

*На правах рукописи*



**РЯБОВ АЛЕКСАНДР АНДРЕЕВИЧ**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЕРТИКАЛЬНЫХ  
СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность: 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы  
(нефтегазовая отрасль)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2018

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кузеев Искандер Рустемович**

Официальные оппоненты: **Гумеров Кабир Мухаметович**  
доктор технических наук, профессор,  
ООО «Научно-исследовательский институт  
Транснефть» / научно-технический центр,  
главный научный сотрудник

**Загидулин Тимур Ринатович**  
кандидат технических наук,  
ООО «Научно-технический центр  
«Спектр», технический директор

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Оренбургский  
государственный университет»  
(г. Оренбург)

Защита состоится «26» июня 2018 года в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Абуталипова Елена Мидхатовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Вертикальные стальные резервуары являются неотъемлемой частью парка оборудования добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья. Несмотря на развитую систему стандартизации и высокие требования к безопасности резервуаров, статистика аварий показывает, что существующие меры по обеспечению надежности этих объектов не являются совершенными. Исследованию закономерностей накопления повреждений и разработке способов повышения безопасности резервуаров посвящены работы многих авторов, среди которых В.Б. Галеев, В.Л. Березин, О.А. Макаренко, А.А. Тарасенко и др., что говорит об актуальности данного направления.

При проектировании резервуаров их безопасность обеспечивается запасами прочности, компенсирующими воздействия повреждающих факторов. Прочностные расчеты, применяемые при проектировании и расчете ресурса резервуаров, основаны на линейной механике разрушения и базируются на силовых критериях. Считается, что существующий порядок проектирования гарантирует реализацию напряженно-деформированного состояния материала в области упругих деформаций. Однако, действующие напряжения могут быть определены только расчетным путем и в ограниченной области значений, поэтому при расчетах принимается ряд условий, что ограничивает точность результатов. Поэтому, в качестве одного из направлений совершенствования методов оценки прочности и долговечности предлагается применение деформационных критериев.

Процессы деформирования стали приводят к изменениям ее микроструктуры и механических свойств. В настоящее время оценка поврежденности стали от пластической деформации выполняется разрушающими методами, практика которых ограничена из-за высоких издержек.

Результаты многочисленных исследований изменений электрофизических свойств конструкционной стали при накоплении повреждений показали, что

изменения механических свойств и поврежденность материала могут быть оценены по изменениям электромагнитных параметров, регистрируемых с помощью вихретокового неразрушающего контроля.

Для применения этого вида контроля при прогнозировании остаточного ресурса резервуаров необходимо исследовать особенности изменений электромагнитных параметров, измеряемых при взаимодействии вихретокового преобразователя со сталью, при накоплении повреждений от воздействия механических нагрузок и разработать алгоритм применения установленных закономерностей.

### **Степень научной разработанности темы исследования**

Н.А. Махутовым, А.П. Гусенковым, А.Н. Романовым, В.В. Москвичевым, В.Н. Пермьяковым, Ю.Г. Матвиенко и др. показано, что на практике возможно сочетание условий нагружения, при которых в локальных областях материала напряжения могут превышать предел текучести, что вызывает накопление пластических деформаций в этих областях. Это приводит к постепенной деградации механических свойств материала и изменению напряженно-деформированного состояния всей конструкции. Поэтому, при длительной эксплуатации объектов происходит исчерпание запасов прочности, заложенных при проектировании, что увеличивает вероятность отказов и возникновения аварийных ситуаций.

Результаты исследований разрушения металлов, описанные в работах В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, В.В. Рыбина и др. показали, что эволюция дислокационной структуры материала, происходящая вследствие накопления пластических деформаций, приводит к изменениям его электромагнитных свойств. Данная связь стала предметом исследований академика РАН Э.С. Горкунова, В.Ф. Мужичко, А.А. Абакумова, А.А. Дубова, А.А. Дубова (мл), Р.В. Агинея, Р.В. Загидуллина, С.М. Задворкина и др., и результаты их работ показали возможность регистрации повреждений стали на уровне микроструктуры методами неразрушающего контроля.

В работах М.Г. Баширова, Э.М. Башировой, И.Р. Кузеева, Е.А. Наумкина

показана возможность оценки усталостной поврежденности ферромагнитной стали (ферритно-перлитного класса), вызванной воздействием циклических нагрузок, с помощью вихретокового контроля. Результаты этих работ могут быть основой для разработки нового алгоритма оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса резервуаров.

### **Цель работы**

Разработка алгоритма прогнозирования остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров по деформационному критерию разрушения.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и выполнены следующие **задачи исследования**:

1 Провести анализ методов прогнозирования ресурса опасных производственных объектов, применяемых для оценки долговечности резервуаров.

2 Исследовать влияние уровня накопленных повреждений в материале сварного соединения на значение амплитуды отклика электрического сигнала, измеряемого в этой зоне (для стали 09Г2С).

3 Исследовать влияние пластической деформации, вызванной действием статической нагрузки, на амплитуду отклика электрического сигнала (для стали 20).

4 Разработать деформационный критерий предельного состояния для прогнозирования ресурса вертикальных стальных резервуаров с применением электромагнитных измерений (ориентированных на оценку деформации материала).

### **Научная новизна**

1 Установлено, что в зоне термического влияния сварных соединений из стали 09Г2С, при воздействии циклических нагрузок, амплитуда отклика электрического сигнала коррелирует со значением уровня накопленных пластических деформаций, который является критерием наступления предельного состояния.

2 Получена зависимость амплитуды отклика электрического сигнала от уровня накопленных пластических деформаций при статическом нагружении, которая имеет две характерные области, разграничивающиеся переходом механических напряжений в зону деформационного упрочнения.

### **Теоретическая значимость**

Для количественной оценки поврежденности локальных участков стенки резервуаров предложено использовать уровень накопленных пластических деформаций, определяемый косвенно по результатам измерений электромагнитных параметров и характеризующий необратимые изменения структуры материала от механических воздействий.

### **Практическая значимость**

1 Разработанные рекомендации прогнозирования ресурса резервуаров вертикальных стальных с использованием измерений электромагнитных характеристик внедрены в программу технического освидетельствования резервуаров, эксплуатируемых компанией ООО «ТГИ Комплекс».

2 Результаты, полученные в работе, применяются в учебном процессе при чтении курса лекций и выполнении практических работ по дисциплине магистерской подготовки «Основы теории диагностики технических систем» по направлению 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

### **Методы исследований**

Работа содержит экспериментальные исследования влияния уровня накопленных повреждений от циклических и статических нагрузок на амплитуду отклика электрического сигнала, измеряемую при взаимодействии вихретокового преобразователя с конструкционными ферромагнитными сталями 09Г2С и 20. Основные теоретические результаты получены с применением анализа, построенного на структурно-энергетической теории разрушения материалов.

## **Положения, выносимые на защиту**

1 Алгоритм прогнозирования остаточного ресурса резервуаров вертикальных стальных с применением измерений электромагнитных параметров.

2 Критерий предельного состояния, соответствующий уровню накопленных пластических деформаций ферромагнитной стали, при котором дальнейшая эксплуатация резервуара недопустима, определяемый по значению амплитуды отклика электрического сигнала.

3 Зависимость амплитуды отклика электрического сигнала, измеряемой в ферромагнитной конструкционной стали, от уровня накопленных пластических деформаций.

## **Апробация результатов**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 66-й, 67-й научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2015 г., 2016 г.); научно-практической конференции «Экспертиза промышленной безопасности, диагностирование, разрушающий и неразрушающий контроль на объектах ТЭК» (г. Уфа, 2015 г.); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения» (г. Стерлитамак, 2015 г.); научно-практической конференции «Сварка и контроль – 2016» (г. Уфа, 2016 г.); научно-технической конференции Блока переработки и коммерции и переработки ПАО АНК «Башнефть» «Башнефть-Уфанефтехим» (г. Уфа, 2016 г.).

## **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов к работе, списка использованной литературы, включающего 182 наименования. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 10 таблиц.

## **Соответствие паспорту специальности**

Тема исследования соответствует п. 7 паспорта специальности 05.02.13 «Разработка и повышение эффективности методов технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации и продления ресурса».

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** выполнено обоснование актуальности темы диссертационной работы, приведены цели и задачи исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту, сведения о публикациях по теме диссертации и краткое описание структуры работы.

В **первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы прогнозирования ресурса резервуаров вертикальных стальных (далее РВС). Проведен анализ статистики аварийности РВС. Сведения, собранные в исследованиях В.Б. Галеева, В.Л. Березина, С.А. Швыркова и др. говорят о том, что в период с 1950 по настоящее время на территории Российской Федерации и стран СНГ произошло более 150 аварий, связанных с возгораниями и разрушениями РВС. Их последствиями являются смертельный травматизм, нанесение вреда окружающей среде и масштабные разрушения (на рисунке 1 приведены примеры возгорания и последствий взрыва РВС). Также во многих источниках отмечается, что зачастую организации скрывают факты возникновения аварий и их реальное количество может превышать официальные цифры в 3-5 раз. Эта статистика свидетельствует об актуальности проблемы обеспечения надежности РВС, которая должна достигаться путем соблюдения

правил эксплуатации, проведения технических освидетельствований и прогнозирования остаточного ресурса.



Рисунок 1 – Примеры разрушений РВС из-за разгерметизации

Многочисленные исследования, направленные на установление закономерностей влияния повреждающих факторов на надежность РВС показывают, что применяемые алгоритмы прогнозирования ресурса не являются совершенными. В их основе лежат расчеты напряжений, выполняемые по силовым критериям. Для РВС одним из наиболее сложных повреждающих факторов является изменение структуры и механических свойств металла, происходящее вследствие накопления пластических деформаций от циклических и статических нагрузок. Известен опыт применения для прочностных расчетов опасных производственных объектов деформационных критериев. Вместе с тем, диагностирование и оценка пластических деформаций элементов и узлов крупногабаритных объектов представляет значительную сложность.

Анализ результатов исследований показал, что для решения данной задачи может быть использован вихретоковый контроль. В качестве диагностической информации могут быть использованы параметры функции переходного процесса в системе «объект контроля» – «вихретоковый преобразователь», названного откликом электрического сигнала (далее ОЭС).

Вместе с тем, ранее проводимые исследования выполнены на образцах из основного металла, в то время как на практике, наиболее часто очаг разрушения локализуется в сварных швах и зонах термического влияния (далее ЗТВ). Также

не установлена зависимость параметров ОЭС от поврежденности при воздействии статической нагрузки. Известно, что данный силовой фактор при длительном воздействии вызывает изменения структуры и механических свойств металла. При эксплуатации РВС подвергается постоянному воздействию статической нагрузки, поэтому данный силовой фактор необходимо учитывать при прогнозировании ресурса.

**Вторая глава** посвящена описанию объекта исследования, выбору материала, исследуемых параметров и применяемого оборудования.

В качестве объекта исследования выбран резервуар РВС-5000 для хранения нефти. Резервуары данного вида широко применяются на объектах добычи нефти в составе сырьевых парков. В них осуществляется хранение сырой и товарной нефти, сброс пластовой воды, отстой нефти.

Анализ статистики аварий этих объектов показал актуальность совершенствования и разработки новых методов прогнозирования ресурса резервуаров. Во многих случаях причиной разрушения РВС является изменение механических свойств металла от воздействия эксплуатационных нагрузок. Регистрация и количественная оценка такого воздействия в настоящее время возможна только при помощи разрушающего контроля, применение которого ограничено. Поэтому, ресурс РВС определяется расчетным способом, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации. При этом стандартная методика расчета ресурса из условия циклической прочности, построенная на силовых критериях разрушения, не позволяет учитывать перераспределение механических напряжений от накопления пластических деформаций в конструктивных концентраторах напряжений и при накоплении усталостных повреждений.

Анализ результатов исследований в области диагностики неразрушающими методами контроля (далее НК) показал, что для оценки усталостной поврежденности может быть использован вихретоковый НК. В исследованиях Э.М. Башировой, И.Р. Кузеева, А.Т. Шарипкуловой, Т.Р. Бикбулатова были установлены зависимости параметров функции переходного процесса в системе

«вихретоковый преобразователь» – «объект контроля» от поврежденности стали 09Г2С при статических и циклических нагрузках. Сама функция переходного процесса была названа откликом электрического сигнала (далее ОЭС). Результаты исследований этих авторов были получены на образцах из основного металла. Это ограничивает возможность их практического применения, так как не установлены зависимости параметров ОЭС от поврежденности для сварных соединений.

В исследованиях Е.А. Наумкина, А.В. Самигуллина для стали 20 получена зависимость параметров ОЭС от поврежденности при циклических нагрузках. В тоже время, при эксплуатации стенка РВС подвержена воздействию статической нагрузки, повреждающим воздействием которой нельзя пренебрегать. Поэтому также необходимо установить для стали 20 зависимость параметров ОЭС от поврежденности при статическом нагружении. Сталь 09Г2С и сталь 20 составляют значительную долю в материальном исполнении парка действующих резервуаров, поэтому эти материалы выбраны для исследований. В качестве исследуемого параметра выбрана амплитуда ОЭС. По своей физической природе амплитуда ОЭС это электродвижущая сила, индуцируемая в измерительной цепи вихретокового преобразователя (единица измерения – вольт).

Анализ режима эксплуатации РВС показал, что основными силовыми факторами являются циклическое изменение уровня налива и осевые нагрузки от веса поясов и кровли. При максимальном уровне налива относительная деформация стенки составляет 0,05 %. Учитывая, большую длительность эксплуатации РВС, для моделирования накопления повреждений в металле применялись ускоренные разрушающие испытания по стандартным методикам.

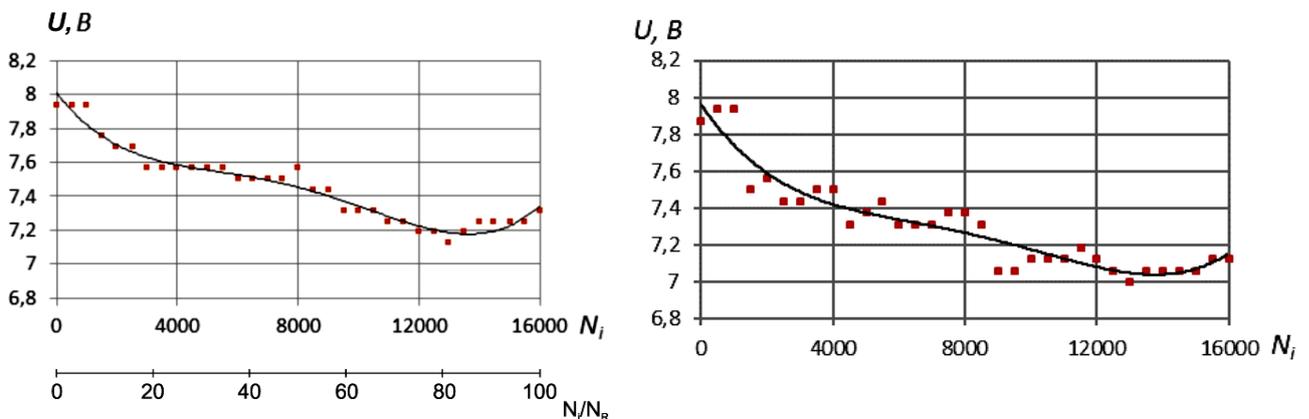
Исследование влияния уровня накопленных повреждений в материале сварного соединения на значение амплитуды ОЭС выполнялось путем проведения усталостных испытаний образцов из стали 09Г2С со сварным соединением, эскиз которых приведен на рисунке 2. Усиление шва снималось заподлицо (на эскизе не показано).



HS801, вихретоковый преобразователь и персональный компьютер; сервогидравлический динамометрический стенд Instron 8801; машина для циклического нагружения; вспомогательные приспособления.

Также во второй главе был проведен анализ факторов, влияющих на результаты измерений. Расчет погрешности выполнен с применением методов теории ошибок и математической статистики. Относительное значение погрешности амплитуды ОЭС по результатам измерений составило 1,05 %.

В третьей главе проведено исследование влияния поврежденности материала, вызванной воздействием циклической и статической нагрузок, на амплитуду ОЭС ( $U, B$ ). На рисунке 4 (а, б) приведены полученные зависимости амплитуды ОЭС ( $U, B$ ) от количества циклов нагружения ( $N_i$ ) для ЗТВ и сварного шва, построенные по средним значениям для 10 испытанных образцов из стали 09Г2С. Разрушение образцов происходило в ЗТВ. На рисунке 4 (а) на ось абсцисс дополнительно нанесена шкала уровня накопленных повреждений ( $N_i/N_R, \%$ ).



а)

б)

а – для ЗТВ; б – для сварного шва

Рисунок 4 – Зависимости амплитуды ОЭС ( $U, B$ ) от уровня накопленных повреждений

Амплитуда ОЭС в обоих случаях имеет максимум в исходном состоянии, снижается при накоплении повреждений и имеет минимум при наработке 13000 циклов, которая для металла ЗТВ соответствовала уровню накопленных повреждений 83 %, и в области  $N_i/N_R$  от 83 до 100 % показывает рост.

В настоящее время установлено, что экстремум в области значений  $N_i/N_R$  от 78 до 83 % показывают также напряженность собственного магнитного поля, скорость ультразвука, поверхностная энергия и ряд других физических характеристик. В качестве объяснения данного эффекта ранее высказывалось предположение, что наличие экстремума связано с началом устойчивого роста трещины. С точки зрения структурно-энергетической теории разрушения, этот процесс должен сопровождаться снижением плотности дефектов структуры материала и изменением его электромагнитных свойств.

Для экспериментального подтверждения выдвинутого предположения, дополнительно испытана серия из 3 образцов, которые доводились до уровня усталостной поврежденности  $N_i/N_R = 85$  %. Далее испытание прекращалось, и из различных участков образцов проводился отбор проб металла для исследования микроструктуры. В ЗТВ образцов были обнаружены усталостные трещины (на рисунке 5 в качестве примера приведен снимок трещины в ЗТВ, обнаруженной на одном из образцов). Это подтверждает предположение о причине роста амплитуды ОЭС при  $N_i/N_R$  более 83 %.

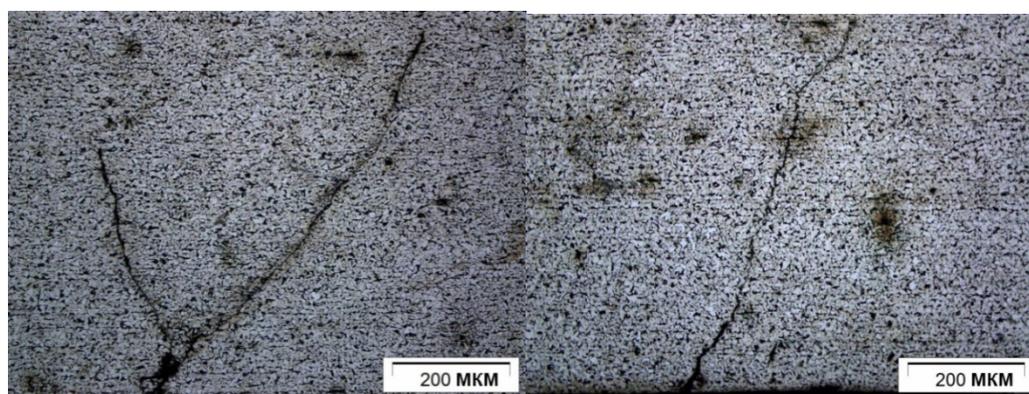
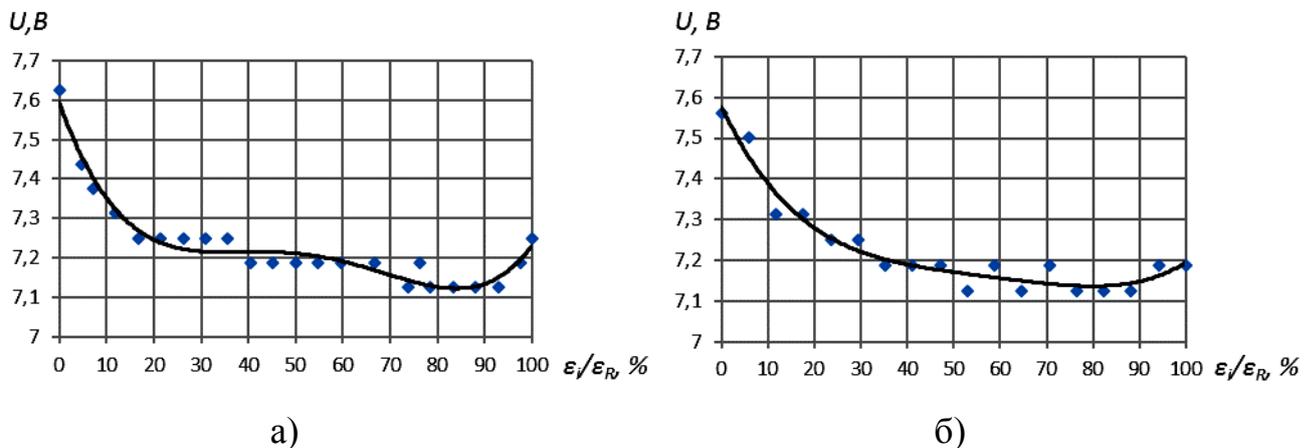


Рисунок 5 – Снимок усталостной трещины, обнаруженной в металле ЗТВ при  $N_i/N_R = 85$  %

Рост амплитуды ОЭС в ЗТВ при  $N_i/N_R$  от 83 до 100 % может быть объяснен эволюцией дислокационной структуры при образовании и росте трещины. Дислокации являются дефектами кристаллической структуры металла, которые снижают его электропроводность и магнитную проницаемость. Образование и рост трещины происходят за счет слияния дислокаций, что приводит к снижению

их плотности в металле. Поэтому, при росте трещины наблюдается увеличение электромагнитных свойств. Полученный результат показывает, что зависимость амплитуды ОЭС от  $N_i/N_R$  имеет схожий характер для основного металла, ЗТВ и сварного соединения. При этом в исходном состоянии амплитуда ОЭС для основного металла и ЗТВ имеет равные значения, и для ЗТВ ее зависимость от уровня накопленных повреждений аналогична зависимости, полученной для основного металла в работе Т. Р. Бикбулатова.

Следующим этапом стало исследование влияния пластической деформации, вызванной действием статической нагрузки, на амплитуду ОЭС. Поврежденность (уровень накопленных повреждений) в данном случае выражается как отношение текущего значения относительной деформации  $\varepsilon_i$  к ее максимальной величине, в момент разрушения материала  $\varepsilon_R$ . Зависимости амплитуды ОЭС ( $U$ ,  $B$ ) от поврежденности ( $\varepsilon_i/\varepsilon_R$ , %) при скоростях деформирования 0,2 и 1,0 мм/мин, усредненные по результатам испытаний двух групп по 3 образца соответственно, показаны на рисунке 6 (а, б).



а) – при скорости деформирования 0,2 мм/мин, б) – при скорости деформирования 1,0 мм/мин  
Рисунок 6 – Зависимость амплитуды ОЭС ( $U$ ,  $B$ ) от поврежденности при статическом растяжении

Амплитуда ОЭС, как и в предыдущем эксперименте, показала снижение в диапазоне  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$  от 20 до 83 % и небольшой рост при  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$  свыше 83 %. В отличие от предыдущей серии экспериментов, интенсивность снижения амплитуды ОЭС в диапазоне  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$  от 0 до 20 %, в среднем, в 6 раз выше, чем в диапазоне  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$  от 20 до

83 %. Такая особенность связана с наибольшей интенсивностью накопления пластических деформаций (максимальным значением отношения приращения деформации к приращению нагрузки) в этой стадии нагружения. Полученная зависимость является новым научным результатом.

Наличие у полученных зависимостей горизонтальных участков при увеличении поврежденности является следствием дискретного характера изменения дислокационной структуры металла при накоплении повреждений. «Стадийность» процессов движения дефектов структуры металла описана в работах В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева и ряда других авторов. Существует связь между плотностью дислокаций и электромагнитными свойствами металла, поэтому наличие горизонтальных участков зависимостей амплитуды ОЭС от поврежденности объясняется дискретным характером эволюции дислокационной структуры.

Выполненные эксперименты показывают, что при воздействии как циклических, так и статических нагрузок, амплитуда ОЭС снижается при накоплении повреждений. Максимальное значение исследуемой характеристики в обоих случаях наблюдается в исходном состоянии, минимальное при поврежденности 83%, которая соответствует началу устойчивого роста трещины. Результаты выполненных экспериментов показывают, что амплитуда ОЭС может быть использована как диагностический параметр для оценки технического состояния РВС с учетом изменений структуры материала, происходящих при длительной эксплуатации. В качестве критерия предельного состояния, как основного металла, так и ЗТВ, может использоваться значение амплитуды ОЭС, соответствующее максимальной допустимой поврежденности.

**Четвертая глава** посвящена анализу стандартизованного метода расчета ресурса РВС по критерию циклической прочности и разработке алгоритма прогнозирования по изменениям амплитуды ОЭС, измеряемой при диагностировании. Анализ действующей методики прогнозирования ресурса РВС позволил выявить ряд особенностей и недостатков:

- не учитывается наличие статической составляющей нагружения;

- отсутствует поправка для расчета ресурса РВС, рабочие параметры которых изменялись в процессе эксплуатации;
- предполагается постоянство значений механических свойств в течение всего срока эксплуатации;
- расчет амплитуды условных напряжений выполняется по упрощенной схеме, не учитывающей наличие конструктивных концентраторов напряжений;
- в расчете отсутствуют параметры, измеряемые в процессе эксплуатации.

Действующий метод прогнозирования ресурса основан на силовых критериях разрушения. В исследованиях Н.А. Махутова показано, что на практике в технических объектах возможно сочетание условий нагружения, при которых в локальных областях напряжения могут превышать предел текучести и вызывать появление пластических деформаций. Результаты многочисленных исследований напряженно-деформированного состояния (далее НДС) РВС показывают, что данное утверждение справедливо и для этих объектов.

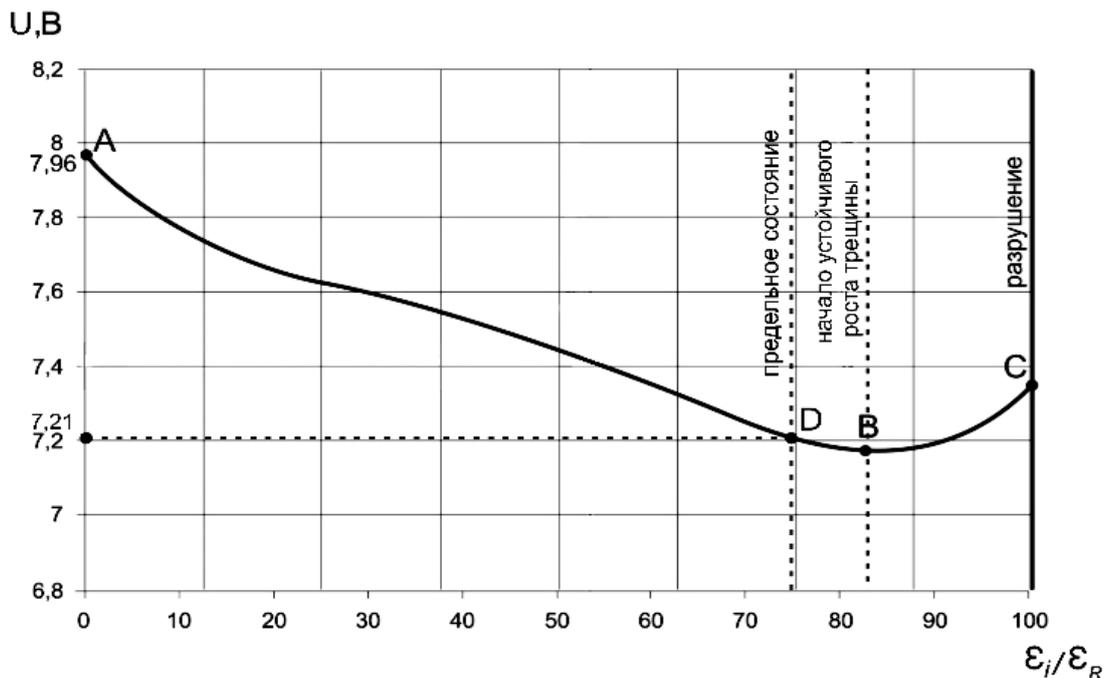
Наличие пластических деформаций в материале снижает его механические свойства и отрицательно сказывается на прочности и устойчивости конструкции в целом. В РВС они могут накапливаться в конструктивных концентраторах напряжений как от циклических нагрузок в малоцикловой области усталости, так и от длительного воздействия статических нагрузок. Способность металла совершать пластическую деформацию ограничена, и характеризуется величиной относительной деформации  $\varepsilon$ .

На практике пластическую деформацию в локальных областях РВС невозможно выявить и оценить прямыми измерениями. Но результаты выполненных экспериментов показали, что уровень накопленной пластической деформации может быть косвенно оценен по значениям амплитуды ОЭС.

Перед измерениями на реальном объекте, необходимо построить калибровочную зависимость амплитуды ОЭС ( $U, B$ ) от уровня накопленных пластических деформаций  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$ . Для этого необходимо выполнить механические испытания на усталость путем циклического нагружения образцов с постоянной амплитудой деформирования, определяемой с помощью механики малоцикловой

усталости. При такой схеме можно считать, что приращение пластической деформации в материале образцов будет происходить по линейному закону (закон Пальмгрена-Майнера). Материал образцов должен соответствовать материалу контролируемого объекта по марке материала и виду проката. Пример калибровочной зависимости приведен на рисунке 7.

В исходном состоянии (точка А), амплитуда ОЭС имеет максимальное значение. При накоплении пластических деформаций она снижается, достигая экстремума в начале устойчивого роста трещины (точка В), которое соответствует  $\varepsilon_i/\varepsilon_R = 83\%$ . Точкой С отмечен момент полного разрушения образца. Уровень накопленной пластической деформации  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$ , не вызывающей образования трещины, находится в диапазоне поврежденности 0 – 83%. Поэтому, область допустимых значений  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$  находится в интервале АВ.



Характерные точки: А – исходное состояние; В – уровень накопленных пластических деформаций, при котором начинается устойчивый рост трещины в металле; С – состояние, в котором происходит полное разрушение образца; D – значение амплитуды ОЭС, характеризующее предельное состояние (начало роста трещины)

Рисунок 7 – Пример калибровочной зависимости

Для обеспечения безопасности эксплуатации данный интервал должен быть уменьшен на некоторый коэффициент запаса (по  $\varepsilon_i/\varepsilon_R$ ). В данном случае, в

качестве примера, он принят равным 1,1 (уменьшенный интервал ограничен точкой D). Таким образом, диапазон допустимых значений амплитуды ОЭС ограничен отрезком AD, а значение амплитуды ОЭС, соответствующее предельному состоянию с учетом выбранного коэффициента запаса, будет соответствовать  $\varepsilon_i/\varepsilon_R = 75,5\%$ . Критерием предельного состояния является амплитуда ОЭС, соответствующая  $\varepsilon_i/\varepsilon_R = 75,5\%$ .

Техническое состояние РВС должно определяться по наименьшей измеренной амплитуде ОЭС  $U_{min}$ , путем сравнения ее значения с амплитудой ОЭС  $U_R$ , соответствующей предельному состоянию. В случае, если выполняется соотношение  $U_{min} \geq U_R$ , резервуар признается годным к эксплуатации (по данному критерию). В противном случае, элементы стенки, в которых  $U_{min}$  меньше  $U_R$ , должны быть заменены.

Прогнозирование ресурса РВС должно осуществляться на основании результатов измерений амплитуды ОЭС. Для повышения достоверности прогнозирования рекомендуется выполнять их при проведении технических освидетельствований (1 раз в 6 месяцев). Измерения амплитуды ОЭС должны выполняться в участках стенки РВС, определяемых картой контроля. Анализ результатов исследований НДС резервуаров показал, что карта контроля РВС-5000 должна включать: уторный шов ЗТВ, шов между первым и вторым поясами, вертикальные швы и ЗТВ, пересечения вертикальных и горизонтальных швов и ЗТВ, основной металл в нижней части контролируемых поясов и ЗТВ вблизи узлов приварки штуцеров (в четырех взаимно перпендикулярных направлениях). Также карта контроля должна включать контрольную точку, расчетное значение напряжений в которой минимально. Количество контролируемых поясов рекомендуется определять по расчетным значениям действующих кольцевых и осевых напряжений: в карту контроля должны включаться пояса, напряжения в которых превышают  $0,45 \cdot \sigma_t$  ( $\sigma_t$  – предел текучести).

Из примера калибровочной зависимости, приведенного на рисунке 7, видно, что некоторые значения амплитуды ОЭС могут принадлежать к двум интервалам: АВ и ВС. Поэтому, если  $U$  меньше  $U_C$ , необходимо выполнить дополнительную

проверку результатов, для того чтобы исключить ошибку при определении вида технического состояния. Для этого на карте контроля выбирается  $n$  точек, расчетные значения напряжений в которых возрастают от минимального, до максимального. Первой должна быть контрольная точка, назначенная при разработке карты контроля,  $n$ -я точка в области, где была измерена  $U_{min}$ , а общее количество точек  $n$  не менее 3. Далее, для выбранных  $n$  точек попарно вычисляются разности значений амплитуд ОЭС  $\Delta U_n$  в двух точках, взятых по возрастанию значения напряжений:

$$\Delta U_n = U_{n-1} - U_n \quad (1)$$

Условимся, что если для напряжений выполняется соотношение  $\sigma_n > \sigma_{n-1}$ , то для деформаций будет выполняться  $\varepsilon_n > \varepsilon_{n-1}$ . В таком случае, значение амплитуды  $U_n$  будет лежать в интервале АВ, если выполняется соотношение:

$$\Delta U_n < \Delta U_{n-1}, \quad (2)$$

в противном случае, значение амплитуды  $U_n$  будет принадлежать к интервалу ВС, и область, в которой оно было измерено, должна быть отбракована.

По результатам измерений амплитуды ОЭС, выполненных в течение всей эксплуатации объекта, должна быть построена зависимость минимальных измеренных значений амплитуды ОЭС ( $U$ ) от наработки ( $\tau$ ), пример которой приведен на рисунке 8.

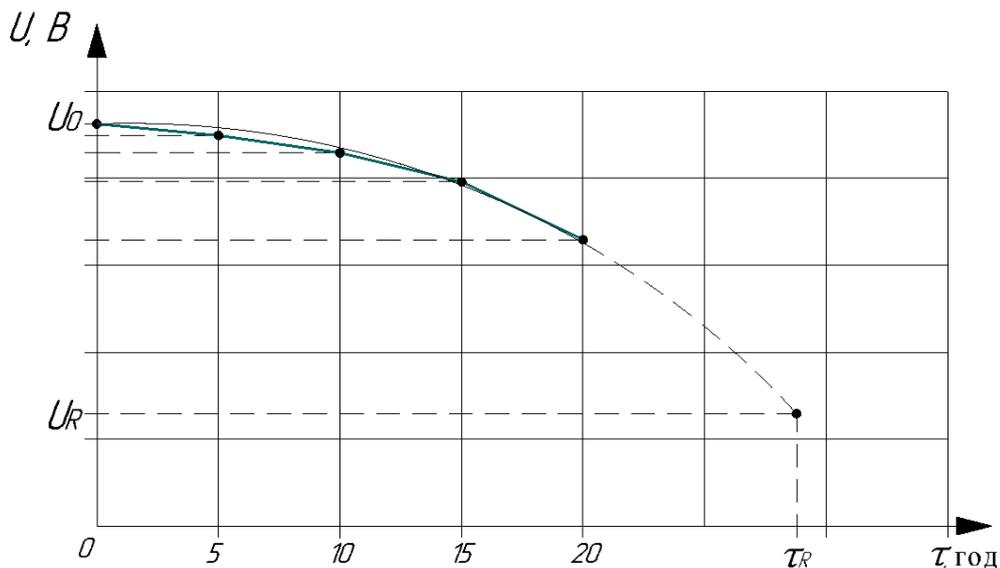


Рисунок 8 – Пример зависимости амплитуды ОЭС ( $U$ , В) от наработки

С помощью регрессионного анализа полученной зависимости определяется функция  $U(\tau)$ , характеризующая зависимость амплитуды ОЭС от времени эксплуатации, которая в наиболее общем случае будет являться полиномиальной:

$$U(\tau) = \bar{k}_n \cdot \tau^n + \bar{k}_{n-1} \cdot \tau^{n-1} + \dots + \bar{k}_1 \cdot \tau + \bar{k}_0 \cdot \tau^0 \quad (3)$$

где  $U$  – амплитуда ОЭС,  $B$ ;

$\bar{k}_{1...n}$  – усредненные коэффициенты интенсивности накопления пластических деформаций,  $B/200\delta^n$ .

Значение  $\bar{k}_{1...n}$  зависит от режима нагружения в процессе эксплуатации.

Полный ресурс  $\tau_R$  будет определяться временем, в течение которого амплитуда ОЭС достигнет предельного состояния. Он будет определяться решением относительно  $\tau$  уравнения:

$$U_R = \bar{k}_n \cdot \tau^n + \bar{k}_{n-1} \cdot \tau^{n-1} + \dots + \bar{k}_1 \cdot \tau + \bar{k}_0 \cdot \tau^0 \quad (4)$$

где  $U_R$  – амплитуда ОЭС, соответствующая предельному состоянию,  $B$ .

Остаточный ресурс будет вычисляться как разность значений полной величины ресурса и текущей наработки:

$$\tau_{ост} = \tau_R - \tau_i \quad (5)$$

где  $\tau_R$  – полная величина ресурса резервуара, год.

$\tau_i$  – текущее значение наработки.

Если наработка резервуара до следующего очередного диагностирования  $\tau_{i+1}$  будет превышать расчетное значение остаточного ресурса  $\tau_{ост}$ , необходимо выполнить ремонт наиболее поврежденных участков или изменить режим эксплуатации резервуара в этот период.

В работе приведен пример расчета остаточного ресурса РВС-5000, выполненного по предлагаемой методике и по стандартной методике. Полученный результат составляет 6,9 лет, в то время как остаточный ресурс РВС-5000, рассчитанный по стандартной методике (по критерию циклической прочности) составил 162 года. Приведенный пример показывает принципиальное различие в подходах предлагаемого и стандартизованного алгоритма к оценке остаточного ресурса. Предложенный в работе алгоритм прогнозирования по изменениям амплитуды ОЭС, которые зависят от уровня накопленных

пластических деформаций, определяет ресурс в зависимости от технического состояния, определяемого периодически путем выполнения натурного обследования. Стандартный порядок расчета ресурса РВС по критерию циклической прочности не учитывает техническое состояние объекта.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1 Разработан алгоритм прогнозирования остаточного ресурса резервуаров вертикальных стальных, в основе которого принят деформационный критерий разрушения. Деформации накапливаются от действия циклических и статических нагрузок и вызывают изменения электромагнитных свойств материала. В отличие от механических напряжений, деформации могут быть определены путем прямых измерений.

2 Эксперименты, выполненные на ферромагнитных сталях (феррито-перлитные стали), показали, что амплитуда отклика электрического сигнала, измеряемая при взаимодействии вихретокового преобразователя со сталью, коррелирует с изменением уровня накопленных пластических деформаций. Это позволяет определить его количественно неразрушающим методом.

3 Установлено, что зависимость между упругопластическими деформациями и амплитудой отклика электрического сигнала существует как для основного металла, так и для сварных соединений. В сварном соединении листовой стали 09Г2С при накоплении пластических деформаций от воздействия циклических нагрузок в малоцикловой области усталости амплитуда отклика электрического сигнала изменяется в среднем от 7,96 до 7,16 В при изменении поврежденности от 0 до 83 %. Статистическая обработка массива полученных результатов измерений показала, что относительная погрешность измерений составила 1,05 %, что позволяет рекомендовать метод для практического использования.

4 Проведены эксперименты по изучению зависимости амплитуды отклика электрического сигнала от уровня накопленных пластических деформаций при статическом одноосном растяжении с различными скоростями деформирования (0,2; 0,4; 0,5; 1,0; 2,0 мм/мин) на примере стали 20. Изменения исследуемого

параметра происходили в диапазоне от 7,62 до 7,12 В при изменении поврежденности от 0 до 83 %. Статистически достоверные результаты измерений показывают, что зависимость имеет два характерных участка с отличающейся в 6 раз интенсивностью снижения значения амплитуды отклика электрического сигнала. Этот результат показывает, что измерения электромагнитных параметров позволяют выполнить оценку поврежденности стенки резервуара и выявить концентраторы пластических деформаций в измеряемой зоне.

5 При реализации предлагаемого алгоритма прогнозирования остаточного ресурса резервуаров критерием предельного состояния является уровень накопленных пластических деформаций в материале стенки сооружения, при значении которого 75,5 % (соответствующем амплитуде отклика электрического сигнала 7,21 В) дальнейшая эксплуатация объекта недопустима.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **- публикации в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК:**

1 *Рябов, А.А.* Оценка уровня накопленных повреждений металла сварных соединений и околошовной зоны аппаратов оболочкового типа электромагнитным методом / Рябов А.А., Кузеев М.И., Наумкин Е.А., И.Р. Кузеев И.Р., Тляшев И.Р. // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т.15. – №2. – С.166-173.

2 *Рябов, А.А.* Оценка поврежденности материалов по измерениям электромагнитных параметров поверхностной зоны / Рябов А.А., Терехов А.П. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – №2 (104). – С. 128-139.

3 *Рябов, А.А.* Прогнозирование остаточного ресурса оборудования нефтегазопереработки с применением вихретокового контроля (на примере вертикального стального резервуара) / Рябов А.А., Кузеев И.Р. // Нефтегазовое дело. – 2016. – №4. – Т.14. – С. 130-136.

4 *Рябов, А.А.* Применение вихретокового неразрушающего контроля для оценки уровня накопленных пластических деформаций на примере стали 20 / Рябов А.А., Кузеев И.Р. // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т.15. – №1. – С.186-191.

5 *Рябов, А.А.* Анализ стандартной методики прогнозирования ресурса вертикальных стальных резервуаров по критерию циклической прочности / Рябов А.А., Кузеев И.Р. // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т.15. – №4. – С. 150-156.

### **- публикации в других изданиях:**

6 *Кузеев, А.М.* Ранняя диагностика разрушения металлов по отклику электрического сигнала / Кузеев А.М., Гафарова В.А., Рябов А.А. // В сборнике: Экспертиза промышленной безопасности, техническое диагностирование, разрушающий и неразрушающий контроль на объектах ТЭК. Уфа: «Нефтегазовое

дело». – 2015. – С. – 106-109.

7 *Ситдиков, А.И.* Определение предельного состояния материала по результатам измерения параметров отклика электрического сигнала / Ситдиков А.И., Рябов А.А., Наумкин Е.А. // В сборнике материалов 66-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа, УГНТУ. – 2015. – С. 225-226.

8 *Рябов, А.А.* Применение измерений электромагнитных параметров поверхности для оценки поврежденности / Рябов А.А., Коновалов В.В. // В сборнике материалов 67-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа, УГНТУ. – 2016. – С. – 274-275.

9 *Рябов, А.А.* Влияние механических напряжений материала на амплитуду отклика электрического сигнала, определенное на примере колонного аппарата / Рябов А.А., Коновалов В.В. // В сборнике: Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – Уфа. – 2015. – №6. – С. 129-131.

10 *Рябов, А.А.* Влияние механических напряжений материала на значения параметров отклика электрического сигнала основного металла и сварных соединений / Рябов А.А., Коновалов В.В., Наумкин Е.А. // Сварка и контроль – 2016: сборник трудов научно-технической конференции. – Уфа, УГНТУ. – 2016. – С. 86-88.

11 *Рябов, А.А.* Обзор существующих методов оценки остаточного ресурса оборудования нефтегазопереработки / Рябов А.А. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2016. – №1. – С. 198-220.

12 *Рябов, А.А.* Оценка поврежденности основного металла и околошовных зон путевого подогревателя с применением вихретокового контроля / Рябов А.А., Кунин Р.С. // Сварка и контроль – 2016: сборник трудов научно-технической конференции. – Уфа, УГНТУ. – 2016. – С. 83-85.

13 *Рябов, А.А.* Применение неразрушающего контроля вихретоковыми методами в современной промышленности / Рябов А.А., Кузеев И.Р. // В сборнике: Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – Уфа. – 2015. – С. 112-113.

14 *Рябов, А.А.* Измерение температуры и электрических характеристик в процессе статического одноосного растяжения стальных образцов при различных скоростях нагружения / Рябов А.А., Гафарова В.А., Хайбуллин И.Р., Кузеев А.М., Худойбердиев Х.Х., Греб А.В. // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – 2016. – №2 (8). – С. 18-21.

15 *Рубцов, А.В.* Оценка технического состояния оборудования [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие по выполнению практических работ / Рубцов А.В., Рябов А.А., Ковшова Ю.С. – Уфа, УГНТУ. – 2012.

16 *Пивоваров, В.Ю.* Совершенствование средств и методологии вихретокового контроля для применения в диагностике сосудов / Пивоваров В.Ю., Валиев А.С., Рябов А.А., Терехов А.П. // Блок переработки и коммерции ПАО АНК «Башнефть» «Башнефть-Уфанефтехим»: сборник тезисов научно-технической конференции. – Уфа, ПАО АНК «Башнефть». – 2016. – С. 100-101.