

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ухтинский государственный технический университет»

На правах рукописи



БОРЕЙКО ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НЕТЕПЛОВЫМИ ПАССИВНЫМИ МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2015

Диссертация выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет».

Научный руководитель:

Быков Игорь Юрьевич, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, Профессиональный инженер России, Заслуженный работник Республики Коми, профессор кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

Официальные оппоненты:

Александров Юрий Викторович, доктор технических наук, директор по капитальному ремонту ООО «СТРОЙГАЗМОНТАЖ», г. Москва.

Михалев Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, ученый секретарь АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород.

Ведущая организация:

Филиал ООО «Научно–исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта.

Защита состоится «30» октября 2015 года в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», а также на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука→Диссертации».

Автореферат разослан «29» сентября 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М. М. Бердник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Проведенный анализ аварийности в нефтегазовом комплексе (по официальным данным Ростехнадзора РФ) показал, что в 2014 году на объектах нефтегазового сектора зафиксирован рост количества аварий, сопровождающихся материальным ущербом и гибелью людей. Такое состояние дел предопределяет необходимость совершенствования оценки технического состояния нефтегазового промышленного оборудования, что обеспечивается на современном этапе научно-технического развития, прежде всего методами неразрушающего контроля (НК).

Известно, что зарождение аварийного разрушения конструкций возникает с формирования зон концентрации напряжений (ЗКН), которые и определяют собой текущее состояние ресурса работающих конструкций. Для прогноза выработки этого ресурса и обеспечения безопасности работы конструкций возникает необходимость в постоянном количественном контроле уровня концентрации напряжений выявленных зон. Для этой цели вполне пригодны пассивные методы диагностики, в частности нетепловой природы, такие как акустическая эмиссия (АЭ) и магнитная память металла (МПМ), чувствительность которых значительно эффективнее традиционных активных методов НК. Между тем, достоверность пассивных методов, несмотря на их регламентированность государственными стандартами, нередко подвергается скептицизму, поскольку результаты измерений могут носить неоднозначный характер и приводить к ошибочным диагностическим оценкам. Однако механизм этих методов порождается единым физическим явлением – деформационной перестройкой структуры металлов под воздействием внешних нагрузок и содержит единый массив информации, совместная интерпретация которой пока остается изученной недостаточно. Исследование этого взаимодействия является актуальной задачей, поскольку способствует повышению эффективности оценки технического состояния нефтегазовых промышленных конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

Цель работы.

Повышение эффективности оценки технического состояния нефтегазо-

промышленных конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

Основные задачи исследований.

1. Анализ уровня оценки технического состояния нефтегазопромышленных конструкций пассивными методами диагностики.

2. Формирование комплекса методик для проведения исследований;

3. Моделирование напряженно–деформированного состояния исследуемых конструкций.

4. Лабораторно–экспериментальные исследования параметров акустической эмиссии и магнитной памяти металла.

5. Испытания нефтегазопромышленных конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

6. Разработка методики оценки технического состояния нефтегазопромышленных конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

Научная новизна предложенных методов и решений.

1. Установлено, что вероятность выявления развивающихся дефектов диаметром 2 мм и менее при экспериментальных исследованиях элементов нефтегазопромышленных конструкций методом АЭ составляет не менее 0,6.

2. Установлена линейная зависимость магнитного коэффициента $K_{\text{пр.маг.}}$ запаса предельного состояния металла, характеризующего отношение предельного показателя интенсивности изменения магнитного поля $m_{\text{пр}}$ к его измеренному фактическому значению $m_{\text{ф}}$ ($K_{\text{пр.маг.}} = m_{\text{пр}} / m_{\text{ф}}$) от фактической средней амплитуды $A_{\text{ср.ф.}}$ акустических сигналов [$K_{\text{пр.маг.}} = f(A_{\text{ср.ф.}})$], порождаемых перестройкой структурных связей под действием внешних деформационных сил.

3. Найден аналитический метод определения предельного значения средней амплитуды ($A_{\text{ср.пр.}}$) сигналов АЭ, характеризующих состояние предразрушения объекта диагностирования.

4. Найдена зависимость для оценки остаточного ресурса зон концентрации напряжений по магнитным параметрам ($m_{\text{ф}}$ и $m_{\text{пр}}$) метода МПМ и по соотношению амплитуд ($A_{\text{ср.ф.}}$ и $A_{\text{пр.}}$) источников АЭ в этих зонах.

Основные защищаемые положения.

1. Сформированный научно–методологический комплекс исследований, обеспечивающий возможность оценки технического состояния нефтегазопро-

мысловых конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

2. Применение метода имитационного компьютерного моделирования НДС исследуемых объектов, позволяющее обосновать рациональные исходные данные для проведения исследований.

3. Созданная методика лабораторных исследований, позволяющая определить чувствительность метода АЭ при обнаружении развивающихся дефектов различного размера.

4. Выявленная зависимость параметра фактической средней амплитуды источника АЭ от градиента напряженности собственного магнитного поля рассеяния в ЗКН, позволяющая обосновать критерий оценки остаточного ресурса объекта диагностирования по совместным параметрам методов АЭ и МПМ.

5. Разработанная методика оценки технического состояния обеспечивает повышение эффективности прогноза остаточного ресурса нефтегазопромысловых конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

Практическая значимость.

1. Сформирован и обоснован комплекс стандартных методик, обеспечивающий полноту проведения исследований по оценке технического состояния нефтегазопромысловых конструкций пассивными методами диагностики.

2. Апробирован новый алгоритм оценки технического состояния нефтегазопромысловых конструкций нетепловыми пассивными методами неразрушающей диагностики и разработана методика их применения.

3. На основе взаимозависимости методов АЭ и МПМ обоснована методика оценки остаточного ресурса нефтегазопромысловых конструкций по совместным параметрам используемых методов.

4. Разработана методика оценки технического состояния нефтегазопромысловых конструкций пассивными методами неразрушающей диагностики, которая согласована в экспертных организациях ООО СРТЦ «ДИТЭКС», ООО «ЭкспертСтрой», ООО НПК «Техресурс» и ООО «Техконтроль».

5. По результатам проделанной теоретической и практической научной работы издано учебное пособие «Диагностика нефтегазопромыслового оборудования методами неразрушающего контроля» для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлению подготовки

магистратуры «Нефтегазовое дело». На пособие получен гриф УМО НГО.

6. Издана научная монография «Методы и методики неразрушающего контроля» в зарубежном издании LAMBERT Academic Publishing.

Достоверность результатов.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, базируются на экспериментальных данных, полученных с применением современных теоретических и экспериментальных методов исследований, имитационного моделирования с использованием современных программных вычислительных комплексов и измерительной техники, научно-исследовательского оборудования и компьютерного обеспечения.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

✓ IX–XII Межрегиональных научно-практических конференциях «Современные проблемы нефтепромысловой и буровой механики» (УГТУ, г. Ухта, 5 февраля 2011 г., 4 февраля 2012 г., 9 февраля 2013 г., 8 февраля 2014 г.);

✓ XII–XVI Международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех–2011, 2012, 2013, 2014, 2015» (УГТУ, г. Ухта, 16–18 марта 2011 г., 21–23 марта 2012 г., 20–22 марта 2013 г., 26–28 марта 2014 г., 25–27 марта 2015 г.);

✓ Научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников УГТУ (УГТУ, г. Ухта, 20–23 сентября 2011 г., 17–20 апреля 2012 г., 16–19 апреля 2013 г., 22–25 апреля 2014 г., 21–24 апреля 2015 г.);

✓ II Всероссийской (XVII) молодежной научной конференции «Молодежь и наука на Севере» при Коми научном центре УрО РАН (УГТУ, г. Ухта, 22–26 апреля 2013 г.);

✓ IV Республиканском молодежном инновационном конвенте «Молодежь – будущему Республики Коми» (УГТУ, г. Ухта, 17–18 апреля 2014 г.);

✓ XV научно-технической конференции молодежи АО «Транснефть–Север» (АО «Транснефть–Север», г. Ухта, 10–12 декабря 2014 г.).

Публикации.

Основные результаты исследований опубликованы в 17 работах, в том

числе: 8 – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК Минобрнауки России; 1 – в монографии; 1 – в учебном пособии с грифом УМО НГО; 1 – в методике, согласованной и утвержденной экспертными организациями и 6 – в материалах научных конференций.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 162 наименований, 13 приложений, содержит 184 стр. текста, включая 78 рисунков и 42 таблицы. Общий объем работы с приложениями составляет 222 стр.

Благодарности.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность своему научному руководителю – доктору технических наук, профессору, академику РАЕН Быкову Игорю Юрьевичу за внимательное отношение и неоценимую помощь на всех этапах работы над диссертацией, а также сотрудникам кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» УГТУ за консультации и ценные рекомендации в процессе подготовки диссертации.

Автор благодарен и признателен ректору УГТУ, доктору технических наук, профессору, академику РАЕН Цхадая Николаю Денисовичу за создание оптимальных условий для проведения исследований и написания диссертации.

Автор выражает благодарность коллективу испытательной лаборатории строительных материалов и грунтов (ИЛСМиГ) ФГБОУ ВПО УГТУ за содействие в проведении лабораторных исследований.

Автор глубоко признателен коллективу ООО «ЭкспертСтрой» в лице директора Смирнова А. Л., а также организациям ООО КРС «Евразия» и Вуктыльское ГПУ ООО «Газпром добыча Краснодар» за содействие в проведении опытно–промышленных испытаний действующего оборудования.

Основное содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и цель диссертационной работы.

В первой главе проанализирован уровень оценки технического состояния нефтегазопромысловых конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

Анализ опыта применения нетепловых пассивных методов диагностики в нефтегазовой промышленности, изложенного в трудах таких ученых и специалистов как А. А. Дубов, В. В. Ключев, Е. А. Богданов, Н. А. Семашко, В. Т. Власов, Р. Tscheliesnig, А. Pollock и др. показывает, что пассивные методы неразрушающей диагностики, в частности нетепловой природы – акустической эмиссии (АЭ) и магнитной памяти металла (МПМ), прерогативой которых является констатация зарождения и развития локальных зон концентрации напряжений (ЗКН), обеспечивают возможность регулярного контроля надлежащего технического состояния опасных производственных объектов. Однако установлено, что оценка опасности ЗКН пока несовершенна, а взаимосвязь параметров методов АЭ и МПМ, основанных на деформационной перестройке структуры металла, изучена недостаточно.

Установлено, что явления АЭ и МПМ имеют единую физическую природу, основанную на изменении структурно–механического состояния атомной решетки металла под воздействием внешних деформационных сил, что сопровождается импульсным высвобождением внутренней энергии в виде акустических сигналов и формированием зон остаточной намагниченности, представляющих собой признаки зарождающихся или развивающихся структурных дефектов, уровень опасности которых определяется количественной взаимосвязью этих энергетических явлений. При этом показано, что уровень внутренней энергетики при перестройке структуры материала под воздействием внешних деформационных сил оценивается параметром амплитуды АЭ сигнала (A , дБ), порождаемого нарушением атомных связей кристалла, и коэффициентом интенсивности остаточных напряжений ($K_{ин.м.}$, A/m^2), возникающих в результате формирования собственного магнитного поля рассеяния (СМПП) в точке зарождения акустической эмиссии.

Анализ действующих нормативных документов показал поступательное развитие алгоритмических подходов по совершенствованию порядка и приемов диагностирования с использованием нетепловых пассивных методов диагностики. Однако существующие алгоритмы до настоящего времени не учитывают натуральных реалий при постановке компьютерного моделирования и синергетики прогнозирования ЗКН и остаточного ресурса при совместном и последователь-

ном применении методов АЭ и МПМ для обследования объекта диагностирования. Механизм взаимодействия этих методов остается до настоящего времени изученным недостаточно, что предопределяет актуальность проведения исследований в области повышения эффективности оценки технического состояния нефтегазопромысловых конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики.

С учетом результатов проведенного анализа предлагается усовершенствованный алгоритм методики технического диагностирования для оценки НДС промышленных конструкций и их остаточного ресурса в условиях воздействия эксплуатационных нагрузок. Предлагаемый алгоритм показан на рисунке 1.

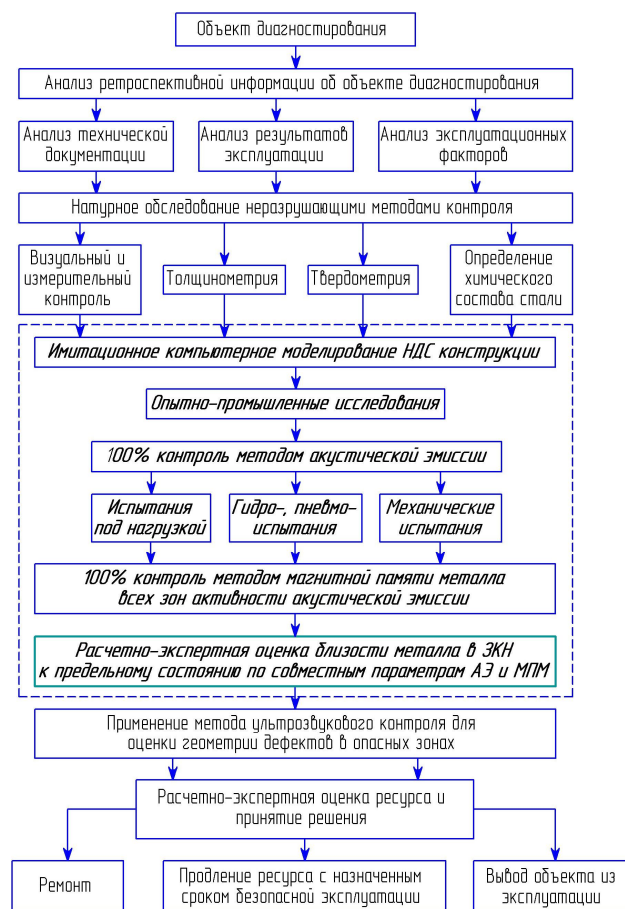


Рисунок 1 – Усовершенствованный алгоритм оценки технического состояния по результатам диагностики нетепловыми пассивными методами диагностики

В предложенном алгоритме учтены достоинства и недостатки существующих методик. В частности, алгоритм включает в себя обязательное применение имитационного компьютерного моделирования, последовательное применение методов АЭ и МПМ, а также расчетно–экспертную оценку близости ЗКН к предельному состоянию по совместным параметрам этих методов.

Во второй главе сформирован и обоснован комплекс методик для оценки

технического состояния нефтегазопромысловых конструкций.

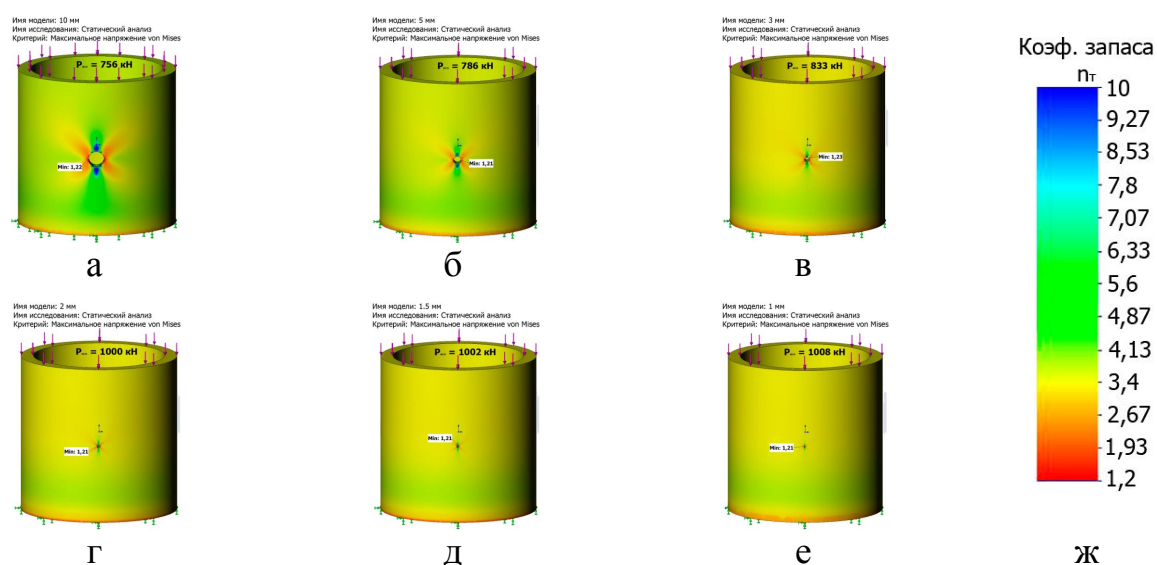
Сформированный научно–методический комплекс включает методику визуального и измерительного контроля для осмотра поверхности объекта исследования с целью выявления видимых дефектов и отклонений от нормы, которые должны быть учтены при проведении испытаний или эксплуатации; методику определения толщины стенки элементов объекта исследования для оценки её соответствия заданным требованиям нормативно–технической документации; методику определения твердости материала объекта исследования для первичной оценки фактических механических характеристик с целью установления соответствия качества материалов требованиям ГОСТ; методику определения элементного состава материала для идентификации заведомо неизвестной марки стали, из которой изготовлены элементы объекта; методику определения прочностных характеристик металла в соответствии с ГОСТ 22761–77 по результатам твердомерии; методику АЭ испытаний для определения координат и мониторинга развития источников АЭ; методику оценки напряженного состояния методом МПМ для количественной оценки уровня остаточных напряжений в зонах активности АЭ с целью определения предельного состояния металла этих зон. Научно обоснованная достоверность результатов измерений, а также репрезентативность получаемых данных на этапе планирования эксперимента обеспечиваются методикой обработки результатов исследований статистическими методами.

В третьей главе представлены результаты имитационного компьютерного моделирования НДС объектов исследований, основной задачей которого является оценка безопасности последующего проведения статических испытаний конструкций на основе фактических измерений толщин стенок и механических характеристик материалов, а также для определения рациональных исходных параметров (нагрузки, давления и т. д.), необходимых для проведения испытаний.

Процесс моделирования объектов осуществляется в системе КОМПАС–3D v15, исследование НДС компьютерных моделей осуществляется средствами специализированных расчетных модулей, реализующих метод конечных элементов (МКЭ) – APM FEM и SolidWorks Simulation. Объектами моделирования

послужили трубные стальные образцы с отверстиями различного диаметра, симулирующими сквозные дефекты в изделии; решетчатая конструкция мачты агрегата АПРС–40 и оболочковая конструкция газоконденсатной разделительной емкости.

Задачей моделирования и конечно–элементного анализа трубных образцов, используемых в дальнейших экспериментальных исследованиях, является определение начальных испытательных нагрузок эксперимента. Эти нагрузки определяются методом итерации до значения, при котором превышает запас прочности по текучести материала примерно в 1,2 раза (запас прочности в 20 %). Результаты моделирования НДС образцов представлены на рисунке 2 в виде цветных компьютерных моделей, где цвет характеризует распределение коэффициента запаса прочности $n_{\text{ст}}$ по объему модели образца в соответствии с цветом шкалы.



а...е – твердотельные компьютерные модели образцов; ж – шкала
Рисунок 2 – Карты распределения коэффициента запаса прочности по текучести для цилиндрических образцов с отверстиями

На основе полученных результатов построена зависимость предельной нагрузки эксперимента от диаметра отверстия в образце (рисунок 3).

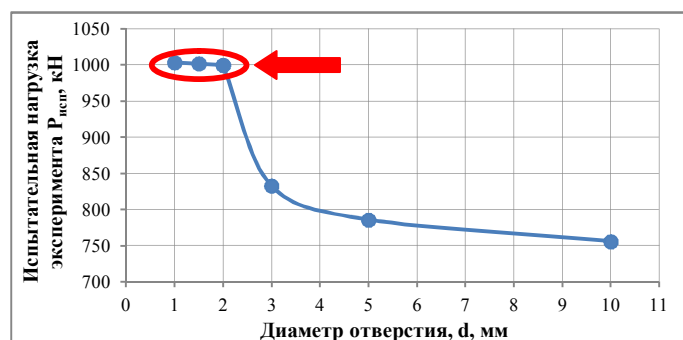
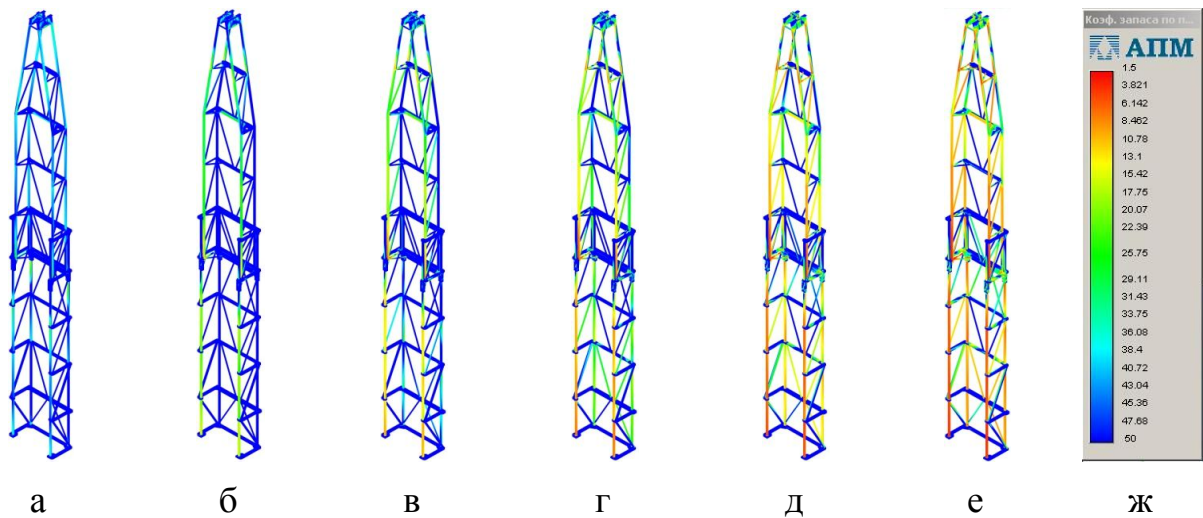


Рисунок 3 – Зависимость изменения нагрузки от диаметра отверстия в образце

Как видно, по результатам моделирования эта нагрузка составила 1000 кН для образцов с заданными сквозными дефектами диаметром ≤ 2 мм, а в диапазоне 2...5 мм значение нагрузки практически скачкообразно уменьшается более чем на 20 % (до 786 кН) и далее в диапазоне до 10 мм изменяется незначительно. Такое деформационное поведение может быть объяснено влиянием масштабного фактора, связанного с уменьшением чувствительности к нагрузке.

Задачами моделирования НДС решетчатой конструкции мачты агрегата АПРС–40 является выявление наиболее опасных ЗКН, которые (учитывая идеализированную геометрию модели) в реальной конструкции могут представлять опасность и нуждаются в особом внимании, а также оценка несущей способности конструкции с учетом текущей фактической толщины стенки несущих ног. В качестве результатов анализа рассматривается карта распределения коэффициента запаса прочности $n_{\text{ст}}$ по телу конструкции. На рисунке 4 представлен пример такой карты при изменении угла наклона мачты к оси скважины от 0° до 12° и допустимой паспортной нагрузке $P_{\text{доп}} = 400$ кН.



а – угол 0° ; б – угол 2° ; в – угол 4° ; г – угол 6° ; д – угол 9° ; е – угол 12° ; ж – шкала
Рисунок 4 – Карта распределения коэффициента запаса прочности по пределу текучести материала по телу конструкции при нагрузке $P_{\text{доп}} = 400$ кН

На рисунке 5 представлен совмещенный график зависимости коэффициента запаса $n_{\text{ст}}$ от возрастающей рабочей нагрузки при различных углах наклона. Общая тенденция изменения коэффициента запаса $n_{\text{ст}}$ с увеличением угла наклона мачты сопровождается увеличением уровня концентрации напряжений в основании передних несущих ног выдвинутой секции, что следует учитывать при эксплуатации подъемника.

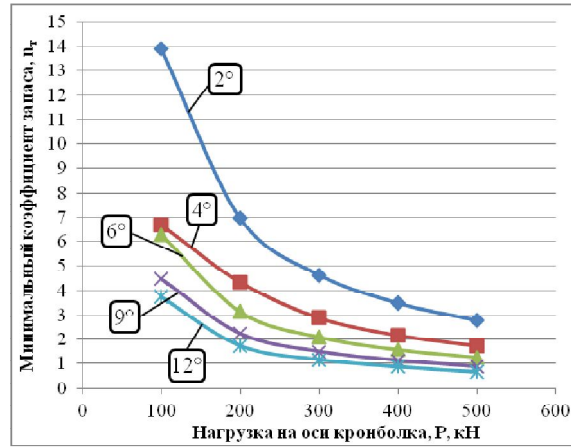


Рисунок 5 – Сравнительный график зависимости коэффициента запаса $n_{ст}$ от возрастающей рабочей нагрузки при различных углах наклона мачты

В результате моделирования НДС установлено, что испытания безопасно производить при угле наклона мачты к оси скважины не более 6° .

Следующий объект исследований – оболочковая конструкция газоконденсатной разделительной емкости на рабочее давление $P_{раб} = 6$ МПа. Учитывая текущее техническое состояние объекта, осложненное утончением металла обечайки, задачей моделирования является оценка возможности проведения гидравлических испытаний с паспортным испытательным давлением $P_{исп} = 7,5$ МПа, либо установление максимально допустимого давления, при котором обеспечивается запас прочности $n_{ст}$ не менее 1,2 (20 %).

В результате анализа установлено, что статические испытания рекомендуется производить при максимальном испытательном давлении не более 7,0 МПа. В этом случае обеспечивается запас прочности $n_{ст} = 1,19$ (рисунок 6).

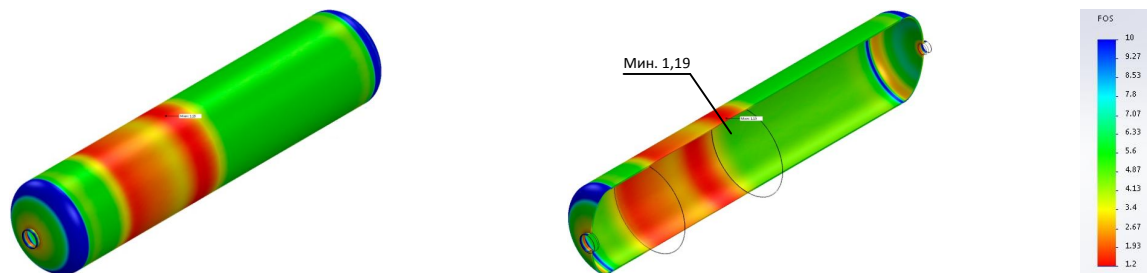


Рисунок 6 – Ката распределения коэффициента запаса $n_{ст}$ при $P = 7,0$ МПа

В четвертой главе представлена разработанная методика проведения лабораторно-экспериментальных исследований, позволяющая определить чувствительность метода АЭ, а так же установить взаимосвязь параметров сигналов АЭ и собственных магнитных полей рассеяния (СМПР), что является основной задачей работы. Испытания заключаются в проведении статического осевого сжатия стальных трубных образцов с искусственными дефектами в виде отвер-

стей различных диаметров с одновременной фиксацией параметров сигналов АЭ и магнитных полей рассеяния методом МПМ.

Чувствительность метода АЭ определяли как статистическую вероятность обнаружения дефектов различных размеров через отношение количества испытаний, в которых дефект был зафиксирован, к общему количеству испытаний для данной партии образцов:

$$P = \frac{N_{\text{заф}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{заф}}$ – количество испытаний, в которых дефект был зафиксирован АЭ аппаратурой, шт; $N_{\text{общ}}$ – общее количество испытаний, шт.

По полученным данным построен график чувствительности метода АЭ, который для сравнения совмещен с ранее известными графиками чувствительности активных методов НК (рисунок 7).

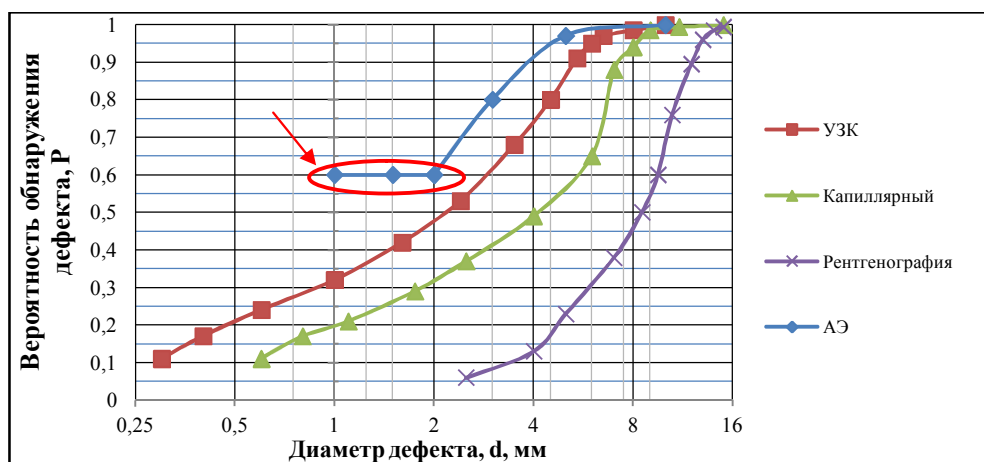


Рисунок 7 – Сравнительный график чувствительности традиционных методов неразрушающего контроля и метода АЭ

Из графика видно, что метод АЭ по чувствительности превосходит традиционные методы НК, причем в диапазоне размеров дефектов 1→1,5→2 мм чувствительность остается постоянной и оценивается вероятностью $P = 0,6$, а далее – в диапазоне размеров от 2 до 10 мм – нелинейно возрастает от 0,6 до 0,999.

В процессе испытаний фиксируются параметры АЭ–сигналов и СМПР, измеряемых по методу МПМ. Произведенные измерения позволили установить взаимосвязь между параметром изменения среднего градиента напряженности СМПР ($\Delta K_{\text{ин.м.}}$) и средней амплитудой АЭ–сигналов ($A_{\text{ср}}$) в зоне сквозных отверстий испытываемых образцов за цикл их нагружения. Указанные зависимости представлены на рисунке 8.

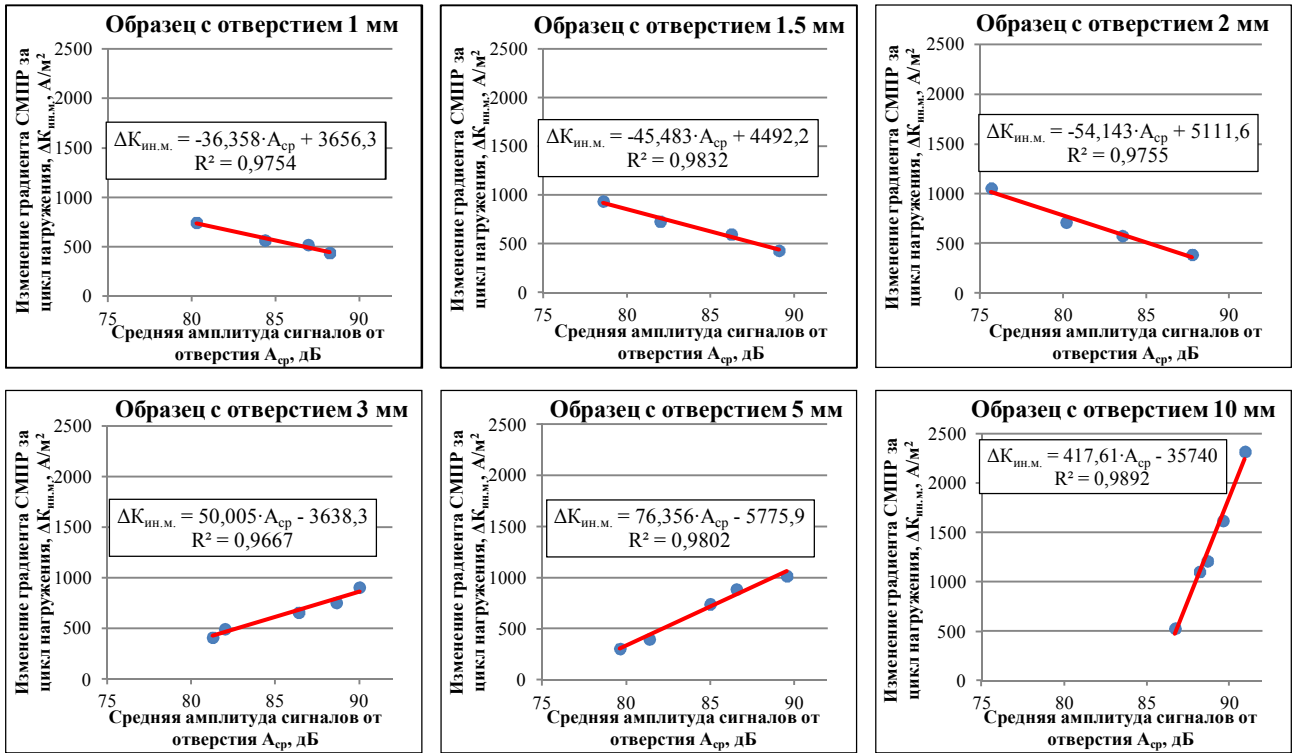


Рисунок 8 – Зависимости величины изменения среднего градиента СМПР $\Delta K_{ин.м.}$ за цикл нагружения от средней амплитуды $A_{ср}$ лоцированных сигналов

Из установленных взаимосвязей между градиентом напряженности СМПР и средней амплитудой АЭ выявляется возможность совместного использования этих двух методов, что позволяет расширить информационное поле для оценки технического состояния реальных нефтегазовых конструкций.

Между тем, зависимости для образцов с отверстиями ≤ 2 мм и отверстиями > 2 мм по углам наклона имеют разноквадрантное расположение, при этом с увеличением диаметра отверстия от 1 до 10 мм углы наклона зависимостей изменяются последовательно, что показано на рисунке 9.

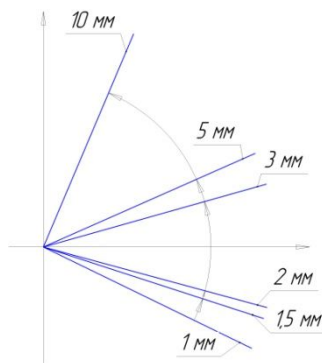


Рисунок 9 – Иллюстрация изменения угла наклона зависимостей $\Delta K_{ин.м.} - A_{ср}$

Разнонаправленность полученных зависимостей вызывала сомнения, поэтому это явление было дополнительно проанализировано в диссертации, что позволило подтвердить факт существования переходной зоны, которая показывает

различия в поведении материала в диапазонах больших и малых искусственных дефектов. Однако физика этого явления пока не объяснена, что является предметом будущих исследований.

В пятой главе представлены результаты опытно–промышленной апробации предложенного алгоритма для оценки технического состояния решетчатых конструкций на примере исследований мачты агрегата АПРС–40 и оболочковой конструкции на примере газоконденсатной разделительной емкости. Исследования заключались в статических АЭ–испытаниях для определения и классификации по амплитудному критерию источников АЭ, которые затем сканировались методом МПМ. Известная методика профессора А. А. Дубова, позволяет определить фактический (m_{ϕ}) и предельный ($m_{\text{пр}}$) магнитные показатели деформационной способности металла, а также аналогичные параметры, учитывающие механические свойства металла (b_{ϕ} и $b_{\text{пр}}$), которые используются для прогнозирования остаточного ресурса ЗКН. При этом отношение параметров $b_{\text{пр}}/b_{\phi}$ можно представить как коэффициент запаса $K_{\text{пр.маг.}}$ деформационной способности материала по предельному магнитному состоянию металла в зонах выявленных источников АЭ. Тогда из известного положения теории подобия:

$$\frac{T_{\text{пр}}}{T_{\phi}} = \frac{b_{\text{пр}}}{b_{\phi}} = K_{\text{пр.маг.}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{пр}}$ – время развития структурного дефекта до предельного состояния, годы; T_{ϕ} – фактическое время деформационного воздействия на структурный дефект между последними определениями параметров $b_{\text{пр}}$ и b_{ϕ} , годы.

При этом остаточный ресурс $T_{\text{ост}}$ до разрушения дефекта определится как разность между значениями $T_{\text{пр}}$ и T_{ϕ} . С учетом (2) и простых преобразований это условие может быть представлено в виде:

$$T_{\text{ост}} = T_{\phi} \cdot (K_{\text{пр.маг.}} - 1). \quad (3)$$

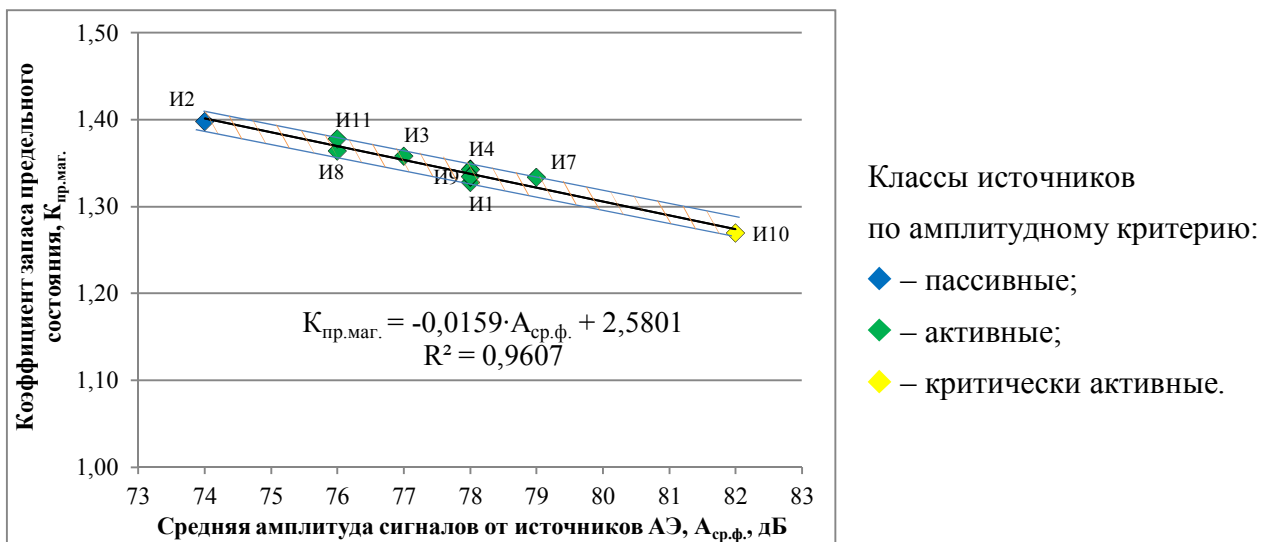
По результатам опытно–промышленных испытаний решетчатой конструкции мачты агрегата АПРС–40 установлено, что источники АЭ различного класса по амплитудному критерию имеют определенный запас предельного состояния по методу МПМ. В 9 из 11 источников АЭ конструкции обнаружено и подтверждено методом МПМ присутствие остаточных напряжений. Далее определяются магнитный коэффициент запаса $K_{\text{пр.маг.}}$ по формуле (2) и остаточный ресурс по предельному магнитному состоянию в каждой ЗКН по формуле

(3). Для проведенного исследования, имея в виду, что T_{ϕ} – время фактической эксплуатации конструкции на момент исследований, равное $T_{\phi} = 14$ лет, показатель остаточного ресурса $T_{ост}$, для критически активного источника с минимальным коэффициентом запаса оказался равен:

$$T_{ост} = 14 \cdot (K_{пр.маг.} - 1) = 14 \cdot (1,27 - 1) = 3,78 \text{ года.}$$

Дальнейший анализ результатов показывает, что существует аналитическая связь между коэффициентом запаса предельного состояния $K_{пр.маг.}$ по параметрам метода МПМ и фактической средней амплитудой $A_{ср.ф.}$ сигналов от источников АЭ. Характер этой зависимости (рисунок 10) с некоторым коридором отклонений от линии тренда, но при этом с достаточно высоким коэффициентом корреляции, имеет вид:

$$K_{пр.маг.} = -0,0159 \cdot A_{ср.ф.} + 2,5801. \quad (4)$$



– коридор отклонений; И1...И11 – обозначения источников АЭ

Рисунок 10 – Зависимость магнитного коэффициента запаса предельного состояния от средней амплитуды сигналов АЭ

Приравняв выражение (4) к единице и решив его относительно $A_{ср.ф.}$, получим значение амплитуды при наступлении предельного состояния металла (предельную среднюю амплитуду), которая составит:

$$A_{ср.пр.} = \frac{2,5801 - 1}{0,0159} = 99,4 \text{ дБ.} \quad (5)$$

Это решение имеет важное практическое значение, т. к. позволяет уточнить остаточный ресурс ЗКН, измеренных методом МПМ, по результатам измерения амплитуд методом АЭ. Таким образом, используя значение $A_{ср.пр.}$ и критерий подобия (2) можно получить значения остаточного ресурса каждого

источника АЭ по совместным результатам исследований объекта диагностирования методами АЭ и МПМ. Для этого введем предельный коэффициент $K_{\text{пр.амп.}}$ запаса амплитуды источника АЭ, определяемый отношением:

$$K_{\text{пр.амп.}} = \frac{A_{\text{ср.пр.}}}{A_{\text{ср.ф.}}}, \quad (6)$$

где $A_{\text{ср.ф.}}$ – фактическая средняя амплитуда источника АЭ, дБ; $A_{\text{ср.пр.}}$ – предельная средняя амплитуда для источников АЭ, дБ.

Так, для наиболее опасного источника И10 (см. рисунок 10) остаточный ресурс по запасу его амплитуды определится:

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{ф}} \cdot (K_{\text{пр.амп.}} - 1) = 14 \cdot (1,21 - 1) = 2,94 \text{ года.} \quad (7)$$

Это означает, что согласно результатам совместного анализа измерений по методам АЭ и МПМ запас предельного состояния металла в зоне этого источника АЭ составляет 2,94 года, после чего возможно событие разрушения металла этой зоны. Поэтому необходимо заблаговременно принять меры по восстановлению прочностных характеристик дефектной зоны, либо вывести объект из эксплуатации. Как видно, этот результат, полученный по методу соотношения амплитуд АЭ, более консервативен, чем по напряженности магнитного поля, в силу высокой чувствительности метода АЭ к энергетике структурных перестроек, поскольку амплитуда АЭ характеризует уровень энергетических затрат на единичный элемент структурной деформации под воздействием внешних нагрузочных сил. Такая консервативность повышает надежность оценки остаточного ресурса объекта обследования. Для других источников АЭ, выявленных в процессе испытаний остаточный ресурс находится в диапазоне от 3,6 до 4,8 года. Такая детализация позволяет разработать график восстановительных мероприятий для продления ресурса эксплуатации объекта обследования.

По аналогичному алгоритму произведены исследования технического состояния оболочковой конструкции газоконденсатной разделительной емкости. При этом предельное давление испытания определялось, как и в предыдущем случае, методом имитационного моделирования. В результате испытаний выявлено 12 источников АЭ, из которых 6 катастрофически и 2 критически активных по амплитудному критерию.

По методу МПМ в 10 источниках АЭ из 12 обнаружены зоны концентрации остаточных напряжений. Далее по аналогии проводится анализ результатов

исследований по методам АЭ и МПМ:

1. Определяются коэффициент запаса $K_{\text{пр.маг.}}$ деформационной способности металла по формуле (2). Так, источник И11 (рисунок 11) имеет наименьший коэффициент запаса $K_{\text{пр.маг.}}$:

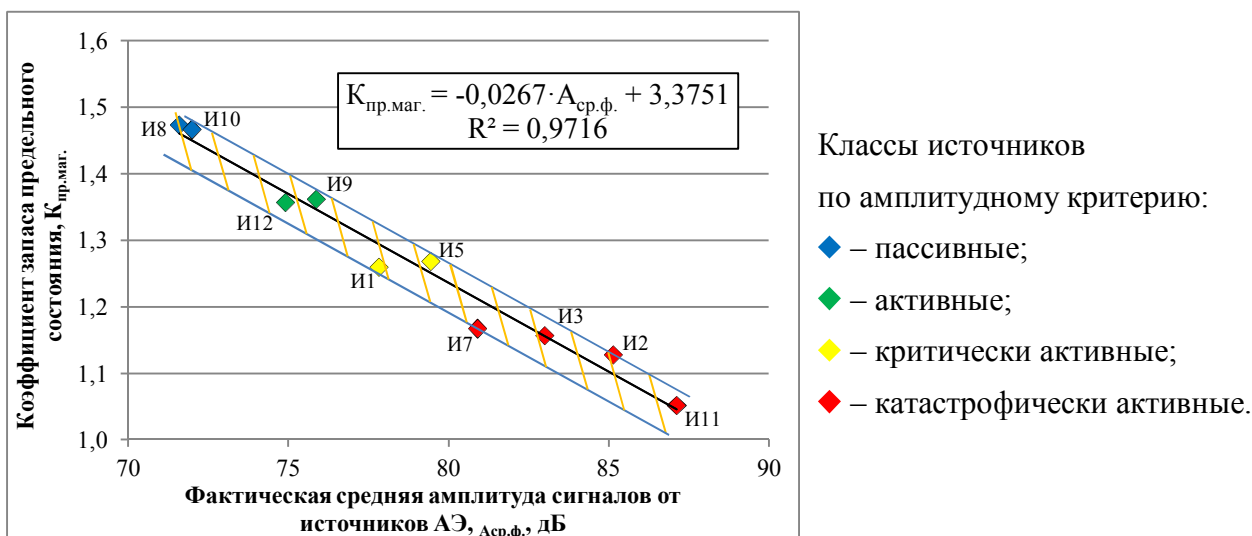
$$K_{\text{пр.маг.}} = \frac{1,517}{1,442} = 1,052. \quad (8)$$

2. Остаточный ресурс по формуле (3), имея в виду, что время фактической эксплуатации емкости на момент исследований $T_{\text{ф}} = 34$ года. Для источника И11 остаточный ресурс составил:

$$T_{\text{ост}} = 34 \cdot (1,052 - 1) = 1,77 \text{ года}. \quad (9)$$

3. Также установлено, что, как и в случае с решетчатой конструкцией мачты агрегата АПРС–40 (см. рисунок 10), коэффициент запаса $K_{\text{пр.маг.}}$ имеет линейную зависимость от средней фактической амплитуды $A_{\text{ср.ф.}}$ сигналов от источников АЭ (см. рисунок 11). Характер этой зависимости имеет вид:

$$K_{\text{пр.маг.}} = -0,0267 \cdot A_{\text{ср.ф.}} + 3,3751. \quad (10)$$



– коридор отклонений; И1...И12 – обозначение источников АЭ

Рисунок 11 – Зависимость коэффициента запаса предельного состояния от средней амплитуды сигналов АЭ

4. Приравняв выражение (10) к единице и решив его относительно $A_{\text{ср.ф.}}$, получим значение предельной средней амплитуды источников АЭ для металла оболочковой конструкции емкости, которая составила:

$$A_{\text{ср.пр.}} = \frac{3,3751 - 1}{0,0267} = 89 \text{ дБ}. \quad (11)$$

5. Таким образом, используя алгоритм обработки данных по аналогии с ис-

следованиями решетчатой конструкции, получаем уточненные значения остаточного ресурса для каждого источника АЭ по совместным результатам исследований объекта методами АЭ и МПМ. По формуле (6) определяем коэффициент $K_{\text{пр.амп.}}$ запаса амплитуды источников АЭ. Для источника И11 он составил:

$$K_{\text{пр.амп.}} = \frac{89}{87} = 1,021. \quad (12)$$

6. Окончательно рассчитываем остаточный ресурс по запасу амплитуды источников АЭ. Так, для наиболее опасного источника И11 (см. рисунок 11) остаточный ресурс по запасу его амплитуды составил:

$$T_{\text{ост}} = 34 \cdot (1,021 - 1) = 0,71 \text{ года}. \quad (13)$$

Для сравнения, ресурс, полученный по магнитным параметрам (формула 9) оказался почти на 60% больше. Для других катастрофически активных источников АЭ остаточный ресурс находится в диапазоне от 1,5 до 3,4 года, для остальных источников – от 4 до 8,2 года. В целом полученные результаты исследования оболочковой конструкции газоконденсатной разделительной емкости, полученные по методу соотношения амплитуд, так же, как и в случае с решетчатой конструкцией мачты АПРС–40, оказались более консервативны, чем по магнитным параметрам. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов и универсальности разработанной методики, которую можно применять в качестве одного из современных инструментов при проведении экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов нефтегазовой отрасли.

По результатам проведенных испытаний и исследований можно заключить, что при диагностировании объектов с осложненным техническим состоянием совместное применение нетепловых пассивных методов АЭ и МПМ с целью оценки остаточного ресурса по алгоритму, предложенному в настоящей работе, является перспективным.

Основные выводы:

1. Анализ опыта применения нетепловых пассивных методов диагностики АЭ и МПМ показал, что большинство испытаний этими методами проводятся по алгоритмам, рекомендованным стандартами или руководящими документа-

ми. Установлено, что эффективность применения методов АЭ и МПМ возрастает при их комбинировании с другими методами, как правило, активными. При этом выявлено, что взаимосвязь параметров методов АЭ и МПМ, основанных на деформационной перестройке структуры металла, до настоящего времени не изучалась, поэтому актуальной задачей является установление и обоснование этой взаимосвязи.

2. Сформирован и обоснован комплекс стандартных методик для проведения исследований по оценке технического состояния нефтегазопромысловых конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики. Комплекс включает методику визуального и измерительного контроля, методики неразрушающего диагностирования и определения химического состава сталей, а также их прочностных характеристик.

3. Показана эффективность применения метода имитационного компьютерного моделирования НДС конструкций для предварительной оценки безопасных параметров проведения статических испытаний реальных промышленных объектов на основе фактически измеренных значений толщин стенок и механических характеристик, а также для определения рациональных начальных параметров (нагрузки, давления, геометрии и т. д.), необходимых для проведения испытаний.

4. Предложена методика проведения лабораторных исследований для определения чувствительности метода АЭ, позволившая экспериментально обосновать его высокую степень эффективности при обнаружении дефектов различного размера в трубных изделиях. По результатам оценки метода АЭ установлено, что чувствительность его значительно выше, чем ультразвукового, капиллярного и рентгенографического. Также установлено, что чувствительность метода АЭ стабилизируется на уровне 0,6, начиная с отверстия 2 мм и менее.

5. По результатам экспериментальных исследований установлена взаимосвязь между средней амплитудой АЭ и изменением градиента напряженности СМПР. Из установленных взаимосвязей выявляется возможность совместного использования методов АЭ и МПМ, что позволяет расширить информационное поле для оценки технического состояния реальных нефтегазовых конструкций.

6. По результатам опытно–промышленных исследований реальных нефте-

газовых конструкций получено решение для определения остаточного ресурса зон концентрации напряжений по магнитным параметрам метода МПМ и по соотношению амплитуд источников АЭ в этих зонах. Это решение имеет важное практическое значение, т. к. позволяет уточнить остаточный ресурс зон концентрации напряжений, измеренных методом МПМ, по результатам измерения амплитуд методом АЭ.

7. По усовершенствованному алгоритму оценки технического состояния нефтегазопромысловых конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики предложена и апробирована методика, в которой с учетом требований промышленной безопасности реализуются современные эффективные принципы диагностирования, определения параметров напряженно-деформированного состояния и методов оценки безопасной эксплуатации опасных производственных объектов. Разработанная методика согласована в экспертных организациях ООО СРТЦ «ДИТЭКС», ООО «ЭкспертСтрой», ООО НПК «Техресурс» и ООО «Техконтроль», специализирующихся на неразрушающем контроле и технической диагностике в нефтегазовой отрасли.

**Основные положения и наиболее значимые результаты диссертации
опубликованы в следующих работах:**

1. Борейко, Д. А. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с искусственными дефектами / И. Ю. Быков, А. Л. Смирнов, Д. А. Борейко // Инженер-нефтяник. – М. : ООО «Ай Ди Эс Дриллинг». – 2013. – № 1. – С. 40–43.

2. Борейко, Д. А. Напряженно-деформированное состояние вышки подъемной установки при конечно-элементном анализе ее 3D-модели / Д. А. Борейко, А. Л. Смирнов, И. Ю. Быков // XIV Международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех-2013»: материалы конференции (20–22 марта 2013 г., Ухта): в 5 ч.; ч. 4. – Ухта : УГТУ, 2013. – С. 145–150.

3. Борейко, Д. А. Направление совершенствования методики оценки технического состояния вышек подъемных установок для ремонта скважин / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (16–19 апреля 2013 г., Ухта): в 3 ч.; ч. 1 / под ред. Н.

Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2013. – С. 221–225.

4. Борейко, Д. А. Использование метода акустической эмиссии для изучения несущей способности трубных образцов с искусственными дефектами / Д. А. Борейко, И. Ю. Быков, А. Л. Смирнов // Материалы докладов II Всероссийской (XVII) молодежной научной конференции «Молодежь и наука на Севере» (Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 22–26 апреля 2013 г.) : в 2 т. ; т. 2. – Сыктывкар : Коми научный центр УрО РАН. – 2013. – С. 95–96.

5. Борейко, Д. А. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния вышки подъемной установки для ремонта скважин / И. Ю. Быков, А. Л. Смирнов, Д. А. Борейко // Территория НЕФТЕГАЗ. – М. : ЗАО «Камелот Пабблишинг». – 2013. – № 4. – С. 18–23.

6. Борейко, Д. А. К методике оценки технического состояния вышек подъемных установок для ремонта скважин / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 2013. – № 9. – С. 28–32.

7. Борейко, Д. А. Методика определения чувствительности метода акустической эмиссии при обнаружении развивающихся дефектов / Д. А. Борейко, В. В. Борейко, И. Ю. Быков // XV Международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех–2014» : материалы конференции (26–28 марта 2014 г.) : в 5 ч. ; Ч. 4. – Ухта : УГТУ, 2014. – С. 13–15.

8. Борейко, Д. А. О чувствительности методов неразрушающего контроля при обнаружении дефектов / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко // Сборник научных трудов : материалы научно-технической конференции (22–25 апреля 2014 г.). В 3 ч. Ч. I / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2014. – 312 с. : ил. С. 107–113.

9. Борейко, Д. А. О чувствительности методов неразрушающего контроля при обнаружении дефектов / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко // Территория НЕФТЕГАЗ. – М. : ЗАО «Камелот Пабблишинг». – 2014. – № 6. – С. 46–51.

10. Борейко, Д. А. Промышленные испытания разделительной емкости методом акустической эмиссии / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко, А. Л. Смирнов // Территория НЕФТЕГАЗ. – М. : ЗАО «Камелот Пабблишинг». – 2014. – № 12. – С. 78–83.

11. Борейко, Д. А. Разработка методики диагностирования оборудования с

уточнением зон концентрации напряжений методом магнитной памяти металла / Д. А. Борейко // XV научно–техническая конференция молодежи АО «Транснефть–Север» : мат. конф. (10–12 декабря 2014 г.). – Ухта : УГТУ, 2014. – 73 с.

12. Борейко, Д. А. Исследование напряженно-деформированного состояния мачты агрегата АПРС-40 методом компьютерного моделирования / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко // Территория НЕФТЕГАЗ. – М. : ЗАО «Камелот Пабблишинг». – 2015. – № 8. – С. 98–104.

13. Борейко, Д. А. Оценка технического состояния несущих металлоконструкций мобильных буровых установок пассивными методами неразрушающего контроля / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко, А. Л. Смирнов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 2015. – № 8. – С. 7–14.

14. Борейко, Д. А. Чувствительность метода акустической эмиссии при обнаружении дефектов в трубных изделиях / Д. А. Борейко, И. Ю. Быков, А. Л. Смирнов // Дефектоскопия. – Екатеринбург : «Издательство «Наука». – 2015. – № 8 – С. 24–33.

15. Борейко, Д. А. Методы и методики неразрушающего контроля / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко. – Германия : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 204 с. : ил.

16. Борейко, Д. А. Диагностика нефтегазопромыслового оборудования методами неразрушающего контроля: учебное пособие / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко. – Старый Оскол : ТНТ, 2015. – 240 с. : ил.

17. Борейко, Д. А. Методика оценки технического состояния нефтегазопромысловых конструкций нетепловыми пассивными методами диагностики / И. Ю. Быков, Д. А. Борейко. – Ухта : УГТУ, 2015. – 46 с. : ил.