

Технические науки. Архитектура и строительство

<https://doi.org/10.63377/3005-4966.4-2024-01>

УДК: 620.179.16

МРНТИ: 73.39.39

Методы неразрушающего контроля используемые при проверке сварных швов нефтепроводов^{*1}Бондарь И.С., ¹Рахимжанов А.Б., ¹Ремизов Е.Н.

ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Республика Казахстан

*Автор-корреспондент e-mail: ivan_sergeevich_08@mail.ru

Поступила: 04 ноября 2024 Рецензирование: 24 ноября 2024 Принята в печать: 09 декабря 2024	Аннотация В данном исследовании анализируются методы неразрушающего контроля, среди которых магнитный, акустический и метод вихревых токов. Рассматривается эффективность различных способов обнаружения дефектов в сварных швах труб, используемых в нефтепроводах. Для этой цели применяются устройства, такие как портативный электромагнитный дефектоскоп КУ-140, электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП), универсальный вихретоковый дефектоскоп NORTEC 600 и версия 3 дефектоскопа ПУЛЬСАР-2.2. С целью повышения точности контроля в многократно-теневом методе и уменьшения влияния акустического контакта на результаты, возбуждение и прием рэлеевских волн осуществляются с использованием электромагнитно-акустического метода. Акустический метод обеспечивает возможность проверки как всей поверхности, так и глубины сварного шва благодаря работе ультразвукового преобразователя. Разработанный подход многократной тени с рэлеевскими волнами подходит для выявления дефектов как в поверхностных, так и в подповерхностных зонах с продольной ориентацией, применим не только к сварным соединениям, но и к насосно-компрессорным трубам, толщина которых может быть минимум в два раза больше длины волны на определенной частоте. Это решение позволяет увеличить производительность путем сканирования исключительно вдоль сварного шва трубы нефтепровода. Ключевые слова: приборы неразрушающего контроля, ультразвуковой, вихретоковый, магнитный контроль, дефекты сварных швов труб нефтепроводов.
Бондарь И.С.	Информация об авторах: Кандидат технических наук ВАК РФ, Ph. D МОН РК, ассоциированный профессор (доцент) МНУВО РК, ассоциированный профессор, кафедра «Архитектурно-строительная инженерия», ALT Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, г. Алматы, Республика Казахстан, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7376-5643 . E-mail: ivan_sergeevich_08@mail.ru .
Рахимжанов А.Б.	магистрант МН-ТС-23-2, кафедра «Архитектурно-строительная инженерия», ALT университет имени Мухамеджана Тынышпаева, г. Алматы, Республика Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-8668-1096 . E-mail: rahimzhanov_ab@mail.ru
Ремизов Е.Н.	студент АДА-22-5р, кафедра «Архитектурно-строительная инженерия», ALT университет имени Мухамеджана Тынышпаева, г. Алматы, Республика Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-6574-1976 . E-mail: zhenya.berberogly2004@gmail.com

Техникалық ғылымдар. Сәулет және құрылыс

<https://doi.org/10.63377/3005-4966.4-2024-01>

ЭОЖ: 620.179.16

GTAMP: 73.39.39

Мұнай құбырларының дәнелестік тексерудегі қолданылатын бұзылмайтын тарау әдістері^{*1}**Бондарь И.С., ¹Рахимжанов А.Б., ¹Ремизов Е.Н.**

Мұхамеджан Тынышпаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан Республикасы

*Автор-корреспондент e-mail: ivan_sergeevich_08@mail.ru

Мақала келді:
04қараша 2024
Сараптамадан өтті:
24қараша 2024
Қабылданды:
09желтоқсан 2024

Түйіндеме

Бұл зерттеуде бұзбайтын бақылау әдістері талданады, олардың арасында магниттік, акустикалық және құйынды ток әдісі бар. Мұнай құбырларында қолданылатын құбырлардың дәнекерлеуіндегі ақауларды анықтаудың әртүрлі әдістерінің тиімділігі қарастырылады. Осы мақсатта ку-140 портативті электромагниттік дефектоскоп, электромагниттік акустикалық түрлендіргіш (ЭМАП), NORTEC 600 әмбебап құйынды ток Дефектоскопы және ПУЛЬСАР-2.2 дефектоскоптың 3 нұсқасы сияқты құрылғылар қолданылады. Бірнеше көлеңкелі әдіспен бақылаудың дәлдігін арттыру және акустикалық байланыстың нәтижелерге әсерін азайту мақсатында Рэлей толқындарын қоздыру және қабылдау электромагниттік-акустикалық әдісті қолдану арқылы жүзеге асырылады. Акустикалық әдіс ультрадыбыстық түрлендіргіштің жұмысының арқасында дәнекерлеудің бүкіл бетін де, тереңдігін де тексеруге мүмкіндік береді. Рэлей толқындарымен жасалған бірнеше көлеңкелі тәсіл беткі және жер асты бойлық бағыттағы аймақтардағы ақауларды анықтауға жарамды, тек дәнекерленген қосылыстарға ғана емес, сонымен қатар қалыңдығы белгілі бір жиілікте толқын ұзындығынан кемінде екі есе көп болуы мүмкін сорғы-компрессорлық құбырларға да қолданылады. Бұл шешім тек мұнай құбырының дәнекерлеу бойымен сканерлеу арқылы өнімділікті арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: бұзбайтын бақылау аспаптары, ультрадыбыстық, құйынды токты, магниттік бақылау, мұнай құбырлары құбырларының дәнекерленген жіктерінің ақаулары.

Бондарь И.С.	Авторлар туралы ақпарат: Техника ғылымдарының кандидаты, Ресей Федерациясының Жоғары аттестаттау комиссиясы, ф.ғ.к. D Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі, доцент (доцент) Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі, Мұхамеджан Тынышпаев атындағы АЛТ университетінің «Сәулет-құрылыс инженериясы» кафедрасының доценті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7376-5643 . E-mail: ivan_sergeevich_08@mail.ru .
Рахимжанов А.Б.	МН-ТС-23-2 магистранты, "Сәулет-құрылыс инженериясы" кафедрасы, АЛТ Мұхамеджан Тынышпаев атындағы университет, Алматы қ., Қазақстан Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-8668-1096 . E-mail: rahimzhanov_ab@mail.ru .
Ремизов Е.Н.	АДА-22-5Р студенті, "Сәулет-құрылыс инженериясы" кафедрасы, АЛТ Мұхамеджан Тынышпаев атындағы университет, Алматы қ., Қазақстан Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-6574-1976 . E-mail: zhenya.berberogly2004@gmail.com .

Technical Sciences. Architecture and Construction

<https://doi.org/10.63377/3005-4966.4-2024-01>

UDC: 620.179.16

IRSTI: 73.39.39

Non-destructive testing methods used in inspection of oil pipeline welds*¹**Bondar I.S., ¹Rakhimzhanov A.B., ¹Remizov E.N.**¹ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan*Corresponding author e-mail: ivan_sergeevich_08@mail.ru

<p>Received: 04 November 2024 Peer-reviewed: 24 November 2024 Accepted: 09 December 2024</p>	<p>Abstract</p> <p>In this study, non-destructive testing methods are analyzed, including magnetic, acoustic and eddy current methods. The effectiveness of various methods for detecting defects in welded seams of pipes used in oil pipelines is considered. Devices such as the KY-140 portable electromagnetic flaw detector, electromagnetic acoustic transducer (EMAP), universal eddy current flaw detector NORTEC 600 and version 3 of the PULSAR-2.2 flaw detector are used for this purpose. In order to increase the accuracy of the control in the multiple-shadow method and reduce the influence of acoustic contact on the results, the excitation and reception of Rayleigh waves are carried out using the electromagnetic acoustic method. The acoustic method makes it possible to check both the entire surface and the depth of the weld due to the operation of the ultrasonic transducer. The developed approach of multiple shadows with Rayleigh waves is suitable for detecting defects in both surface and subsurface zones with longitudinal orientation, applicable not only to welded joints, but also to tubing, the thickness of which can be at least twice the wavelength at a certain frequency. This solution allows you to increase productivity by scanning exclusively along the weld seam of the pipeline pipe.</p> <p>Keywords: non-destructive testing devices, ultrasonic, eddy current, magnetic inspection, defects in welded seams of oil pipeline pipes.</p>
<p>Bondar I.S.</p>	<p>Information about authors:</p> <p>Candidate of Technical Sciences, Higher Attestation Commission of the Russian Federation, Ph. D Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, Associate Professor (Associate Professor) of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, Associate Professor, Department of Architectural and structural engineering, ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7376-5643. E-mail: ivan_sergeevich_08@mail.ru</p>
<p>Rakhimzhanov A.B.</p>	<p>Graduate student MN-TS-23-2, Department of Architectural and Construction Engineering, Mukhamedzhan Tynyshpaev ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-8668-1096. E-mail: rahimzhanov_ab@mail.ru.</p>
<p>Remizov E.N.</p>	<p>Student ADA-22-5p, Department of Architectural and Construction Engineering, Mukhamedzhan Tynyshpaev ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-6574-1976. E-mail: zhenya.berberogly2004@gmail.com.</p>

Введение

Для выполнения задачи оценки напряженно-деформированного состояния в условиях эксплуатации применяются различные методы:

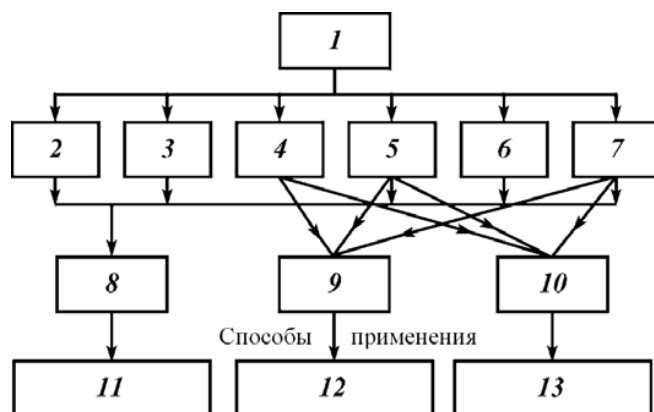
- натурные наблюдения и съемки пространственного положения трубопровода с последующей аналитической оценкой его напряженно- деформированного состояния (НДС);
- оценка уровня действующих напряжений в стенках трубопровода методами и средствами неразрушающего контроля (магнитный метод, акустический, вихретоковый и др.).

Методы

Методы неразрушающего контроля

К основным методам неразрушающего контроля можно отнести: магнитные, акустические методы контроля, контроль методами вихревых токов и просвечивания.

1. Магнитные методы контроля основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий. Магнитные методы контроля классифицируют по способам регистрации магнитных полей рассеяния или определения магнитных свойств контролируемых изделий. Классификация приведена на рисунке 1.



1 – магнитные методы контроля; 2 – магнитопорошковый;

3 – магнитографический; 4 – феррозондовый; 5 – преобразователя Холла; 6 – индукционный; 7 – пonde-
ромоторный; 8 – дефектоскопия; 9 – измерение толщины; 10 – контроль за структурой и механическими свой-
ствами; 11 – определение поверхностных и подповерхностных дефектов типа нарушений сплошности металла в
ферромагнитных изделиях; 12 – определение толщины немагнитных и слабомагнитных покрытий на ферромаг-
нитных изделиях, толщины азотированного и цементированного слоев, слоя поверхностной закалки; 13 – опре-
деление качества термообработки, количества магнитной фазы в немагнитных сплавах, механических характе-
ристик ферромагнитных сталей, остаточного аустенита, магнитной анизотропии

Рисунок 1. Классификация магнитных методов и области применения [1]

Для выявления дефектов типа нарушений сплошности металла в ферромагнитных из-
делиях применяют все магнитные методы, подробно изложенные в работе [1].

Кроме обнаружения дефектов типа несплошностей материала (трещин, волосовин, за-
катов, флокенов и др.), магнитные методы позволяют решать задачи исследования структу-
ры, определять качество термообработки деталей, наличие и количество остаточного аус-
тенита, магнитную анизотропию, контролировать процесс распада твердого раствора и диспер-
сионного твердения, определять механические характеристики ферромагнитных сталей и чу-
гунов по изменению их магнитных характеристик, а также контролировать толщину цемен-
тированного или азотированного слоев и толщину слоев поверхностной закалки изделий.

2. С помощью акустических методов в заготовках и изделиях, изготовленных практически из любых материалов, можно обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты, представляющие собой нарушение сплошности, неоднородность структуры, зоны поражения межкристаллитной коррозией, дефекты склейки, пайки, сварки и т. п. Акустические методы позволяют измерять геометрические параметры, например толщину при одностороннем доступе к изделию, а также физико-механические свойства материалов без их разрушения.

В последнее время эти методы с успехом используют для изучения кинетики начальной стадии разрушения образцов и изделий при усталостных испытаниях в работах [1-3].

На рисунке 2 показаны области применения акустических методов неразрушающего контроля.



Рисунок 2. Области применения акустических методов [1]

Важным преимуществом акустических методов является возможность их применения для контроля элементов конструкций в условиях эксплуатации без их демонтажа, особенно в тех случаях, когда требуется обеспечить надежную работу дорогостоящих и уникальных объектов, а также машин и конструкций ответственного назначения.

К преимуществам контроля акустическими методами относятся:

- высокая чувствительность, позволяющая выявлять мелкие дефекты;
- большая проникающая способность, позволяющая обнаруживать внутренние дефекты в крупногабаритных изделиях;
- возможность определения места и размеров дефекта;
- практически мгновенная индикация дефектов, позволяющая автоматизировать контроль;
- возможность контроля при одностороннем доступе к изделию;
- простота и высокая производительность контроля;
- полная безопасность работы оператора и окружающего персонала.

К недостаткам акустических методов относятся необходимость разработки специальных методик контроля деталей отдельных типов, необходимость сравнительно высокой частоты обработки поверхности контролируемых объектов и наличие мертвых зон, снижающих эффективность контроля.

3. При контроле методом вихревых токов (МВТ) в работах [2,3] используют зависимость амплитуды, фазы, траекторий, переходных характеристик и спектра частот токов, возбуждаемых в изделии, от его формы и размеров, физико-механических свойств и сплошности материала, расстояния до датчика, частоты и скорости перемещений, в том числе вибрации.

Для контроля все изделие и его часть помещают в поле датчика, схематично изображенного на рисунке 3. Вихревые токи (ВТ) возбуждают переменным магнитным потоком Φ_0 . Информацию о свойствах изделия датчик получает через магнитный поток Φ_B , созданный ВТ, с плотностью δ . Векторы напряженности возбуждающего поля H_0 и поля ВТ H_B направлены навстречу друг другу; ЭДС в обмотке датчика пропорциональна разности потоков $\Phi_0 - \Phi_B$.

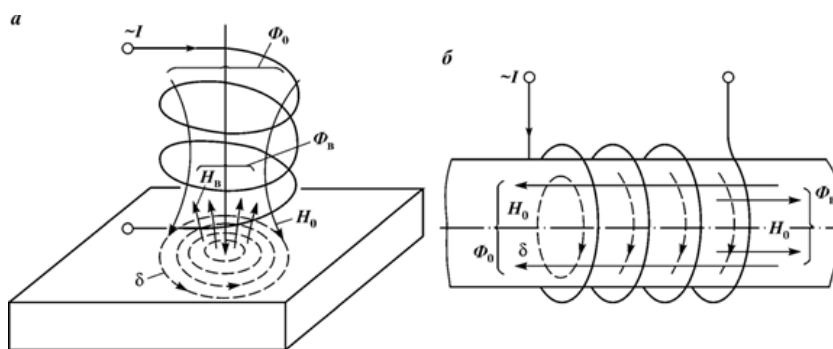
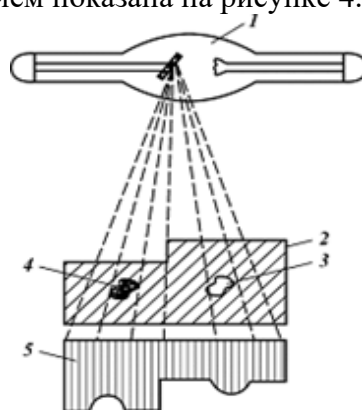


Рисунок 3. Линии напряженности магнитных полей H_0, H_n и плотности вихревых токов δ при контроле с помощью накладных (а) и проходных (б) датчиков [3]

К особенностям МВТ относятся:

возможность проверки большого числа параметров изделия; возможность проверки слоев материала небольшой толщины; отсутствие необходимости электрического и даже механического контакта датчика с изделием; большая скорость и незначительная трудоемкость контроля; сравнительная простота реализации дистанционного контроля деталей, установленных в малодоступных местах машин; возможность измерения толщины листа, стенки труб и деталей при одностороннем доступе; электрическая природа сигнала, быстродействие, что позволяет легко автоматизировать контроль; возможность контроля быстро движущихся изделий.

4. Методы просвечивания оптически непрозрачных объектов основаны на законе ослабления интенсивности излучения, проходящего через контролируемый объект. Интенсивность излучения меняется в зависимости от плотности материала и толщины. Схема просвечивания рентгеновским излучением показана на рисунке 4.



1— источник излучения; 2— контролируемый объект; 3 — раковина;
4— плотное включение; 5— эпюра интенсивности излучения за объектом

Рисунок 4. Схема просвечивания [3]

По результатам измерения интенсивности излучения за объектом определяют наличие в нем дефектов (раковин, включений и т. д.).

Результаты

За период прохождения научно-исследовательской практики в испытательной лаборатории «Испытания пути и искусственных сооружений» и АО «Трест Средаэнергоустановка» были изучены методы неразрушающего контроля: магнитный, акустический, вихретоковый и просвечивания [4].



Портативный электромагнитный дефектоскоп KY-140



Фотография работы с портативным электромагнитным дефектоскопом KY-140



Фотография сварного шва с макро- и микродефектами

Рисунок 5. Схема просвечивания



Электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП)



Фотография работы с электромагнитно-акустическим преобразователем



Фотография поры, заполненной газом полость круглой формы

Рисунок 6. Схема просвечивания [4]



Универсальный вихретоковый дефектоскоп NORTEC 600



Фотография работы вихретоковым дефектоскопом NORTEC 600



Фотография разветвленной трещины сварного шва, уходящая в глубину

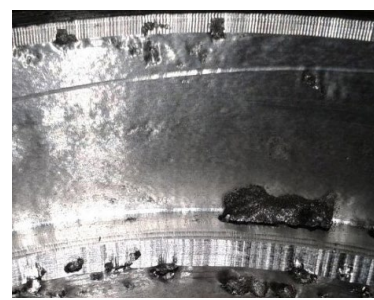
Рисунок 7. Схема просвечивания [4]



ПУЛЬСАР-2.2 версия 3 – ультразвуковой прибор для контроля прочности (поверхностное и сквозное прозвучивание)



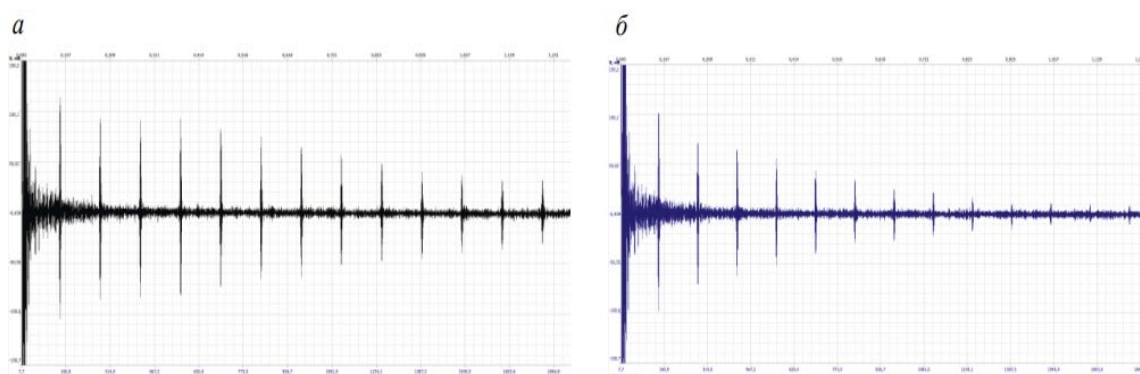
Калибровка прибора на контрольном образце из оргстекла



Фотография скрытых дефектов в сварных швах труб большой толщины стенки

Рисунок 8. Схема просвечивания [4]

Обучение проходило с использованием приборов: Портативный электромагнитный дефектоскоп КУ-140 (рисунок 5), Электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП) (рисунок 6), Универсальный вихретоковый дефектоскоп NORTEC 600 (рисунок 7), ПУЛЬСАР-2.2 версия 3 – ультразвуковой прибор для контроля прочности (поверхностное и сквозное прозвучивание) (рисунок 8), проводились исследования образцов сварных труб. Специализированный накладной ЭМАП обеспечивает бесконтактное возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях. Рабочая частота ЭМАП – 1 МГц, что позволяет обнаруживать дефекты на глубине в пределах длины рэлеевской волны (до 3 мм). Серия импульсов рэлеевских волн, многократно прошедших в прямом и обратном направлениях по огибающей прутка при отсутствии дефекта и при его наличии, представлены на рисунке 9. Серии характеризуются существенным сокращением количества импульсов и их амплитуд для дефектных областей объекта, что объясняется многократными двухсторонними переотражениями от дефекта. Следует отметить, что в процессе распространения рэлеевская волна дополнительно ослабляется за счет расхождения, радиального переизлучения на выпуклой цилиндрической поверхности и рассеяния на шероховатостях поверхности [5].



а – образец №1; б – образец №2

Рисунок 9. Эхограммы рэлеевских волн [5]

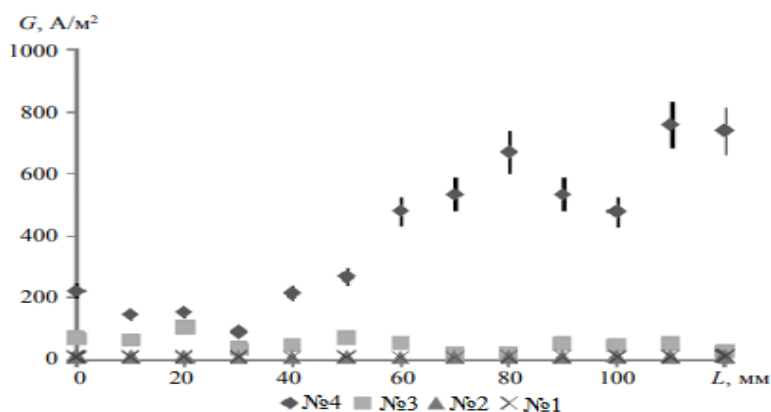
Результаты анализа вероятностных характеристик и коэффициента выявляемости для каждого из исследуемых образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Средние значения вероятностных характеристик серии импульсов рэлеевских волн

№ Образца	Математическое ожидание M , мВ	Дисперсия D , мВ ²	Среднеквадратическое отклонение σ , мВ	Асимметрия S	Экссесс E
№1	$-0,677 \pm 0,023$	$71,2 \pm 3,6$	$8,31 \pm 0,42$	$0,528 \pm 0,069$	$43,7 \pm 1,9$
№2	$-0,414 \pm 0,008$	$61,8 \pm 4,9$	$7,85 \pm 0,31$	$0,702 \pm 0,073$	$46,5 \pm 1,6$
№3	$-0,379 \pm 0,042$	$35,0 \pm 2,0$	$5,91 \pm 0,16$	$0,858 \pm 0,050$	$71,3 \pm 1,9$
№4	$-0,344 \pm 0,042$	$11,3 \pm 0,6$	$3,36 \pm 0,09$	$0,646 \pm 0,182$	$52,6 \pm 11,1$

Обсуждение

Электромагнитный контроль осуществлялся вдоль траектории трещины с шагом 10 мм по образующей. Результаты феррозондового контроля (ФЗК) в виде зависимости градиента магнитного поля вдоль трещины представлены на рисунке 10. Видно, что чувствительность ФЗК к трещине образца №4 существенно превышает чувствительность к трещине образца №3 (значения градиента соизмеримы с уровнем градиента поля для бездефектных образцов).

**Рисунок 10.** Распределение градиента магнитного поля G вдоль траектории трещины относительно проекции на образующую муфты L [материал автора]

Согласно рисунку 10, максимальный показатель выявляемости PFZ при ФЗК для образца №4 составляет 35 дБ, для образца №3 — не превышает 15 дБ. Следует отметить, что для образца №1 без механической обработки показатель выявляемости дефекта остается на том же уровне.

Из таблицы 1 следует, что параметры «математическое ожидание», «экссесс» и «асимметрия» не являются информативными с точки зрения дефектности образца. Параметр «коэффициент выявляемости» напротив имеет тенденцию к увеличению для образцов с дефектами №3 и №4.

Возможность выявления дефекта определяется различиями в величине информативного параметра, измеренного на образце с дефектом (№3 и №4), и величине аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец (№2). В случае параметра «коэффициент выявляемости» бездефектный образец характеризуется величиной отклонения при изменении положения ЭМА преобразователя по углу относительно начальной образующей.

Для моделирования дефектов в магистральных узлах нефтепроводов и выполнения расчетов по прогнозированию преждевременного износа труб нефтепроводов и ослабления в сварочных швах, используют программные комплексы «СТАРТ», «APM Win Machine», «ANSYS», «LS-DYNA», «MSC/NASTRAN», «ABAQUS» которые используют численные алгоритмы на основе МКЭ [6-11].

Выводы

1. Для определения дефектов в сварных швах нефтепроводов необходимо использовать приборы неразрушающего контроля, такие как: Портативный электромагнитный дефектоскоп КУ-140, Электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП), Универсальный вихретоковый дефектоскоп NORTEC 600, ПУЛЬСАР-2.2 версия 3.

2. Рассмотрен акустический метод многократной тени с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях, в отличие от традиционных методов контроля, требующих сканирования всей поверхности, обеспечивает контроль всего образца.

3. Анализ выявляемости дефектов показал, что для дефекта малого раскрытия и малой глубины (образец №3) акустический метод характеризуется наибольшим значением показателя выявляемости и превышает в среднем на 6÷9 дБ показатели выявляемости ФЗК и ВТК методов контроля.

4. Предлагаемый метод многократной тени с использованием рэлеевских волн может быть применим для выявления дефектов в поверхностной и подповерхностной зонах с ориентацией близкой к продольной не только в сварных швах, но и насосно-компрессорных трубах, толщина которых не менее двукратной длины волны на данной частоте. При этом обеспечивается более высокая производительность за счет сканирования только вдоль сварного шва трубы.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Бондарь ИС, Нугуманов НК. Методы неразрушающего контроля используемые при проверке сварных швов нефтепроводов. Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2024; 4(8): 6-16. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.4-2024-01>

Cite this article as: Bondar IS, Nugumanov NK. Metody nerazrushayushego kontrolya ispol'zuemye pri proverke svarnykh shvov nefteprovodov [Non-destructive testing methods used in inspection of oil pipeline welds]. Vestnik Kazahskogo avtomobil'no-dorozhnogo institute = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2024; 4(8): 6-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.63377/3005-4966.4-2024-01>

Литература

- [1] Белкин П.Н. Механические свойства, прочность и разрушение твёрдых тел. Учебное пособие. Саратов: Вузовское образование. 2019, 196.
- [2] Коршак А.А. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Учебник для вузов по направлению подготовки бакалавриата «Нефтегазовое дело». Ростов-на-Дону: Феникс. 2016, 541.
- [3] Безпалько В.И. Технология конструкционных и трубопроводостроительных материалов. Учебное пособие для вузов. Москва: Академия. 2008, 416.
- [4] Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Бобров В.Т., Алехин С.Г., Козлов В.Н. ЭМА преобразователи для ультразвуковых измерений. В мире неразрушающего контроля. Москва. ООО "Свен". 2008; 2 (40); 22-25.
- [5] Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. Москва: Наука. 1981, 288.
- [6] Бондарь И.С., Квашин М.Я., Рахимжанов А.Б. Исследование напряженно - деформированного состояния подземных трубопроводов. Вестник Казахского автомобильно-дорожного института. 2023; 4; 53-65.
- [7] Ivan S. Bondar, Dinara T. Aldekeyeva, Zere K. Ospanova. Stress-strain states of reinforced concrete spans of a railroad overpass using a spatial finite element model. Vibrotechnical works. 2024; 54; 320-326. <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24086>

- [8] Ivan S. Bondar, Gulnaz B. Karibaeva, Asel K. Kurbenova. Vibration diagnostics of transportation structures on railroads. Vibrotechnical works. 2024; 54; 109-115.<https://doi.org/10.21595/vp.2024.24086>
- [9] Морозов Е.М., Музеймек Е.М., Морозов А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. Москва: ЛЕНАНД. 2010, 456.
- [10] Серпик И.Н. Метод конечных элементов в решении задач механики несущих систем. Учебное пособие. Москва: Издательство АСВ. 2015, 200.

References

- [1] Belkin PN. Mekhanicheskie svoystva, prochnost' i razrushenie tvyordykh tel [Mechanical properties, strength and fracture of solids] uchebnoe posobie= training manual. Saratov: Vuzovskoe obrazovanie. 2019, 196. (in Russ.).
- [2] Korshak AA. Proektirovanie i ekspluatsiya gazonefteprovodov [Design and operation of gas and oil pipelines]. Uchebnik dlya vuzov po napravleniyu podgotovki bakalavriata «Nefte-gazovoe delo» = textbook for universities in the direction of bachelor's degree "Oil and Gas Business". Rostov-na-Donu: Feniks. 2016, 541. (in Russ.).
- [3] Bezpal'ko VI. Tekhnologiya konstruktsionnykh i truboprovodostroitel'nykh materialov [Technology of structural and pipeline construction materials]. Uchebnoe posobie dlya vuzov = a textbook for universities. Moskva: Akademiya. 2008, 416. (in Russ.).
- [4] Samokrutov AA, Shevaldykin VG, Bobrov VT, Alekhin SG, Kozlov VN. EMA preobrazovateli dlya ul'trazvukovykh izmerenij [EMA transducers for ultrasonic measurements]. Trudy defektoskopista = Works of a flaw detector. 2008; 2(40):214. (in Russ.).
- [5] Viktorov IA. Zvukovye poverhnostnye volny v tverdykh telakh [Sound surface waves in solids]. Moskva: Nauka. 1981, 288. (in Russ.).
- [6] Bondar' IS, Kvashin MYa, Rahimzhanov AB. Issledovanie napryazhenno - deformirovannogo sostoyaniya podzemnykh truboprovodov [Study of stress-strain state of underground pipelines]. Vestnik Kazahskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of the Kazakh Automobile and Road Institute. 2023; 4; 53-65. (in Russ.).
- [7] Bondar IS, Dinara T. Aldekeyeva, Zere K. Ospanova. Stress-strain states of reinforced concrete spans of a railroad overpass using a spatial finite element model. Vibrotechnical works. 2024; 54; 320-326.<https://doi.org/10.21595/vp.2024.24086>
- [8] Ivan S. Bondar, Gulnaz B. Karibaeva, Asel K. Kurbenova. Vibration diagnostics of transportation structures on railroads. Vibrotechnical works. 2024; 54; 109-115.<https://doi.org/10.21595/vp.2024.24086>
- [9] Morozov EM, Muzejmek EM, Morozov AYU, Shadskij AS. ANSYS v rukah inzhenera: Mekhanika razrusheniya [ANSYS in the Hands of an Engineer: Fracture Mechanics]. Moskva: LENDAND. 2010, 456. (in Russ.).
- [10] Serpik IN. Metod konechnykh elementov v reshenii zadach mekhaniki nesushchih sistem [Finite element method in solving problems of mechanics of load-bearing systems]. Uchebnoe posobie = training manual. Moskva: Izdatel'stvo ACB. 2015, 200. (in Russ.).