

На правах рукописи

Тянь Ифань

Тянь Ифань

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДА РАННЕЙ ОЦЕНКИ
ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ
НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛН**

***Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ***

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:
кандидат технических наук

Палаев Александр Григорьевич

Официальные оппоненты:

Бурков Петр Владимирович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, профессор;

Шишкин Иван Владимирович

кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ». Филиал «Газпром ВНИИГАЗ Ухта», отдел надежности и ресурса Северного коридора газотранспортной системы, начальник отдела.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **24 сентября 2026 в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



НОСОВ
Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Распределительные газопроводы из полиэтилена (ПЭ) широко применяются в системах газораспределения благодаря ряду эксплуатационных преимуществ по сравнению со стальными трубопроводами. Использование полиэтиленовых труб позволяет снизить трудоёмкость монтажных работ, повысить коррозионную стойкость трубопроводов и обеспечить длительный срок эксплуатации газораспределительных сетей. В связи с этим наблюдается устойчивая тенденция к расширению применения полиэтиленовых газопроводов при строительстве и реконструкции распределительных сетей.

Одновременно с увеличением протяжённости полиэтиленовых газопроводов возрастает количество аварийных ситуаций, связанных с их повреждением. По статистическим данным, около 44 % повреждений ПЭ-газопроводов обусловлено механическими воздействиями при выполнении земляных работ. Одной из основных причин является сложность определения фактического положения полиэтиленовых трубопроводов с использованием традиционных методов, ориентированных преимущественно на металлические коммуникации. На практике сведения о расположении ПЭ-газопроводов в большинстве случаев определяются по исполнительной документации, которая не всегда отличается достаточной точностью и актуальностью. Кроме того, многие методы неразрушающего контроля, эффективно применяемые для стальных трубопроводов, неприменимы для полиэтиленовых газопроводов.

Дополнительной проблемой является отсутствие единого методического подхода к оценке технического состояния и прогнозированию повреждений полиэтиленовых газопроводов, а также недостаточное внедрение современных диагностических технологий, что снижает эффективность предупреждения аварийных ситуаций.

Ранняя оценка повреждений ПЭ-газопроводов способствует надёжному функционированию объектов газораспределения и газопотребления, предотвращению аварий, экономических и экологических потерь.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых

газопроводов на основе анализа линейных направленных волн. Реализация данного подхода требует разработки средств регистрации и обработки волновых сигналов, а также формирования методической основы оценки технического состояния полиэтиленовых трубопроводов. Использование разработанного метода позволит повысить безопасность эксплуатации газораспределительных сетей и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Степень разработанности темы исследования

Система распределительных газопроводов представляет собой многокомпонентный технологический комплекс, предназначенный для транспортировки природного газа от магистральных трубопроводов к конечным потребителям. Надёжность функционирования таких систем во многом определяется техническим состоянием трубопроводов и эффективностью применяемых методов диагностики.

Вопросам распространения линейных направленных волн в различных конструкциях посвящено значительное количество научных исследований. Существенный вклад в развитие данного направления внесли отечественные учёные: Гришанина Т.В., Колесников К.С., Образцов И.Ф., Новожилов В.В., Уманский А.А., Шклярчук Ф.Н., Тютюнников Н.П., Субботин С.Л., Михасёв Г.И., Баранов Н.А., Родыгин А.В., Кулешова А.Н., Петрова И.Г., Егоров В.В., Лебедева Т.Н., Мурашов С.А., Пчелинцева О.Н., Диденкулов И.Н., Екимов А.Э., Казаков В.В. и другие. Проведённые исследования в основном были ориентированы на металлические конструкции и не учитывали особенности распространения направленных волн в полиэтиленовых трубопроводах.

В зарубежных исследованиях Huang S., Barile C., Shafique S., Diogo A.R., Moreira B., Gouveia C. A., Guan R., Lu Y., Duan W., Desai P. R., Mao H., Ren J., Tang Y., Patadia H., Lively K., Wee J. W., Park S. Y., Das S., Dhar A. S., Guo Z., Xu R. и других авторов рассматривались методы локализации подземных коммуникаций, основанные на применении линейных направленных волн. Вместе с тем вопросы диагностики технического состояния полиэтиленовых газопроводов и раннего выявления повреждений в указанных работах исследованы недостаточно.

Таким образом, разработка метода ранней диагностики повреждений полиэтиленовых газопроводов на основе анализа линейных направленных волн и его экспериментальная верификация являются актуальной научной задачей. Для определения эффективности и области применения предлагаемого подхода требуется проведение комплексных исследований, включающих лабораторное изучение физических процессов и численное моделирование. Результаты таких исследований могут быть использованы при формировании теоретической и методической базы повышения надёжности и безопасности эксплуатации полиэтиленовых газораспределительных сетей.

Объект исследования – полиэтиленовые трубопроводы, применяемые в сетях газораспределения.

Предмет исследования – оценка повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн и анализ характеристик направлений рассеяния волновых откликов.

Цель работы – повышение качества диагностики полиэтиленовых газопроводов.

Идея работы заключается в применении линейных направленных волн для выявления повреждений полиэтиленовых трубопроводов на ранней стадии.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ научной литературы, патентных материалов, а также отечественного и зарубежного опыта в области обнаружения, локализации и количественной оценки повреждений подземных полиэтиленовых трубопроводов.

2. Изучить существующие методы и технологии поиска, мониторинга и диагностики технического состояния подземных распределительных газопроводов из полиэтилена.

3. Установить функциональную зависимость, описывающую влияние характеристики дефектов полиэтиленового трубопровода на изменение параметров линейно-направленных волн.

4. Экспериментально и теоретически обосновать применимость разработанного метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе анализа линейно-направленных волн в условиях, приближенных к реальным условиям.

5. Разработать программный модуль для ЭВМ, реализующий предложенный метод ранней диагностики повреждений, и сформулировать методические рекомендации по его практическому применению в системах технического мониторинга газораспределительных сетей.

Научная новизна работы:

1. Разработана новая методика раннего выявления повреждений полиэтиленовых трубопроводов, основанная на применении линейно-направленных волн и анализе характеристик рассеяния волновых откликов от дефектов, что впервые позволяет повысить достоверность диагностики за счёт раздельного определения типов дефектов по особенностям волновых откликов.

2. Установлена прямая пропорциональная зависимость амплитуды второй гармоники линейно-направленной волны от степени повреждения полиэтиленового материала, что обосновывает использование данного параметра для количественной оценки уровня повреждённости трубопровода.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.5 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пункту 4. «Методы и средства информационных технологий, моделирования, мониторинга, прогнозирования, интеллектуального инжиниринга и управления, автоматизации и роботизации, стандартизации и цифровизации технологических процессов проектирования, сооружения, эксплуатации, диагностики, ремонта сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта с целью повышения эффективности, надежности и безопасности использования отраслевого потенциала и ресурса трубопроводных конструкций».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлена связь между параметрами линейно-направленных волн, характеристиками волновых откликов и степенью повреждения ПЭ труб.

2. Предложен программный модуль для анализа и типизации волновых откликов дефектов. Разработан подход к моделированию волнового рассеяния с использованием S-матрицы.

3. Создана методическая основа для дальнейшего развития системы мониторинга и цифрового двойника трубопровода.

4. Результаты диссертационного исследования реализованы в компании «Shengli Highland Oilfield Services Co., Ltd» при выполнении научно-исследовательской работы, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертации от 19.03.2026 г.

5. По результатам диссертационного исследования получен патент на изобретение №2822296 «Устройство автоматизированного ультразвукового обнаружения дефектов на поверхности трубопроводов».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач был применен комплексный метод исследований, включающий анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации:

- анализ поведения второй гармоники образцов из полиэтилена с различной степенью старения.
- оценка значений коэффициента β , характеризующего способность материала или поверхности поглощать акустическую энергию при старении материала ПЭ и наличия дефектов.

Использовалось аттестованное и поверенное специализированное оборудование, на котором исследовались вырезанные из магистральных газопроводов образцы с различными видами дефектов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика раннего выявления и оценки повреждений полиэтиленовых трубопроводов, основанная на использовании линейно-направленных волн и анализе характеристик направлений рассеяния волновых откликов от дефектов различной природы способствует повышению качества диагностики полиэтиленовых трубопроводов.

2. Амплитуда волны второй гармоники, возникающая при распространении линейно-направленной волны в полиэтиленовом трубопроводе находится в прямой пропорциональной зависимости от степени повреждения материала трубопровода, что позволяет использовать данный параметр в качестве диагностического признака.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена тем, что защищаемые положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, базируются на строгих теоретических подходах, теоретически и экспериментально обоснованных математических моделях. Достоверность результатов работы подтверждается совпадением экспериментальных данных с результатами общепризнанных исследований по теме диссертации.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: XVIII Международная научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2023» (16-17 ноября 2023 года, г. Уфа), XXVI Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана» (07-08 ноября 2023 года, г. Тюмень), 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElCon 2024 (29-30 January 2024 года, Saint Petersburg), Ежегодная научная конференция Общества механики горных пород и инженерного дела провинции Аньхой (июль 2025 года, Китай).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме диссертации, разработке методики исследования, проведении экспериментальных исследований по оценке поврежденных полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн, в написании научных работ по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 5 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 122 наименования, и 2 приложений. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы, научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современных технических решений и существующих методов поиска и оценки повреждений полиэтиленовых труб и их местоположение. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований. Разработана система анализа, типизации волновых откликов дефектов с помощью программной системой, что может быть применено для разработки соответствующего программно-аппаратного решения предложенной системы рефлексной дефектоскопии. Преимуществом является потенциал к раннему выявлению последствий деструктивных процессов в толще материала ПЭ труб. Рассмотрен метод выявления дефектов ПЭ труб на основе линейно-направленных волн. Получена формула для вычисления оценки демпфирующих свойств ПЭ трубы.

В третьей главе описаны экспериментальные исследования оценки повреждений ПЭ труб на основе линейных направленных волн. На основе полученных изображений дислокации и термические микроповреждения внутри образцов играют существенную роль в изменении акустической линейности в процессе испытания.

В четвертой главе разработаны рекомендации по ранней оценке повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн и их зависимость от вида и размера дефекта. На основании полученных зависимостей даны рекомендации по оценке повреждения полиэтиленового трубопровода в газораспределительной сети.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых научных положениях:

1. Методика раннего выявления и оценки повреждений полиэтиленовых трубопроводов, основанная на использовании линейно-направленных волн и анализе характеристик направленных рассеяния волновых откликов от дефектов различной природы способствует повышению качества диагностики полиэтиленовых трубопроводов.

Методика имеет потенциал улучшить технические возможности диагностики, снизить операционные риски и сократить затраты на ремонт и замену поврежденных труб, которая базируется на математическом моделировании процесса детектирования дефектов полиэтиленовых труб с последующей апробацией разработанного математического аппарата в программной среде *Simulation* ПО *Solidworks*. Все акустические эффекты при движении звуковых (в том числе ультразвукового спектра) волн в сплошной среде (в данном случае в толще стен ПЭ трубы) описываются волновым уравнением (1):

$$\frac{\partial^2 U}{dt^2} = \frac{1}{c^2} \nabla^2 U = 0, \quad (1)$$

где U – функция, описывающая колебания среды, которая может быть применена для математического описания широкого спектра динамически изменяемых физических величин, характерных для соответствующей сплошной среды (электротехнические параметры, давление, плотность, скорость, смещение, прочее); t – период времени, в течении которого производится операция по детектированию нарушения сплошности среды, с; c – скорость движения акустической волны в сплошной среде, с/м; ∇ - оператор Лапласа.

Для определения несплошности с помощью акустического поля ультразвукового спектра целесообразно для функции U использовать параметр смещения среды, в которой движутся ультразвуковые волны от точки равновесия. При этом волновое уравнение (1) можно записать в виде (2):

$$\rho \frac{\partial^2 U}{dt^2} + \eta \frac{\partial U}{dt} + E \nabla^2 U = 0, \quad (2)$$

где ρ – параметр плотности сплошной среды, в которой движутся волны ультразвукового спектра; U – функция, описывающая динамику смещения точки описанной сплошной среды; η – параметр динамической вязкости описанной сплошной среды; E – модуль Юнга описанной сплошной среды, Па.

Источник ультразвуковых направленных волн R описывается условием (3):

$$R \Rightarrow \begin{cases} \pm x_R; \\ \pm y_R; \\ z_R = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для описанного источника задаются начальные флуктуации (смещение), которые представляют собой синусоидальный импульс, описываемый выражением (4):

$$U_0 = \frac{P}{\omega E} \sin(\omega t) \Rightarrow 0 < t < \tau, \quad (4)$$

где P – мощность синусоидального импульса начальных (нулевых) флуктуаций, Вт/м²; τ – период синусоиды импульса начальных смещений, с; ω – частота колебаний линейно направленных ультразвуковых волн, с⁻¹.

Результаты указывают на сгущение волнового рисунка линейно направленных акустических волн в районе дефекта округлого геометрического профиля, что также получило отклик на детектном графике в виде повторного всплеска импульса синусоиды флуктуаций (смещений) (рисунок 1). Согласно полученным данным? по результатам моделирования наблюдается формирование детектного пика и устойчивого сгущения волнового рисунка, что вызвано рефлексными линейно направленными акустическими волнами, которые отражаются от поверхности дефекта округлой геометрической формы (рисунок 1). Следовательно, моделируемый метод детекции дефектов полиэтиленовых труб показывает высокую степень обнаружения несплошности материала трубы. Для анализа применимости исследуемого детект-метода выполнили цифровую апробацию ещё для двух

характерных дефектов полиэтиленовых труб - поперечного (рисунок 2) и продольного дефекта в виде трещин (рисунок 3). Дефекты такого типа также часто встречаются при эксплуатации ПЭ трубопроводных систем в Китае.

Шум можно рассматривать как дополнительный сигнал $\bar{N}$. Набор данных заполняется в соответствии с уравнением (5), в котором любое новое наблюдение в базе данных - просто поэлементное сложение чистого сигнала и аддитивного Гауссовского белого шума. Эта операция выполняется 30 раз для каждого чистого сигнала (5):

$$Y_{i,j,k,l} = X_{i,j,k} + \bar{N}, 0 < l \leq 30, \quad (5)$$

Было оценено несколько значений сигнал/шума с целью выбора оптимального значения, которое не ставит под угрозу присущую дифференциацию между различными состояниями повреждения. После рассмотрения различных значений сигналов значение 60 дБ было определено как лучший выбор.

Когда значение сигнала было установлено слишком низким, например, 25 дБ, наложение различных сигналов состояний повреждения было очевидным для режимов L(0,3) и L(0,4), как показано на (рисунок 3). Это повлияло бы на параметр мягкого запаса разработанной модели, что привело бы к неточности при расчете. Значение сигнала 60 дБ поддерживало запас разделения в наблюдениях во временной области для каждого состояния повреждения, (рисунок 4). Результаты сигнала именно в 60 дБ являются предпочтительными, поскольку они близко совпадают с диапазоном спектральной мощности в числовых сигналах и соответствуют разбросу сигнала, наблюдаемому в экспериментальных результатах.

Применение данной методики ранней оценки повреждений на основе линейных направленных волн окажет значительное влияние на качество диагностики полиэтиленовых трубопроводов.

Одним из ключевых преимуществ методики является способность обнаруживать разнообразные дефекты на ранних стадиях их развития. Это позволяет оперативно выявлять потенциальные проблемы в материале трубопровода и принимать меры по их устранению до того, как они приведут к серьезным повреждениям или даже авариям.

2. Амплитуда волны второй гармоники, возникающая при распространении линейно-направленной волны в полиэтиленовом трубопроводе находится в прямой пропорциональной зависимости от степени повреждения материала трубопровода, что позволяет использовать данный параметр в качестве диагностического признака.

Экспериментальные исследования проводились в научно-исследовательском институте диагностики и повышения качества трубопроводной продукции Пекинского нефтяного института (Китай). В качестве исследуемых образцов применялись материалы труб ПЭ 32/40 и ПЭ 50/63/80/100/.

Экспериментальная установка включает в себя генератор тональных импульсов высокой мощности, систему Ritec-SNAP модели RAM-5000, аттенюатор высокой мощности, предусилитель, фильтры нижних и верхних частот, преобразователи и осциллограф (рисунок 5).

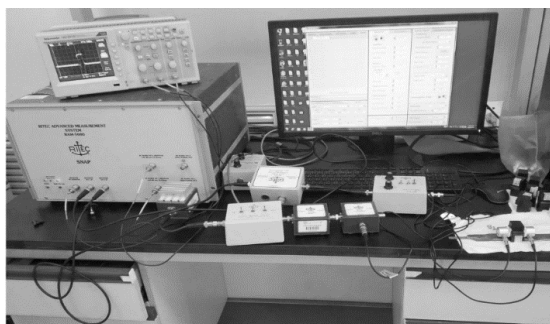


Рисунок 5 – Внешний вид экспериментальной установки линейно-направленной ультразвуковой измерительной системы. Генератор тональных импульсов высокой мощности системы Ritec-SNAP модели RAM-5000

В том числе усилитель с высоким уровнем мощности для создания высокочастотных импульсов. Передатчик управляется сигналом тонального импульса высокой мощности из 19 циклов на частоте 2,25 МГц и длительностью радиочастотного импульса 8,45 мкс. При запуске установки передающий преобразователь сигнала высокого напряжения проходит через терминал высокой мощности 50 Ом, аттенюатор высокой мощности (6 дБ) и набор фильтров нижних частот,

так что переходное поведение и высокочастотная составляющая от усилителя подавляются. Амплитуды основных и вторых гармонических волн измеряются методом передачи и регистрации в образцах (рисунок 6).

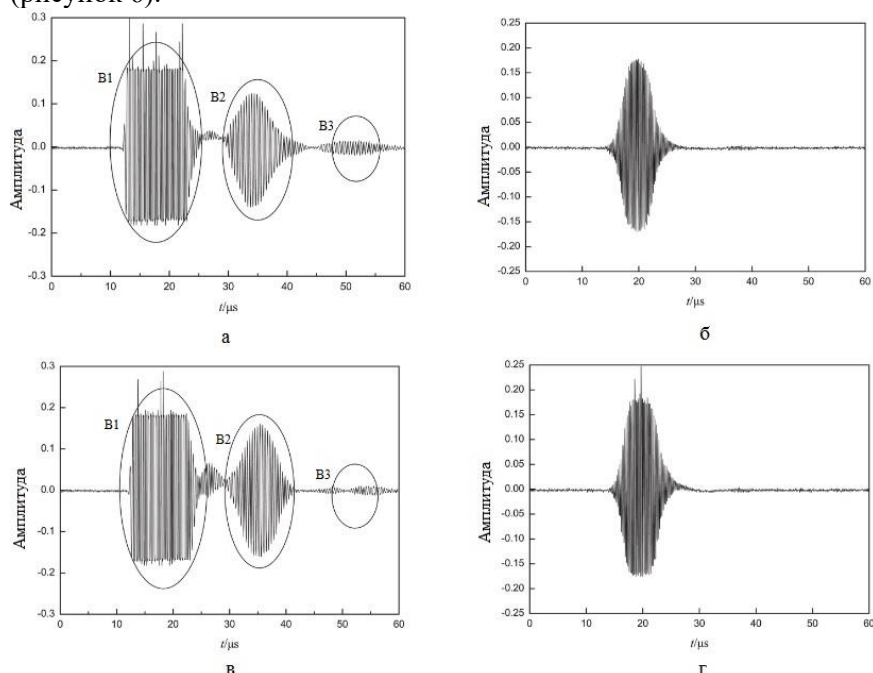


Рисунок 6 – Форма волны исследуемых образцов ПЭ и соединения:
(а) полученная форма волны материала ПЭ без дефекта; (б) вторая гармоническая форма волны материала ПЭ; (в) полученная форма волны соединения ПЭ с дефектом; (г) вторая гармоническая форма волны соединения ПЭ

Диапазон прочности материала ПЭ100 составляет 15–22 МПа. В эксперименте средний модуль упругости образцов ПЭ100 составляет 948,13 МПа, предел текучести - 21,23 МПа, а усилие - 3338,1 Н. Испытания проводились в соответствии с нормативной документацией на следующие показатели, согласно с нормативным документом на методы испытаний - ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. Для подтверждения, что вторая гармо-

ника принимаемого сигнала обусловлена линейно направленным сигналом теплового соединения трубы ПЭ, а не зеркальностью амплитуды линейного сигнала или экспериментальных приборов, сравнивались изменения амплитуды (A_2) в частотных областях основного материала ПЭ и соединений образцов трубы (рисунок 7). Амплитуды сигнала (A_2) увеличивались в диапазоне с 13,27 до 16,25, что указывает на то, что очевидна соответствующая реакция линейно направленных волн на изменение состояния ПЭ трубы или наличия дефекта.

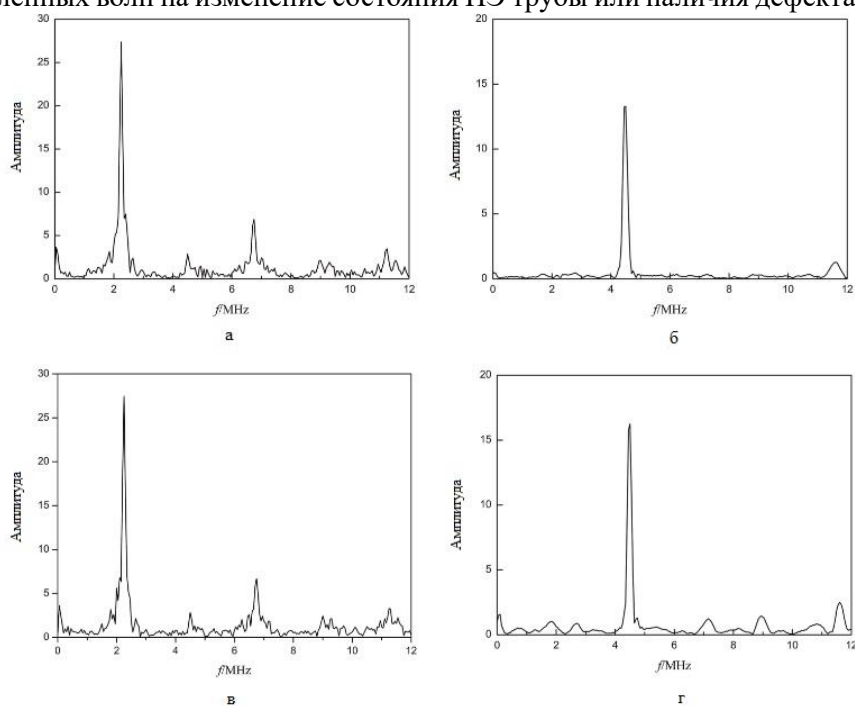


Рисунок 7 – Амплитуды частотного спектра основной (A_1) и второй гармоники (A_2): (а) основная частота основного материала ПЭ, (б) вторая гармоника основного материала ПЭ; (в) основное соединение материала ПЭ; (г) вторая гармоника

Для моделируемого состояния повреждения вводился шум с заданным сигналом/шумом, который можно описать уравнением (6):

$$SNR_{dB} = 10 \log^6 \left(\frac{P_{ijk}}{P_{ni}} \right), \quad (6)$$

где P_{ijk} – мощность произвольного чистого сигнала, которая вычисляется на основе среднеквадратичного значения амплитуд сигнала, Вт; P_{ni} – мощность добавленного шума к каждому вновь сгенерированному сигналу, Вт.

Было оценено несколько значений сигнала/шума с целью выбора оптимального значения, которое не ставит под угрозу присущую дифференциацию между различными состояниями повреждения. После рассмотрения различных значений сигналов значение 60 дБ было определено как лучший выбор.

В процессе проведения эксперимента сравнивались параметры акустической линейности образцов термического соединения ПЭ с различными дефектами (рисунок 8). Согласно китайскому техническому стандарту по проектированию газопроводов из полиэтилена CJJ63-2018, термическая обработка ПЭ требует времени поглощения 227 с. Данный технический стандарт предписывает требования к процедуре сварки ПЭ. Образцы (B1, B2, B3) представляют собой соединения ПЭ с 40%, 60% и 80% дефектов, на которых точки зависимостей значения (β) трех образцов (B1, B3, B5) имеют происхождения без нагрузки при сжатии, а треугольники указывают образцы соединений ПЭ (B2, B4, B6) с дефектами ПЭ при нагрузке ползучести материала ПЭ при сжатии. Значения (β) уменьшаются почти линейно от 0,0238 до 0,0223 и 0,0214, что согласуется с фактическими образцами (рисунок 9).

Для образцов (B2, B4, B6) значения (β) уменьшаются от 0,0248 до 0,0229, а затем увеличиваются от 0,0229 до 0,0254. Увеличение параметра линейности означает, что произошли микроповреждения и дислокации.

Изображения микроструктуры образцов соединения ПЭ было получено с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM3000. Для образца (B4) с дефектом 60% при 15 МПа/2ч в этой точке линейность, вызванная дислокациями, увеличивается, а линейность термического повреждения уменьшается (рисунок 10).

Значение (β) увеличивается с 0,0229 до 0,0254, что очень близко к нормальному значению коэффициента линейности, равному 0,0244. Это означает, что соединение ПЭ с 80% старения очень близко

к нормальной работе соединения ПЭ не состарившегося. Значение (β) указывает на то, что акустическая линейность для ПЭ сильно зависит от повреждения микроструктуры и ползучести при сжатии. Она увеличивается со степенью нагрузки сжатия (давлением и временем нагрузки).

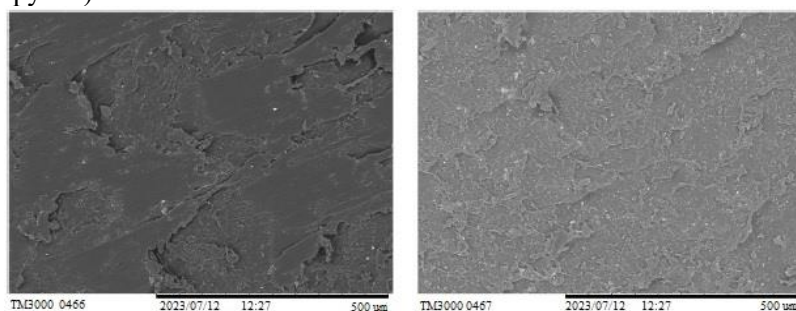


Рисунок 10 – Микроструктурные изображения с электронного микроскопа (Hitachi TM3000): (а) зоны соединения ПЭ трубы с незначительными дефектами и неоднородностью; (б) основного материала ПЭ трубы без дефектов и однородной структурой

Факт достижения амплитудой волны второй гармоники величины 20мкм и более означает, что размер дефекта имеет предельное значение и представляет опасность для функционирования газопровода.

Таким образом, методика возможности обнаружения старения, повреждений, а также всех нарушений в ПЭ трубопроводах, которые используются в городских газораспределительных сетях, была охарактеризована применением метода линейно направленного ультразвукового способа обнаружения повреждений и оценки старения при нагрузке ползучести материала ПЭ и его сжатии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи по повышению эффективности ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе линейно направленных волн.

1. Разработана методика раннего выявления и оценки повреждений полиэтиленовых трубопроводов, основанная на использовании линейно-направленных волн и анализе характеристик направленных рассеяния волновых откликов от дефектов различной природы

2. Разработана система анализа, типизации волновых откликов дефектов с помощью программы, что может быть применено для соответствующего программно-аппаратного решения предложенной системы рефлексной дефектоскопии. Преимуществом является потенциал к раннему выявлению последствий деструктивных процессов в ПЭ трубопроводах.

3. Установлено, что амплитуда волны второй гармоники, возникающей при распространении линейно-направленной волны и отражения от дефекта в полиэтиленовом трубопроводе, находится в прямой пропорциональной зависимости от степени повреждения материала трубопровода, что позволяет использовать данный параметр в качестве диагностического признака.

4. Для соединений ПЭ, дефектность которых проявляется в поглощении ультразвуковых волн (β) в интервале 40%–80%, установлена почти линейная монотонная зависимость.

5. Разработан программный модуль для ЭВМ, реализующий предложенный метод ранней оценки повреждений и методические рекомендации по его практическому применению.

Перспективы дальнейшего развития исследования заключаются в совершенствовании существующих и новых технических решений по определению влияния линейно направленных волн на нелинейность волны в среде распространения при встрече с дефектом и деградиационными процессами структуры.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Палаев, А. Г. Обоснование возможности применения метода на основе акустических линейных направленных волн для оценки поврежденных полиэтиленовых труб газораспределительной сети / А. Г. Палаев, **И. Тянь**, Ф. Чжао, Б. Ван, Х. Цянь // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2023. – № 3–4. – С. 18–22. DOI 10.24412/0131-4270-2023-3-4-18-22.

2. Палаев, А. Г. Ранняя оценка повреждений полиэтиленовых трубопроводов на основе линейных направленных волн / А. Г. Палаев, **И. Тянь**, Ц. Ван, Т. Хуан // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2024. – № 3–4. – С. 23–31. DOI 10.24412/0131-4270-

2024-3-4-23-31.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Aleksander, G.P. Predicting Service Life of Polyethylene Pipes under Crack Expansion using «Random Forest» Method / G.P. Aleksander, **T. Yifan**, Z. Fuming // International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects. – Vol. 36, No. 12. – P. 2243–2252. DOI: 10.5829/ije.2023.36.12c.14.

4. Shao, M. Understanding the phase behavior during CO₂ flooding by dissipative particle / M. Shao, P. Alexander, Yu. Xia, H. Xu, **Y. Tian**, A.M. Shipachev, Zh. Yang // Journal of Molecular Liquids. – 2024. - Vol. 409. – P. 125514. DOI: 10.1016/j.molliq.2024.125514.5.

5. Palaev, A.G. Method for Assessing Damage to Gas Distribution Network Pipelines based on Nonlinear Guided Wave / A.G. Palaev, Z. Fuming, **T. Yifan** // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – Vol. 37, No. 5. – P. 852–859. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.05B.04

6. **Tian, Y.** Non-destructive testing technology for corrosion wall thickness reduction defects in pipelines based on electromagnetic ultrasound / **Y. Tian**, A. G. Palaev, I. A. Shammazov, Y. Ren // Frontiers in Earth Science. – 2024. – Vol. 12. – 12 p. DOI: 10.3389/feart.2024.1432043.

7. **Tian, Y.** Early assessment method for damage to polyethylene pipes based on linear directional waves / **Y. Tian**, A. Palaev, A. Goluntsov, Z. Liu, M. Shao, B. Wang. // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2025. – Vol. 33, No. 1. – Article 2456102. DOI 10.1080/15376494.2025.2456102.

Публикации в других изданиях:

8. **Тянь, И.** Обоснование возможности применения метода ранней оценки повреждений полиэтиленовых труб на основе линейных направленных волн / **И. Тянь**, А. Г. Палаев // Трубопроводный транспорт – 2023 : Тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции, Уфа, 16-17 ноября 2023 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2023. – с. 282-283.

9. **Тянь, Ифань** Метод ранней оценки повреждений трубопроводов на основе линейных направленных волн / **Ифань Тянь**, А.Г. Палаев // Актуальные проблемы транспорта и хранения углеводородных ресурсов при освоении Арктики и Мирового Океана : Материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 07-08 ноября 2023 года. – Тюмень: ТИУ, 2023. – с. 200-204.

10. **Tian, Y.** Method for Early Damage Assessment of Pipes Based on Linear Guided Waves / **Y. Tian**, A. G. Palaev, F. Zhao // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, El-Con 2024, St. Petersburg, 29 - 30 January 2024. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. – P. 685–688. DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468233.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

11. Патент № 2822296 Российская Федерация, МПК G01N 29/04 (2024.01). Устройство автоматизированного ультразвукового обнаружения дефектов на поверхности трубопроводов. Заявка № 2024109418: заявл. 08.04.2024; опубл. 04.07.2024 / А.Г. Палаев, **Ифань Тянь**, И.М. Ландышев; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 13 с.: ил.

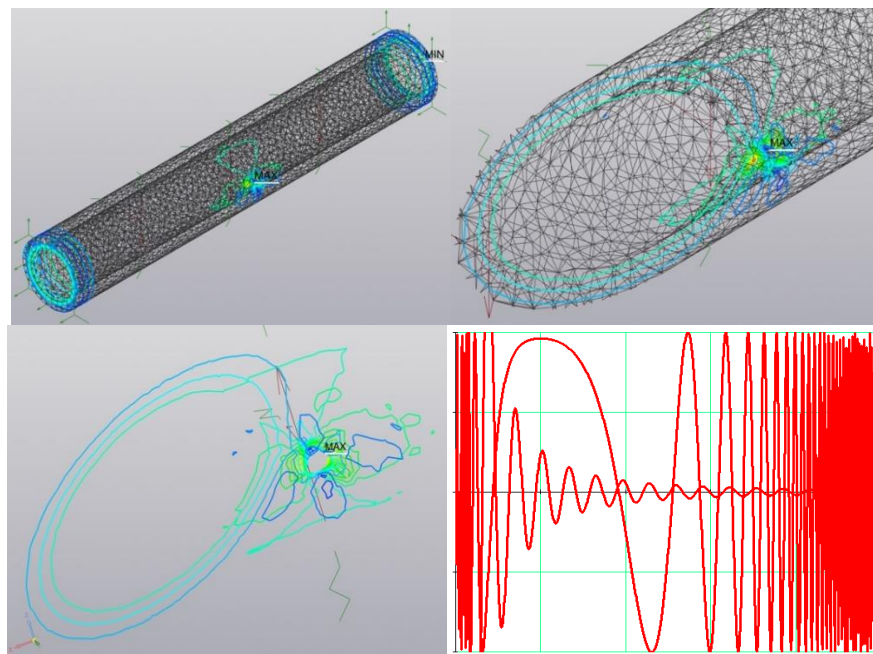


Рисунок 1 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом округлой геометрической формы с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции

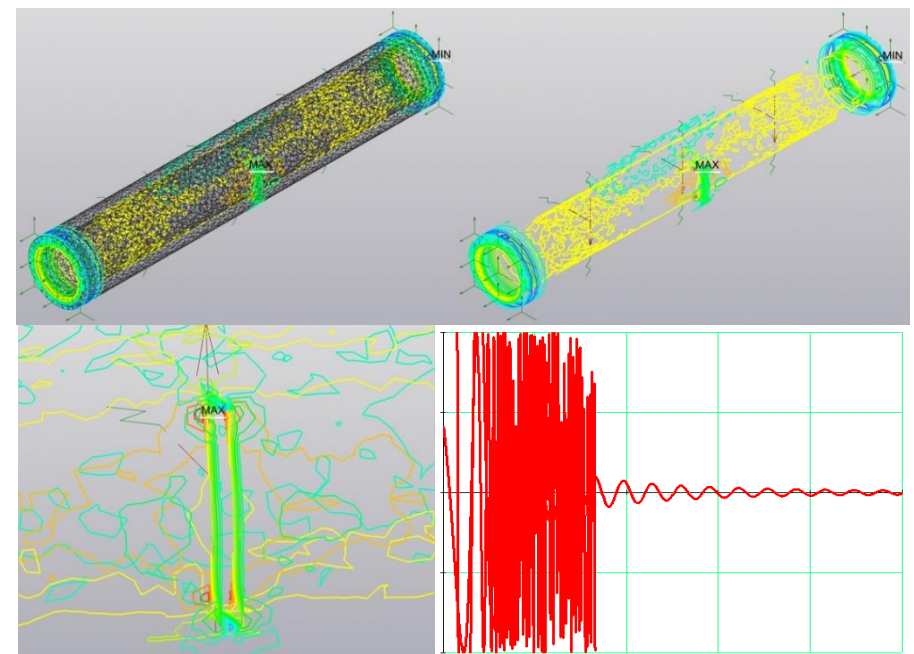


Рисунок 2 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом в виде поперечной трещины с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции

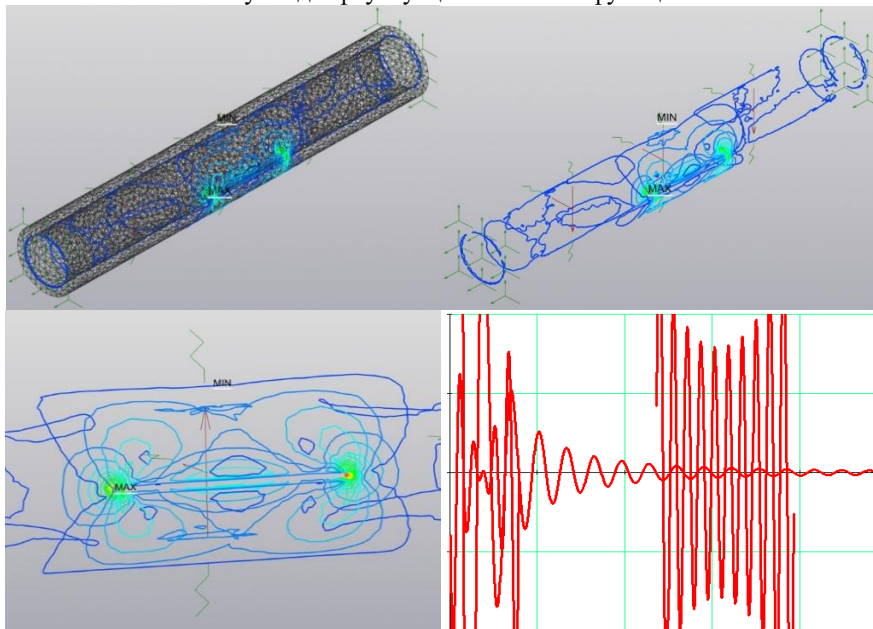


Рисунок 3 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом в виде продольной трещины с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции

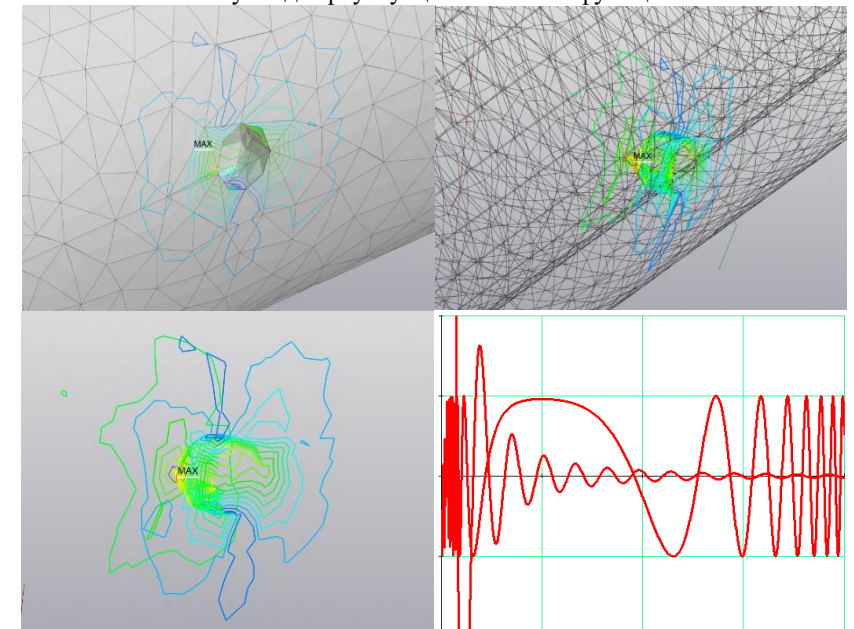


Рисунок 4 – Результаты моделирования распространения линейно направленных ультразвуковых волн в материале полиэтиленового трубопровода с дефектом округлой геометрической формы на начальной стадии развития с установлением характерного детектного всплеска импульса синусоиды флуктуации волновой функции

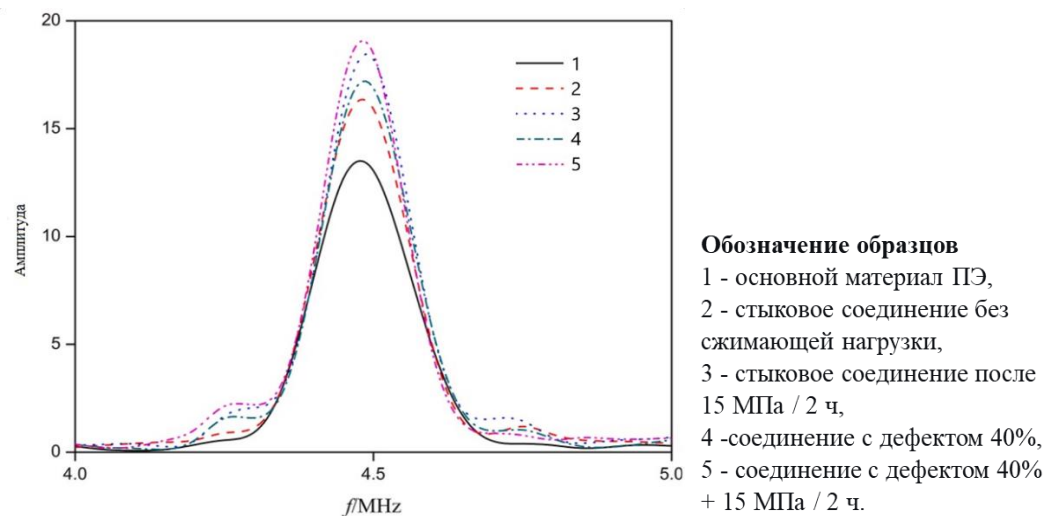


Рисунок 8 – Сравнение спектра второй гармоники A2 для пяти образцов с различной степенью старения

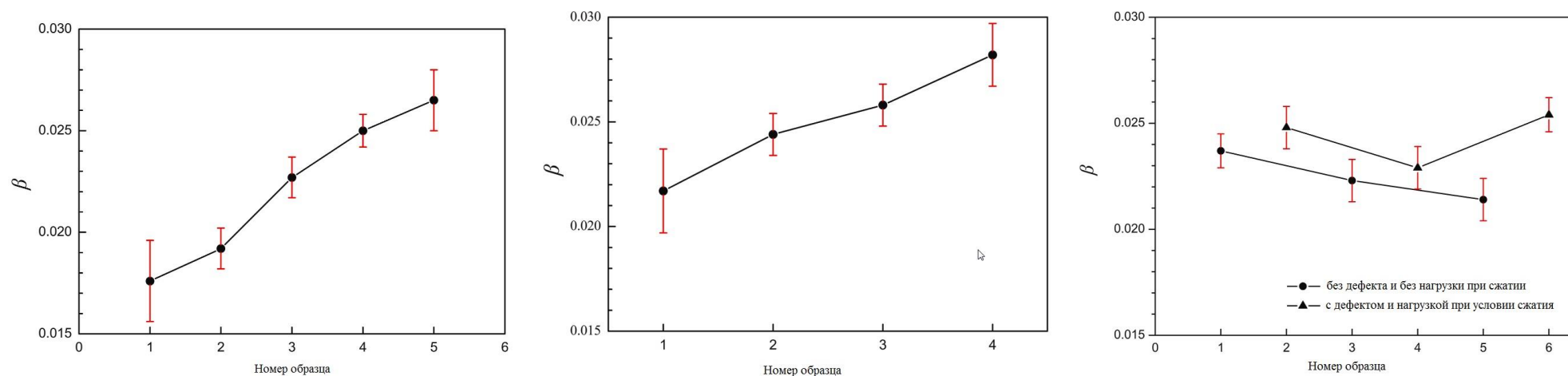


Рисунок 9 – Сравнение значений (β): а – для материала ПЭ при различных условиях старения; для стыковых сварных б – соединений полиэтилена при различных условиях старения; в – для образцов ПЭ с дефектами и без дефектов