

**АНДРЕЕВ Яков Михайлович**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ  
РЕЗЕРВУАРОВ СЕВЕРА ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ВЫЯВЛЯЕМОСТИ  
ПЛОСКОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

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

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН г. Якутск)

Научный руководитель: **Большаков Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор РАН.

Официальные оппоненты: **Морозов Евгений Михайлович** доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры физики прочности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт» (НИЯУ МИФИ).

**Анискович Евгений Валериевич** кандидат технических наук, научный сотрудник Красноярского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук – Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН).

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Ордена Трудового Красного Знамени Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)

Защита состоится «18» декабря 2017 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.054.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 15. Факс (383)-333-16-12, e-mail: [kurguzov@hydro.nsc.ru](mailto:kurguzov@hydro.nsc.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН) и на сайте [www.hydro.nsc.ru](http://www.hydro.nsc.ru).

Автореферат разослан «\_\_» октября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.054.02 доктор физико-математических наук



В.Д. Кургузов

**Актуальность темы** Резервуарные парки являются одними из основных технологических сооружений нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. В соответствии со статистическими данными, наиболее частой причиной аварий резервуаров в условиях Севера, является хрупкое разрушение несущих конструкций. Необходимо отметить, что в период быстрого роста количества нефтебаз 1970 - 1980 г.г., большинство поставляемых на Север резервуаров были изготовлены из марки стали неподходящей к эксплуатации в низкотемпературных условиях. Существенное влияние на развитие хрупкого разрушения оказывают наличия различного рода дефектов, как в сварных соединениях, так и в основном металле. Одним из основных источников хрупкого разрушения являются протяженные дефекты плоскостного типа, к которым относятся дефекты с длиной значительно больше, чем поперечное сечение. Наличие дефекта плоскостного типа в элементах резервуара в сочетании с низкими эксплуатационными температурами значительно увеличивает вероятность хрупкого разрушения. В связи с этим, возникает необходимость обеспечения надежности резервуаров с учетом их специфических условий эксплуатации в северных районах страны, путем использования усовершенствованных методов неразрушающего контроля в рамках экспертизы промышленной безопасности, согласно Федеральному закону № 116-ФЗ от 21.07.97 г. «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Большой вклад в развитие исследований по затрагиваемым вопросам обеспечения надежности резервуаров внесли такие ученые, как Болотин В.В., Алешин Н.П., Морозов Е.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Лыглаев А.В., Матвиенко Ю.Г., Лепихин А.М., Гумеров А.Г., Березин В.Л., Сафарян М.К., Евтихин В.Ф., Бигус Г.А., Буренин В.А., Галеев В.Б., Грешников В.А., Веревкин С.И., Каравайченко М.Г., Дробот Ю.Б. и другие. Повышение надежности резервуаров для хранения нефтепродуктов требует привлечения дополнительных средств на диагностирование и ремонт резервуаров. Вследствие этого в исследованиях последних лет важное значение придается вопросам установления оптимального нормативного уровня надежности резервуарных конструкций и обеспечения заданного уровня в процессе эксплуатации. Однако, исследований по разработке теоретически и практически обоснованных методов по обеспечению надежности резервуаров как на стадии проектирования, так и в процессе длительной эксплуатации недостаточны.

**Целью работы** является обеспечение эксплуатационной надежности резервуаров вертикальных стальных (РВС) для хранения нефтепродуктов, работающих в условиях Севера, путем повышения выявляемости труднообнаруживаемых плоскостных дефектов с использованием низкотемпературного нагружения при акустико-эмиссионном методе технического обследования.

Для достижения цели исследований поставлены следующие **основные задачи**:

1. Анализ нарушений работоспособности и аварий резервуаров Севера, связанных с образованием и развитием различных типов дефектов.
2. Анализ выявляемости различных типов дефектов резервуаров традиционными методами и средствами неразрушающего контроля.

3. Определение специфики распределения плоскостных типов дефектов в сварных соединениях и в основном металле резервуаров Севера.
4. Определение участков резервуара, наиболее подверженных к образованию плоскостных дефектов, влияющих на эксплуатационную надежность.
5. Усовершенствование типовой схемы создания упругого деформирования в отдельных элементах резервуаров при акустико-эмиссионном (АЭ) методе неразрушающего контроля.

#### **Научная новизна:**

1. Предложен усовершенствованный метод создания упругого деформирования локальных участков крупногабаритных металлоконструкций при проведении АЭ контроля.
2. Разработан алгоритм проведения технического диагностирования резервуаров с применением локального низкотемпературного нагружения при АЭ методе контроля.

#### **На защиту выносятся следующие основные научно обоснованные результаты:**

1. Анализ отказов и аварий резервуаров для хранения нефтепродуктов, эксплуатируемых в Республике Саха (Якутия).
2. Повышение эксплуатационной надежности резервуаров, работающих в условиях Севера, путем усовершенствования схемы нагружения контролируемой области при акустико-эмиссионном методе контроля
3. Анализ распределения плоскостных и объемных дефектов в сварных соединениях и основном металле резервуаров.
4. Установление участков в элементах резервуаров подверженных к образованию и дальнейшему распространению дефектов.
5. Внедрение экспериментальных результатов в программу работ экспертных организаций при проведении технического диагностирования РВС.

**Практическая ценность работы** заключается в разработке низкотемпературного нагружения локальных участков РВС при АЭ контроле. Проведение АЭ контроля с низкотемпературным нагружением участков резервуаров наиболее подверженных к образованию плоскостных дефектов позволяет: повысить выявляемость развивающихся дефектов в сварных соединениях и в основном металле, сократить материально-экономические затраты АЭ диагностирования, проводить комплексное диагностирование резервуаров в короткие сроки.

Получен патент на изобретение «Способ низкотемпературного локального нагружения объекта при акустико-эмиссионном методе неразрушающего контроля» пат. №2614190.

#### **Внедрение результатов научного исследования.**

Результаты исследования успешно использовались при диагностировании днищ резервуаров, эксплуатирующихся в сложных климатических условиях Севера, а также при подготовке заключений экспертиз промышленной безопасности опасных производственных объектов подконтрольных Ростехнадзору.

Внедрение данного усовершенствования реализовано в экспертной организации ООО «Научно-технический центр анализа промышленного риска Севера» а также в организации нефтепродуктообеспечения АО «Саханефтегазсбыт».

**Методология и методы исследования.** Общая методология исследований базируется на использовании экспериментальных методов механики деформирования и разрушения. Для решения поставленных задач использованы сертифицированные, поверенные и высокоточные приборы и аппаратура, произведено сравнение результатов исследований с опубликованными ранее данными других авторов. Практические результаты диссертационной работы использованы при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств опасных производственных объектов.

**Личный вклад автора** заключается: в сборе и оценке данных дефектности резервуаров; в разработке и реализации способа повышения эксплуатационной надежности резервуаров, работающих в условиях Севера путем совершенствования схемы нагружения контролируемой области при АЭ методе контроля; в исследовании распределения плоскостных и объемных дефектов в сварных соединениях и основном металле резервуаров; в установлении зон в элементах резервуаров подверженных к образованию и дальнейшему распространению дефектов; во внедрении результатов экспериментов в программу работ экспертной организации и в организации нефтепродуктообеспечения.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались и обсуждались на VII Лаврентьевских чтениях (г. Якутск, 2003 г.); III - V Евразийских симпозиумах по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата (г. Якутск, 2006 - 2010 г.г.); II - V Всероссийских научных конференциях «Безопасность и живучесть технических систем» (г. Красноярск, 2007 - 2015 г.г.); IV, V Российских научно-технических конференциях «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2009, 2011 г.г.); 2-ой международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (г. Москва, 2012 г.); Всероссийской научно - практической конференции «Сварка и безопасность» (г. Якутск, 2012 г.г.).

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 18 научных работ, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и двух приложений. Основное содержание и выводы изложены на 106 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 56 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 102 наименования.

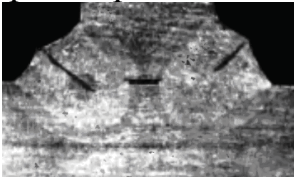
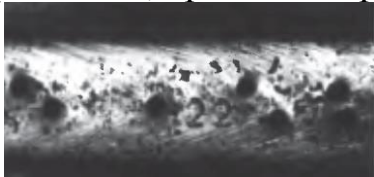
## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и основные задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** содержится обзор и анализ работ, посвященных обеспечению эксплуатационной надежности резервуаров для хранения нефтепродуктов Севера различными методами неразрушающего контроля, а также обзорный анализ существующих российских нормативно-методических документов по техническому диагностированию.

По результатам обзора и анализа работ все дефекты в стальных конструкциях можно разделить на два типа: плоскостные (горячие и холодные трещины, непровары сварного соединения) и объемные (шлаковые включения, поры, раковины, прожоги и др.), которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Плоскостные и объемные дефекты на резервуарах

| Плоскостные дефекты                                                                                                                                | Объемные дефекты (пространственные)                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Горячие и холодные трещины, непровары сварного соединения</p>  | <p>Шлаковые включения, поры, раковины, прожоги и др.</p>  |

Обнаружение плоскостных типов дефектов распространенными методами неразрушающего контроля, как рентгенографический контроль (РК) и ультразвуковой контроль (УЗК) и др. затруднены рядом факторов. Основным недостатком РК является невозможность обнаружения дефектов с малым раскрытием плоскостного типа. При ультразвуковом контроле выявляемость зависит от расположения дефектов относительно хода испускаемого пьезоэлементом акустического луча и неоднозначности расшифровки полученных данных.

Данные методы и средства неразрушающего контроля направлены на поиск и нахождение дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации резервуара, дефектов при изготовлении прокатных материалов, и не подходят для определения дефектов на раннем этапе их развития. Последнее становится все более важным, так как во многих случаях является более опасным на резервуарах, превысивших нормативный срок эксплуатации, поскольку в структуре материала уже произошли необратимые изменения механических свойств в сторону охрупчивания.

Таким образом, применение существующих традиционных методов неразрушающего контроля повреждений металла при оценке надежности резервуаров недостаточно эффективно. Поэтому, необходимо использовать расширенные подходы и методы контроля. К таким методам, прежде всего, следует отнести методы и средства, позволяющие обнаруживать и контролировать на практике наиболее опасные развивающиеся плоскостные несплошности, к которым относится прежде всего АЭ контроль.

**Во второй главе** приведен анализ разрушений резервуаров, эксплуатирующихся в условиях низких температур на примере Республики Саха (Якутия). Последовательность развития повреждений и разрушений резервуаров происходит в результате циклических температурных деформаций и колебаний рабочего давления. В зонах монтажных и конструкционных дефектов накапливаются повреждения, которые служат очагами образования плоскостных дефектов, и при превышении критического размера или иных условий происходит хрупкое или

квазихрупкое распространение трещины по околошовной зоне с выходом на основной металл.

Анализ полных и частичных случаев разрушений резервуаров, эксплуатирующихся на территории Якутии показал, что большинство произошедших масштабных повреждений и аварий на резервуарах приходится на холодные месяцы года (выбраны 6 наиболее холодных месяцев из 12) (рис. 1).

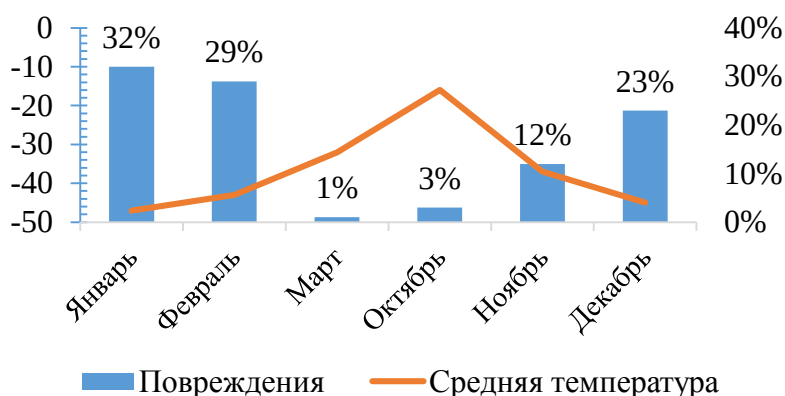


Рисунок 1- Распределение количества аварий и повреждений по месяцам

Повреждение резервуара РВС-2000 №25, произошедшее в феврале 2009 г. По данным дефектоскопии на днище резервуара были обнаружены 3 трещины, на стенке резервуара – 2 трещины (рис. 2). Анализ повреждений показал, что очагами разрушения послужили плоскостные дефекты сварных швов, образованные в процессе сварочных работ во время проведения замены днища резервуара. Распространение хрупких трещин с выходом на основной металл от очагов, произошло в результате применения несоответствующих нормативным требованиям электродов.



Рисунок 2- Повреждения резервуара с розливом нефтепродукта

Анализ катастрофического разрушения резервуара РВС-700 №49, произошедшего 26 января 2007 г. (рис. 3) показал, что разрушение произошло в результате хрупкого разрушения по основному металлу стенки в зоне термического влияния швов соединения стенки с крышей и днищем при сочетании ряда факторов таких, как старение металла резервуара, проявляющееся в охрупчивании металла, понижения температуры окружающего воздуха до минус 42°C, наличия плоскостного типа дефекта в виде трещины на стенке. При этом, плоскостной дефект – инициатор аварии располагался вне зоны проведения НК традиционными методами.



Таким образом, анализ повреждений и разрушений резервуаров, работающих длительное время в условиях низких температур, показал, что одной из основных причин является наличие дефектов плоскостного типа и их развитие в зоне повышенной концентрации напряжений, которые трудно определить традиционными методами неразрушающего контроля.



Рисунок 3 - Полное разрушение резервуара с разливом нефтепродукта

**В третьей главе** проведен анализ распределения дефектов, функционирующих безаварийных РВС для хранения нефтепродуктов, работающих на территории Якутии. При учете дефектов сварных соединений и основного металла были использованы рентгенографический, ультразвуковой и визуально-измерительный методы неразрушающего контроля.

По результатам проведенных экспертными организациями технических обследований более 600 резервуаров были обнаружены более 9000 дефектов. Из них преобладающее количество занимают подрезы – около 45%, дефекты в виде раковин – 30%, дефекты формы шва – 15%, непровары и шлаки – по 5%.

По полученным данным построены гистограммы распределения дефектов, которые представлены на рисунке 4.

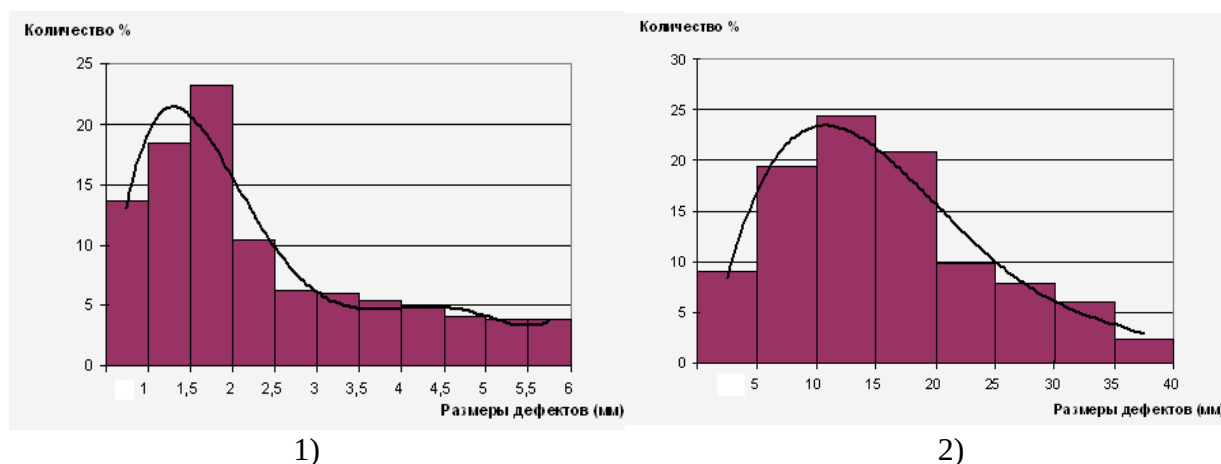


Рисунок 4- Размерное распределение дефектов в резервуарах, работающих в условиях Севера, объемных (1) и плоскостных (2)



Установлено, что для рассмотренных случаев наиболее характерным является двухпараметрический вейбулловский закон распределения.

$$f(l) = \frac{\beta}{\theta} l^{\beta-1} e^{-\left(\frac{l}{\theta}\right)^{\beta}},$$

где  $l$  – размер (длина) дефекта;  $\beta$ ,  $\theta$ - параметры распределения (табл. 2).

Таблица 2 - Параметры распределения

| Объект                                               | Параметр дефекта   | Параметры распределений |         |
|------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|---------|
|                                                      |                    | $\theta$                | $\beta$ |
| Резервуары РВС-1000<br>Нефтебаза п. Нижний Бестях    | Раковины           | 2,1                     | 1,8     |
|                                                      | Шлаковые включения | 3,18                    | 1,8     |
|                                                      | Подрезы            | 5,1                     | 2,1     |
|                                                      | Непровары          | 2,88                    | 1,74    |
|                                                      | Трещины            | 2,52                    | 2,13    |
| Резервуары РВС-2000<br>Нефтебаза п. Нижний Бестях    | Раковины           | 2,0                     | 1,8     |
|                                                      | Шлаковые включения | 3,0                     | 2,1     |
|                                                      | Подрезы            | 5,3                     | 1,78    |
|                                                      | Непровары          | 2,9                     | 1,69    |
|                                                      | Трещины            | 3,0                     | 2,2     |
| Резервуары РВС-3000<br>Нефтебаза п. Нижний Бестях    | Раковины           | 2,2                     | 1,8     |
|                                                      | Шлаковые включения | 3,2                     | 1,8     |
|                                                      | Подрезы            | 2,3                     | 1,8     |
|                                                      | Непровары          | 2,1                     | 1,7     |
|                                                      | Трещины            | 4,2                     | 2,3     |
| Резервуары РВС-1000<br>Нефтебаза аэропорта г. Якутск | Раковины           | 2,1                     | 1,7     |
|                                                      | Подрезы            | 4,0                     | 2,2     |
|                                                      | Трещины            | 6,3                     | 2,05    |
| Резервуары РВС-2000<br>Нефтебаза аэропорта г. Якутск | Раковины           | 1,61                    | 1,58    |
|                                                      | Подрезы            | 3,2                     | 2,2     |
|                                                      | Трещины            | 3,1                     | 1,9     |

Установлено, что плоскостные дефекты преимущественно располагаются в зонах высоких растягивающих остаточных напряжений таких, как стенка, днище, патрубки и уторный шов (рис. 5), которые значительно повышают вероятность отказов и разрушений. На основании анализа распределений плоскостных и объемных дефектов установлено, что 47% от общего количества дефектов относятся к плоскостным дефектам и 53% к объемным дефектам (рис. 6).

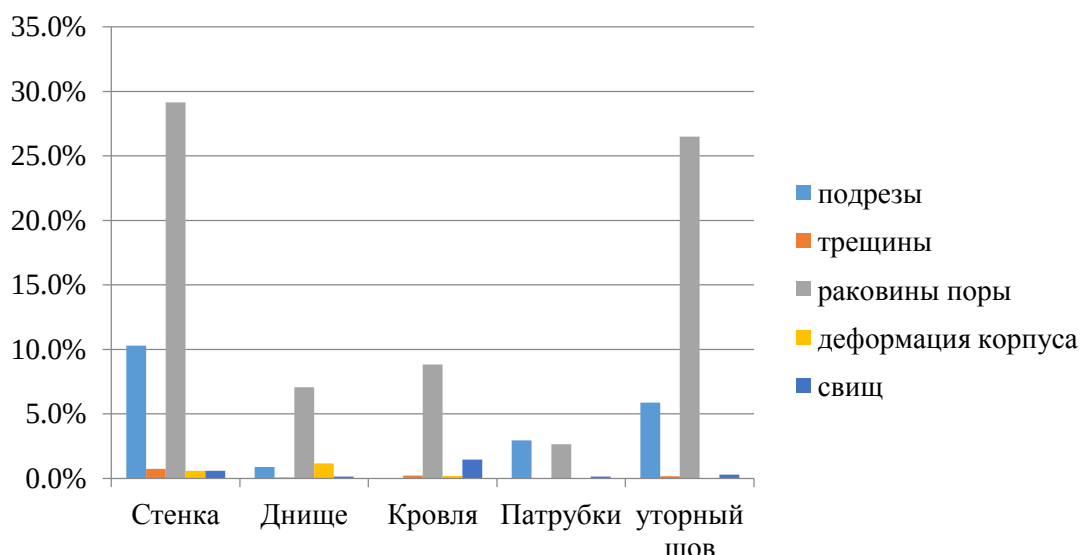


Рисунок 5 - Группировка дефектов по элементам резервуаров



Рисунок 6- Процентное соотношение дефектов и повреждений резервуаров, работающих в условиях Севера

**Четвертая глава** посвящена решению вопросов выявляемости плоскостных дефектов в резервуарах методами неразрушающего контроля. Предложена усовершенствованная схема проведения диагностирования АЭ методом контроля.

В настоящее время одним из немногих методов, выявляющих развивающиеся дефекты, является АЭ метод. Однако, применение данного метода на РВС, ограничивается рядом факторов, основными из которых являются техническая сложность его реализации и высокая себестоимость. При стандартной схеме проведения АЭ контроля резервуара, для получения акустических импульсов от

потенциальных дефектов в резервуарах, создается упругая деформация (нагружение) всей конструкции путем налива и слива воды. Нагружение при этом занимает много времени, имеет значительные материальные финансовые затраты и во время изменения уровня воды сопровождается различными акустическими помехами. Кроме того, обработка большого количества данных требует высокой квалификации оператора, так как при фильтрации посторонних фоновых акустических шумов имеется высокая вероятность упущения сигналов от потенциальных инициаторов аварий.

В работах Баранова В.М. и Молодцова К.И. предложен способ обнаружения и локализации дефектов методом АЭ контроля, путем создания в контролируемом изделии напряженно-деформированного состояния, с помощью комбинированного локального низкотемпературного (парами жидкого азота) и механического воздействия. Использование сложных в получении паров жидкого хладагента, требует специального оборудования, что ограничивает спектр контролируемых изделий. В основном, применимо только в лабораторных условиях и не отвечает условиям проведения оперативного диагностирования резервуаров в полевых условиях.

Для усовершенствования описанных методов АЭ контроля, предлагается проводить АЭ контроль на заранее выбранный опасный локальный участок резервуара. Нагружение проводится путем воздействия на контролируемый участок низкими температурами, при этом используется хладагент в виде твердого диоксида углерода. В твердом диоксиде углерода сублимация происходит при минус 78°C и его испарение не сопровождается какими-либо посторонними акустическими шумами, что положительно сказывается на выявляемость дефектов. Также при низкотемпературном воздействии на изделие в материале возникают преимущественно напряжения растяжения, которые способствуют раскрытию плоскостных дефектов, вследствие чего вероятность возникновения акустических импульсов увеличивается и тем самым повышается выявляемость дефектов.

Предлагаемый способ был реализован в лабораторных условиях на образце из стали СтЗсп в виде листа размерами 1х1х0,03 м, с центральной сквозной искусственной трещиной длиной 65 мм. В эксперименте использовались: АЭ комплекс «Эксперт-1014»; преобразователи акустических эмиссий с интервалом измерений 150 – 300 кГц; хром-никелевые термопары для контроля распределения температуры по образцу в реальном времени; блок регистрации сигналов термопар «Теркон» для перерасчета сигналов на температуру по времени; программное обеспечение обработки данных; твердый диоксид углерода. Схема установки и подключений аппаратур эксперимента представлена на рисунке 7.

Обработка полученных данных в ходе эксперимента показала высокую точность определения местоположения источника акустической эмиссии (рис. 8), оценка опасности источника классифицировалась как «активный», что соответствует III классу опасности. Замер протяженности концентратора, ультразвуковым дефектоскопом «Мастер А1212» после нагружения, показал удлинение трещины на 3 мм. Исследование зон концентрации напряжений методом магнитной памяти прибором «ИКН-6М-8» показал увеличение концентрации напряжений в зоне нахождения искусственной трещины (рис. 9).

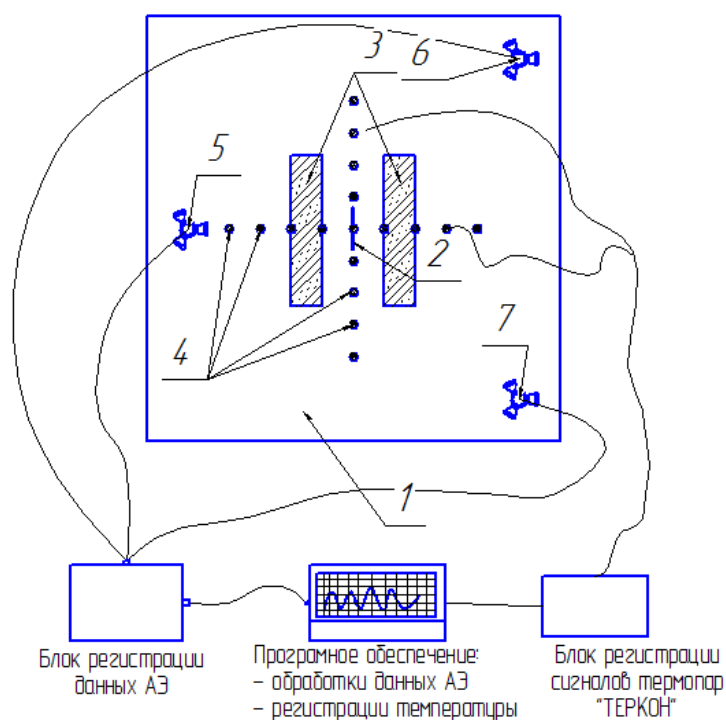


Рисунок 7 - Схема локального низкотемпературного нагружения образца:  
1 – Образец- стальной лист 1x1x0,03 м; 2 – Искусственная сквозная трещина 65 мм; 3 – Зона закладки твердого диоксида углерода; 4 – Хром-никелевые термопары; 5, 6, 7 – Пьезоакустические преобразователи

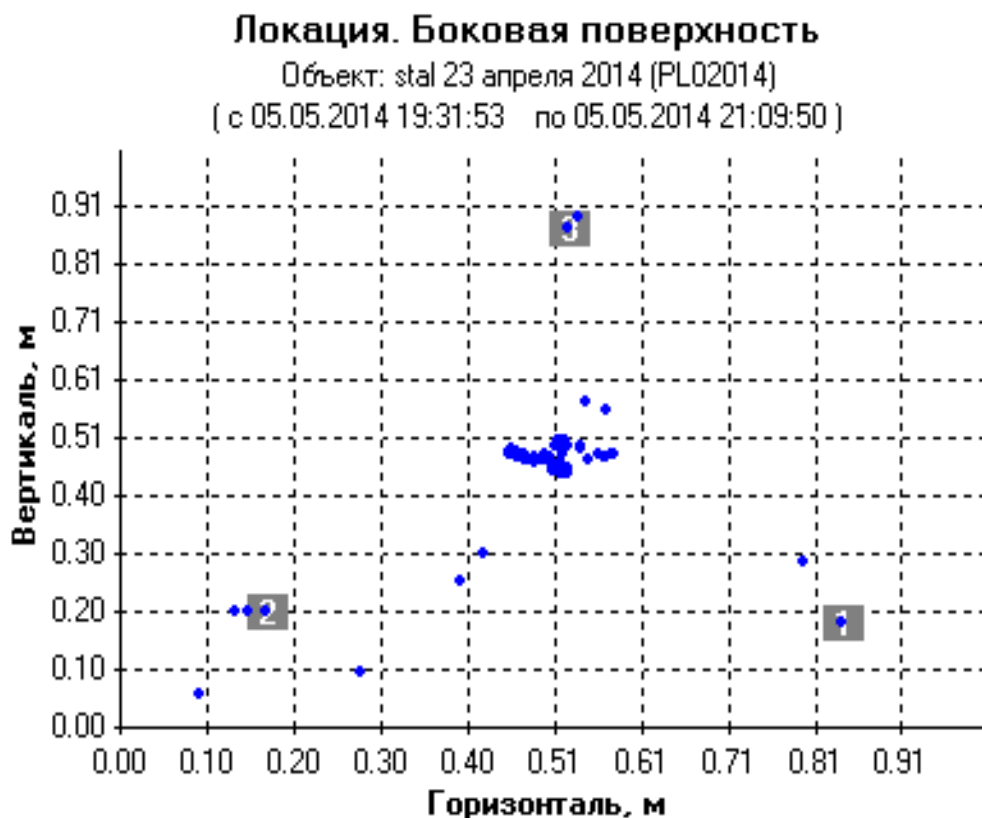


Рисунок 8 - Регистрация сигналов АЭ концентратора

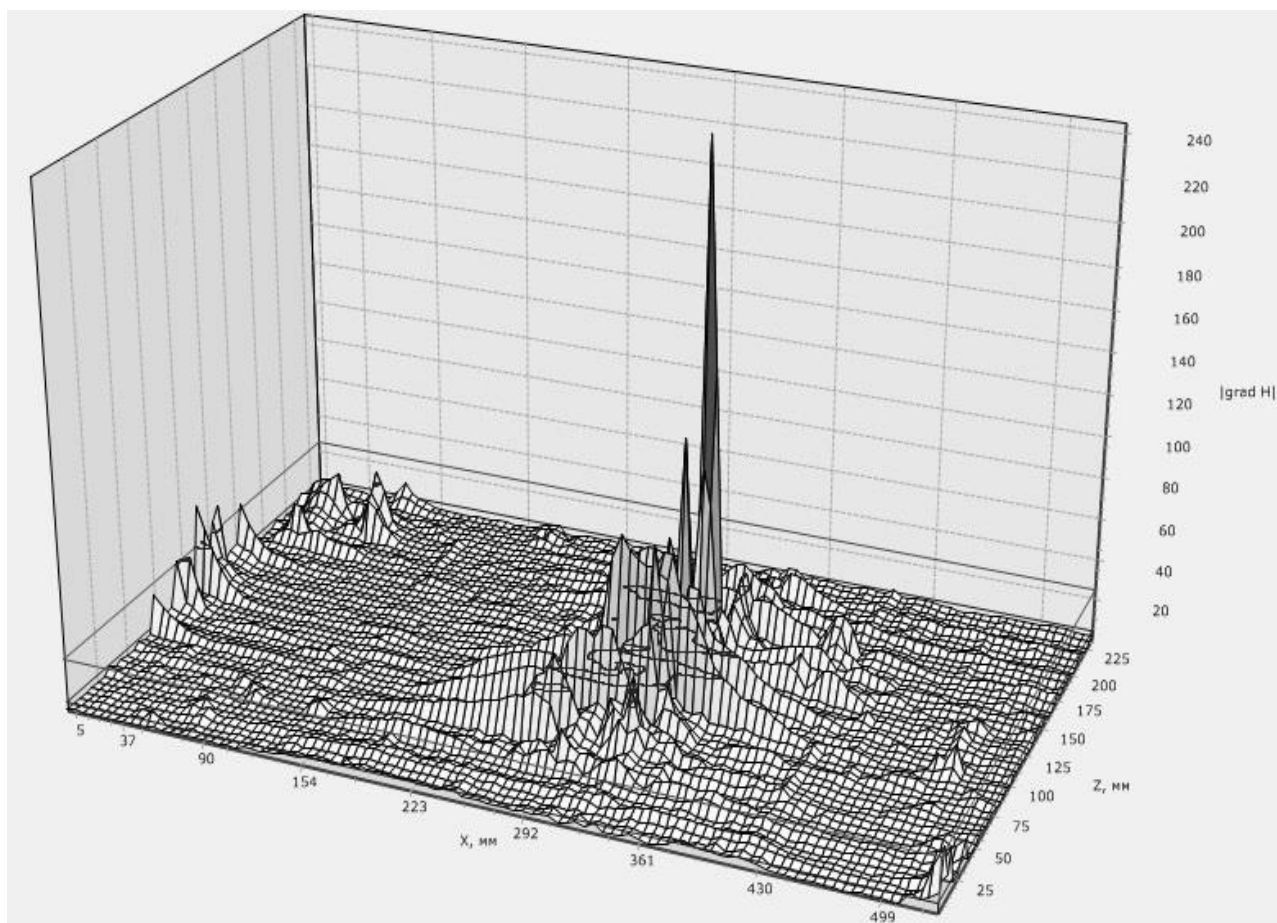
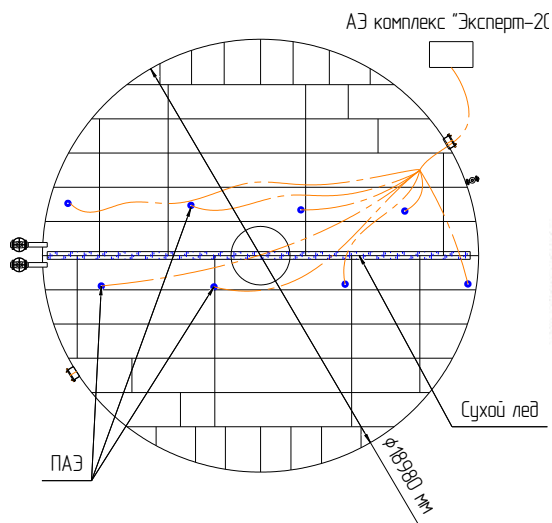


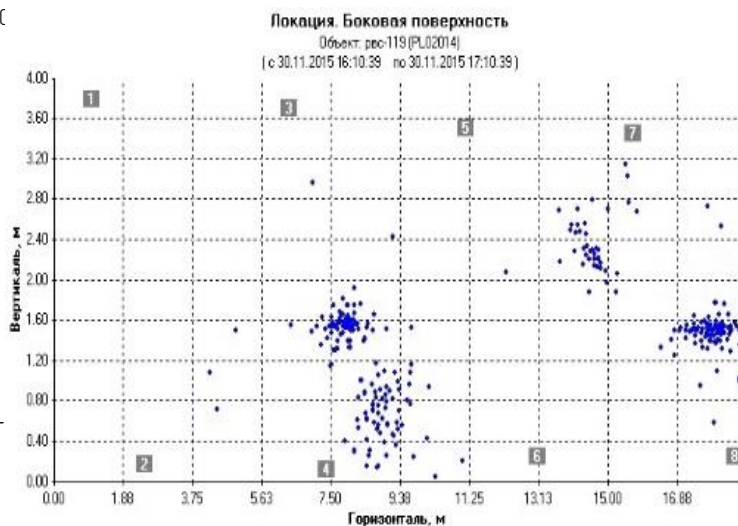
Рисунок 9 - Измерение зон концентрации напряжений ММПМ. Ось «x, z» - ширина и длина сканирования измеряемая в «мм», ось «у» - напряженность магнитного поля измеряемая в  $(A/M)^2$

На основании лабораторных исследований, предлагаемый способ был апробирован на днищах РВС для хранения нефтепродуктов (рис. 10). Выбор участков контроля на резервуарах производился с учетом анализа распределения дефектов, который при текущем техническом состоянии резервуаров охватывал центральную часть днища – монтажное сварное соединение двух сегментов днища.

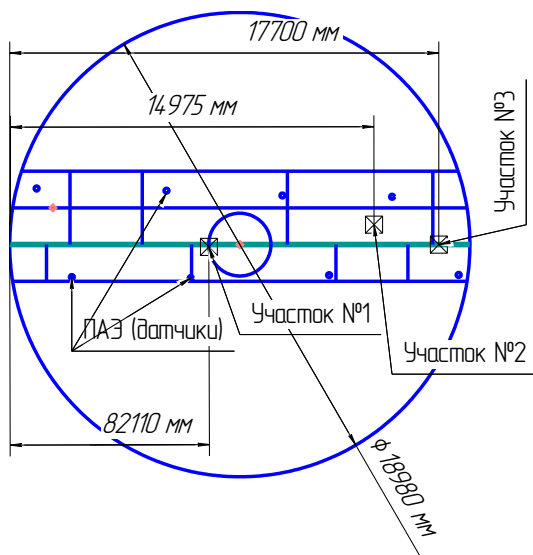
АЭ контроль производился с использованием тех же приборов и оборудования, что и при эксперименте на стальном листе с отличием только в количестве пьезоакустических датчиков и объема твердого диоксида углерода. По результатам проведения АЭ контроля, зафиксированы 4 «активных» участка. Оценка по модифицированному локально динамическому критерию опасности акустических источников показала наличие 5 событий III класса опасности, которые соответствуют развивающимся дефектам и являются дефектами высокой степени опасности.



1)



2)



3)



4)

Рисунок 10 - Проведение АЭ контроля монтажного соединения днища РВС-3000 с применением низкотемпературного нагружения: 1 – Схема закладки твердого диоксида углерода и размещения пьезоакустических преобразователей на днище; 2 - Регистрация сигналов АЭ активных источников (При данной схеме установки антенн, используется развертка «плоскость», именуемая в программном обеспечении АЭ комплекса «Локация. Боковая поверхность»); 3 – Участки III класса опасности; 4 – Фотографии обнаруженных участков

При проведении повторного комплексного диагностирования резервуара традиционными методами неразрушающего контроля участков, оцененных АЭ контролем как «активные», были обнаружены нарушения сплошности наплавленного и основного металла, которые представлены на рисунке 10:

Участок №1 – Сварное соединение опорного кольца к днищу. При дополнительном ультразвуковом сканировании, на месте прихватки обнаружена развивающаяся трещина;

Участок №2 – Вмятина по основному металлу с пересечением сварного

соединения. Измерение твердости материала показало о понижении твердости относительно других участков на 50%, что свидетельствует об изменении механических свойств металла;

Участок №3 – Остатки временных сварных прихваток при монтаже резервуара. При проведении монтажных работ прихватки производились с прожогом основного металла.

На основании проведенных исследований разработана блок – схема алгоритма проведения технического диагностирования резервуаров с применением локального низкотемпературного нагружения при АЭ методе контроля, которая представлена на рисунке 11.



Рисунок 11 – Комплексное техническое диагностирование резервуаров с дополнительным локальным АЭ контролем

Натурное испытание АЭ методом контроля в сочетании с низкотемпературным локальным нагружением показало высокую выявляемость и точность определения координат зарождающихся дефектов. Внедрение данного усовершенствованного метода реализовано в программу работ экспертной организации ООО «Научно-технический центр анализа промышленного риска Севера», а также в организацию нефтепродуктообеспечения АО «Саханефтегазсбыт».



## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Анализ отказов и аварий резервуаров для хранения нефтепродуктов эксплуатируемых в Республике Саха (Якутия) показал, что в большинстве случаев очагами и инициаторами их разрушений являются плоскостные дефекты, которые составляют 47% от всех типов дефектов обнаруженных традиционными методами неразрушающего контроля.
2. Определены зоны элементов конструкции, наиболее подверженные к образованию плоскостных зарождающихся дефектов. Ими являются наиболее нагруженные участки несущей стенки и участки примыкания к днищу резервуаров.
3. Установлено, что распределение плотности вероятностей плоскостных дефектов сварных соединений в резервуарах подчиняется закону распределения Вейбулла. Показана низкая выявляемость плоскостных дефектов в виде микротрещин, находящихся в слепой зоне для традиционных методов диагностирования.
4. Предложен способ низкотемпературного нагружения при проведении акустико-эмиссионного контроля с использованием хладагента в виде твердого диоксида углерода, позволяющий повысить выявляемость дефектов акустико-эмиссионным методом, за счет локализации контроля и уменьшения побочных акустических шумов.
5. Низкотемпературная схема нагружения при акустико-эмиссионном методе контроля апробирована в процессе диагностирования вертикальных стальных резервуаров. Предложенный способ низкотемпературного нагружения внедрен в программу проведения экспертизы промышленной безопасности особо опасных объектов в организацию нефтепродуктообеспечения и в специализированную организацию в области промышленной безопасности.

### **Основные публикации по теме диссертации Статьи в рецензируемых журналах ВАК**

1. Большаков, А.М. Характер дефектов и виды отказов резервуаров, работающих в условиях Севера / А.М. Большаков, Я.М. Андреев // Газовая промышленность. – 2012. – №3. – С.68–72.
2. Большаков, А.М. Виды отказов и распределение дефектов по степени опасности резервуаров, эксплуатирующихся в условиях Севера / А.М. Большаков, Я.М. Андреев // Дефектоскопия. – 2014. – №9. – С.3–10.
3. Bolshakov, A.M. The Types of Failures and Defect Distribution by Degree of Danger of Reservoirs Exploited in the Extreme North / A.M.Bolshakov, Ya.M.Andreev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50. – No. 9. – pp. 499–505.

4. Большаков А.М. Анализ разрушений металлоконструкций, работающих в условиях севера / А.М. Большаков, Я.М. Андреев // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № S1. – С.27–31.
5. Bol'shakov, A.M. A Local Method for Loading a Tested Object during Acoustic-Emission Diagnostics / A. M. Bol'shakov, Ya. M. Andreev // ISSN 1061-8309. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2016, – Vol. 52. – No. 4. – pp. 206–211.
6. Большаков, А.М. Локальный способ нагружения в объекте контроля при акустико-эмиссионном методе диагностирования / А.М. Большаков, Я.М. Андреев // *Дефектоскопия*. – 2016. – № 4. – С. 26-30.

### **Другие публикации**

7. Андреев, Я.М. Исследование износа поверхности шипа крестовины шарнира карданной передачи автомобиля УАЗ / Я.М. Андреев // VII Лаврентьевские чтения: науч. конф. студентов и молодых ученых. Секция: Технические науки и науки о земле: сб. ст. Т. II. – Якутск. – 2003. – 93 с.
8. Андреев, Я.М. Сравнительная оценка традиционной методики неразрушающего контроля сварных металлоконструкций и метода акустической эмиссии в условиях Севера / Я.М. Андреев, А.М. Большаков // Тр. III Евраз. симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Ч. I (Якутск, 14-18 августа 2006). – Якутск. – 2006. – С.76–83.
9. Андреев, Я.М. Методика определения остаточного ресурса сварных металлоконструкций в условиях Севера на основе методов оперативной диагностики / Я.М. Андреев, А.М. Большаков // II Всероссийская конференция "Безопасность и живучесть технических систем" 8-12 октября 2007 года. – Красноярск.
10. Андреев, Я.М. Виброакустический метод диагностики подшипников качения, с применением компьютерных технологий / Я.М. Андреев // IV Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.imach.uran.ru/conf/rdmk/rdmk16.htm> – г. Екатеринбург. – 2009. – С.163.
11. Большаков, А.М. Разработка методики оценки остаточного ресурса сварных металлоконструкций в условиях севера на основе методов оперативной диагностики / А.М. Большаков, Я.М. Андреев, А.В. Григорьев // III Всероссийская конференция "Безопасность и живучесть технических систем" 21-25 сентября 2009. – Красноярск.
12. Андреев, Я.М. Оптимизация комплексного использования методов неразрушающего контроля для мониторинга технического состояния металлоконструкций. / Я.М. Андреев, А.М. Большаков // Труды V Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Секция 2. Физика и механика прочности материалов при низких температурах, надежность и ресурс конструкций в

- условиях холодного климата; техническая диагностика потенциально опасных и критически важных объектов. – Якутск. – 2010. – с.12-15.
13. Андреев, Я.М. Разработка методики оценки остаточного ресурса сварных металлоконструкций в условиях Севера на основе методов оперативной диагностики / Я.М. Андреев, А.М. Большаков // Ресурс и диагностика материалов и конструкций [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.imach.uran.ru/conf/rdmk5/rdmk3.htm>. V Российская научно-техническая конференция. – Екатеринбург. – 2011.
  14. Большаков, А.М. Характер отказов резервуаров для хранения нефтепродуктов, эксплуатирующихся в условиях Севера по принципу плоскостных и объемных дефектов / А.М. Большаков, Я.М. Андреев // Материалы Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение», 22-24 октября 2012 г. – Москва. – ИМАШ РАН. – С.12–13.
  15. Андреев, Я.М. Исследование влияния плоскостных и объемных дефектов сварных соединений резервуаров для хранения нефтепродуктов, эксплуатирующихся в условиях Севера / Я.М. Андреев, А.М. Большаков // Труды IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем», 9-13 октября 2012 г., Красноярск. В 2 т. Том 2. -С. 12-15.
  16. Андреев, Я.М. Исследование плоскостных и объемных дефектов сварных соединений резервуаров для хранения нефтепродуктов, эксплуатирующихся в условиях Севера / Я.М. Андреев, А.М. Большаков // Материалы Всероссийской научно - практической конференции «Сварка и безопасность», 11-12 октября 2012 г. – Якутск. – В 2 т. Том 1. – С.173–177.
  17. Большаков, А.М. Исследование зарождения трещины в оргстекле акусто-эмиссионным методом, при воздействии на материал низкими температурами / А.М. Большаков, Я.М. Андреев // Тезисы докладов 2-й Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (SSMS-2014), 21-23 октября 2012 г. – Москва. – ИМАШ РАН. – С.22.
  18. Большаков, А.М. Акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля с низкотемпературным нагружением объекта / А.М. Большаков, Я.М. Андреев // Труды V Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем», 12-16 октября 2015 г. – Красноярск. – В 2 т. Том 1. – С.102–106.

## **Патент**

Способ низкотемпературного локального нагружения объекта при акустико-эмиссионном методе неразрушающего контроля: пат. 2614190 Рос. Федерация / Большаков А. М., Андреев Я. М. Федеральное государственное учреждение науки Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова сибирского отделения Российской академии наук, ИФТПС СО РАН. – №2016102107; заявл. 22.01.2016; опубл. 23.03.2017; бюл. №9.