

DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-6-130-139
УДК 620.179.14

Р.В. Загидулин (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация), **Т.Р. Загидулин** (ООО «Научно-технический центр «Спектр», г. Уфа, Российская Федерация), **В.Р. Мардамшин** (ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), **Т.А. Бакиев** (ООО «Газпром трансгаз Уфа», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕФЕКТОСКОПИИ МЕТАЛЛА

Rinat V. Zagidulin (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation), **Timur R. Zagidulin** (Scientific and Technical Center «Spector» LLC, Ufa, Russian Federation), **Vadim R. Mardamshin** (Gazprom PJSC, Saint-Petersburg, Russian Federation), **Tagir A. Bakiev** (Gazprom Transgaz Ufa, LLC, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

DEFECTS ESTIMATION OF WELDED CONNECTIONS CONTINUITY ON STEEL PIPELINES BY DEFECTOSCOPY RESULTS

Введение

Для длительно эксплуатирующихся стальных трубопроводов стресс-коррозионные трещины и дефекты сплошности сварных соединений создают большие риски. Они являются концентраторами механических напряжений и обладают способностью быстро развиваться в металле (часто непредсказуемо), приводя к неожиданному разрушению металла стальной трубы.

Цели и задачи

Проанализировать дефекты сплошности сварных соединений стальных трубопроводов.

Методы

Исследование дефектов сплошности в сварных швах, которые были выявлены при ультразвуковом контроле стальных труб.

Background

For long-term operating steel pipelines, stress-corrosion cracks and defects in the integrity of welded joints pose great risks. They are mechanical stress concentrators and they have the ability to grow rapidly in metal (often unpredictable), leading to unexpected destruction of the metal of the steel pipe.

Aims and Objectives

Analyze welded connections continuity defects on steel pipelines.

Methods

Investigation of integrity defects in welds that were detected by ultrasonic testing of steel pipes.

Проведены гидравлические испытания на стенде в виде двухтрубной плети, изготовленной из стальных труб бывшего в эксплуатации магистрального газопровода, на усталостную долговечность и статическую прочность металла.

Результаты

Исходя из основ механики разрушения показано, что в зависимости от ориентации дефектов сплошности относительно действующих нагрузок в металле, дефекты, имеющие одинаковые формы и линейные размеры, создают разные концентрации механических напряжений при вершине дефекта, то есть имеют разную опасность для стальной трубы. Проанализирована возможность оценки опасности дефектов сплошности сварного шва, выявленных при ультразвуковой дефектоскопии стальных труб, на основе диагностической информации, получаемой в результате обработки сигналов ультразвукового дефектоскопа. Показано, что эта информация о примерной форме, линейных размерах и месторасположении дефекта сплошности в сварном шве содержит большую неопределенность. Она не позволяет определять величину коэффициента интенсивности напряжений и поле напряжений около граней дефекта сплошности, на основе разработанных расчетных моделей механики разрушения, с требуемой для практики технической диагностики надежностью. Показано, что оценка опасности дефекта сплошности в ультразвуковой дефектоскопии, путем ведения порогового уровня для эквивалентной площади отражателя, не является достаточной.

Hydraulic tests were carried out at the stand in the form of a two-pipe whip made of steel pipes of a used gas pipeline for fatigue life and static strength of the metal.

Results

Based on the fundamentals of fracture mechanics, it is shown that, depending on the orientation of the integrity defects relative to the actual loads in the metal, defects having the same shapes and linear dimensions create different concentrations of mechanical stresses at the tip of the defect, that is, they have different risks for the steel pipe. The possibility of assessing the risk of weld continuity defects identified during ultrasonic testing of steel pipes, based on diagnostic information obtained as a result of signal processing of an ultrasonic detector, is analyzed. It is shown that this information about the approximate shape, linear dimensions and location of the integrity defect in the weld contains a large uncertainty. It does not allow to determine the magnitude of the stress intensity factor and the stress field near the edges of the integrity defect, based on the developed calculation models of fracture mechanics, with the reliability required for the practice of technical diagnostics. It is shown that the risk assessment of the defect of integrity in ultrasonic flaw detection, by maintaining the threshold level for the equivalent area of the reflector, is not sufficient.

Ключевые слова: стальной трубопровод, дефект сплошности металла, сварное соединение, ультразвуковой контроль, магнитный контроль напряженного состояния металла, коэффициент интенсивности напряжений, индикатор механического напряжения

Key words: steel pipeline, metal continuity defect, welded joint, ultrasonic control, magnetic control of the metal stress state, stress intensity factor, mechanical stress indicator

Стресс-коррозионные трещины и дефекты сплошности сварных соединений создают большие риски для длительно эксплуатирующихся стальных трубопроводов [1, 2]. Такие дефекты сплошности являются кон-

центраторами механических напряжений и обладают способностью быстро развиваться в металле (часто непредсказуемо), приводя к неожиданному разрушению металла стальной трубы [3-6].

Из основ механики разрушения известно, что концентрация механических напряжений около кромок дефекта сплошности зависит от формы поверхности его граней, остроты вершин, а также от пространственной ориентации относительно действующих нагрузок. В связи с этим дефекты сплошности металла, имеющие одинаковые линейные размеры, но имеющие различную ориентацию, могут создавать разные концентрации механических напряжений, то есть иметь разную опасность для прочности металла.

В физических методах неразрушающего контроля и в механике разрушения материалов при исследованиях естественных дефектов сплошности широко применяется модель дефекта, поверхность граней которого имеет форму эллипса [4-7]. Для бесконечно протяженного дефекта сплошности эллиптической формы в растянутой пластине получена формула расчета величины наибольшего механического напряжения около вершины дефекта (рисунок 1, дефект А) [4, 6]:

$$\sigma_y = \sigma_0 \left(1 + \frac{2a}{b} \right), \quad (1)$$

где $2a$, $2b$ - линейные размеры дефекта сплошности;

σ_0 - номинальное механическое напряжение.

На основе (1) можно рассмотреть напряженное состояние металла около вершин двух дефектов сплошности в стальной трубе (дефект А, дефект Б), которые имеют одинаковые размеры, но ориентированы относительно действующей нагрузки ортогонально (для упрощения на рисунке 1 номинальное напряжение взято равным окружному напряжению в стальной трубе, которое определяется по формуле $\sigma_0 = \sigma_{y0} = P d / 2 t$ [3]),

при этом:

- для вершины дефекта сплошности А:

$$\sigma_y = P d / 2 t (1 + 2a/b), \quad (2a)$$

- для вершины дефекта сплошности Б:

$$\sigma_y = P d / 2 t (1 + 2b/a), \quad (2б)$$

где P - давление в стальной трубе;

d - внешний диаметр;

t - толщина стенки стальной трубы.

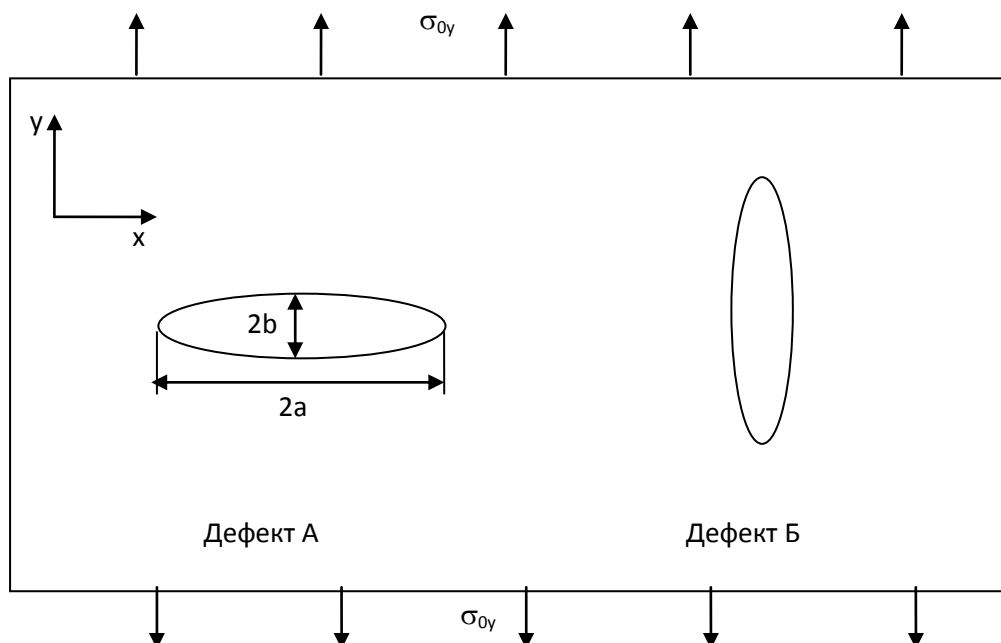


Рисунок 1. К оценке опасности дефекта сплошности металла в стальной трубе

В таблице 1 приведены значения механических напряжений в вершинах дефектов сплошности А и Б (параметры $2a = 1$ мм, $2b = 0,5$ мм) в стальной трубе из стали марки 10Г2СД (предел прочности $\sigma_B = 550$ МПа [8]) с внешним диаметром $d = 530$ мм и толщиной стенки $t = 8$ мм, полученные по формулам (2) при разных давлениях P в стальной трубе.

Из таблицы 1 видно, что около вершины дефекта сплошности А механические напряжения достигают величины предела прочности металла $\sigma_B = 550$ МПа (необходимое условие для возрастания дефекта) при кон-

центрация напряжений около вершин дефектов сплошности в стальной трубе при давлении в стальной трубе $P = 3,5$ МПа, в то время как около вершины дефекта сплошности Б этот предельный параметр достигается лишь при давлении в трубе $P = 8,5$ МПа. С учетом того что рабочее давление в стальном трубопроводе составляет около $P = 5$ МПа, можно заключить, что дефект сплошности Б не представляет опасности для прочности стальной трубы, в то время как дефект сплошности А будет активно развиваться и снижать прочность металла.

Таблица 1. Значения механических напряжений в вершинах дефектов сплошности А и Б при разных давлениях P в стальной трубе

P , МПа	1,0	2,0	3,0	3,5	4,0	5,0
Дефект А σ_y , МПа	165,6	331,3	497,0	580,0	662,5	828,0
Дефект Б σ_y , МПа	66,3	132,5	199,0	232,0	265,0	331,0

Из этих элементарных расчетов следует, что опасность дефекта сплошности металла в стальной трубе определяется не только его формой и линейными размерами, но и ориентацией относительно действующей нагрузки.

В методах механики разрушения для объективной оценки опасности дефекта сплошности металла стального трубопровода, выявленного техническими средствами дефектоскопии, необходимо определение формы, линейных размеров и ориентации дефекта сплошности в металле. На основе этих эмпирических данных появляется возможность расчетной оценки концентрации механических напряжений около дефекта сплошности и его критичности для прочности металла [4, 6]. Однако здесь имеются серьезные трудности, которые в настоящее время не позволяют в полной мере использовать результаты дефектоскопии для расчетной

оценки опасности дефектов сплошности (устойчивости состояния или предрасположенности к развитию), которые частично заключаются в следующем:

- формы дефектов сплошности металла естественного происхождения могут в разной степени отличаться от принятой в расчетных моделях дефектов эллипсоидальной формы, что приводит к неконтролируемым ошибкам в расчетах на прочность;
- практически для всех существующих технических средств дефектоскопии характерна ограниченная точность оценки линейных размеров и формы дефектов сплошности, неудовлетворительная оценка ориентации граней дефекта относительно поверхностей стальной трубы в силу наличия ограничений методического и технического характера;

- в теоретических расчетах на прочность металла с дефектами сплошности в механике разрушения в основном учитываются расчетные действующие нагрузки, но не учитывается распределение остаточных механических напряжений в стальных трубах и сварных соединениях, которые могут иметь значительные величины.

Очевидно, что решение этих проблем физико-математического и технического характера требует больших усилий, временных и материальных ресурсов. Отчасти этим обстоятельством можно объяснить появление вероятностных методов оценки прочности металлоконструкций (оценка рисков), где осуществляется постепенный отход от детерминированных диагностических признаков и методов, применяемых в технической диагностике металлоконструкций [5].

На практике неразрушающего контроля стальных изделий и материалов для преодоления существующих трудностей опасность дефекта сплошности, выявленного при дефектоскопии стального трубопровода, определяется на основе сравнения его линейных размеров с заданными пороговыми значениями, которые регламентируются нормативными документами [2, 9]. При таком подходе рассмотренные дефекты сплошности А и Б будут классифицированы как одинаково опасные для прочности металла стальной трубы, что не в полной мере соответствует действительности. Однако если учесть, что около опасных дефектов сплошности формируется область с повышенным напряженным состоянием металла, то, контролируя фактическое напряженное состояние металла и сопоставляя его с примерными линейными размерами дефектов сплошности, полученными по результатам дефектоскопии стальных труб, можно достаточно уверенно оценивать опасность выявленных дефектов сплошности металла. Об этом свидетельствуют результаты гидравлических испытаний стенда в виде двухтрубной плети, изготовленной из стальных труб бывшего в эксплуатации магистрального газопровода с наружным диаметром 530 мм (рисунок 2).

Некоторые параметры данного испытательного стенда приведены в таблице 2.

Для моделирования пятилетнего периода эксплуатации стального газопровода испытательный стенд подвергался переменным нагрузкам с количеством циклов $N = 150$.

Испытание на усталостную долговечность металла стальных труб стенда проводилось в режиме гидравлического нагружения от минимального внутреннего давления, равного $P_{\min} = 2,6$ МПа, до максимального давления $P_{\max} = 5,4$ МПа (с выдержкой величины давления в течение 2 мин при P_{\min} и при P_{\max}).

В процессе испытаний стенда были проведены комплексные исследования качества сварных соединений, включающего ультразвуковой контроль (УЗК) с помощью ультразвукового дефектоскопа с акустическим преобразователем в виде фазированной антенной решетки и магнитный контроль напряженного состояния с помощью индикаторов механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 сканирующего типа [9-11].

Ультразвуковой дефектоскоп, основанный на методе отражения акустических волн, позволяет выявлять внутренние дефекты сплошности металла и определять их диагностические параметры (эквивалентная площадь отражателя (дефекта сплошности), протяженность в металле, примерная форма поверхности граней (объемное тело / плоское тело) и глубина залегания).

Показания индикаторов механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 сканирующего типа, измеряющих напряженность поля остаточной намагниченности металла, связаны с величиной эффективного механического напряжения металла в сложном напряженном состоянии [10, 11].

В результате проведенных комплексных исследований в сварных соединениях испытательного стенда были выявлены внутренние дефекты сплошности производственного и эксплуатационного характера и соответствующие им области с повышенным напряженным состоянием металла, месторасположение которых на стенде показано на рисунках 2, 3.

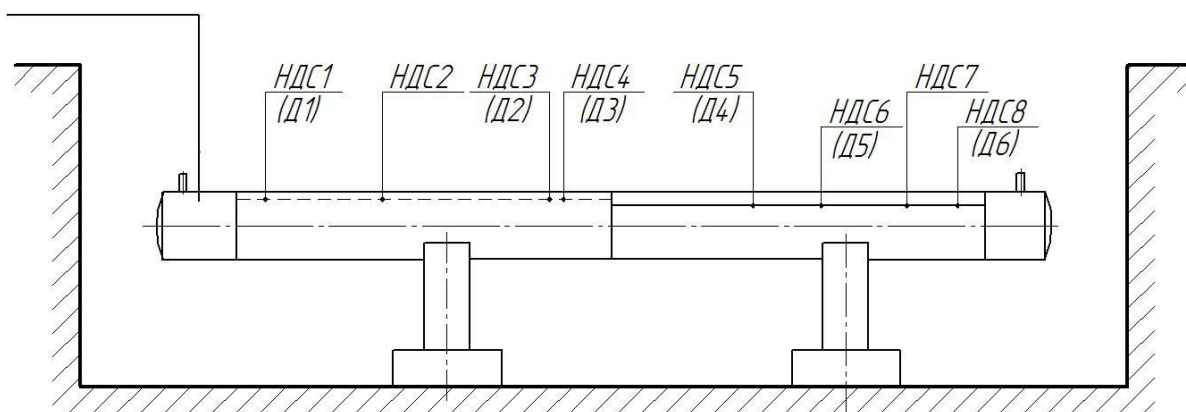


Рисунок 2. Схема стэнда с указанием дефектов сплошности и областей с напряженным состоянием металла в продольных сварных швах

Таблица 2. Параметры испытательного стэнда

№ п/п	Параметр	Значение
1	Количество стальных труб	2
2	Длина стэнда	11800 мм
3	Количество сварных соединений	продольный сварной шов - 2 кольцевой сварной шов - 1
4	Наружный диаметр стальных труб d	530 мм
5	Толщина стенки t	8 мм
6	Марка стали	10Г2СД
7	Предел текучести металла σ_T	398 МПа
8	Предел прочности металла σ_B	550 МПа
9	Относительное удлинение после разрыва δ	28 %
10	Допускаемое напряжение для стали 10Г2СД $[\sigma]$	140 МПа

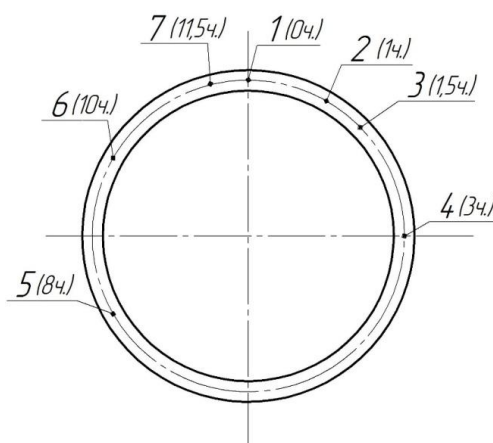


Рисунок 3. Месторасположение дефектов сплошности и областей с повышенным напряженным состоянием в кольцевом сварном шве стэнда

В результате испытаний на усталостную долговечность металла трубной плети после $N = 150$ циклов нагружения стенда давлением технической воды от P_{\min} до P_{\max} не наблюдалось разрушения металла.

Однако при выполнении испытаний на статическую прочность металла трубной плети было зафиксировано разрушение металла при давлении в стенде $P_{\max} = 14,4$ МПа. Разрушение металла произошло в продольном сварном соединении второй стальной трубы испытательного стенда, источником которого явился ранее выявленный дефект сплошности металла Д5 (рисунок 2).

По результатам УЗК продольных сварных соединений испытательного стенда, которые были проведены согласно требованиям ГОСТ Р 55724-2013 [9], было выявлено 6 дефектов сплошности металла (из них 3 - недопустимых, 3 - допустимых, рисунок 2), при этом в кольцевом сварном соединении стальных труб было выявлено 7 допустимых дефектов сплошности металла (рисунок 3).

Акустические образы дефектов сплошности, выявленных в продольном и кольцевом сварных соединениях испытательного стенда, которые были получены на экране ультразвукового дефектоскопа, показаны на рисунке 4.

В полученных изображениях можно отметить расплывчатость формы и размытость граней графических образов дефектов

сплошности металла сварных соединений. Описание дефектов сплошности металла в сварных соединениях стальных труб испытательного стенда представлено в таблицах 3, 4.

Можно отметить, что совокупность диагностической информации в таблицах о дефектах сплошности металла, полученной в результате УЗК сварных соединений стальных труб, недостаточна для объективной оценки их степени опасности для прочности металла на основе разработанных методов механики разрушения.

В простейшей модели внутренней трещины, расположенной в бесконечной пластине, находящейся под действием растягивающих напряжений, механические напряжения около вершины дефекта сплошности определяются по формуле [6]:

$$\sigma_i = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_i(\theta), \quad (3)$$

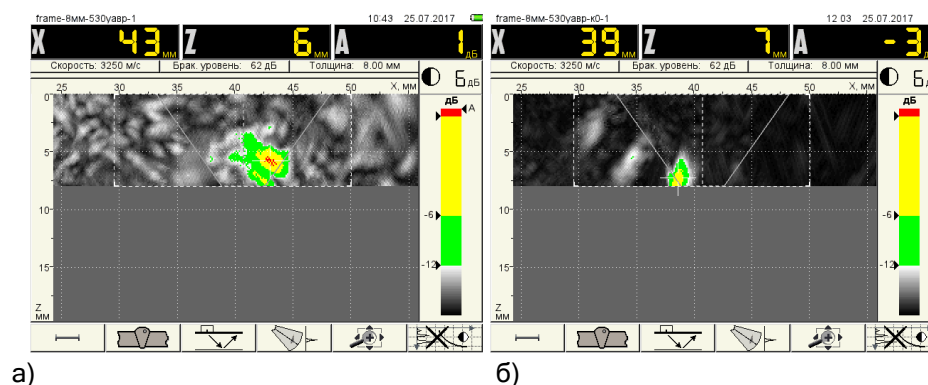
где $K = \sigma_0 \sqrt{\pi 2a}$ - коэффициент интенсивности напряжений (для нормального отрыва металла);

2a - протяженность трещины (рисунок 1);

(r; θ) - полярные координаты точки измерения напряжения в металле;

σ_0 - номинальное механическое напряжение;

$f(\theta)$ - функция координат, $i = x, y, z$.



а) дефект Д1
б) дефект № 2

Рисунок 4. Акустические образы дефектов сплошности в продольном (а) и кольцевом (б) сварных швах испытательного стенда

Таблица 3. Дефекты сплошности в продольном сварном соединении (УЗК)

№ п/п	№ дефекта	Эквивалентная площадь $S_{\text{деф}}$, мм ²	Глубина залегания Y , мм	Протяженность $2a$, мм	Форма дефекта (объемный/плоскостной)	№ прод. стыка	Заключение
1	Д1	> 1,5	6	2,5	объем./плоск.	1	ремонт
2	Д2	> 1,5	6	2	объем./плоск.	1	ремонт
3	Д3	< 1,5	2	1	объем.	1	годен
4	Д4	< 1,5	2	1	объем.	2	годен
5	Д5	> 1,5	2	2	объем./плоск.	2	ремонт
6	Д6	< 1,5	2	1	объем.	2	годен

Таблица 4. Дефекты сплошности в кольцевом сварном соединении (УЗК)

№ п/п	№ дефекта	Эквивалентная площадь $S_{\text{деф}}$, мм ²	Глубина залегания Y , мм	Протяженность $2a$, мм	Форма дефекта (объемный/плоскостной)	Угловое положение, ч	Заключение
1	1	< 1,5	6	1	объем./плоск.	0	годен
2	2	< 1,5	7	1	объем./плоск.	1	годен
3	3	< 1,5	7	1	объем./плоск.	1,5	годен
4	4	< 1,5	8	1	объем./плоск.	3	годен
5	5	< 1,5	7	1	объем./плоск.	8	годен
6	6	< 1,5	7	1	объем./плоск.	10	годен
7	7	< 1,5	8	1	объем./плоск.	11,5	годен

Согласно (3), наибольшие механические напряжения концентрируются около вершины дефекта сплошности металла, имеющего наибольшую протяженность.

Из таблицы 3 следует, что из недопустимых дефектов сплошности продольного сварного соединения стальных труб, эквивалентные площади которых превышают заданное пороговое значение, дефекты сплошности Д2, Д5 имеют примерно одинаковые протяженности, а протяженность дефекта сплошности Д1 является наибольшей в этой совокупности. Расчеты по (3) показывают, что с увеличением нагрузки в испытательном стенде, около вершины дефекта сплошности Д1 концентрируются наибольшие механические напряжения, способные привести к его росту до критических размеров.

Вывод

Расчеты по (3) показывают, что с увеличением нагрузки в испытательном стенде около вершины дефекта сплошности Д1 концентрируются наибольшие механические напряжения, способные привести к его росту до критических размеров.

Однако источником разрушения металла испытательного стенда явился дефект сплошности Д5, имеющий меньшую протяженность, чем дефект Д1, что противоречит результатам расчетов по (3).

Для определения причины этого противоречия следует рассмотреть результаты дальнейших исследований напряженного состояния металла и макрошлифов дефектов сплошности сварных соединений испытательного стенда.

Список литературы

1. Миторхин М.Ю., Велиулин И.И., Касьянов А.Н. и др. Анализ средств и технологий технического диагностирования и отбраковки труб при проведении капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Территория Нефтегаз. 2010. № 12. С. 57-60.
2. СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. М.: ОАО «Газпром», 2008. 43 с.
3. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Соппротивление материалов. М.: Высшая школа, 1989. 624 с.
4. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.
5. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. Новосибирск: Наука, 2005. 494 с.
6. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2010. 103 с.
7. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 6: Магнитные методы контроля. 832 с.
8. Конструкционные материалы: справочник / Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
9. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
10. Мардамшин В.Р., Бакиев Т.А., Загидулин Т.Р., Загидулин Р.В. Исследование возможности магнитного контроля напряженного состояния металла и сварных соединений стальных трубопроводов // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16, № 2. С. 139-146.
11. Загидулин Т.Р., Загидулин Р.В. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния металлоконструкций индикатором механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15, № 4. С. 143-149.

References

1. Mitorkhin M.Yu., Veliyulin I.I., Kas'yanov A.N. e.a. Analiz sredstv i tekhnologii tekhnicheskogo diagnostirovaniya i otrakovki trub pri provedenii kapital'nogo remonta lineinoi chasti magistral'nykh gazoprovodov OAO «Gazprom» [Analysis of Tools and Technologies for Technical Diagnostics and Rejection of Pipes during the Overhaul of the Linear Part of Gazprom Gas Pipelines]. *Territoriya Neftegaz -Neftegaz Territory*, 2010, No. 12, pp. 57-60. [in Russian].
2. *STO Gazprom 2-2.3-095-2007. Metodicheskie ukazaniya po diagnosticheskomu obsledovaniyu lineinoi chasti magistral'nykh gazoprovodov* [STO Gazprom 2-2.3-095-2007. Guidelines for the Diagnostic Examination of the Linear Part of Gas Pipelines]. Moscow, OAO «Gazprom», 2008. 43 p. [in Russian].
3. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 624 p.
4. Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya: Ot teorii k praktike* [Fracture Mechanics: from Theory to Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 240 p. [in Russian].
5. Makhutov N.A. *Konstruktсионная prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'* [Structural Strength, Life and Man-Made Safety]. Ch. 1. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 494 p. [in Russian].
6. Nikolaeva E.A. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of Fracture Mechanics]. Perm', Izd-vo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2010. 103 p. [in Russian].
7. *Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik: v 7 t.* [Non-Destructive Testing: Handbook: in 7 vol.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. Vol. 6: Magnitnye metody kontrolya. 832 p. [in Russian].
8. Arzamasov B.N. *Konstruktсионnye materialy: spravochnik* [Construction Materials: Reference Book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 688 p. [in Russian].
9. *GOST R 55724-2013. Kontrol' nerazrushayushchii. Soedineniya svarynye. Metody ul'trazvukovye* [State Standard R 55724-2013. Non-destructive Control. Welded Joints. Ultrasound Methods]. [in Russian].
10. Mardamshin V.R., Bakiev T.A., Zagidulin T.R., Zagidulin R.V. *Issledovanie vozmozhnosti magnitnogo kontrolya napryazhennogo sostoyaniya metalla i svarykh soedinenii stal'nykh truboprovodov* [Research of Magnetic Control for Metal Stressed State and Welded Seams of Steel Pipeline]. *Neftegazovoe delo - Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 2, pp. 139-146. [in Russian].
11. Zagidulin T.R., Zagidulin R.V. *Magnitnyi kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsii indikatorom mekhanicheskogo napryazheniya metalla IN-02 skaniruyushchego tipa* [Metal Structures Stressed and Strained State Magnetic Inspection by IN-02 the Scanning Metal Strain Indicator]. *Neftegazovoe delo - Petroleum Engineering*, 2017, Vol. 15, No. 4, pp. 143-149. [in Russian].

Авторы

• Загидулин Ринат Васикович, д-р техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Технологические машины
и оборудование»,
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: doctech.zagriv@post.com

• Загидулин Тимур Ринатович, канд. техн. наук
ООО «Научно-технический центр «Спектр»
Технический директор
Российская Федерация, 450078, г. Уфа,
ул. Кирова, 89
e-mail: ztr@post.com

• Мардамшин Вадим Рафаилович
ПАО «Газпром»
Главный специалист отдела 338/9/4
Российская Федерация, 196105,
г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 156
e-mail: vrmardamshin@gmail.com

• Бакиев Тагир Ахметович, д-р техн. наук
Инженерно-технический центр
ООО «Газпром трансгаз Уфа»
Начальник
Российская Федерация, 450054, г. Уфа,
ул. Р. Зорге, 59
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Заведующий кафедрой «Гидрогазодинамика
трубопроводных систем и гидромашин»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: tagirbak@mail.com

The Authors

• Zagidulin Rinat V., Doctor of Engineering Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Technological Machines and Equipment
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: doctech.zagriv@post.com

• Zagidulin Timur R., Candidate of Engineering
Sciences
Scientific and Technical Center «Spector» LLC
Technical Director
89, Kirov str., Ufa, 450078, Russian Federation
e-mail: ztr@post.com

• Mardamshin Vadim R.
Gazprom PJSC
Chief Specialist of Department 338/9/4
156, Moscow ave., Saint-Petersburg, 196105,
Russian Federation
e-mail: vrmardamshin@gmail.com

• Bakiev Tagir A., Doctor of Engineering Sciences
Engineering and Technical Center,
Gazprom Transgaz Ufa LLC
Head
59, R. Zorge str., Ufa, 450054,
Russian Federation
Ufa State Petroleum Technological University
Head of Hydro- and Gas Dynamics of Pipeline
Systems and Hydraulic Machines Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: tagirbak@mail.com