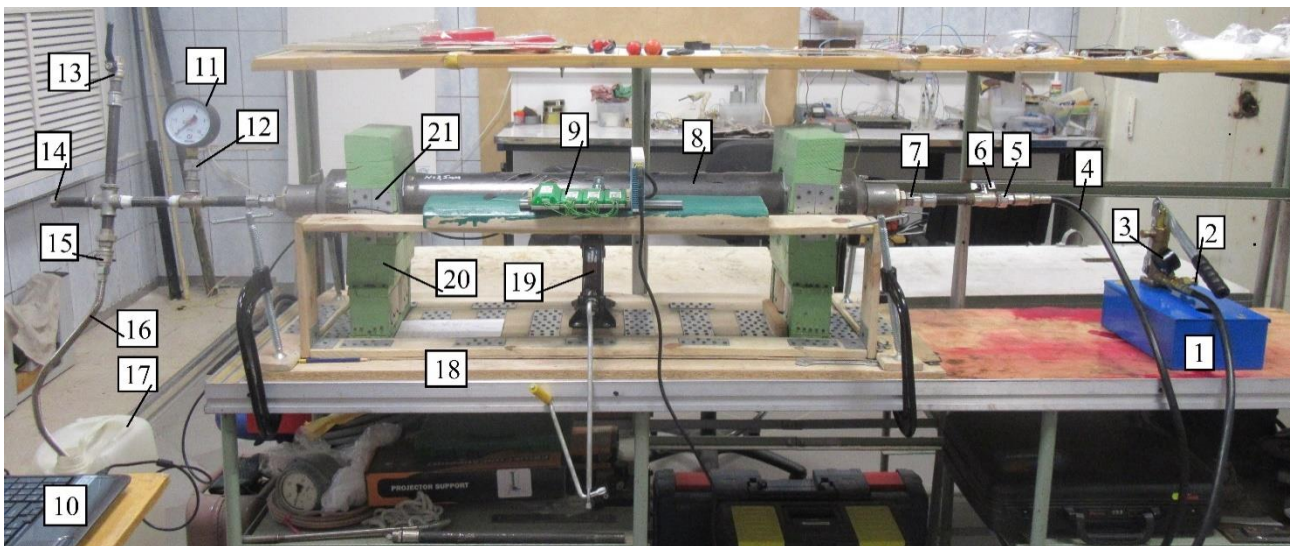


Рис. 6. Внешний вид лабораторного стенда (нумерация позиций на рис. 5 и 6 совпадает)

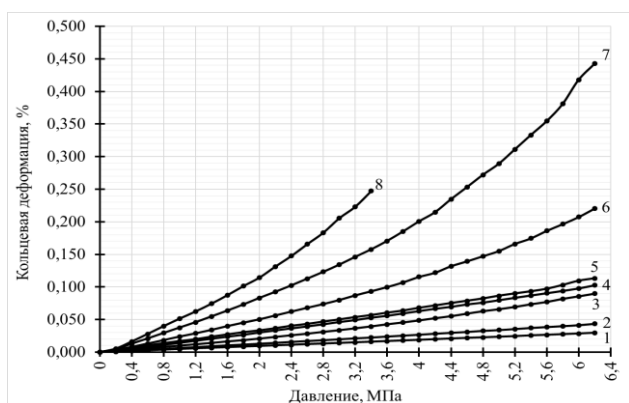
Объектами исследований служили образцы трубы (длина $L_{обр} = 1$ м, наружный диаметр $D = 114$ мм, толщина стенки $\delta = 4,5$ мм, марка стали – ВСтЗсп). Проведено изучение напряжённо-деформированного состояния в зонах

искусственных дефектов следующих типов: 1) одиночная потеря металла; 2) одиночная вмятина; 3) вмятина, взаимодействующая с потерей металла, то есть комбинированный дефект типа «вмятина с потерей металла». Образцы трубы с дефектами подвергались воздействию внутреннего давления в диапазоне от нуля до 6,2 МПа. Кольцевые ε_{Θ} и продольные ε_z деформации в дефектных и бездефектной зонах измерялись тензорезистивным методом.

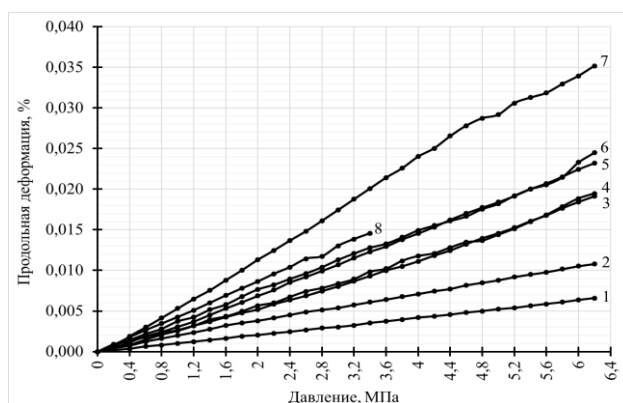
Эксперимент № 1. При экспериментальном исследовании напряжённо-деформированного состояния в областях искусственных дефектов потери металла, геометрические параметры которых представлены в табл., найдены зависимости деформаций от давления (см. рис. 7). Установлено, что в зонах дефектов с глубиной $H = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ мм (соответствующая относительная глубина дефекта $H / \delta = 0,11; 0,22; 0,33; 0,44$) материал трубы работает в упругой стадии, так как кривые 2–5 имеют линейный характер, а в зонах дефектов с глубиной $H = 2,5; 3,0; 3,5$ мм (соответствующая относительная глубина дефекта $H / \delta = 0,56; 0,67; 0,78$) – в упругой и упруго-пластической стадиях, так как характер кривых 6–8 нелинейный (см. рис. 7 а).

Табл. Геометрические параметры искусственных дефектов потери металла

Номер дефекта	Длина L, мм	Ширина W, мм	Ширина Θ , рад	Глубина H, мм	Относительная глубина, H / δ
№ 1	50	32	0,56	0,5	0,11
№ 2	50	32	0,56	1,0	0,22
№ 3	50	31	0,54	1,5	0,33
№ 4	50	34	0,60	2,0	0,44
№ 5	50	35	0,61	2,5	0,56
№ 6	50	36	0,63	3,0	0,67
№ 7	50	40	0,70	3,5	0,78
бездефектная зона № 8	0	0	0	0	0



а



б

Рис. 7. Экспериментальные графики зависимости кольцевой деформации от давления (а), продольной деформации от давления (б) в зонах дефектов потери металла: 1 – $H = 0$; 2 – $H = 0,5$ мм; 3 – $H = 1,0$ мм; 4 – $H = 1,5$ мм; 5 – $H = 2,0$ мм; 6 – $H = 2,5$ мм; 7 – $H = 3,0$ мм; 8 – $H = 3,5$ мм

На рис. 8 изображены теоретические графики зависимости деформаций от давления, построенные при использовании расчётной схемы объёмного дефекта потери металла.

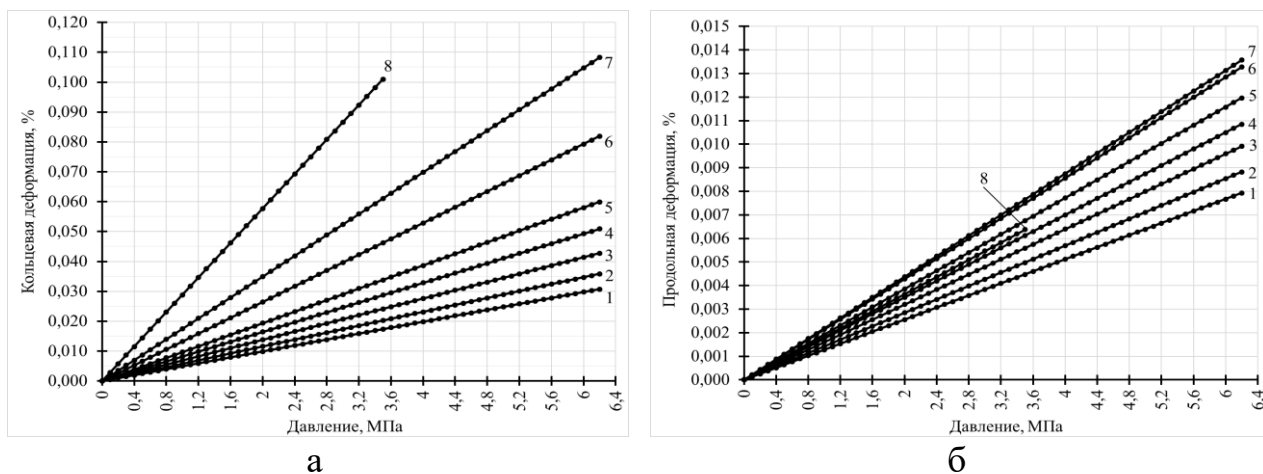
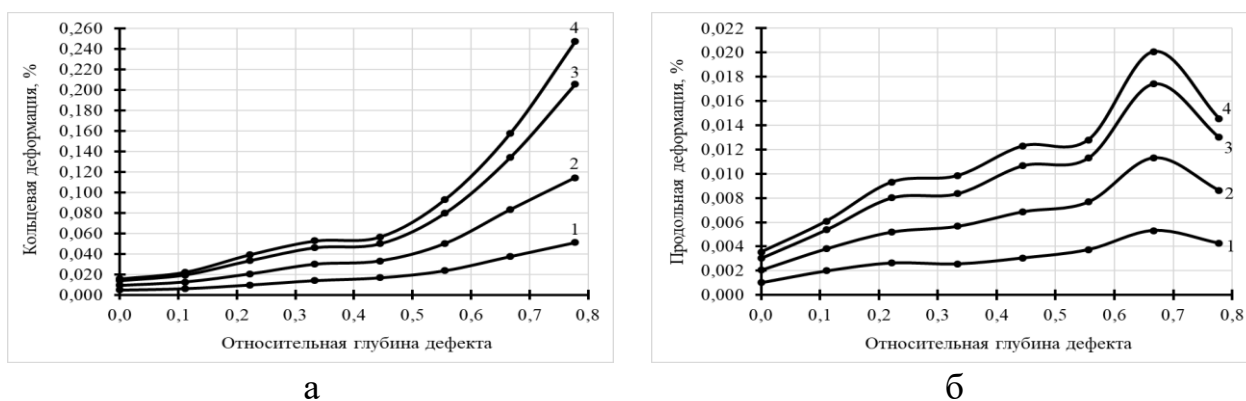


Рис. 8. Теоретические графики зависимости кольцевой деформации от давления (а), продольной деформации от давления (б) в зонах дефектов потери металла: 1 – $H = 0$; 2 – $H = 0,5$ мм; 3 – $H = 1,0$ мм; 4 – $H = 1,5$ мм; 5 – $H = 2,0$ мм; 6 – $H = 2,5$ мм; 7 – $H = 3,0$ мм; 8 – $H = 3,5$ мм

Данные из рис. 7 и 8 свидетельствуют о том, что теоретически рассчитанные значения деформаций меньше экспериментально полученных значений. Лишь значения деформаций в бездефектной зоне, полученные экспериментальным путём, хорошо согласуются с теорией. Несоответствие экспериментальных и теоретических результатов связано с тем, что в экспериментах деформации измерялись на наружной поверхности образца трубы в дефектных зонах, где присутствуют деформации от изгиба, а по расчётной схеме объёмного дефекта потери металла вычисляются усреднённые деформации по сечению остаточной толщины стенки.

В ходе обработки экспериментальных данных проводились построения графиков зависимости кольцевой ϵ_{θ} и продольной ϵ_z деформаций в дефектных зонах потери металла от относительной глубины дефекта H/δ . На рис. 9 продемонстрированы эти экспериментальные графики при давлении $p = 1,0; 2,0; 3,0; 3,4$ МПа, а также аналогичные теоретические графики.



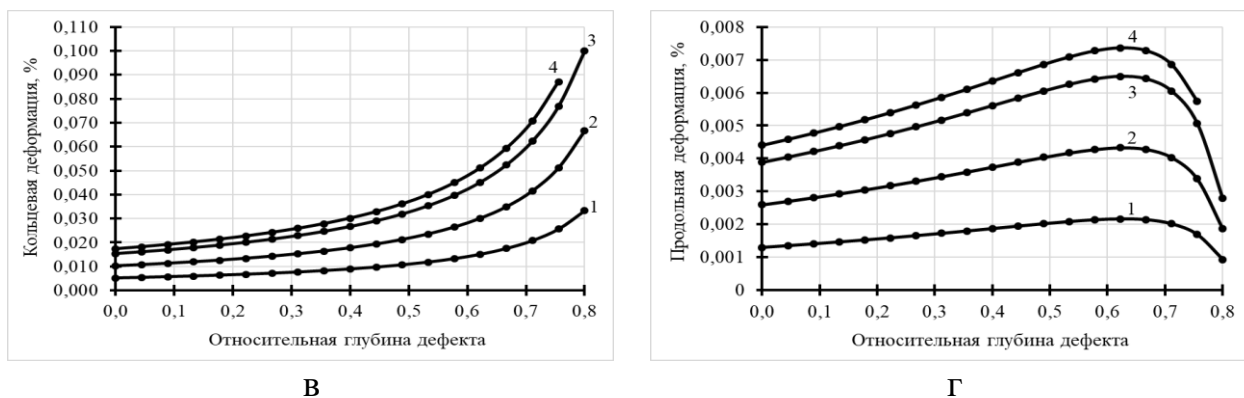


Рис. 9. Экспериментальные (а, б) и теоретические (в, г) графики зависимости деформаций от относительной глубины дефекта потери металла:
 1 – $p = 1,0$ МПа; 2 – $p = 2,0$ МПа; 3 – $p = 3,0$ МПа; 4 – $p = 3,4$ МПа

Зависимость деформаций в дефектных зонах потери металла от относительной глубины дефекта предлагается описывать двумя законами в интервалах $H / \delta \in [0; 0,55]$ и $H / \delta \in [0,55; 0,80]$.

Зависимость вида $\epsilon_{\theta} - H / \delta$ при $H / \delta \in [0; 0,55]$ подчиняется линейному закону, при $H / \delta \in [0,55; 0,80]$ подчиняется другому линейному закону с большим значением углового коэффициента.

Зависимость вида $\epsilon_z - H / \delta$ при $H / \delta \in [0; 0,55]$ описывается линейным законом, при $H / \delta \in [0,55; 0,80]$ описывается законом параболы, причём в интервале $H / \delta \in [0,55; 0,80]$ наблюдается точка максимума, что подтверждается теоретически и экспериментально (см. рис. 9 б и 9 г).

Эксперимент № 2. На образце трубы была изготовлена вмятина с помощью гидравлического пресса. Геометрические параметры вмятины таковы: длина $L_{\text{вм}} = 134$ мм, ширина $W_{\text{вм}} = 64$ мм, глубина $H_{\text{вм}} = 3,4$ мм. В области вмятины изменение кривизны стенки трубы плавное, поэтому вмятина является гладкой. Так как вмятина является симметричной относительно осевого и окружного направлений образца трубы, то измеренные кольцевые и продольные деформации считаются главными деформациями.

В области одиночной гладкой вмятины было установлено шесть розеток тензорезисторов. На рис. 10 изображены искусственная гладкая вмятина и установленные на её поверхности тензорезисторы.

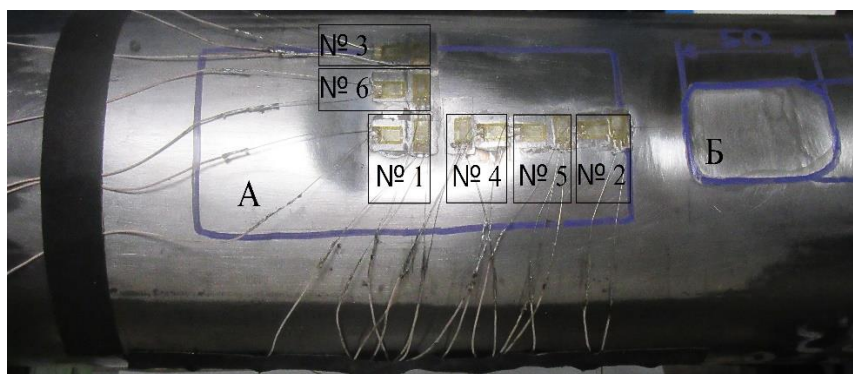


Рис. 10. Искусственная гладкая вмятина и установленные на её поверхности тензорезисторы:
 № 1–6 – нумерация зон вмятины;
 А – вмятина; Б – дефект потери металла

Экспериментально найдены зависимости деформаций ε_{Θ} , ε_z от давления p в области одиночной вмятины в зонах № 1–6.

Полученные измерением значения кольцевой деформации ε_{Θ} и продольной деформации ε_z позволили рассчитать значения кольцевого напряжения σ_{Θ} и продольного напряжения σ_z в области вмятины по формулам закона Гука в обратной форме для случая плоского напряжённого состояния, а также рассчитать интенсивность напряжений σ_i в области вмятины.

На рис. 11 а представлены распределения интенсивности напряжений σ_i вдоль осевого направления образца трубы в области вмятины: $\sigma_i = \sigma_i(z)$, где z – осевая координата. Рис. 11 б содержит распределения интенсивности напряжений вдоль окружного направления образца трубы в области вмятины: $\sigma_i = \sigma_i(\Theta)$, где Θ – окружная координата. Координаты z и Θ отсчитываются от центра вмятины вдоль осевого и окружного направлений образца трубы соответственно и определяются по местоположению центра решётки тензорезистора.

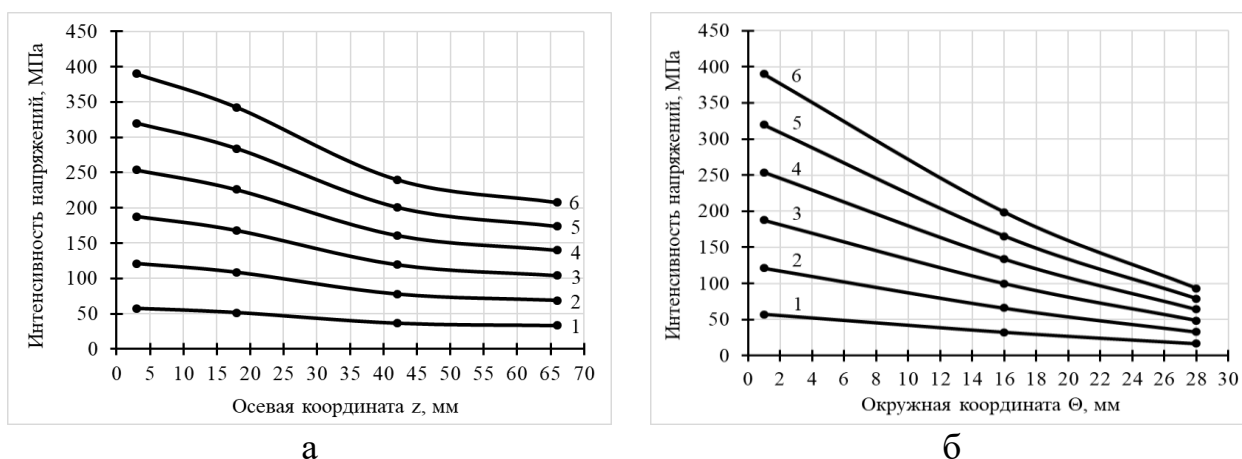


Рис. 11. Распределения интенсивности напряжений в области гладкой вмятины вдоль осевого направления образца трубы (а), вдоль окружного направления образца трубы (б): 1 – $p = 1$ МПа; 2 – $p = 2$ МПа; 3 – $p = 3$ МПа; 4 – $p = 4$ МПа; 5 – $p = 5$ МПа; 6 – $p = 6$ МПа

Наибольшая интенсивность напряжений наблюдаются в центре гладкой вмятины. Интенсивность напряжений монотонно убывает от центра вмятины к её границам вдоль осевого и окружного направлений образца трубы (см. рис. 11).

Предлагается вычислять значения средней кольцевой деформации, средней продольной деформации и средней интенсивности напряжений в области вмятины в осевом и в окружном направлениях по формулам

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\Theta \text{ oc}}^{\text{cp}} &= \frac{2}{L_{\text{BM}}} \cdot \int_0^{L_{\text{BM}}/2} \varepsilon_{\Theta}(z) dz, & \varepsilon_{z \text{ oc}}^{\text{cp}} &= \frac{2}{L_{\text{BM}}} \cdot \int_0^{L_{\text{BM}}/2} \varepsilon_z(z) dz, & \sigma_{i \text{ oc}}^{\text{cp}} &= \frac{2}{L_{\text{BM}}} \cdot \int_0^{L_{\text{BM}}/2} \sigma_i(z) dz, \\ \varepsilon_{\Theta \text{ окр}}^{\text{cp}} &= \frac{2}{W_{\text{BM}}} \cdot \int_0^{W_{\text{BM}}/2} \varepsilon_{\Theta}(\Theta) d\Theta, & \varepsilon_{z \text{ окр}}^{\text{cp}} &= \frac{2}{W_{\text{BM}}} \cdot \int_0^{W_{\text{BM}}/2} \varepsilon_z(\Theta) d\Theta, & \sigma_{i \text{ окр}}^{\text{cp}} &= \frac{2}{W_{\text{BM}}} \cdot \int_0^{W_{\text{BM}}/2} \sigma_i(\Theta) d\Theta, \end{aligned} \right\}$$

где индексы: «ср» – среднее значение; «ос» – осевое направление трубы; «окр» – окружное направление трубы.

Зависимости интенсивности напряжений σ_i от координат z и Θ предлагается описывать линейным законом.

Эксперимент № 3. Выполняется исследование взаимодействия дефектов вмятина ($L_{\text{вм}} = 134$ мм, $W_{\text{вм}} = 64$ мм, $H_{\text{вм}} = 3,4$ мм, поз. А на рис. 10) и потеря металла ($L = 50$ мм, $W = 30$ мм, $H = 1,5$ мм, поз. Б на рис. 10).

На рис. 12 представлена зависимость вида $\sigma_{i \text{ ос}}^{\text{ср}} / \sigma_{i \text{ ном}} - S_z / \delta$ при давлении $p = 6,2$ МПа, благодаря которой изучается взаимодействие вмятины и дефекта потери металла в осевом направлении образца трубы, где $\sigma_{i \text{ ос}}^{\text{ср}}$ – средняя интенсивность напряжений в области вмятины в осевом направлении трубы; $\sigma_{i \text{ ном}}$ – интенсивность напряжений в бездефектной зоне трубы; S_z – минимальное расстояние между границами дефектов вмятина и потеря металла в осевом направлении трубы; δ – толщина стенки в бездефектной зоне трубы.

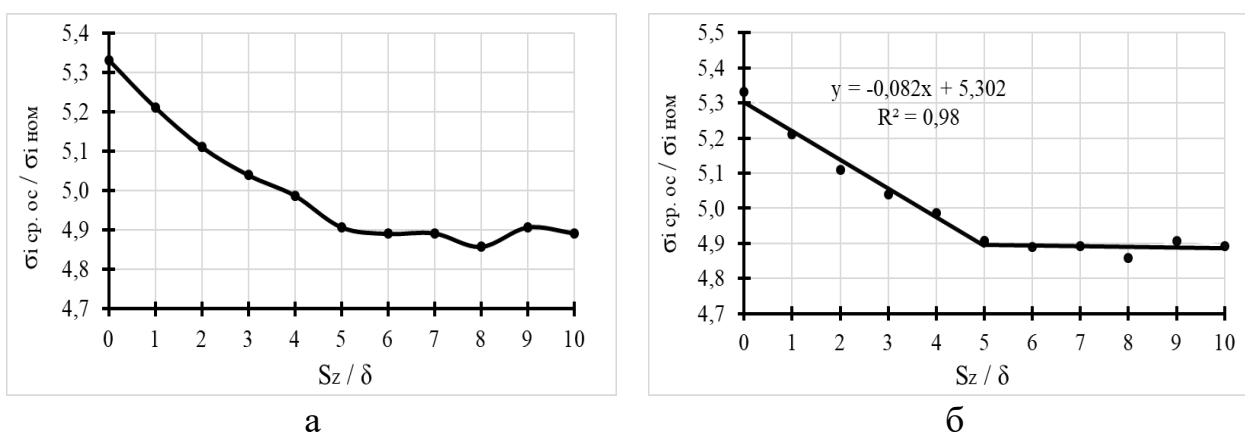


Рис. 12. Графики для оценки взаимодействия дефектов вмятина и потеря металла в осевом направлении трубы: а – полученные точки соединены гладкими кривыми; б – по полученным точкам построены линии тренда

На рис. 13 изображены графики зависимости вида $\sigma_{i \text{ окр}} / \sigma_{i \text{ ном}} - S_{\Theta} / \delta$ при давлении $p = 6,2$ МПа, где S_{Θ} – минимальное расстояние между границами дефектов вмятина и потеря металла в окружном направлении трубы; $\sigma_{i \text{ окр}} = \sigma_{i \text{ №3}}$, где $\sigma_{i \text{ №3}}$ – интенсивность напряжений в зоне вмятины № 3. Эти графики позволяют исследовать взаимодействие вмятины и дефекта потери металла в окружном направлении образца трубы. Горизонтальная линия 2 на рис. 13 а соответствуют величине $\sigma_{i \text{ окр}} / \sigma_{i \text{ ном}}$ ($\sigma_{i \text{ №3}} / \sigma_{i \text{ ном}}$) для одиночной вмятины.

Из графиков на рис. 12 видно, что взаимодействие дефектов в осевом направлении проявляется при $S_z \leq 5 \cdot \delta$, так как наблюдается рост значений отношения $\sigma_{i \text{ ос}}^{\text{ср}} / \sigma_{i \text{ ном}}$ при уменьшении S_z начиная с $S_z = 5 \cdot \delta$.

Из графиков на рис. 13 можно сделать вывод, что дефекты взаимодействуют в окружном направлении, когда выполняется неравенство $S_{\Theta} \leq 5 \cdot \delta$, поскольку тогда отношение $\sigma_{i \text{ окр}} / \sigma_{i \text{ ном}}$ при рассмотрении комбинации дефектов во всех случаях больше, чем при рассмотрении одиночной вмятины.

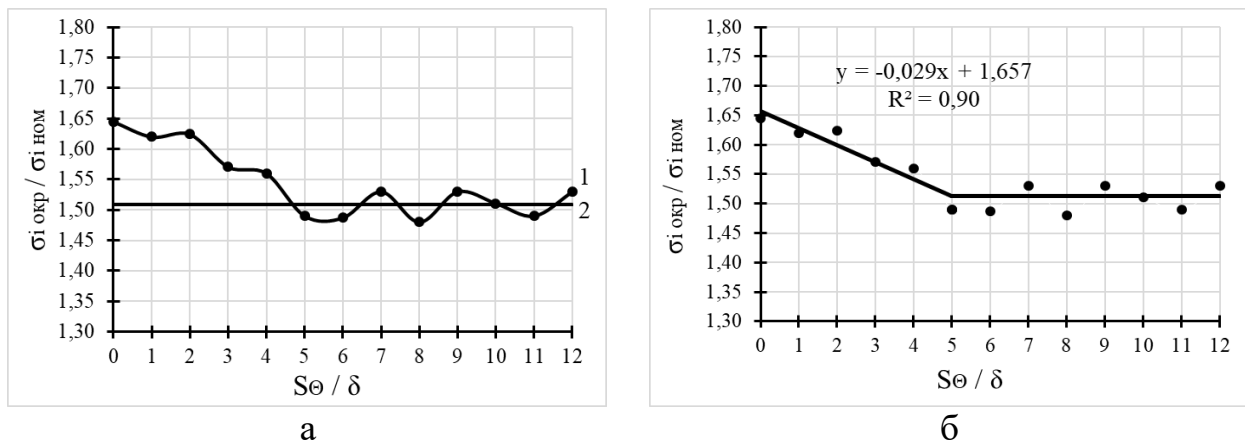


Рис. 13. Графики для оценки взаимодействия дефектов вмятина и потеря металла в окружном направлении трубы: а – полученные точки соединены гладкими кривыми; б – по полученным точкам построены линии тренда; 1 – отношение $\sigma_{i \text{ окр}} / \sigma_{i \text{ ном}}$ для сочетания вмятины и потери металла; 2 – отношение $\sigma_{i \text{ окр}} / \sigma_{i \text{ ном}}$ для одиночной вмятины

Следовательно, получен критерий определения комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла» (или критерий взаимодействия дефектов вмятина и потеря металла) в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} S_z &\leq 5 \cdot \delta, \\ S_\theta &\leq 5 \cdot \delta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Если верны оба неравенства критерия (2), то вмятина и дефект потери металла образуют один комбинированный дефект, то есть вмятина и дефект потери металла взаимодействуют. Если неверно хотя бы одно неравенство, то вмятина и дефект потери металла не взаимодействуют и их следует рассматривать как одиночные.

В зоне комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла» при воздействии на образец трубы внутреннего давления найдены методом наименьших квадратов зависимости вида $\sigma_{i \text{ окр}}^{\text{cp}} / \sigma_{i \text{ ном}} = -0,082 \cdot (S_z / \delta) + 5,302$ в интервале S_z / δ от 0 до 5 (см. рис. 12 б) и $\sigma_{i \text{ окр}} / \sigma_{i \text{ ном}} = -0,029 \cdot (S_\theta / \delta) + 1,657$ в интервале S_θ / δ от 0 до 5 (см. рис. 13 б).

В четвёртой главе «Разработка методики оценки работоспособности секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «вмятина с потерей металла»» рассмотрен порядок проведения дополнительного дефектоскопического контроля (ДДК) секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «вмятина с потерей металла». ДДК назначается по итогам проведённой внутритрубной диагностики и состоит из трёх этапов: подготовительного, измерительного, расчётного. Подготовительный этап включает в себя определение местоположения дефекта на трассе нефтепровода, разработку котлована в месте дефекта, разметку и подготовку зоны контроля. В ходе измерительного этапа осуществляются измерения геометрических параметров дефектов (длины L, ширины W, глубины H), расстояний между вмятиной и потерей металла в осевом и

окружном направлениях трубы (S_z и S_θ , рис. 14), расстояний от границ сварных швов до границ комбинированного дефекта, фактической толщины стенки нефтепровода δ в бездефектной зоне. При помощи критерия (2) определяется, взаимодействуют между собой или нет дефекты вмятина и потеря металла.

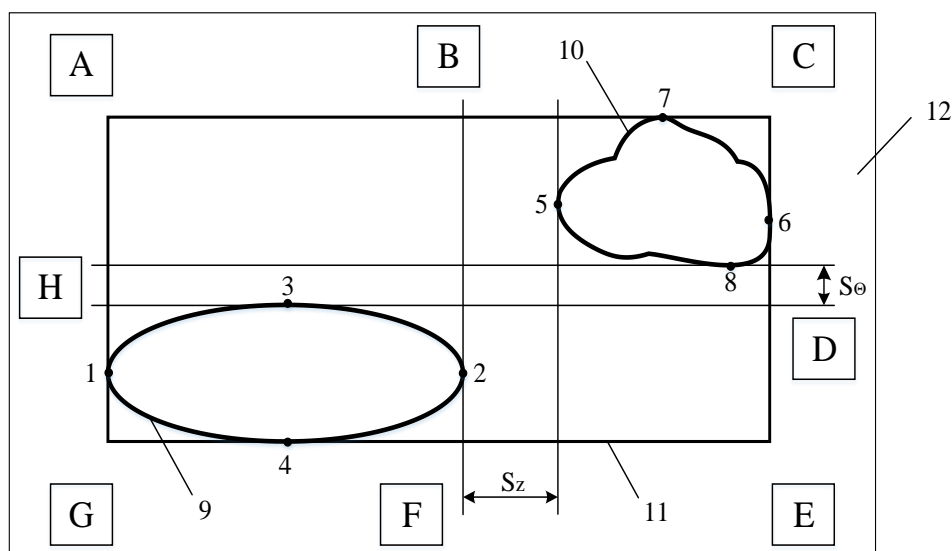


Рис. 14. Разметка в зоне контроля комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла»: 1–4 – крайние точки контура вмятины; 5–8 – крайние точки контура дефекта потери металла; 9 – граница вмятины; 10 – граница дефекта потери металла; 11 – граница комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла»; 12 – зона контроля; А–Н – бездефектные зоны для измерения толщины стенки нефтепровода δ ; S_z и S_θ – минимальные расстояния между границами дефектов вмятина и потеря металла в осевом и окружном направлениях трубы соответственно

В процессе расчётного этапа используется программа для ЭВМ. С её помощью выполняется вычисление предельного давления $p_{пред}$ секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом по алгоритму, представленному на рис. 3. Затем делается вывод о том, нуждается или нет дефектная секция в ремонте посредством неравенства $p_{пред} \geq p_{проект}$ (условие прочности). Если неравенство неверное, то требуется немедленный ремонт дефектной секции или понижение давления в трубопроводной системе до уровня, при котором $p_{пред} = p_{проект}$. Если неравенство верное, то следует рассчитать предельный срок эксплуатации магистрального нефтепровода $t_{пред}$ по алгоритму, предложенному на рис. 4, и назначить срок ремонтных работ не позднее истечения предельного срока эксплуатации $t_{пред}$. Предполагается, что дефект потери металла развивается по коррозионному механизму.

Разработанная методика оценки работоспособности секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «вмятина с потерей металла» позволяет осуществлять планирование ремонтных работ на дефектных участках трубопровода, чтобы обеспечить надёжное и безопасное функционирование системы магистрального трубопроводного транспорта нефти.

Заключение

1. Для обоснованного планирования сроков и объёмов ремонтных работ на линейной части магистральных нефтепроводов необходимо выполнять расчёты количественных показателей надёжности элементов трубопровода, а именно: разрушающего давления и предельного давления, предельного срока эксплуатации трубной секции, вероятности отказа участка трубопровода. Дефектные зоны трубопровода изменяют количественные показатели надёжности относительно бездефектных зон. Существуют дефекты разного типа, разного происхождения. Геометрические параметры некоторых дефектов развиваются по коррозионному или циклическому механизму, что приводит к изменению количественных показателей надёжности с течением времени эксплуатации трубопровода. Анализ отчётов по внутритрубной диагностике магистральных нефтепроводов показывает, что среди опасных дефектов большую долю имеют комбинированные дефекты типа «дефект геометрии с потерей металла», в том числе дефекты типа «вмятина с потерей металла».

2. В диссертационной работе проанализированы методики расчёта на прочность и долговечность магистральных трубопроводов с одиночными и комбинированными дефектами. Применены расчётные деформационные критерии предельных состояний и расчётные схемы для определения компонентов напряжённо-деформированного состояния в зонах дефектов разного типа. Представлен единый подход к расчётам на прочность и долговечность магистральных трубопроводов с дефектами трубы разных типов.

3. Разработаны алгоритмы расчёта предельного давления и предельного срока эксплуатации секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла». Представлены преимущества разработанных алгоритмов расчёта перед известными алгоритмами.

4. Выполнены экспериментальные исследования на лабораторном стенде с целью изучения напряжённо-деформированного состояния образцов трубы в дефектных зонах. Исследовано напряжённо-деформированное состояние в зонах дефектов следующих типов: 1) одиночная потеря металла; 2) одиночная вмятина; 3) комбинированный дефект типа «вмятина с потерей металла». В процессе экспериментов измерялись кольцевые и продольные деформации в дефектных зонах. Результаты опытов представлены в графической форме. Введён критерий взаимодействия дефектов вмятина и потеря металла, позволяющий выявлять комбинированный дефект типа «вмятина с потерей металла» при выполнении диагностики магистрального нефтепровода.

5. Разработана методика оценки работоспособности секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «вмятина с потерей металла», служащая для применения в процессе наружной диагностики дефектного участка трубопровода. Благодаря использованию методики определяются величины предельного давления и предельного срока эксплуатации дефектной секции, осуществляется планирование ремонтных работ на дефектных участках трубопровода.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК при Минобрнауки России:

1. Сальников А. В., Шарыгин А. М., Игнатик А. А. Оценка прочности и долговечности труб с дефектами для эффективного планирования ремонтных работ на линейной части магистральных трубопроводов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 9. С. 114–121.

2. Игнатик А. А., Сальников А. В. Разработка методики расчёта на прочность и долговечность магистральных трубопроводов в рамках вероятностно-статистического подхода // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2017. № 5. С. 42–45.

3. Сальников А. В., Игнатик А. А. Совершенствование методики расчёта труб на долговечность с комбинированными дефектами типа «дефект геометрии с коррозионной потерей металла» // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 3. С. 62–70.

4. Игнатик А. А. Экспериментальное и теоретическое исследование деформированного состояния дефектных зон трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 2. С. 147–153.

5. Сальников А. В., Игнатик А. А. Применение комбинированной вероятностно-статистической методики количественной оценки прочности и долговечности магистральных трубопроводов с одиночными и комбинированными дефектами // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2019. № 5. С. 115–124.

Статья в журнале, включённом в международную систему цитирования Scopus:

6. Игнатик А. А., Сальников А. В., Шарыгин А. М. Исследование напряжённо-деформированного состояния трубопровода в области одиночной вмятины и вмятины с дефектом уменьшения толщины стенки // SOCAR Proceedings. 2018. № 4. С. 35–42.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

7. Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018614545. Программа для расчёта предельного давления секции магистрального нефтепровода с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с потерей металла» / Игнатик А. А. ; заявл. 25.02.2018 ; опубли. 10.04.2018, Бюл. № 4. 1 с.

8. Св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018663510. Расчёт предельного срока эксплуатации магистрального газонефтепровода с комбинированным дефектом типа «дефект геометрии с риской» / Игнатик А. А., Сальников А. В. ; правообладатель ФГБОУ ВО «УГТУ» ; заявл. 01.10.2018 ; опубли. 30.10.2018, Бюл. № 11. 1 с.

Статьи в других научных изданиях:

9. Игнатик А. А. Оценка технического состояния линейной части магистральных нефтепроводов посредством расчётов на прочность и долговечность труб и сварных соединений с дефектами // мат. XVI Междунар. молод. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2015» (Ухта, 25–27 марта 2015 г.). В 6 ч. Ч. 4. Ухта : УГТУ, 2015. С. 119–123.

10. Игнатик А. А. Способ определения ресурса трубопровода с трещиноподобными дефектами // мат. XVII Междунар. молод. науч. конф. «Севергеоэкотех – 2016» (Ухта, 23–25 марта 2016 г.). В 6 ч. Ч. 3. Ухта : УГТУ, 2016. С. 103–107.

11. Игнатик А. А., Сальников А. В. Анализ методики расчёта на долговечность эксплуатируемого магистрального нефтепровода // мат. Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов» (Ухта, 2–3 ноября 2016 г.). Ухта : УГТУ, 2017. С. 186–191.

12. Игнатик А. А., Сальников А. В. Разработка методики расчёта предельного срока эксплуатации секции магистрального трубопровода с комбинированным дефектом // мат. Междунар. конф. «Рассохинские чтения» (Ухта, 2–3 февраля 2017 г.). В 2 ч. Ч. 1. Ухта : УГТУ, 2017. С. 168–173.

13. Игнатик А. А., Сальников А. В. Экспериментальная установка для исследования деформированного состояния моделей трубопроводов, находящихся под нагрузкой // мат. I Междунар. науч.-практ. конф. «Булатовские чтения» (Краснодар, 31 марта 2017 г.). В 5 т. Т. 4. Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. С. 48–53.

14. Игнатик А. А., Сальников А. В. Практическое использование методик расчёта на прочность и долговечность магистральных газонефтепроводов с дефектами // тез. докл. XII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт – 2017» (Уфа, 24–25 мая 2017 г.). Уфа : Изд-во УГНТУ, 2017. С. 95–96.

15. Игнатик А. А. Анализ и сравнение существующих методик оценки прочности магистральных трубопроводов с коррозионными дефектами потери металла // мат. Междунар. науч.-практ. конф. «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (Нижевартовск, 20 апреля 2017 г.). В 2 т. Т. 1. Тюмень : ТИУ, 2017. С. 244–249.

16. Игнатик А. А., Сальников А. В. Влияние трещин и коррозионно-механических дефектов в сварных швах и околошовной зоне на надёжность магистральных трубопроводов // мат. Междунар. науч.-практ. конф. «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (25–28 октября 2017 г.). Альметьевск : АГНИ. 2018. В 3 т. Т. 3. С. 437–443.

17. Игнатик А. А., Сальников А. В. Теоретическое исследование прочности и долговечности магистральных трубопроводов с комбинированными дефектами металла трубы // мат. Всерос. науч.-техн. конф. (с междунар. участием) «Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений и транспорта трудноизвлекаемых запасов углеводородов» (Ухта, 2–3 ноября 2017 г.). Ухта : УГТУ, 2018. С. 133–141.

18. Игнатик А. А., Сальников А. В. Комбинированные дефекты магистральных трубопроводов // тез. докл. XIII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. «Трубопроводный транспорт – 2018» (Уфа, 23–24 мая 2018 г.). Уфа : Изд-во УГНТУ, 2018. С. 64–65.

19. Игнатик А. А., Сальников А. В. Апробация методики расчёта комбинированных дефектов по данным результатов внутритрубной диагностики магистрального нефтепровода // Нефтегазовый терминал : мат. Междунар. науч.-техн. конф. «Транспорт и хранение углеводородного сырья» (25–26 апреля 2019 г.). Т. 2. Выпуск 17. Тюмень : ТИУ, 2019. С. 9–16.

Учебно-методическое издание:

20. Игнатик А. А., Сальников А. В. Лабораторное исследование деформированного состояния труб магистральных трубопроводов в зонах с дефектами : метод. указания. Ухта : УГТУ, 2017. 45 с.

