

УДК 614.8

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ТЕХНОГЕННЫЕ РИСКИ

INDIVIDUAL TECHNOGENIC RISKS

И.Р. Сунгатуллин, В.А. Гафарова, Д.Х. Махмутов, И.Р. Кузеев

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

г. Уфа, Российская Федерация

ПАО «Уфаоргсинтез», г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Sungatullin, Victoria A. Gafarova, Dinar H. Makhmutov,

Iskander R. Kuzeev

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

ПАО «Ufaorgcintes», Ufa, Russian Federation

e-mail: gafarova.vika@bk.ru

Аннотация. Для оценки индивидуальных техногенных рисков предлагается использовать объемные диаграммы, которые позволяют для каждого опасного производственного объекта оценить с помощью интегрального параметра уровень реализации прочности, долговечности и живучести. Поскольку используемые критерии являются зависимыми между собой, объемная поверхность критических состояний является выпуклой и может, для удобства расчетов, быть заменена плоскостью, уравнение которой в отрезках равняется единице. Выход суммарного вектора состояния за пределы поверхности является неприемлемым даже, если отдельные параметры имеют значения меньше критических. Такой подход к оценке индивидуальных рисков позволяет использовать в качестве критериев показатели, наиболее характерные для данного вида оборудования: силовые, термические, деформационные. Можно также использовать критерии, характеризующие процессы коррозии, диффузии,

старения. Предлагаемый алгоритм хорошо сочетается с методом создания цифровых двойников и может служить интегральной характеристикой двойника. Результаты расчетов интегральных характеристик объектов позволяют осуществлять подбор конкретных мероприятий для уменьшения эксплуатационных рисков, например в случае эксплуатации объектов с трещинами. Особенно это важно для объектов, при эксплуатации которых используются нормативные документы, позволяющие функционирование при наличии трещин с размерами ниже критических значений. Такие нормативные документы действуют в ряде стран, в том числе и в России для эксплуатируемых транспортных трубопроводных систем. Поскольку трубопроводные системы подвержены действию внешних природных факторов, которые могут привести к нестационарному изменению напряженно-деформированного состояния и скачкообразному росту размеров дефектов, требуется разработка мероприятий, снижающих риски разрушения. В качестве такого мероприятия предлагается использовать композиционные материалы для заполнения полости трещин и закрепления ее берегов. Приведены результаты экспериментов, которые показывают возможность восстановления свойств стальных элементов с трещинами с использованием композиционных материалов, в качестве которых использовали гибридные композиты на основе эпоксидных смол. Показан пример использования объемных диаграмм для контроля состояния трубопроводных систем с учетом возможности восстановления свойств, обеспечивающих прочность и живучесть конструкции.

Abstract. For assessing individual technogenic risks it is suggested to use stereograms, as they allow to assess each hazardous production facility with an integrated parameter in terms of the level of strength, durability and survivability. As the used criteria depend on one another, the three-axis surface of critical conditions is convex. To make calculations easier it can be substituted with a plane whose intercept form of equation equals to one. If the sum vector goes beyond the surface limits, it is unacceptable, even provided certain parameters

show under-critical values. Such an approach to assessment of individual risks allows to use criteria that are the most typical parameters for the given type of equipment. These parameters can be power, temperature or deformation. It is also possible to use criteria that describe corrosion, diffusion and ageing. The assumed algorithm effectively matches the method of creating digital twins. The algorithm can serve as an integrated characteristics of the twin. Integrated risk calculation outcomes for facilities allow to select specific measures that would decline operational risks, for example, if there are cracks in the operated facility. It is vital for facilities that are subject to compliance with regulatory documents allowing functioning if there cracks of under-critical size. Such regulatory documents are applied in a number of states including Russia to operated transfer pipeline systems. As pipeline systems are susceptible to external natural impacts that may lead to transient change of the strain-stress state and intermittent growth of defects' size, it is crucial to develop a range of measures that would decrease the risk of disintegration. It is suggested to use composite materials as such a measure to fill in the crack cavity and fix its edges. There are experiment findings that show that it is possible to recover the properties of cracked steel elements by using composite materials. The experiments involved hybrid epoxy resin-based composite materials. There is an example of using stereograms to control the state of pipeline systems with regards to a possibility to recover the properties that would ensure strength and survivability of the structure.

Ключевые слова: промышленная безопасность; трещины; композиционный материал; прочность; долговечность; живучесть

Keywords: industrial safety; cracks; composite material; strength; durability; survivability

Когда рассматривается конкретный объект в нефтегазовой отрасли, необходимо учитывать его индивидуальные особенности. Особенно это касается трубопроводных систем, которые, являясь протяженными объектами, могут находиться в несопоставимых условиях.

Сложность эксплуатации протяженных объектов заключается в том, что как внутренние условия, так и внешние могут изменяться. Изменение внутреннего давления при переключении режимов перекачки создает цикличность воздействия и нестационарность напряженно-деформированного состояния [1, 2]. Все это приводит к накоплению повреждений на различных масштабных уровнях [3–5].

Трансформация дислокационной структуры, границ зерен в конечном итоге приводят к изменениям макропараметров механических характеристик еще до возникновения трещин. Поэтому авторы [6–8] считают необходимым развивать средства диагностики, которые способны фиксировать накопленные повреждения и текущие параметры механических характеристик, что затруднено ввиду отсутствия таких методов. Детерминированные методы расчета трубопроводов не позволяют однозначно гарантировать их надежность [9] вследствие разброса начальных характеристик стали. Накопление повреждений, утонение стенки трубопровода приводят к необходимости пересмотра предельных состояний при расчете ресурса [10].

На стадии образования и развития трещин современные средства диагностики позволяют идентифицировать такие дефекты, которые характерны для трубопроводного транспорта.

Эксплуатация трубопроводов в различных климатических зонах приводит к возникновению специфических дефектов, например коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) при эксплуатации газопроводов. КРН – явление, которое имеет множество особенностей, и нет единого взгляда на механизмы образования множественных трещин [11]. В работе [12] показано, что при обследовании одного из газопроводов длиной

62 км из изученных 5560 труб на 1321-ой обнаружено КРН, причем в среднем обнаружено более 170 дефектных участков на 1 км.

При КРН дефектная зона формируется большим числом трещин (до нескольких сотен) [13], размеры которых достигают 150 мм, и глубина соизмерима с толщиной стенки. Здесь также старение материала приводит к снижению времени инкубационного периода КРН [14] и порогового напряжения разрушения.

Трубопроводные системы являются сварными конструкциями, и этот факт также влияет на КРН. В некоторых случаях участки трещинообразования приурочены к продольным сварным швам [12]. Исследования показывают [15–17], что коррозионное воздействие вызывает снижение ударной вязкости материала сварных швов. В тоже время не все очаги КРН являются развивающимися. Установлено [18], что трещины, которые не превышают по глубине 30 % от толщины стенки оболочки, при устранении воздействия среды могут быть не опасными с точки зрения разрушения. Множественные трещины в определенных условиях могут замедлить процесс разрушения, поскольку каждая из трещин может быть стоком вводимой в систему энергии, которой недостаточно для достижения трещиной критических размеров. Поэтому множественные трещины не всегда являются причиной разрушения. Более того, некоторые исследователи фиксируют стабилизацию коротких трещин [19] в процессе эксплуатации, и это подтверждается повторными обследованиями внутритрубными дефектоскопами. Это явление, названное авторами [19] «стабилизированными дефектами», позволяет отслеживать поведение трещин с помощью закладных электромагнитных датчиков.

Для любого опасного производственного объекта с целью предотвращения аварии необходимо обеспечить прочность, долговечность и живучесть конструкции. Рассмотрим критерии оценки этих параметров. Для обеспечения прочности должно выполняться условие:

$$\sigma_n / \sigma_c < 1, \quad (1)$$

где σ_n – номинальные напряжения, МПа;

σ_c – критические напряжения, МПа.

Номинальные напряжения должны учитывать напряжения, возникающие от внутреннего давления в трубопроводе, изгибные напряжения от движения грунта. В качестве критических напряжений используются параметры материала: предел текучести и предел прочности. Когда напряжения оказываются в упругопластической зоне, следует переходить к использованию деформационных критериев.

Для учета накопления повреждений от циклических нагрузок можно использовать критерий:

$$N_i / N_c < 1, \quad (2)$$

где N_i – текущее количество циклов нагружения;

N_c – критическое число циклов, соответствующее возникновению трещины.

Существующие дефекты, обнаруженные в процессе дефектоскопии, необходимо учитывать соответствующим критерием:

$$l_i / l_c < 1, \quad (3)$$

где l_i – длина дефекта;

l_c – критическая длина дефекта.

Для цилиндрической оболочки номинальные напряжения рассчитываются по безмоментной теории:

$$\sigma_n = PD/2S \quad (4)$$

где P – внутреннее давление, МПа;

D – внутренний диаметр, м;

s – толщина оболочки, м.

Количество циклов нагружения до возникновения трещины рассчитывается по уравнению Лэнджера [20]:

$$N_c = [0,25 \ln(1/1-\Psi)/\varepsilon_a - (0,4\sigma_b/E)]^{1/m}, \quad (5)$$

где Ψ – относительное сужение;

ε_a – амплитуда деформаций;

σ_b – предел прочности; МПа;

E – модуль упругости материала; МПа;

m – константа материала.

Критическую длину трещины можно рассчитать по формуле:

$$l_c = 0,32 (K_{Ic} / \sigma_c)^2, \quad (6)$$

где l_c – критическая длина трещины, м;

K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа м^{0,5};

σ_c – критические напряжения, МПа.

Далее мы используем объемные диаграммы, которые анонсировали в предыдущей статье данного выпуска сетевого издания «Нефтегазовое дело». В данном случае диаграмму строим в координатах прочности, долговечности и живучести. Важно обеспечить живучесть конструкции, поскольку в мировой практике стали допускать возможность эксплуатации при наличии трещин. В ряде стран, в том числе в России используются нормативные документы, регламентирующие такое положение. Тройные диаграммы демонстрируют возможность реализации критической ситуации, когда отдельно все критерии меньше единицы.

В соответствии с рисунком 1 можно написать уравнение плоскости, которое и будет критерием совокупной реализации триады прочность – долговечность – живучесть для (а) и (б) (рисунок 1):

$$\sigma_n / \sigma_c + N_i / N_c + l_i / l_c \leq 1 ; \quad (7)$$

$$PD/2s \sigma_c + N_i / [0,25 \ln(1/1-\Psi)/\varepsilon_a - (0,4\sigma_b/E)]^{1/m} + l_i / 0,32 (K_{Ic} / \sigma_c)^2 \leq 1. (8)$$

Уравнения типа (7) могут прогнозировать поведение индивидуального опасного объекта. И не только прогнозировать, но и регулировать. Покажем это на примере с трубопроводом, который имеет трещину. В работах [21, 22]

показано, что закрепление берегов трещины композитным материалом может увеличить K_{Ic} в 2 раза. Это указывает на возможность уменьшения третьего слагаемого уравнения (7).

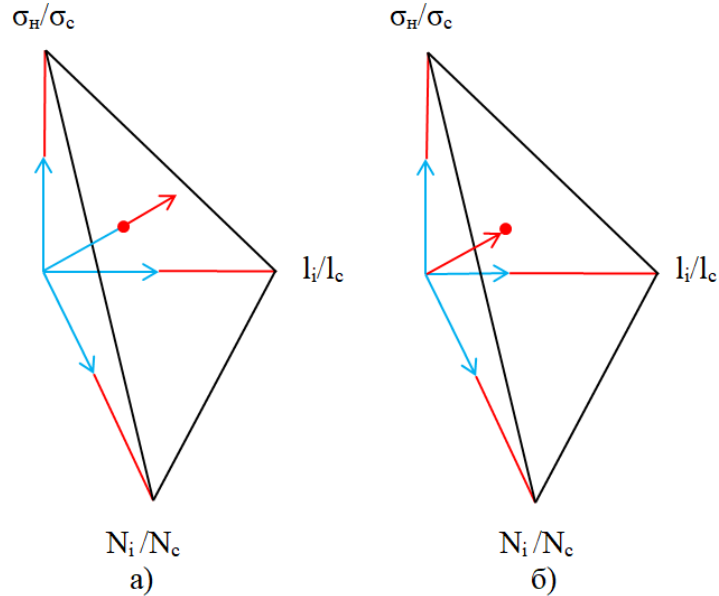


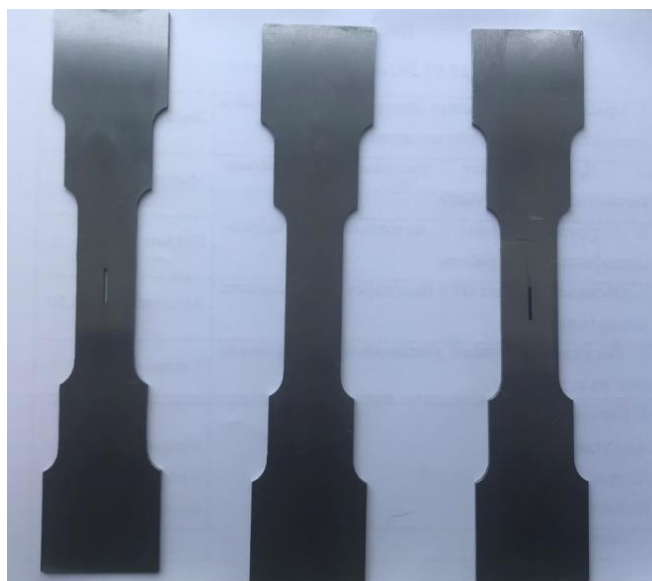
Рисунок 1. Диаграмма критических состояний объекта до (а) и после (б) заделки трещины композитом

Метод вакуумирования полости трещин позволяет заполнить ее жидкой фазой с последующим переходом в твердую фазу и адгезионным взаимодействием с поверхностью трещины. Изменение K_{Ic} позволяет трансформировать диаграмму (рисунок 1, б).

Такой подход может реализовать процедуру отслеживания целостности композиционного материала в полости трещины по сигналам акустической эмиссии. Исследования, которые показали возможность такого алгоритма, проводились при комнатной температуре 20 °С. В полость трещиноподобных дефектов внедряли гибридный композиционный материал. Основа: эпоксидная смола марки ЭД20; отвердитель ПЭПА; наполнители: магнитный порошок оксида железа микронного размера и магнитный порошок оксида железа наноразмеров, стабилизированный в керосине с помощью поверхностно-активного вещества – стеариновая

кислота. В течение 24 ч происходило затвердевание композиционного материала непосредственно в трещиноподобных дефектах.

На разрывной машине Instron со скоростью 4 мм/мин провели сравнительную оценку прочности материала (сталь 10) бездефектного образца, образца с имитационной трещиной и образца с имитационной трещиной с внедренным композиционным материалом (рисунок 2).

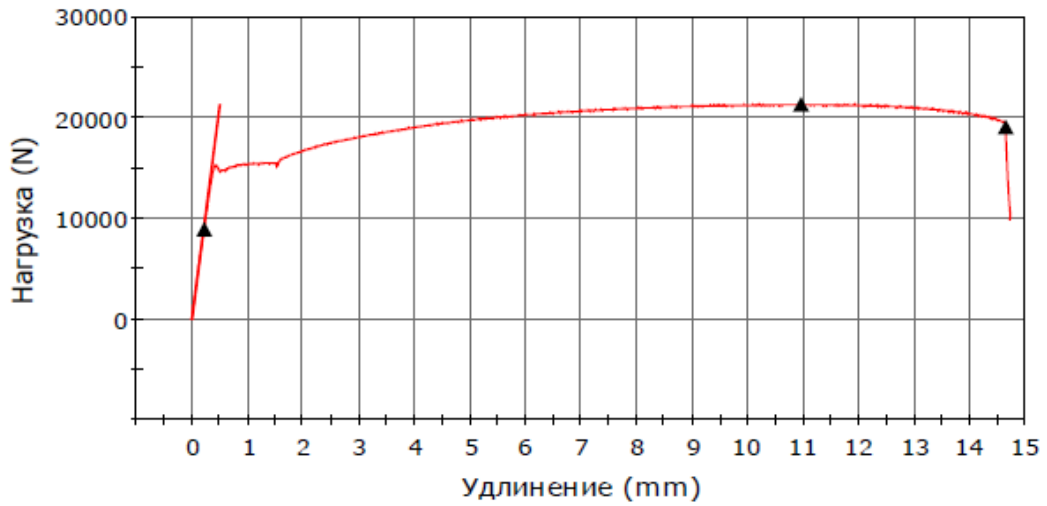


- а) б) в)
 а) образец с трещиной;
 б) цельный образец;
 в) образец с трещиной, заделанной
 композиционным материалом

Рисунок 2. Образцы для исследований

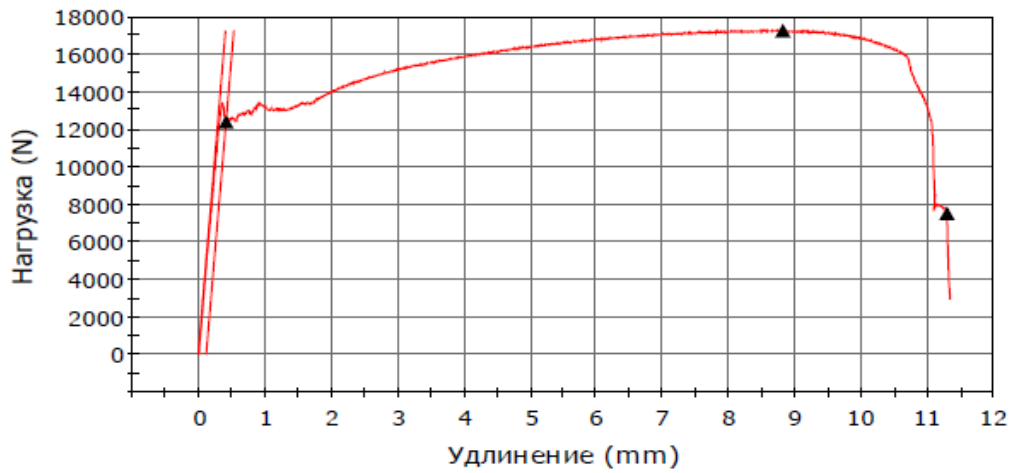
Результаты экспериментов указаны на рисунках 3–5.

Из диаграмм (рисунки 3–5) видно, что бездефектный образец выдержал максимальную нагрузку 532 МПа. Несущая способность образца с имитационной трещиной, заделанной композиционным материалом, существенно выше, чем образца с имитационной трещиной без композиционного материала и на 5 % ниже, чем бездефектного образца.



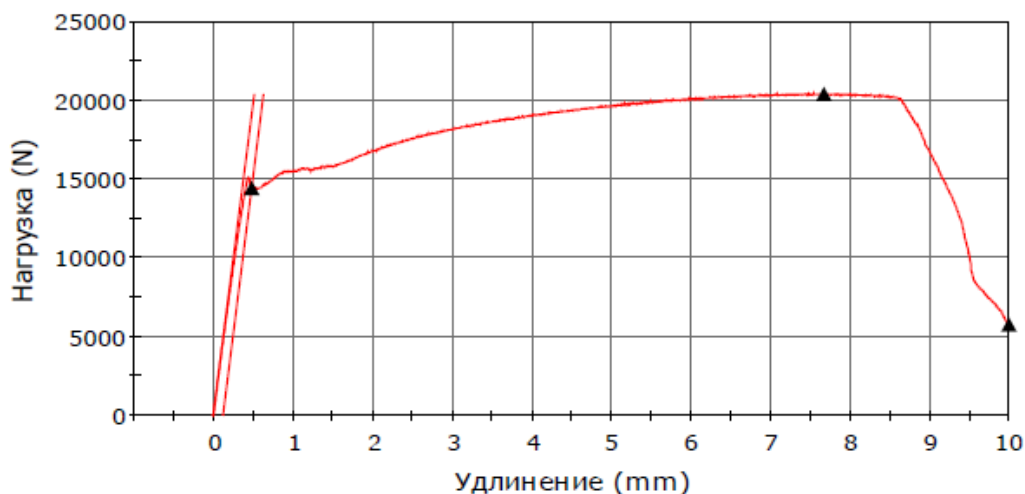
	Максимум Нагрузка (N)	Напряжение при растяжении при Максимум Нагрузка (МПа)	Напряжение при растяжении при Текучест ь (Смещение 0,2 %) (МПа)
1	21286	532	223

Рисунок 3. Бездефектный образец



	Максимум Нагрузка (N)	Напряжение при растяжении при Максимум Нагрузка (МПа)	Напряжение при растяжении при Текучест ь (Смещение 0,2 %) (МПа)
1	17274	432	310

Рисунок 4. Образец с имитационной трещиной



	Максимум Нагрузка (N)	Напряжение при растяжении при Максимум Нагрузка (МПа)	Напряжение при растяжении при Течучест ь (Смещение 0,2 %) (МПа)
1	20405	510	361

Рисунок 5. Образец с имитационной трещиной, заделанной композиционным материалом

Вывод

Показана возможность контроля за состоянием объекта при сложном нагружении с помощью объемных диаграмм, можно снижать уровень риска эксплуатации объекта с трещинами с помощью заполнения их композиционным материалом.

Список используемых источников

1. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
2. Павлова З.Х., Кузеев И.Р., Азметов Х.А. Безопасность эксплуатации трубопроводных систем в условиях нестационарности технологических параметров перекачки. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. 64 с.

3. Сыромятникова А.С., Большаков А.М. Деградация механических свойств и структурно-фазового состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Севера // Природные ресурсы Арктики и субарктики. 2018. Т. 23. № 1. С. 75-80. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-23-1-75-80.

4. Бутусова Е.Н., Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В. Исследование зарождения и распространения коррозионно-усталостных трещин в малоуглеродистых низколегированных сталях // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. Вып. 4. С. 1572-1573.

5. Мирошниченко Б.И., Нохрин А.В., Лопатин Ю.Г., Смирнов С.И., Мельников Г.Ю. Металлургические и эксплуатационные аспекты образования дефектов стресс-коррозии в магистральных трубопроводах. Ч. II. Влияние старения на склонность трубных сталей к зарождению стресс-коррозионных трещин // Технология металлов. 2012. № 5. С. 6-15.

6. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И., Шибнев А.В. Работоспособность трубопроводов. Ч. 1: Расчетная и эксплуатационная надежность. М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. 243 с.

7. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И., Шибнев А.В. Работоспособность трубопроводов. Ч. 2: Сопротивляемость разрушению. М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. 350 с.

8. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И., Шибнев А.В. Работоспособность трубопроводов. Ч. 3: Диагностика и прогноз ресурса. М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. 291 с.

9. Неганов Д.А. Основы детерминированных нормативных методов обоснования прочности // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 6. С. 608-617.

10. Неганов Д.А., Лисин Ю.В., Махутов Н.А., Варшицкий В.М. Влияние напряженно-деформированного состояния на предельное состояние трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. № 4. С. 12-16.

11. Исламов И.М., Чучкалов М.В., Аскарлов Р.М. Оценка ресурса магистральных газопроводов в условиях поперечного коррозионного растрескивания под напряжением // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 2. С. 35-38. DOI: 10.24411/0131-4270-2018-10206.

12. Агинея Р.В., Гуськов С.С., Мусонов В.В., Садртдинов Р.А., Лапин В.А. Исследование геометрических параметров и особенностей расположения стресс-коррозионных повреждений на магистральных газопроводах // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2016. № 3 (27). С. 102-107. URL: <http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/vgn-3-27-2016-102-107.pdf> (дата обращения: 04.01.2021).

13. Буклешев Д.О. Исследование интенсивности напряжений в процессе коррозионного растрескивания стали магистральных газопроводов // Universum: технические науки. 2019. № 2 (59). С. 17-21. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/6900> (дата обращения: 05.01.2021).

14. Болдин М.С., Нохрин А.В., Чувильдеев В.Н., Чегуров М.К., Бутусова Е.Н., Степанов С.П., Козлова Н.А., Лопатин Ю.Г. Котков Д.Н. Исследование процесса зарождения трещин коррозионного растрескивания под напряжением в малоуглеродистых низколегированных сталях // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 5-2. С. 186-189.

15. Кузеев И.Р., Диньмухаметова Л.С., Пояркова Е.В. Прогнозирование безопасности эксплуатации сварных конструкций в условиях нефтесодержащих сред // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 6. С. 254-262. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Kuzeev/Kuzeev_7.pdf (дата обращения: 05.01.2021).

16. Пояркова Е.В., Кузеев И.Р., Грызунов В.И., Пояркова Т.В. Влияние агрессивных сред на комплекс механических свойств сварных элементов // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных конструкционных материалов и технологий: матер. межд. науч. конф. М.: Машиностроение, 2009. С. 450-455.

17. Кузеев И.Р., Пояркова Е.В., Диньмухаметова Л.С. Исследование коррозионного поведения сварных соединений технологических установок с целью оценки их остаточного ресурса // Промышленная безопасность на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах: матер. III межд. науч.-практ. конф. / Отв. ред. проф. Н.Х. Абдрахманов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. С. 156-160.

18. Арабей А.Б., Мелёхин О.Н., Ряховских И.В., Богданов Р.И., Абросимов П.В., Штайнер М., Маревски У. Исследование возможности длительной эксплуатации труб с незначительными стресс-коррозионными повреждениями // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2016. № 3 (27). С. 4-11.

19. Рыбалко С.В., Рыбалко В.Г., Ефремов Т.А. Опыт мониторинга технического состояния труб, оставленных в эксплуатации со стресс-коррозионными повреждениями // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2016. № 3 (27). С. 97-101.

20. Гареев А.Г., Худяков М.А., Абдуллин И.Г., Мостовой А.В., Тимошкин Ю.В. Особенности разрушения материалов нефтегазопроводов. Уфа: Гилем, 2006. 155 с.

21. Гафарова В.А. Применение композиционных материалов для сдерживания роста трещин в нефтегазовом оборудовании // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 5. С. 99-107. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-99-107.

22. Гафарова В.А. Материалы и способ заделки трещин в нефтегазовом оборудовании в межремонтный период эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. 145 с.

References

1. Mazur I.I., Ivantsov O.M. *Bezopasnost' truboprovodnykh sistem* [Pipeline Safety]. Moscow, ITs «ELIMA» Publ., 2004. 1104 p. [in Russian].
2. Pavlova Z.Kh., Kuzeev I.R., Azmetov Kh.A. *Bezopasnost' ekspluatatsii truboprovodnykh sistem v usloviyakh nestatsionarnosti tekhnologicheskikh parametrov perekachki* [Operational Safety of Pipeline Systems in Conditions of Non-Stationarity of Pumping Technological Parameters]. Ufa, UGNTU Publ., 2015. 64 p. [in Russian].
3. Syromyatnikova A.S., Bolshakov A.M. Degradatsiya mekhanicheskikh svoystv i strukturno-fazovogo sostoyaniya metalla trub magistral'nogo gazoprovoda pri dlitel'noi ekspluatatsii v usloviyakh Severa [Degradation of Mechanical Properties and Structural-Phase State of the Metal of a Main Gas Pipeline at Long Operation in the Conditions of the North]. *Prirodnye resursy Arktiki i subarktiki – Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2018, Vol. 23, No. 1, pp. 75-80. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-23-1-75-80. [in Russian].
4. Butusova E.N., Chuvildeev V.N., Nokhrin A.V. Issledovanie zarozhdeniya i rasprostraneniya korrozionno-ustalostnykh treshchin v malouglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [Initiation and Propagation of Corrosion Fatigue Cracks in Low-Carbon Steels]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2013, Vol. 18, Issue 4, pp. 1572-1573. [in Russian].
5. Miroshnichenko B.I., Nokhrin A.V., Lopatin Yu.G., Smirnov S.I., Mel'nikov G.Yu. Metallurgicheskie i ekspluatatsionnye aspekty obrazovaniya defektov stress-korrozii v magistral'nykh truboprovodakh. Ch. II. Vliyanie stareniya na sklonnost' trubnykh stalei k zarozhdeniyu stress-korrozionnykh treshchin [Solid Solution Decomposition Mechanisms in Cast and Microcrystalline Al-Sc Alloys: I. Experimental Studies]. *Tekhnologiya metallov – Tehnologiya Metallov*, 2012, No. 5, pp. 6-15. [in Russian].

6. Zorin E.E., Lanchakov G.A., Stepanenko A.I., Shibnev A.V. *Rabotosposobnost' truboprovodov. Ch. 1: Raschetnaya i ekspluatatsionnaya nadezhnost'* [Serviceability of Pipelines. Part 1: Design and Operational Reliability]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2000. 243 p. [in Russian].

7. Zorin E.E., Lanchakov G.A., Stepanenko A.I., Shibnev A.V. *Rabotosposobnost' truboprovodov. Ch. 2: Soprotivlyaemost' razrusheniyu* [Serviceability of Pipelines. Part 2: Resistance to Destruction]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2001. 350 p. [in Russian].

8. Zorin E.E., Lanchakov G.A., Stepanenko A.I., Shibnev A.V. *Rabotosposobnost' truboprovodov. Ch. 3: Diagnostika i prognoz resursa* [Serviceability of Pipelines. Part 3: Diagnostics and Resource Forecast]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2003. 291 p. [in Russian].

9. Neganov D.A. Osnovy determinirovannykh normativnykh metodov obosnovaniya prochnosti [Basics of Deterministic Normative Methods of Pipeline Strength Substantiation]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov – Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2018, Vol. 8, No. 6, pp. 608-617. [in Russian].

10. Neganov D.A., Lisin Yu.V., Makhutov N.A., Varshitskii V.M Vliyanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na predel'noe sostoyanie truboprovoda [Impact of Stress-Strain State of the Pipeline on the Limit State of the Pipeline]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov – Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2017, Vol. 7, No. 4, pp. 12-16. [in Russian].

11. Islamov I.M., Chuchkalov M.V., Askarov R.M. Otsenka resursa magistral'nykh gazoprovodov v usloviyakh poperechnogo korrozionnogo rastreskivaniya pod napryazheniem [Life Cycle Assessment of Gas Pipelines in Terms of the Transverse Stress Corrosion Cracking]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya – Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2018, No. 2, pp. 35-38. DOI: 10.24411/0131-4270-2018-10206. [in Russian].

12. Aginei R.V., Guskov S.S., Musonov V.V., Sadrtidinov R.A., Lapin V.A. Issledovanie geometricheskikh parametrov i osobennostei raspolozheniya stress-korrozionnykh povrezhdenii na magistral'nykh gazoprovodakh [Investigation of Dimensional Properties and Location of Stress Corrosion Cracks in Trunk Gas Pipelines]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Vesti gazovoi nauki» – Scientific-Technical Collection Book «Vesti Gazovoy Nauki»*, 2016, No. 3 (27), pp. 102-107. URL: <http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/vgn-3-27-2016-102-107.pdf> (accessed 04.01.2021). [in Russian].

13. Bukleshev D.O. Issledovanie intensivnosti napryazhenii v protsesse korrozionnogo rastreskivaniya stali magistral'nykh gazoprovodov [Study of the Intensity of Stresses in the Process of Corrosive Straining of Steel of Main Gas Pipelines]. *Universum: tekhnicheskie nauki – Universum: Engineering Sciences*, 2019, No. 2 (59), pp. 17-21. Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/6900> (accessed 05.01.2021). [in Russian].

14. Boldin M.S., Nokhrin A.V., Chuvildeev V.N., Chegurov M.K., Butusova E.N., Stepanov S.P., Kozlova N.A., Lopatin Yu.G. Kotkov D.N. Issledovanie protsessa zarozhdeniya treshchin korrozionnogo rastreskivaniya pod napryazheniem v malouglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [Investigation of Stress-Corrosion Crack Origin in Low-Carbon, Low-Alloy Steels]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo – Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2010, No. 5-2, pp. 186-189. [in Russian].

15. Kuzeev I.R., Dinmukhametova L.S., Poyarkova E.V. Prognozirovaniye bezopasnosti ekspluatatsii svarnykh konstruksii v usloviyakh neftesoderzhashchikh sred [Forecasting the Operation Safety of Welded Designs in the Conditions of Oilcontaining Environments]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2011, No. 6, pp. 254-262. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Kuzeev/Kuzeev_7.pdf (accessed 05.01.2021). [in Russian].

16. Poyarkova E.V., Kuzeev I.R., Gryzunov V.I., Poyarkova T.V. Vliyanie agressivnykh sred na kompleks mekhanicheskikh svoistv svarnykh elementov [Influence of Corrosive Media on the Complex of Mechanical Properties of Welded Elements]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Innovatsionnaya deyatel'nost' predpriyatii po issledovaniyu, obrabotke i polucheniyu sovremennykh konstruktsionnykh materialov i tekhnologii»* [Materials of the International Scientific Conference «Innovative Activities of Enterprises for the Research, Processing and Production of Modern Structural Materials and Technologies»]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, pp. 450-455. [in Russian].

17. Kuzeev I.R., Poyarkova E.V., Dinmukhametova L.S. Issledovanie korrozionnogo povedeniya svarnykh soedinenii tekhnologicheskikh ustanovok s tsel'yu otsenki ikh ostatochnogo resursa [Investigation of the Corrosion Behavior of Welded Joints of Technological Units in Order to Assess Their Residual Life]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Promyshlennaya bezopasnost' na vzryvopozharoopasnykh i khimicheskii opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh»* [Materials of the III International Scientific and Practical Conference «Industrial Safety at Explosive, Fire and Chemically Hazardous Production Facilities»]. Managing Ed. Prof. N.Kh. Abdrakhmanov. Ufa, UGNTU Publ., 2009, pp. 156-160. [in Russian].

18. Arabei A.B., Melekhin O.N., Ryakhovskikh I.V., Bogdanov R.I., Abrosimov P.V., Shtainer M., Marevski U. Issledovanie vozmozhnosti dlitel'noi ekspluatatsii trub s neznachitel'nymi stress-korrozionnymi povrezhdeniyami [Studying a Possibility of Continuous Service of Pipes with Minor Stress-Corrosion Cracks]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Vesti gazovoi nauki» – Scientific-Technical Collection Book «Vesti Gazovoy Nauki»*, 2016, No. 3 (27), pp. 4-11. [in Russian].

19. Rybalko S.V., Rybalko V.G., Efremov T.A. Opyt monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya trub, ostavlennykh v ekspluatatsii so stress-korroziionnymi povrezhdeniyami [Practice of Monitoring Technical State of Tubes Left in Operation with Stress-Corrosion Cracks]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Vesti gazovoi nauki» – Scientific-Technical Collection Book «Vesti Gazovoy Nauki»*, 2016, No. 3 (27), pp. 97-101. [in Russian].

20. Gareev A.G., Khudyakov M.A., Abdullin I.G., Mostovoi A.V., Timoshkin Yu.V. *Osobennosti razrusheniya materialov neftegazoprovodov* [Features of Destruction of Materials of Oil and Gas Pipelines]. Ufa, Gilem Publ., 2006. 155 p. [in Russian].

21. Gafarova V.A. *Primenenie kompozitsionnykh materialov dlya sderzhivaniya rosta treshchin v neftegazovom oborudovanii* [Application of Composite Materials for Fracture Growth Control in Oil and Gas Equipment]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 5, pp. 99-107. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-99-107. [in Russian].

22. Gafarova V.A. *Materialy i sposob zadelki treshchin v neftegazovom oborudovanii v mezhremontnyi period ekspluatatsii: dis. kand. tekhn. nauk* [Materials and Method of Sealing Cracks in Oil and Gas Equipment During the Overhaul Period: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2019. 145 p. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Сунгатуллин Искандер Равилевич, соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, председатель совета директоров холдинга «ПЕГАЗ», г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Sungatullin, Applicant at Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Chairman of the Board of Directors of PEGAZ Holding, Ufa, Russian Federation

e-mail: irsungatullin@gmail.com

Гафарова Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Victoria A. Gafarova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gafarova.vika@bk.ru

Махмутов Динар Хадисович, заместитель начальника управления технического надзора ПАО «Уфаоргсинтез», г. Уфа, Российская Федерация

Dinar N. Makhmutov, Deputy Head of the Technical Supervision Department of PAO «Ufaorgcintes», Ufa, Russian Federation

e-mail: MakhmutovDKh@bashneft.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru