

К.Н. Абдрахманова, Ю.Ю. Петицкая, Р.Ф. Алянин, Д.Ю. Валекжанин
(Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация)

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Karina N. Abdrakhmanova, Yuliy Yu. Petitskaya, Roman F. Alyanin,
Dmitriy Yu. Valekzhanin (Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation)

MODERN DIAGNOSTICS METHODS OF MAIN PIPELINES AND PROSPECTS FOR APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES

Введение

В связи с износом магистральных систем трубопроводного транспорта первостепенное значение приобретает проблема совершенствования комплексных методов их технического диагностирования. В статье приведен анализ методов диагностики магистральных трубопроводов, рассмотрены визуальный, ультразвуковой, магнитный, капиллярный методы, а также перспектива развития цифровых технологий в данной сфере. Важно, что каждый из существующих методов диагностики позволяет выявлять только определенные параметры дефектов. К основным задачам при использовании таких методов относится оценка коррозионного и напряженно-деформированного состояния трубопроводов, что непосредственно связано с определением ресурса эксплуатации. Одним из подходов к определению ресурса эксплуатации является применение моделирования и цифровых технологий.

Background

Due to the wear and tear of the main pipeline transport systems, the problem of improving the complex methods of their technical diagnostics is of paramount importance. The article provides an analysis of diagnostic methods for main pipelines, considers visual, ultrasonic, magnetic, capillary methods, as well as the prospects for the development of digital technologies in this area. It is important that each of the existing diagnostic methods allows you to identify only certain parameters of defects. The main tasks when using such methods include the assessment of the corrosion and stress-strain state of pipelines, which is directly related to the determination of the service life. One of the approaches to determining the resource of exploitation is the use of modeling and digital technologies.

Возможность объединять и анализировать полученную в процессе диагностики информацию, неразрывно связанную с особенностями эксплуатации, проведение расчетов, при помощи компьютерных программ являются ценным достижением современности.

Цели и задачи

Анализ комплекса диагностических работ, в который входят:

- обнаружение внутренних и внешних дефектов поверхностей труб;
- измерение (определение) геометрических параметров дефектов;
- обнаружение утечки;
- выявление нарушений охранных зон магистральных трубопроводов;
- проверка состояния электрохимической защиты и ее эффективности;
- измерение механической деформации и смещения участков магистрального трубопровода;
- проверка состояния трубопроводной арматуры;
- определение состояния оболочки и глубины прокладки магистрального трубопровода;
- измерение толщины стенки трубопровода и твердости металла;
- определение погрешностей геометрии труб.

Результаты

Предложены методы оптимизации диагностики магистральных трубопроводов, заключающиеся в комплексном подходе к диагностике внутренней поверхности магистрального трубопровода с применением метода акустической эмиссии, позволяющим:

- выявлять опасные перебои в производстве и эксплуатации на ранней стадии и предотвращать их развитие до критического уровня;
- определять степень риска обнаруженных дефектов;
- провести 100 % осмотр диагностируемой зоны, включая зоны, недоступные для визуального контроля;
- оценивать оставшийся срок службы трубопровода на основе информации о существующих сбоях и повреждениях.

Рассмотрены перспективные возможности применения цифровых технологий для оптимизации процесса диагностики и осуществления мониторинга.

The ability to combine and analyze the information obtained in the process of diagnostics, which is inextricably linked with the features of operation, carrying out calculations using computer programs is a valuable achievement of our time.

Aims and Objectives

Analysis of the complex of diagnostic works, which includes:

- detection of internal and external defects of pipe surfaces;
- measurement (determination) of geometric parameters of defects;
- leak detection;
- detection of violations of protection zones of main pipelines;
- checking the state of electrochemical protection and its effectiveness;
- measurement of mechanical deformation and displacement of sections of the main pipeline;
- checking the condition of pipeline fittings;
- determination of the condition of the shell and the depth of the laying of the main pipe-wire;
- measurement of pipeline wall thickness and metal hardness;
- determination of pipe geometry errors.

Results

Methods for optimization of diagnostics of main pipelines are proposed, which consist in an integrated approach to diagnostics of the inner surface of a main pipeline using the method of acoustic emission, which allows:

- identify dangerous interruptions in production and operation at an early stage and prevent their development to a critical level;
- determine the degree of risk of detected defects;
- conduct 100% inspection of the diagnosed area, including areas inaccessible for visual control;
- estimate the remaining service life of the pipeline based on information about existing failures and damages.

The perspective possibilities of using digital technologies to optimize the process of diagnostics and monitoring are considered.

Ключевые слова: диагностика; магистральный трубопровод; методы оптимизации диагностики магистральных трубопроводов; цифровые технологии

Key words: diagnostics; main pipeline; methods for optimizing diagnostics of main pipelines; digital technologies

В связи с износом магистральных систем трубопроводного транспорта первостепенное значение приобретает задача совершенствования комплексных методов их технического диагностирования и обеспечения безопасности производства. К задачам технического диагностирования относятся оценки коррозионного и напряженно-деформированного состояний трубопровода, что непосредственно связано с определением оставшегося ресурса эксплуатации [1-3].

Известно, что накопление микроструктурных дефектов в локальных областях концентрации пластических деформаций можно отнести к числу основных причин наступления предельного состояния. Это - небольшие отрезки трубопровода, подверженные неравномерным переменным нагрузкам; участки коррозионного воздействия; площадь поперечного сварного шва и зона теплового воздействия, которые тоже подвергаются переменным или статическим нагрузкам. При длительной эксплуатации магистрального трубопровода вероятнее локальное повреждение, чем изменение состояние металла всего трубопровода [4, 5].

С увеличением времени эксплуатации и продолжающимся старением трубопроводных систем увеличивается вероятность выхода их из строя ввиду развития коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением [6-8]. Многие существующие трубопроводы построены по однолинейному проекту, поэтому перебои в подаче нефти недопустимы. Для обеспечения надежной работы постоянно возрастает роль диагностики и разработки соответствующих мероприятий по ее результатам.

На данный момент основным методом диагностики является диагностический контроль внутренних поверхностей магистрального трубопровода. Данная диагностическая система позволяет проводить осмотр всех трубопроводов, подготовленных для оперативной диагностики, а также определять дату повторного диагностирования. Во избежание проблем необходимо определить безопасный период эксплуатации до следующего обследования, а также срок до проведения ремонтных работ, в пределах которого дефекты не достигнут опасных пределов и не вызовут аварийную ситуацию.

Диагностика магистральных трубопроводов на этапе эксплуатации является взаимосвязанной системой, состоящей из следующих компонентов: информационного и организационного управления системой диагностического обслуживания, планирования и проведения диагностики магистрального трубопровода.

Методы диагностики линейной части магистрального трубопровода делятся на функциональные (плановые), специальные и тестовые. Рассмотрим виды и методы диагностики магистрального трубопровода. В состав диагностики входят:

- определение внутренних и внешних дефектов поверхностей труб, а также сварных швов;
- измерение (определение) геометрических параметров дефектов;
- обнаружение утечек;
- выявление нарушений охранных зон магистральных трубопроводов;
- проверка состояния электрохимической защиты;

- определение механической деформации и смещения участков магистрального трубопровода;
- проверка состояния трубопроводной арматуры;
- определение состояния оболочки и глубины прокладки магистрального трубопровода;
- измерение толщины стенки трубопровода и твердости металла;
- определение погрешностей геометрии труб;

Техническая диагностика магистрального трубопровода организуется, исходя из исследований сложных для диагностики структурных элементов.

Диагностика внутренней поверхности магистрального трубопровода - основной инструмент, используемый для определения технического состояния труб в диагностической тестовой системе и обеспечения безопасной эксплуатации объектов транспортирования. Эффективность контроля магистрального трубопровода производится с использованием линейных дефектоскопов высокого разрешения, измерения параметров повреждения с точностью, необходимой для выполнения расчетов сопротивления и определения оставшегося срока службы труб.

Рассмотрим наиболее часто применяемые *методы неразрушающего контроля* магистральных трубопроводов:

- визуальный и измерительный;
- ультразвуковой;
- магнитный;
- капиллярный.

Метод обнаружения на основе визуального и измерительного контроля основан на выявлении и измерении дефектов, видимых человеческому глазу. В качестве основного оборудования применяются простейшие измерительные приборы: лупа, универсальные шаблоны и т.д.

В *ультразвуковых дефектоскопах* используются методы эхолокации и теневого контроля. Эхо-метод основан на измерении импульса и эхо-сигналов.

Принцип действия заключается в отправке ультразвукового сигнала в виде импульса от детектора к объекту исследования, при этом фиксируется временной интервал прихода отраженных от неисправностей эхо-сигналов.

Метод позволяет обнаруживать поверхностные и глубинные дефекты различной ориентации. На рисунке 1 представлена расшифровка файла ультразвукового контроля (УЗК).

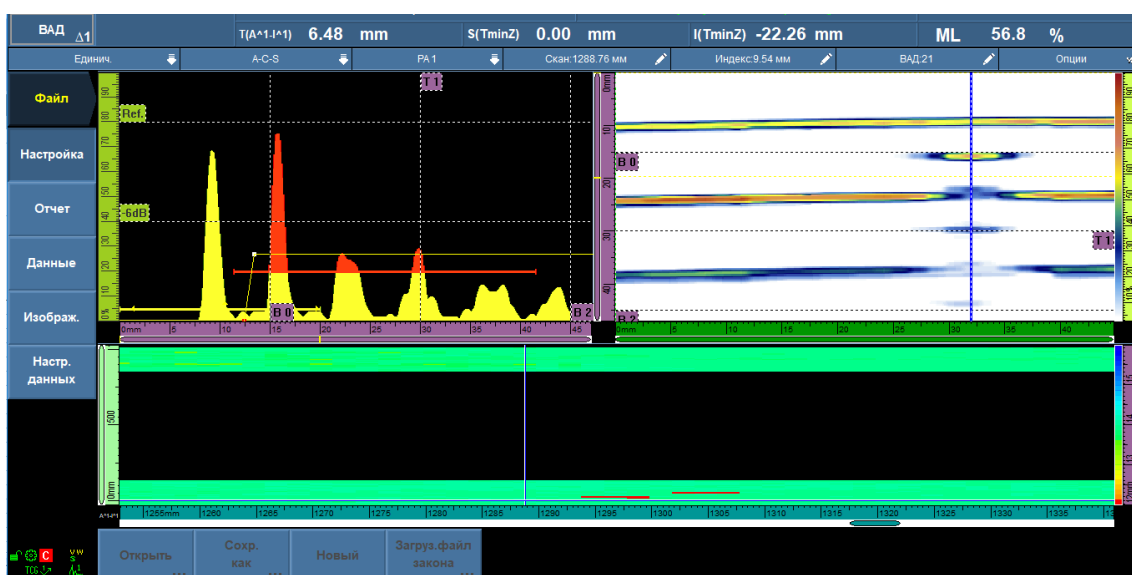


Рисунок 1. Дефект, обнаруженный с помощью УЗК

В теновом методе используют отражатели, которые устанавливаются друг напротив друга (источник (А) и приемник (В)) при условии, что расстояние от А до В известно, и время прохождения волны от А до В измерено.

Расчетами определяется распределение скорости распространения волны в определенной области объекта исследования, и в случае наличия дефекта, он обнаруживается.

Магнитопорошковая дефектоскопия основана на обнаружении диффузии магнитного поля. Этот метод является наиболее показательным, поскольку принцип исследования заключается в нанесении магнитного порошка на исследуемую область, намагничивания и объединения частиц под действием магнитного поля. Визуально можно наблюдать скопление частиц, например в местах трещин. Этот метод позволяет проверять детали различной формы, сварные швы и поверхность магистрального трубопровода [9, 10].

Капиллярная дефектоскопия позволяет легко обнаружить небольшие поверхностные трещины и неоднородности материала, к которым невозможно применить визуальный контроль. Полости поверхностных трещин за-

полняют специальными индикаторными (проникающими) веществами, которые проникают в них под действием капиллярных сил. На очищенную поверхность от излишков пенетранта наносится мелкий порошок проявителя белого цвета (оксид магния, тальк и др.) с впитывающими свойствами, за счет чего проникающие частицы вытягиваются из полости трещины на поверхность. Ширина контрастного следа значительно больше фактического размера дефекта, что позволяет обнаружить дефект невооруженным глазом. На рисунке 2 представлена трещина, обнаруженная капиллярным методом.

Следует отметить, что каждый из существующих методов диагностики позволяет выявлять только определенные параметры неисправностей конкретного объекта, а не оценивать общее техническое состояние магистрального трубопровода.

Эксплуатация магистрального трубопровода вызывает появление дефектов типа трещины и дефектов, вызванных коррозией. Большое значение имеет скорость накопления повреждений в зоне разлома, которая характеризует степень опасности и определяет возможный остаточный срок эксплуатации объекта.

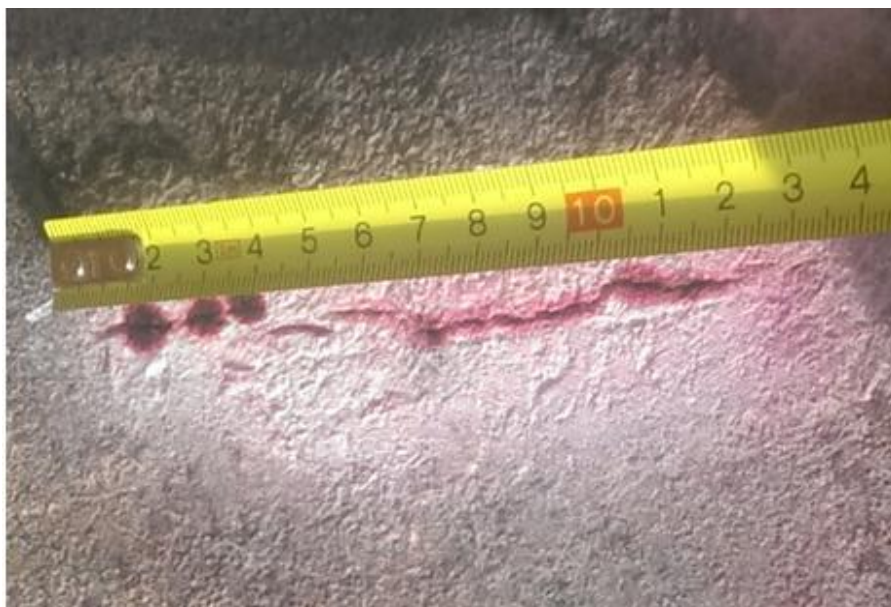


Рисунок 2. Трещина обнаруженная капиллярным методом

В этих случаях определяется техническое состояние труб на потенциально опасных участках. Однако проектная документация на строительство трубопроводов разрабатывалась, прежде всего, с точки зрения надежности и безопасности технологических процессов, а не с точки зрения удобства их диагностирования, поэтому при проведении диагностирования трубопроводов необходимо применять комплексный подход с использованием всех необходимых методов неразрушающего контроля, которые дают возможность обнаружить неисправности, появившиеся в ходе эксплуатации, по всей линии диагностируемого участка магистрального трубопровода.

Среди методов диагностики трубопроводов возможно применение *метода акустической эмиссии (АЭ)*, который практически не имеет альтернативы.

Принцип метода АЭ основан на регистрации волн упругих напряжений, возникающих в материале конструкции в результате зарождения и развития различных типов дефектов [11, 12].

Следует отметить, что АЭ диагностика трубопроводов, основанная на комплексном диагностическом подходе, позволяет сделать обоснованные выводы о процессах возникновения и развития опасных повреждений и, в конечном итоге, о техническом состоянии объекта [13, 14].

Высокая эффективность применения метода АЭ в сочетании с другими методами неразрушающего контроля подтверждается результатами работ, проведенных специалистами по контролю сварных соединений магистрального трубопровода.

Выявление опасных дефектов разных типов, а именно коррозионного повреждения с использованием метода акустической эмиссии проводилось при техническом диагностировании подземных участков магистрального трубопровода.

Работы осуществлялись в эксплуатационном режиме в соответствии с действующим внутренним регламентом, без отключения установки с системой акустической эмиссии. Длина диагностируемого участка для цикла

измерений с 24-канальной системой составила 2 км.

Следует отметить, что максимально допустимое расстояние между датчиками акустической эмиссии при диагностировании магистральных трубопроводов не превышало 60 м. Это подтверждается теоретическими расчетами [15-17] и экспериментальным исследованием магистральных трубопроводов. При проведении диагностики с применением метода акустической эмиссии на основном металле участков магистрального трубопровода была обнаружена течь, и определены очаги интенсивной коррозии с язвенными и точечными дефектами.

Результаты применения локальных методов неразрушающего контроля для определения параметров обнаруженных дефектов (размер отверстия прокола менее 2 мм, глубина проникновения примерно 80-90 % толщины стенки трубы) позволяют сделать вывод о том, что течь образовалась именно в коррозионных ямах.

Использование АЭ контроля дает возможность без стопроцентного доступа к внутренней поверхности магистрального трубопровода локализовать неисправности по всему участку анализируемого трубопровода и существенно уменьшить возможность возникновения негативных ситуаций.

Использование данной комплексной методики диагностирования магистрального трубопровода в условиях эксплуатации гарантирует своевременный отбор участков, которым необходим немедленный ремонт, уменьшает подготовительные работы для технического диагностирования.

Актуальным для диагностики является применение цифровых технологий и мониторинг. Известно использование АЭ контроля не только во время планового диагностирования, но и в целях удаленного наблюдения оборудования, для определения развивающихся дефектов под действием рабочих нагрузок [18]. Чаще всего происходят аварии при транспортировке как на магистральных, так и на технологических трубопроводах. Это обусловлено большой протяженностью трубопровода.

Создание цифровой модели объекта позволяет осуществлять контроль за эксплуатационными характеристиками и принимать решение о дальнейшей эксплуатации.

Построенная 3D модель трубопровода, учитывающая результаты периодического диагностирования, имеющиеся дефекты, позволит получить более ясную картину и проводить комплексные расчёты напряженно-деформированного состояния, объединяя в себе данные со всего жизненного цикла обслуживания [19].

С развитием цифровых технологий предприятия стремятся создавать цифровые двойники, в основе которых лежат цифровые прототипы объектов наблюдения. Подобный подход хорошо себя зарекомендовал в аэрокосмической, автомобилестроительной, энергетической отраслях и постепенно вводится в нефтегазовую. Отмечается повышение эффективности предприятия, снижение экономических расходов, осуществляется оптимизация технического обслуживания.

Цифровая модель позволит точно оценить влияние возможного изменения режима эксплуатации на техническое состояние трубопровода и время безопасной эксплуатации, до фактического изменения технологического процесса. Это даст возможность предотвратить негативные ситуации [20].

Выводы

Предложены методы оптимизации диагностики магистральных трубопроводов, заключающиеся в комплексном подходе к диагностике внутренней поверхности магистрального трубопровода с применением метода акустической эмиссии, позволяющим:

- выявлять опасные перебои в производстве и эксплуатации на ранней стадии и предотвращать их развитие до критического уровня;

- определять степень риска обнаруженных дефектов;

- провести 100% осмотр диагностируемой зоны, включая зоны недоступные для визуального контроля;

- оценивать оставшийся срок службы трубопровода на основе информации о существующих сбоях и повреждениях.

Сочетание приведенных выше факторов позволяет провести истинную оценку технического состояния магистрального трубопровода, а затем принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации объекта, а создание и применение цифровой модели позволит улучшить и облегчить процесс.

Определены перспективные возможности применения цифровых технологий для оптимизации процесса диагностики и осуществления мониторинга магистральных трубопроводов.

Список литературы

1. Патон Б.Е., Семенов С.Е., Рыбаков А.А. О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов // Автоматическая сварка. 2000. № 7. С. 2-12.
2. Харионовский В.В. Диагностика и ресурс магистральных трубопроводов: состояние и перспективы // Газовая промышленность. 1995. № 11. С. 28-30.
3. Barreto C.V., Gonçalves L.F., Azevedo L.F. Optimization of Pump Energy Consumption in Oil Pipelines // Pipeline Technologies - 2004: Materials of International Pipeline Conference. Calgary, Alberta, Canada. 2004. Vol. 1-3. Paper No. IPC2004-0385. P. 23-27.
4. Климов П.В., Валекжанин Д.Ю. Некоторые особенности развития стресс-коррозионных тре-

References

1. Paton B.E., Semenov S.E., Rybakov A.A. O starenii i otsenke sostoyaniya metalla ekspluatiruemyykh magistral'nykh truboprovodov [Aging and Assessment of the Metal Condition of the Main Pipelines in Operation]. *Avtomaticheskaya svarka - The Paton Welding Journal*, 2000, No. 7, pp. 2-12. [in Russian].
2. Kharionovskii V.V. Diagnostika i resurs magistral'nykh truboprovodov: sostoyanie i perspektivy [Diagnostics and Resource of Main Pipelines: State and Prospects]. *Gazovaya promyshlennost' - GAS Industry of Russia*, 1995, No. 11, pp. 28-30. [in Russian].
3. Barreto C.V., Gonçalves L.F., Azevedo L.F. Optimization of Pump Energy Consumption in Oil Pipelines. *Materials of International Pipeline Conference «Pipeline Technologies - 2004»*. Calgary, Alber-

щин // Энергоэффективность. Проблемы и решения: матер. XI Всеросс. науч.-практ. конф. Уфа: ИПТЭ РБ, 2011. С. 179-180.

5. Павлова З.Х., Азметов Х.А., Абдрахманов Н.Х., Павлова А.Д. Оценка и обеспечение безопасности эксплуатации нефтегазопроводов в условиях нестационарности технологических параметров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 132-139.

6. Валежанин Д.Ю. Контроль структурных изменений и напряженного состояния металла трубопроводов магнитными методами // Проблемы и методы обеспечения надёжности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: матер. науч.-практ. конф. Уфа: ИПТЭ РБ, 2013. С. 184-185.

7. Абдрахманова К.Н., Дягилев И.А., Абдрахманов Н.Х., Шайбаков Р.А. Проблемы защиты от коррозии при эксплуатации трубопроводных систем и оборудования нефтегазовой отрасли // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 3. С. 39-46. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-3-39-46.

8. Абдрахманов Н.Х., Азметов Х.А., Павлова А.Д., Закирова З.А., Басырова А.Р. Современные методы и средства обеспечения безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2017. № 6. С. 192-206. URL: http://ogbus.ru/issues/6_2017/ogbus_6_2017_p192-206_AbrakhmanovNKh_ru.pdf (дата обращения: 23.10.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2017-6-192-206.

9. Абдрахманов Н. Х., Емельянова И.Н., Шавалеев Д.А. Эффективность акустико-эмиссионного контроля при диагностировании технического состояния технологического оборудования ОАО «Газпромнефтехим Салават» // Промышленная безопасность на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах. Технический надзор, диагностика и экспертиза: матер. науч.-практ. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. С. 5-16.

10. Абдрахманов Н.Х., Шайбаков Р.А., Леонов О.А., Абдрахманова К.Н., Басырова А.Р. Акустико-эмиссионный метод контроля с использованием низкотемпературного нагружения при диагностировании нефтегазового оборудования // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 6. С. 6-24. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2019/ogbus_6_2019_p6-24.pdf (дата обращения: 23.10.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-6-6-24.

11. Баранов В.М., Гриценко А.И., Карасевич А.М. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. М.: Наука, 1998. 303 с.

12. Федосов А.В., Вадулина Н.В., Хафизова Д.Ф., Абдрахманова К.Н. Диагностирование вертикальных стальных резервуаров как инструмент повышения безопасности эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 12. С. 75-81.

ta, Canada, 2004, Vol. 1-3, Paper No. IPC2004-0385, pp. 23-27.

4. Klimov P.V., Valekzhanin D.Yu. Nekotorye osobennosti razvitiya stress-korroziionnykh treshchin [Some Features of the Development of STress-Corrosion Cracks]. *Materialy XI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energoeffektivnost'. Problemy i resheniya»* [Materials of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference «Energy Efficiency. Problems and Solutions»]. Ufa, IPTE RB Publ., 2011, pp. 179-180. [in Russian].

5. Pavlova Z.Kh., Azmetov Kh.A., Abdrakhmanov N.Kh., Pavlova A.D. Otsenka i obespechenie bezopasnosti ekspluatatsii neftegazoprovodov v usloviyakh nestatsionarnosti tekhnologicheskikh parametrov [Assessment and Safety Assurance of Oil and Gas Pipelines Operation in Conditions of Non-Stationarity of Technological Parameters]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, Vol. 329, No. 1, pp. 132-139. [in Russian].

6. Valekzhanin D.Yu. Kontrol' strukturnykh izmenenii i napryazhennogo sostoyaniya metalla truboprovodov magnitnymi metodami [Control of Structural Changes and Stress State of Pipeline Metal by Magnetic Methods]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefti, nefteproduktov i gaza»* [Materials of the Scientific-Practical Conference «Problems and Methods of Ensuring the Reliability and Safety of Oil, Oil Products and Gas Transportation Systems»]. Ufa, IPTE RB Publ., 2013, pp. 184-185. [in Russian].

7. Abdrakhmanova K.N., Dyagilev I.A., Abdrakhmanov N.Kh., Shaibakov R.A. Problemy zashchity ot korrozii pri ekspluatatsii truboprovodnykh sistem i oborudovaniya neftegazovoi otrasli [Problems of Corrosion Protection During Safe Operation of Pipeline Systems and Equipment of Oil and Gas Industry]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem - Safety of Technogenic and Natural Systems*, 2020, No. 3, pp. 39-46. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-3-39-46. [in Russian].

8. Abdrakhmanov N.Kh., Azmetov Kh.A., Pavlova A.D., Zakirova Z.A., Basyrova A.R. Sovremennyye metody i sredstva obespecheniya bezopasnoi ekspluatatsii magistral'nykh nefteprovodov [Modern Methods and Means of Ensuring Safe Exploitation of Oil Trunk Pipelines]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» - Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2017, No. 6, pp. 192-206. URL: http://ogbus.ru/issues/6_2017/ogbus_6_2017_p192-206_AbrakhmanovNKh_ru.pdf (accessed 23.10.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2017-6-192-206. [in Russian].

9. Abdrakhmanov N. X., Emelyanova I.N., Shavaleev D.A. Effektivnost' akustiko-emissionnogo kontrolya pri diagnostirovani tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya ОАО «Газпромнефтехим Салават» [Efficiency of Acoustic Emission Control when Diagnosing the Technical Condition of Technological Equipment of JSC Gazpromneftekhim Salavat]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Promyshlennaya be-*

DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2394.

13. Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Журавлев Д.Б. Акустико-эмиссионная диагностика магистральных трубопроводов с применением тензометрии // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 4 (18). С. 60-62.

14. Галлямов А.К., Черняев К.В., Шаммазов А.М. Обеспечение надёжности функционирования системы нефтепроводов на основе технической диагностики. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1997. 600 с.

15. Недзведская О.В., Буденков Г.А., Котоломов А.Ю. Количественные оценки возможностей неразрушающего контроля на базе явления акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2001. № 5. С. 50-67.

16. Харебов В.Г., Жуков А.В., Кузьмин А.Н. Практическая оценка метода акустической эмиссии на технологических газопроводах // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 3 (41). С. 24-26.

17. Xiaohuri Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen Stress Concentration Factor and Fatigue Analysis of a Lateral Nozzle with Local Wall Thinning // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 105. P. 289-304. DOI: 10/1016/j.engfailanal.2019.07/004.

18. Abdrakhmanova K.N. Possibilities of an Object Digital Twin Application in Order to Extend and Predict Safe Operation Resource // Materials of the International University Science Forum. Toronto, Canada. 2020. P. 182-186.

19. Abdrakhmanova K.N., Fedosov A.V., Idrisov I.R., Danieva I.R., Valeeva R.R. Review of Modern Software Complexes and Digital Twin Concept for Forecasting Emergency Situations in Oil and Gas Industry // Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations: Materials of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk, Russia. 2020. P. 32078. DOI: 10/1088/1757-899X/862/3/032078.

20. Абдрахманова К.Н., Федосов А.В., Идрисова К.Р., Даниева И.Р., Валеева Р.Р. Обзор современных программных комплексов и концепция цифрового двойника для прогнозирования аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2020. № 3. С. 71-91. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2020/ogbus_3_2020_p71-91.pdf (дата обращения: 23.10.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2020-3-71-91.

zopasnost' na vzryvopozharoopasnykh i khimicheskii opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh. Tekhnicheskii nadzor, diagnostika i ekspertiza [Materials of the Scientific-Practical Conference «Industrial Safety at Explosive and Fire Hazardous and Chemically Hazardous Production Facilities. Technical Supervision, Diagnostics and Expertise»]. Ufa, UGNTU Publ., 2012, pp. 5-16. [in Russian].

10. Abdrakhmanov N.Kh., Shaibakov R.A., Leonov O.A., Abdrakhmanova K.N., Basyrova A.R. Akustiko-emissionnyi metod kontrolya s ispol'zovaniem nizkotemperaturnogo nagruzheniya pri diagnostirovaniy neftegazovogo oborudovaniya [Acoustic Emission Control Method Using Low-Temperature Loading in the Diagnosis of Oil and Gas Equipment]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» - Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 6, pp. 6-24. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2019/ogbus_6_2019_p6-24.pdf (accessed 23.10.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-6-6-24. [in Russian].

11. Baranov V.M., Gritsenko A.I., Karasevich A.M. *Akusticheskaya diagnostika i kontrol' na predpriyatiyakh toplivno-energeticheskogo kompleksa* [Acoustic Diagnostics and Control at the Enterprises of the Fuel and Energy Complex]. Moscow, Nauka Publ., 1998. 303 p. [in Russian].

12. Fedosov A.V., Vadulina N.V., Khafizova D.F., Abdrakhmanova K.N. Diagnostirovanie vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov kak instrument povysheniya bezopasnosti ekspluatatsii ob"ektov neftegazovoi otrasli [Diagnosis of Vertical Steel Tanks as a Tool to Improve Safety Operation of Oil and Gas Facilities]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, Vol. 330, No. 12, pp. 75-81. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2394. [in Russian].

13. Kuzmin A.N., Zhukov A.V., Zhuravlev D.B. Akustiko-emissionnaya diagnostika magistral'nykh truboprovodov s primeneniem tenzometrii [Acoustic Emission Diagnostics of Main Pipelines Using Strain Gauge]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya - NDT World Review*, 2002, No. 4 (18), pp. 60-62. [in Russian].

14. Gallyamov A.K., Chernyaev K.V., Shamma-zov A.M. *Obespechenie nadezhnosti funktsionirovaniya sistemy nefteprovodov na osnove tekhnicheskoi diagnostiki* [Ensuring the Reliability of the Operation of the Oil Pipeline System Based on Technical Diagnostics]. Ufa, UGNTU Publ., 1997. 600 p. [in Russian].

15. Nedzvedskaya O.V., Budenkov G.A., Kotolomov A.Yu. Kolichestvennye otsenki vozmozhnostei nerazrushayushchego kontrolya na baze yavleniya akusticheskoi emissii [Quantitative Estimation of Nondestructive Testing Possibilities Using Acoustic Emission Phenomenon]. *Defektoskopiya - Defektoskopiya*, 2001, No. 5, pp. 50-67. [in Russian].

16. Kharebov V.G., Zhukov A.V., Kuz'min A.N. Prakticheskaya otsenka metoda akusticheskoi emissii na tekhnologicheskikh gazoprovodakh [Practical Evaluation of Acoustic Emission Method Applied to Technologic Gas Pipelines]. *V mire nerazrushayush-*

chego kontrolya - *NDT World Review*, 2008, No. 3 (41), pp. 24-26. [in Russian].

17. Xiaohuri Chen, Shuang Fang, Haofeng Chen Stress Concentration Factor and Fatigue Analysis of a Lateral Nozzle with Local Wall Thinning. *Engineering Failure Analysis*, 2019, Vol. 105, pp. 289-304. DOI: 10/1016/j.engfailanal.2019.07/004.

18. Abdrakhmanova K.N. Possibilities of an Object Digital Twin Application in Order to Extend and Predict Safe Operation Resource. *Materials of the International University Science Forum*. Toronto, Canada, 2020, pp. 182-186.

19. Abdrakhmanova K.N., Fedosov A.V., Idrisov I.R., Danieva I.R., Valeeva R.R. Review of Modern Software Complexes and Digital Twin Concept for Forecasting Emergency Situations in Oil and Gas Industry. *Materials of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations»*. Krasnoyarsk, Russia, 2020, pp. 32078. DOI: 10/1088/1757-899X/862/3/032078.

20. Abdrakhmanova K.N., Fedosov A.V., Idrisova K.R., Danieva I.R., Valeeva R.R. Obzor sovremennykh programmnykh kompleksov i kontseptsiiya tsifrovogo dvoynika dlya prognozirovaniya avariinykh situatsii na ob'ektakh neftegazovoi otrasli [Review of Modern Software Complexes and Digital Twin Concept for Forecasting Emergency Situations in Oil and Gas Industry]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» - Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2020, No. 3, pp. 71-91. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2020/ogbus_3_2020_p71-91.pdf (accessed 23.10.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2020-3-71-91. [in Russian].

Авторы

• Абдрахманова Карина Наилевна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Аспирант кафедры «Пожарная и промышленная
безопасность»,
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: akarinan@mail.ru

• Петецкая Юлия Юрьевна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Студент кафедры «Промышленная безопасность
и охрана труда»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: yulya.petitskaya@bk.ru

The Authors

• Abdrakhmanova Karina N.
Ufa State Petroleum Technological University
Postgraduate Student of Fire and Industrial Safety
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
e-mail: akarinan@mail.ru

• Petitskaya Yuliy Yu.
Ufa State Petroleum Technological University
Student of Industrial Safety and Labor Protection
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
e-mail: yulya.petitskaya@bk.ru

• Алянин Роман Федорович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Студент кафедры «Промышленная безопасность
и охрана труда»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: r.alyanin@yandex.ru

• Alyanin Roman F.
Ufa State Petroleum Technological University
Student of Industrial Safety and Labor Protection
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
e-mail: r.alyanin@yandex.ru

• Валежанин Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Промышленная безопасность
и охрана труда»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: unimix@mail.ru

• Velikzhanin Dmitriy Yu., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Industrial Safety
and Labor Protection Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
e-mail: unimix@mail.ru