

На правах рукописи

ЗЕЛЕНСКИЙ Николай Алексеевич



**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
ГЛУБОКОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

*Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий*

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

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Носов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты:

Жуков Владимир Андреевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кафедра машиноведения и основ конструирования, профессор

Махмудов Хайрулло Файзуллаевич

кандидат физико-математических наук, ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, лаборатория физики прочности, старший научный сотрудник

Ведущая организация –

АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»

Защита состоится 29 сентября 2017 г. в 12 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 июля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Контроль состояния сложно нагруженных технических объектов ответственного назначения является обязательным этапом в обеспечении их надёжности. Особенно это касается глубоководных сооружений, эксплуатируемых в условиях ограниченного доступа к обслуживанию и находящихся под воздействием сжимающих нагрузок. В процессе эксплуатации элементы конструкций глубоководных сооружений подвергаются нагрузкам, создающим сложное неоднородное состояние. Глубоководные аппараты осуществляют многоразовые погружения и всплытия, что обеспечивается оптимальными соотношениями удельного веса, прочности и геометрических параметров. Отклонение от этих соотношений снижает безопасность эксплуатации и ресурс, что делает актуальной задачу контроля и стабилизации прочностных и геометрических параметров.

Степень научной разработанности темы. Основной особенностью контроля состояния конструкций глубоководных сооружений является повышенное внимание к опасности потери устойчивости, смятия или усталостного разрушения. Согласно правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) применяют ультразвуковой, рентгеновский и другие методы неразрушающего контроля, гидравлические испытания наружным и внутренним давлением. Прочностная неоднородность материала элементов конструкций и некорректное упрощение трудоёмких прочностных испытаний приводят к снижению информативности рекомендованных методов контроля и необходимости их совершенствования. В качестве основы такого совершенствования принимаются возможности метода акустической эмиссии (АЭ), как одного из методов контроля за приводящим к потере прочности процессом накопления повреждений. Однако применение стандартных акустико-эмиссионных методик и критериев оценки состояния и ресурса для сжимаемых элементов конструкций глубоководных сооружений не даёт ожидаемого результата, что предполагает необходимость разработки новых технологий АЭ контроля. Работа является продолжением направления, защищенного ранее в диссертациях Носова В.В. (1988 г., 1997 г.), Буракова И.Н. (2004 г.), Ельчанинова Г.С. (2011 г.), Лаврина В.Г.

(2011 г.), Лаховой Е.Н. (2012 г.). Большой вклад в решение проблемы неразрушающего контроля и диагностики, метода акустической эмиссии и методологии оценки прочности различного рода материалов и технических объектов внесён такими учёными, как Иванов В.И., Грешников В.А., Дробот Ю.В., Башкарёв А.Я., Жуков В.А., Нефедьев Е.Ю., Махмудов Х.В., Трипалин А.С., Буйло С.И., Елизаров С.В., Барат В.А., Баранов В.М., Бырин В.Н., Бигус Г.А., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Журков С.Н., Регель В.Р., Слуцкер А.К., Томашевский Э.Е., Куксенко В.С., Петров В.А., Веттегрень В.И., Махутов Н.А., Мельников Б.Е., Гецов Л.Б., Судаков А.В. и др.

Идея работы: контроль состояния, оценка степени опасности дефектов и определение ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений должны производиться на основе наблюдения за определяющим ресурс разрушением с учетом неоднородности структуры материала и неустойчивостью деформированного состояния посредством регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе корректного экспресс-нагружения и определения представительных АЭ показателей прочности.

Цель работы состоит в обосновании метода неразрушающего контроля прочности и оценки ресурса корпусных элементов глубоководных сооружений на основе оперативного АЭ контроля за процессом их разрушения в процессе корректного и технологически упрощённого экспресс-нагружения.

В ходе исследований решаются **следующие задачи:**

1. Анализ методов контроля состояния и подходов к оценке работоспособности и обеспечению безопасности эксплуатации элементов глубоководных сооружений, обоснование предпочтительного метода контроля за определяющим работоспособность процессом разрушения;
2. Обоснование принципов оптимизации АЭ контроля прочности элементов конструкций глубоководных сооружений на основе формулировки критерия оптимизации и применения обобщённого алгоритма определения представительного АЭ показателя индивидуальных прочностных характеристик;
3. Экспериментальные исследования и анализ данных реги-

страции сигналов акустической эмиссии сварных корпусных элементов глубоководных сооружений, оценка влияния дестабилизирующих факторов на точность неразрушающего контроля показателей прочности;

4. Разработка метода неразрушающего контроля прочности и ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений.

Методология и методы исследований опираются на информационно-кинетический подход к разработке технологий АЭ диагностирования, известную микромеханическую модель временных зависимостей параметров АЭ, результаты экспериментальных исследований процесса разрушения и акустической эмиссии конструкционных материалов, статических и усталостных прочностных испытаний, статистического, физического и имитационного компьютерного моделирования процесса разрушения, анализ напряженного состояния с применением программы *Autodesk Inventor Professional* со встроенным набором ключевых функций из пакета анализа МКЭ *ANSYS Design Space*. Экспериментальные исследования проведены с использованием сертифицированной автоматизированной диагностической акустико-эмиссионной системы на сваренных в единое целое плоских и подобных корпусным элементам глубоководных аппаратов кольцевых образцах с технологическими и искусственно созданными дефектами, механически нагружаемых устройством со специально созданным приспособлением.

Метод разрабатывается с целью расширения возможности неразрушающего контроля прочности за счёт снижения трудоёмкости и повышения информативности контроля. В ходе решения данной проблемы получены следующие, обладающие **научной новизной** результаты:

- сформулирован принцип совершенствования контроля состояния элементов конструкций глубоководных сооружений;
- подготовлены и проведены экспериментальные исследования акустической эмиссии кольцевых образцов стыковых сварных соединений при их сжатии;
- подтверждена представительность АЭ показателей прочности, определяемых с позиции микромеханической модели разрушения и временных зависимостей параметров АЭ, регистрируемой в

процессе обеспечивающего подобие рабочему напряжённому состоянию упрощённого тестового механического воздействия;

- на основе оценки представительных АЭ показателей работоспособности разработаны способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата, методика оценки допустимой глубины его погружения.

Достоверность научных положений подтверждается результатами метрологических проверок, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, имитационного компьютерного моделирования, сравнением с результатами, полученными в известных работах, результатами статистической обработки экспериментальных исследований, признанием научной общественностью при выступлениях на конференциях, публикацией результатов в рецензируемых научных журналах.

Практическая ценность результатов обусловлена:

- усовершенствованием метода акустической эмиссии, как метода неразрушающего контроля состояния технических объектов, природной среды, веществ, материалов и изделий с учетом особенностей объектов контроля;

- повышением информативности, снижением трудоёмкости контроля прочности и прогнозирования ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений;

- продлением сроков эксплуатации, повышением допустимой глубины погружения элементов конструкций глубоководных сооружений, что чрезвычайно эффективно экономически.

Область применения результатов. Результаты исследований могут быть использованы для обеспечения безопасности эксплуатации, обоснования возможности продления ресурса элементов конструкций и сооружений различного назначения в различных областях промышленности, в учебном процессе студентов технических специальностей общемашиностроительного и специального значения.

Апробация и внедрение результатов. Основное содержание диссертационной работы представлялось, докладывалось и обсуждалось на II, III и IV международных научно-практических конференциях «Инновационные системы планирования и управления на

транспорте и в машиностроении» СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014, 2015, 2016 гг.; на научном форуме с международным участием «Неделя науки Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого», 2015 г.; на XIII молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2015» (СПб – ОАО «ЦКБ МТ «Рубин»); на III Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» СПб (20-21 октября 2016 г.), Санкт-Петербургский горный университет; на II-ой Международной научно-технической конференции «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов» (7-9 декабря 2016 г.). Работа связана с развитием Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», результаты внедрены в учебный процесс подготовки магистров и бакалавров по направлению «Приборостроение». Получен патент на изобретение № 2617195, опубл. 21.04.2017, бюл. № 12 «Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата».

Личный вклад автора:

- предложена идея тестового нагружения с контролем по двум основным критериям работоспособности элементов глубоководных сооружений;

- разработаны образцы и приспособление для нагружающего устройства, осуществляющего сжимающее нагружение аналогов элементов прочного корпуса глубоководного аппарата;

- произведён анализ напряжённого состояния и выполнены расчеты максимальных напряжений возле дефектов с применением программы *Autodesk Inventor Professional* со встроенным набором ключевых функций из пакета анализа МКЭ *ANSYS Design Space*;

- проведены эксперименты по выявлению возможности прочностного контроля сжимаемых корпусных элементов их результатов с позиций микромеханической модели с применением оптимальной фильтрации сигналов и имитационного компьютерного моделирования;

- установлены зависимости между представительными параметрами АЭ контроля, степенью опасности дефектов и стандартными характеристиками прочности сварных соединений.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 6 входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, 1 в издании, цитируемой в БД *Scopus* и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5-и глав, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 174 страницах, содержит 46 рисунков, 12 таблиц, 196 библиографических источников.

Диссертация соответствует пунктам паспорта специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: п.1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», п.2 «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследований, перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются виды, форма, состояние, критерии работоспособности и методы неразрушающего контроля прочности элементов конструкций глубоководных сооружений в связи с проблемой повышения их надёжности.

Во второй главе проведено обоснование предпочтительности акустико-эмиссионного контроля прочности элементов конструкций глубоководных сооружений, рассмотрены методы неразрушающего контроля состояния сосудов и кольцевых элементов конструкций, работающих под давлением, оптимизирующая неразрушающий контроль прочности микромеханическая модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии и физические основы долгосрочного прогнозирования остаточного ресурса.

В третьей главе рассмотрены метрологические аспекты акустико-эмиссионной оценки представительных концентрационно-кинетических АЭ-показателей прочности, проведён анализ эффективности их применения для оценки ресурса промышленных объектов.

В четвёртой главе описаны образцы, нагружающее оборудование, акустико-эмиссионная аппаратура, методика и результаты лабораторных экспериментальных исследования акустической эмиссии сжимаемых сварных кольцевых образцов, приведены результаты имитационного компьютерного моделирования временных зависимостей параметров АЭ и сопоставление их с результатами экспериментальной регистрации, рассмотрен алгоритм акустико-эмиссионного контроля степени опасности и неоднородности прочностного состояния кольцевых образцов сварных соединений с дефектами.

В пятой главе рассмотрены основные аспекты прочностного контроля элементов конструкций глубоководных сооружений в гидротестированиях и его метрологические проблемы, разработан устраняющий недостатки контроля способ неразрушающего контроля прочности и допустимой глубины погружения конструкций глубоководных сооружений на основе оценки представительных акустико-эмиссионных параметров, предложена методика неразрушающего контроля прочности и ресурса элементов конструкций глубоководных сооружений.

По результатам проведённых исследований на защиту выносятся следующие научные положения:

1. Совершенствование контроля состояния элементов конструкций глубоководных сооружений следует производить с учётом его многокритериальности на основе анализа данных регистрации сигналов акустической эмиссии в процессе подобного рабочему тестового механического нагружения с позиций микромеханической модели разрушения и временных зависимостей параметров АЭ.

Анализ конструкции (рисунок 1) и видов отказов глубоководных сооружений показал, что контроль прочности их элементов является основным средством повышения безопасности их эксплуатации. Регламентируемое РМРС проведение неразрушающего контроля различными методами (рисунок 2) не даёт представления о

степени опасности выявляемых дефектов и ресурсе сооружения, что приводит к необходимости проверочных гидравлических испытаний внешним или внутренним давлением, создающим неадекватное рабочему напряжённому состоянию и приводящим к ошибкам контроля.

Наиболее эффективные направления совершенствования методов и средств неразрушающего контроля прочности связаны с обеспечением долгосрочного прогнозирования механического разрушения на основе последовательного построения различного уровня моделей приводящих к отказу процессов, созданием приборов их регистрации и использованием математического, программного обеспечения, компьютеризацией контроля. Перспективным при этом представляется метод акустической эмиссии, который применительно к глубоководным сооружениям хотя и не является новым, однако до сих пор не получил нормативного статуса для контроля прочности. Его активно применяют для контроля качества в процессе выполнения сварного шва (так называемая «горячая» АЭ). Потенциал метода АЭ реализован ещё не полностью, технологии АЭ контроля активно развиваются.

Подходы к оптимизации контроля, поиску представительных параметров АЭ и разработке конкретных алгоритмов АЭ-контроля должны быть основаны на микромеханической модели АЭ (ММАЭ), квантовании стадии мелкодисперсного разрушения на различающиеся по прогностическим свойствам этапы неоднородного и однородного разрушения и стабилизации параметров корректно регистрируемой АЭ. Основой прогнозирования ресурса является устанавливаемая связь регистрируемых параметров АЭ ξ с параметрами повреждаемости материала – концентрацией образующихся микротрещин C (рисунок 3)

$$\xi(t) = k_{AE} C(t), \quad (1)$$

где t – текущее время, с;

k_{AE} – акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК).

Информативными параметрами ξ могут являться различные первичные параметры АЭ – число N_{Σ} регистрируемых импульсов дискретной АЭ, суммарный счёт N АЭ, относительная суммарная амплитуда или комбинация этих параметров.

Соотношения входящих в ММАЭ параметров функции $\Psi(\omega)$

(рисунок 3) характеризует степень неоднородности механического прочностного материала; параметры τ_0 и U_0 относительно стабильны и не зависят от состояния структуры; значения параметра γ являются характеристикой наноструктуры материала, которая, совместно с напряжениями σ отражает прочностную индивидуальность структурного элемента, а входящий в формулу Журкова параметр $\omega = \gamma\sigma/(KT)$ фактически является параметром его прочностного состояния. Требования стабилизации вариативного АЭК определяют правила проведения и оптимизации АЭ контроля посредством фильтрации сигналов АЭ, повышения чувствительности контроля и точности идентификации этапа однородного разрушения. Обосновано подбираются диагностические параметры (таблица 1), лежащие в основе универсальных алгоритмов оценки прочности и ресурса сложно нагруженных объектов, апробированных на образцах и сварных конструкциях, изделиях из композиционных материалов, сосудах давления, металлургических заготовках, горных породах. Таблица 1 – Концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочностного состояния технических объектов, устойчивые к влиянию дестабилизирующих факторов

АЭ-показатель	Микромодель	Наномодель	Свойство
X_{AE}	$d\ln\dot{\xi}/dt$	$\gamma\dot{\sigma}/KT$	Наноструктура
Y_{AE}	$d\ln\dot{\xi}/d\sigma$	γ/KT	»
kY_{AE}	$d\ln\dot{\xi}/dF$	$\gamma\sigma/KTF$	»
W_{AE}	$d\ln\dot{\xi}/dK_n$	$\omega = \gamma\sigma/KT$	Опасность разрушения

Примечание. F – нагрузка, K_n – коэффициент нагрузки (отношение диагностической нагрузки к рабочей), $k = \sigma/F$

2. Неразрушающий контроль прочности элементов конструкций глубоководных сооружений следует производить на основе оценки представительных концентрационно-кинетических АЭ показателей прочности по результатам регистрации сигналов АЭ в процессе сжимающего радиального экспресс-нагружения элемента в направлении наиболее вероятной потери его устойчивости до напряжений ниже предела текучести материала.

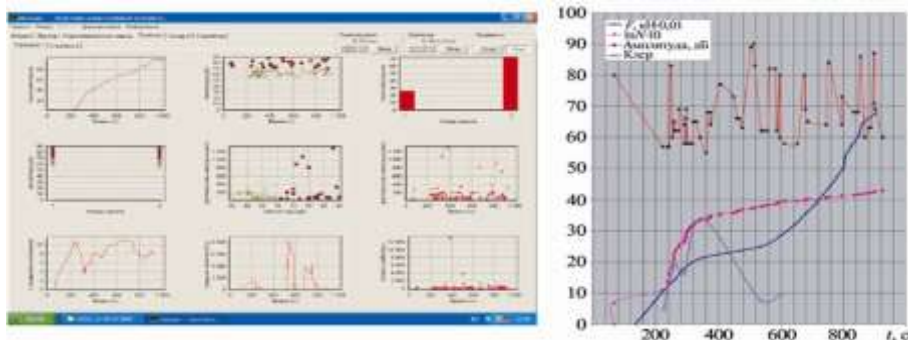
Для обоснования положения были проведены эксперимен-

тальные исследования аналогов элементов прочного корпуса глубоководного аппарата и разработана методика контроля (рисунок 4). Показаны особенности контроля и его метрологические характеристики. Каждый образец был изготовлен из четырех сегментов, сваренных между собой электродом марки 08Г2С, материал сегментов – сталь марки Ст3. В сварных швах четырех образцов искусственно создавались дефекты – отверстия диаметром 4 мм различной глубины. Один образец создавался без дефектов (см. таблицу 2).

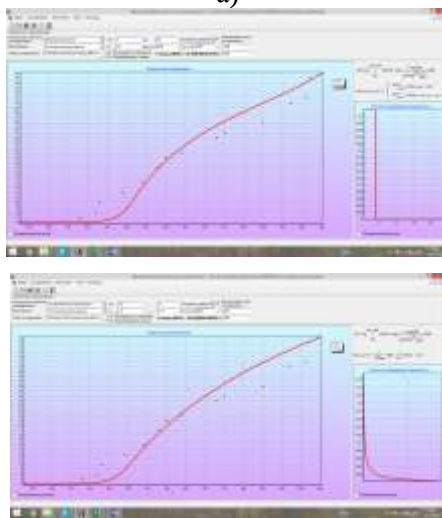
Таблица 2 – Результаты анализа данных эксперимента

Но- мер об- раз- ца	Дефекты образца	Суммар- ная энер- гия на этапе упругого нагруже- ния	Число импуль- сов на этапе упруго- го нагру- жения	Сум- марная ампли- туда на этапе упруго- го нагру- жения, дБ	Локаль- но- дина- миче- ский показа- тель m	Концентрационно- кинетические пока- затели			Мак- си- маль- ные напря- жения вблизи дефек- тов
		MARSE, мВ ² хмс				X_{AE} , 1/с	Y_{AE} , МПа ⁻¹	W_{AE}	
5	2 не сквоз- ных отвер- стия внутри: Ø4 мм и Ø3 мм	2734	12	851	5,86	0,036	0,036	4,39	268
4	2 не сквоз- ных отвер- стия снару- жи: Ø2,4 мм и Ø3,2 мм; свищ 1 мм	9244	33	2335	3,82	0,032	0,025	2,84	247
1	2 сквозных отверстия Ø4 мм	275	17	1072	3,64	0,028	0,029	3,39	259
3	2 не сквоз- ных отвер- стия: внутри Ø3,5 мм, снаружи Ø3 мм	1188	12	811	3,1	0,028	0,026	3,04	266
2	Без дефек- тов	4566	26	1787	0,49	0,006	0,006	0,69	188
Коэффициент корреляции со значениями σ_{max}		-0,341	-0,58	-0,561	0,86	0,93	0,94	0,94	

Для инициирования сигналов АЭ в качестве диагностического использовано радиальное нагружение, ориентированное в направлении создающем наибольшие напряжения в сварных швах. По полученным данным (рисунок 5) были построены графики изменения нагрузки и логарифма числа импульсов АЭ от времени.



а)



б)

Рисунок 5 — Экспериментальные данные по АЭ испытанию сваренных встык колец радиальной нагрузкой (а), и сопоставление результатов регистрации сигналов АЭ образца №1 на этапе их упругого нагружения с результатами имитационного моделирования (б) $\omega_2 > 6 \omega_1$, $\omega_1 > 3 \omega_0$, $\sigma_3 > 3 \mu$, $\omega_2 / \omega_1 = 6,45$, $\omega_1 / \omega_0 = 3,1$, $\sigma_3 / \mu = 3,56$

По формулам таблицы 1 на участке 3 упругого кинетически однородного разрушения неразрушающим путём определён параметр X_{AE} (рисунок 6) и связанные с ресурсом и степенью опасности состояния показатели Y_{AE} и W_{AE} (рисунок 7). Допустимая рабочая глубина погружения

$$h_{\text{раб}} = 200\sigma_{\text{раб}} S / (D \cdot W_{AE}), \text{ м} - \text{для корпусов цилиндрической формы,}$$

$$h_{\text{раб}} = 400\sigma_{\text{раб}} S / (D \cdot W_{AE}), \text{ м} - \text{для корпусов сферической формы,}$$

где $\sigma_{\text{раб}}$ – допускаемое рабочее напряжение, МПа;

S – толщина стенки прочного корпуса, мм;

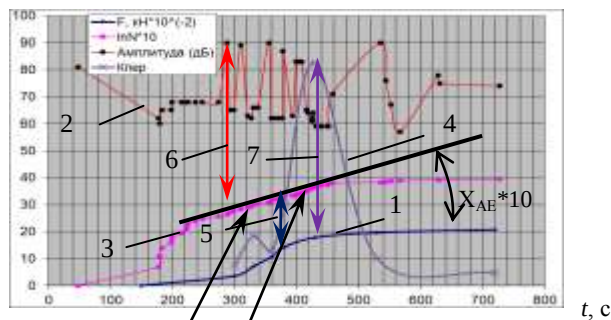
D – диаметр прочного корпуса, мм.

Относительная погрешность оценки параметров X_{AE} , Y_{AE} , W_{AE} не превышает 20 %, что, наряду с повышенными значениями коэффициентов корреляции, демонстрирует оптимизацию акустико-эмиссионного контроля. После определения решение о работоспособности принимается на основе сравнения его значения W_{AE} с его критической величиной $[W_{AE}]$ (таблица 3) или расчёта остаточного ресурса.

Таблица 3 – Относительная оценка состояния изделия и классификация источников АЭ по параметру W_{AE}

Класс опасности источника АЭ	Диагностический признак	Состояние контролируемого объекта и источника АЭ
I	$W_{AE} \leq 0$	Эксплуатация допускается, пассивный
II	$0 < W_{AE} < [W_{AE}]$	Эксплуатация допускается, активный
III	$W_{AE} \geq [W_{AE}]$	Может эксплуатироваться с ограничениями, критически активный источник АЭ, допускаемая глубина погружения должна быть снижена не менее чем на 25 %
IV	$W_{AE} \geq [n][W_{AE}]$	Эксплуатация не допускается, катастрофически активный. Объект подлежит снятию с эксплуатации и списанию

Здесь $[n]$ – требуемый коэффициент запаса статической прочности.



$$N_{\Sigma}(t) = k_{AE} C_0 K T \exp[(\gamma \sigma t - U_0)/(KT)] / (\tau_0 \gamma \sigma)$$

t	N	lnN	lnN*10	F, H	$\sigma_{\text{н}}(\text{МПа})$	$\sigma_{\text{н}}(\text{МПа})$	$\sigma_{\text{ср}}(\text{МПа})$
48	1	0,000	0,000				
177	2	0,693	6,931				
179	3	1,099	10,986				
183	4	1,386	13,863				
198	5	1,609	16,094				
199	6	1,792	17,918				
215	7	1,946	19,459				
222	8	2,079	20,794				
223	9	2,197	21,972				
225	10	2,303	23,026				
237	11	2,398	23,979				
248	12	2,485	24,849				
274	13	2,565	25,649				
288	14	2,639	26,391				
292	15	2,708	27,081				
299	16	2,772	27,726				
310	17	2,833	28,332	176,000	46,220	38,260	42,240
321	18	2,890	28,904				
327	19	2,944	29,444				
330	20	2,996	29,957				
338	21	3,045	30,445				
355	22	3,061	30,610				
359	23	3,139	31,355				
362	24	3,178	31,781				
369	25	3,219	32,181				
377	26	3,258	32,581				
378	27	3,296	32,958				
393	28	3,332	33,322				
399	29	3,367	33,673				
404	30	3,401	34,012				
406	31	3,434	34,340	1613,648	166,500	129,800	142,150
408	32	3,466	34,657				
416	33	3,497	34,965				
417	34	3,526	35,264				
418	35	3,555	35,555				
425	36	3,584	35,835				
425	37	3,611	36,109				

Представительные параметры
$X_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / dt, \text{ c}^{-1}$
$kY_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / dF, \text{ H}^{-1}$
$F_{\text{ном}} = 1310 \text{ H}$
$W_{AE} = d \ln N_{\Sigma} / dK_{\text{н}}$
$Y_{AE_{\text{нн}}} = d \ln N_{\Sigma} / d\sigma_{\text{нн}}, \text{ МПа}^{-1}$
$Y_{AE_{\text{нар}}} = d \ln N_{\Sigma} / d\sigma_{\text{нар}}, \text{ МПа}^{-1}$
$Y_{AE_{\text{ср}}} = d \ln N_{\Sigma} / d\sigma_{\text{ср}}, \text{ МПа}^{-1}$

$$X_{AE} = (3,434 - 2,833) / (406 - 310) = 0,00626 (\text{c}^{-1})$$

$$kY_{AE} = (3,434 - 2,833) / (1613,64 - 476) = 0,000528 (\text{H}^{-1})$$

$$W_{AE} = kY_{AE} * F_{\text{ном}} = 0,000528 * 1310 = 0,691$$

$$Y_{AE_{\text{ср}}} = (3,434 - 2,833) / (143,15 - 42,24) = 0,00595 (\text{МПа}^{-1})$$

Рисунок 6 – Анализ данных, полученных из эксперимента при испытании образца № 2. 1,2,3,4 – временные зависимости нагрузки (1), амплитуды (2), числа импульсов (3) и коэффициента перекрытия (4) сигналов АЭ; 5,6,7 – признаки временной фильтрации сигналов АЭ по упруго-пластичности (5), стабилизации амплитудной дисперсии (6) и повышению коэффициента перекрытия (7)

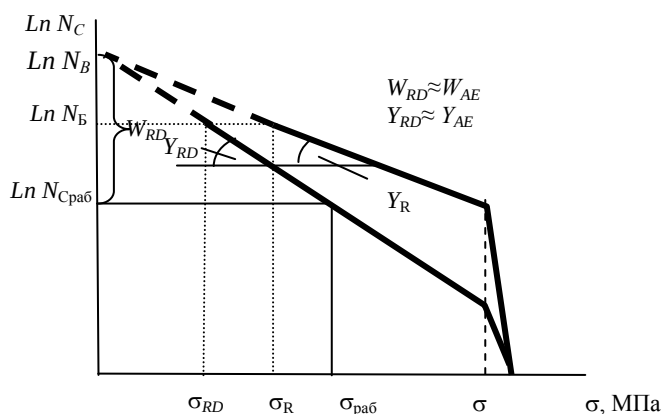


Рисунок 7 – Кривая усталости и графическая интерпретация связи параметров Y_{AE} и W_{AE} с ресурсом. σ_{RD}, σ_R – пределы выносливости реального изделия и эталонного образца, $\sigma_{раб}$ – рабочие напряжения, σ_K – критическое напряжение, N_B – базовое число циклов, N_B – константа материала, $N_{C_{раб}}$ – число циклов до разрушения (ресурс) реальной детали, $W_{RD} = \omega_{раб}$ – параметр прочностного состояния реального изделия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Повышение надёжности и безопасности эксплуатации, глубоководных сооружений должно вестись на основе оперативного неразрушающего контроля и оценки их ресурса с позиций микромеханической модели разрушения и совершенствования технологий акустико-эмиссионного контроля.
2. В качестве основы совершенствования АЭ контроля выбраны микромеханическая модель АЭ (ММАЭ) и дискретизация стадии мелкодисперсного разрушения на различающиеся по прогнозистическим свойствам этапы неоднородного и однородного разрушения.
3. Оптимизация технологий неразрушающего акустико-эмиссионного контроля прочности глубоководных сооружений должно вестись на основе применения обобщённого алгоритма определения представительных АЭ показателей индивидуальных прочностных характеристик объекта контроля и повышения коэффициент корреляции значений этих показателей и стандартных показателей прочностного состояния объекта контроля.

4. Корректный неразрушающий контроль прочности сжимаемых корпусных кольцевых сварных элементов следует производить на основе регистрации сигналов акустической эмиссии во время радиального равномерного тестового экспресс-нагружения элемента в направлении наиболее вероятной потери устойчивости до напряжений ниже предела текучести материала, определения представительного АЭ-показателя, связанного с характеристиками прочности, ресурсом или с степенью опасности дефектов и сравнения его значения с его критической величиной.

5. Разработан способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата (патент на изобретение № 2617195, заявка 2016112868 от 04.04.2016, опубл. 21.04.2017, Бюл. № 12 «Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата»), который включает в себя нагружение исследуемого объекта, регистрацию числа импульсов акустической эмиссии (АЭ) и их амплитуды, определение связанного с характеристиками прочности значения акустико-эмиссионного представительного параметра и его сравнение с допускаемой величиной.

6. На основе предложенного способа оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата разработана методика неразрушающего контроля прочности элементов основного корпуса глубоководного аппарата, позволяющая определить классы опасности дефектов, выявленных в ходе контроля, остаточный ресурс и допустимую рабочую глубину погружения глубоководного аппарата. По предварительной оценке применение методики позволит понизить необходимый для обеспечения безопасности коэффициент запаса прочности и повысить допустимую глубину погружения в $1,1 \div 1,2$ раза или, при неизменной глубине погружения, на порядок увеличить расчётный ресурс конструкции.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендо- ванных ВАК

1. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-

Петербургского государственного политехнического университета. 2(219). 2015. – С. 182-190.

2. Носов В.В., Самигуллин Г.Х., Ямилова А.Р., **Зеленский Н.А.** Микромеханическая модель акустической эмиссии как методологическая основа прогнозирования разрушения сварных соединений// Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 1. – С. 244-253.

3. Носов В.В., Ямилова А.Р., **Зеленский Н.А.**, Матвиян И.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций на основе микромеханической модели акустической эмиссии при статическом нагружении// Деформация и разрушение материалов. 2016. № 11. – С. 38-45.

4. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Контроль и диагностика кольцевых элементов сварного корпуса подводного аппарата на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии// Контроль. Диагностика. 2016. № 12. – С. 30-39.

5. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Оценка прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии// Дефектоскопия. 2017. № 2. – С. 3-9.

6. Носов В.В., Ямилова А.Р., **Зеленский Н.А.**, Матвиян И.В. Оптимизация акустико-эмиссионного контроля прочности сварных соединений// Вестник МЭИ. 2017. № 2. – С. 96-101.

В изданиях, цитируемых в БД Scopus

7. Nosov V. V., **Zelenskii N. A.** *Estimating the Strength of Welded Hull Elements of a Submersible Based on the Micromechanical Model of Temporal Dependences of Acoustic-Emission Parameters*// *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. Vol. 53. No. 2. pp. 89-95.

Публикации в других научных изданиях

8. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Разработка нагружающего устройства для проведения акустико-эмиссионного исследования элементов прочного корпуса подводного аппарата(тезисы)// Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: сборник трудов II международной научно-

практической конференции. Том II/ Под ред. Е.И.Пряхина. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2014. 205 с. – С. 135-138.

9. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Определение степени опасности дефектов сварных швов корпуса подводного аппарата с помощью явления акустической эмиссии // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов III международной научно-практической конференции. Том IV/ Под ред. В.В.Максарова / – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2015. 106 с. – С. 41-44.

10. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Акустико-эмиссионные исследования дефектов прочного корпуса подводного аппарата// Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2015. – С. 90-94.

11. **Зеленский Н.А.**, Носов В.В. Дефектоскопия корпусных конструкций подводных аппаратов, основанная на явлении акустической эмиссии//Материалы XIII м-ной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2015». СПб – ОАО «ЦКБ МТ«Рубин». 2015. 560 с. – С. 120-127.

12. Носов В.В., **Зеленский Н.А.**, Матвиев И.В., Ямилова А.Р. Влияние неоднородности на информативность диагностических параметров акустической эмиссии// Сборник трудов IV международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Том IV. Секция «Транспортная энергетика и машиностроение» СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2016. – С. 96-99.

13. Носов В.В., **Зеленский Н.А.**, Матвиев И.В., Ямилова А.Р. Оценка информативности акустико-эмиссионного показателя прочности/ Сборник трудов IV международной научно-практической конференции. «Инновации на транспорте и в машиностроении». Том IV. Секция «Транспортная энергетика и машиностроение» Том IV. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». 2016. – С. 100-103.

14. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Обеспечение безопасности глубоководных аппаратов посредством контроля состояния проч-

ного корпуса// III Международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». Тезисы докладов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 20-21 октября 2016 г. 256 с. – С. 119.

15. Носов В.В., Ямилова А.Р., **Зеленский Н.А.**, Матвиев И.В. Диагностирование прочностного состояния сварных соединений// III Международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». Тезисы докладов./ Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 20-21 октября 2016 г. 256 с. – С. 142.

16. Носов В.В., Матвиев И.В., **Зеленский Н.А.**, Ямилова А.Р. Оценка состояния технических объектов на основе моделирования прочностной неоднородности материала// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал, № 3(14) 2016. https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/10/NosovSoavtors_3_16_1.pdf (дата обращения 20.03.2017)

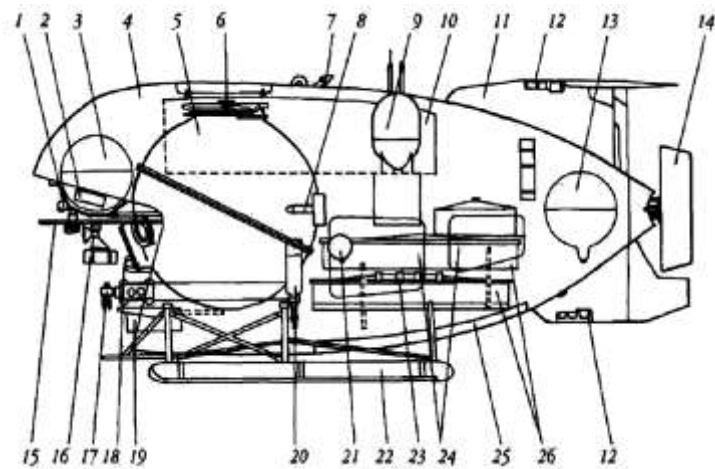
17. Носов В.В., Матвиев И.В., **Зеленский Н.А.**, Ямилова А.Р. Неразрушающий контроль на основе использования параметров микромеханической модели акустической эмиссии// Территория NDT. № 1. 2017. – С. 28–33.

18. Носов В.В., **Зеленский Н.А.** Обеспечение безопасности глубоководных аппаратов посредством контроля состояния прочного корпуса// Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4(5-2). 476 с. – С. 383-390.

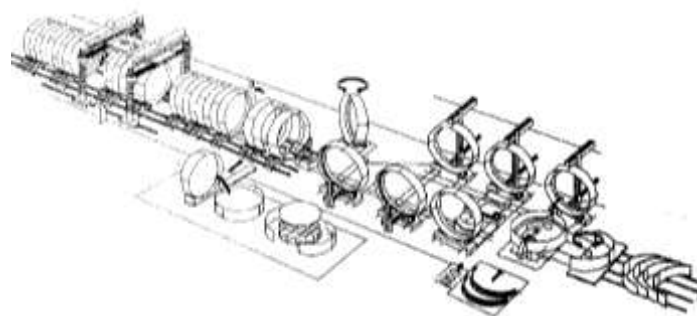
19. Носов В.В., Ямилова А.Р., Матвиев И.В., **Зеленский Н.А.** АЭ диагностирование прочностного состояния сварных соединений// Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. 476 с. – С. 391-400.

Патенты

20. Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата: Пат. 2617195 РФ, МПК(51) G01N 29/14 (2006.01)/ В.В. Носов, **Н.А. Зеленский**, И.В. Матвиев, Ф.Р. Ямилова – Опубл. 21.04.2017. Бюл. № 12.

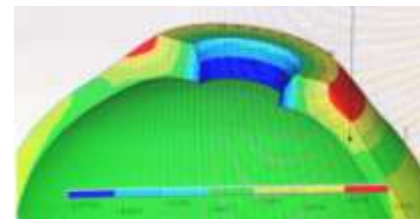


а)



б)

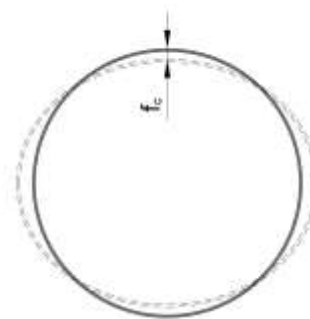
Рисунок 1 (а) – Схематичный продольный разрез подводного аппарата. 1 – гидролокатор; 2 – фотовспышка; 3 – носовая балластная сфера; 4 – лёгкий корпус; 5 – прочный корпус; 6 – люк; 7 – рым; 8 – боковые движители; 9 – аварийный буй; 10 – цистерна главного балласта; 11 – стабилизатор; 12 – гидрофоны; 13 – кормовая балластная цистерна; 14 – маршевый движитель; 15 – поворотная штанга; 16 – поворотная рама; 17 – манипулятор; 18 – датчик системы сбора данных; 19 – бункер для образцов; 20 – бункер с дробью; 21 – баллон воздуха высокого давления; 22 – лыжи; 23 – насос морской воды; 24 – технологические лучки; 25 – сбрасываемая часть лёгкого корпуса; 26 – аккумуляторные боксы; (б) – Схема сборки прочного корпуса подводного аппарата из кольцевых элементов



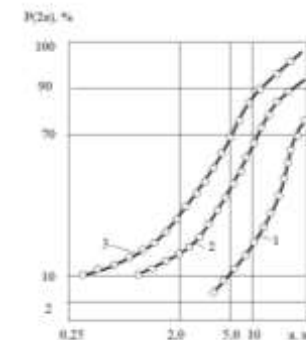
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Методы контроля состояния глубоководных аппаратов: а) – примеры расчёта напряжённого состояния программой *ANSUS* в районах выреза под входной люк; б) – снимок рентгеновского контроля; в) – контроль величины f_c наибольшего отклонения от правильной формы; г) – характеристические кривые чувствительности обнаружения дефектов методами неразрушающего контроля 1 – рентгеновский метод; 2 – применение окрашивающих жидкостей; 3 – ультразвуковой импульсный метод. a – характерный размер (полудлина) дефекта; $P(2a)$ – вероятность обнаружения дефекта

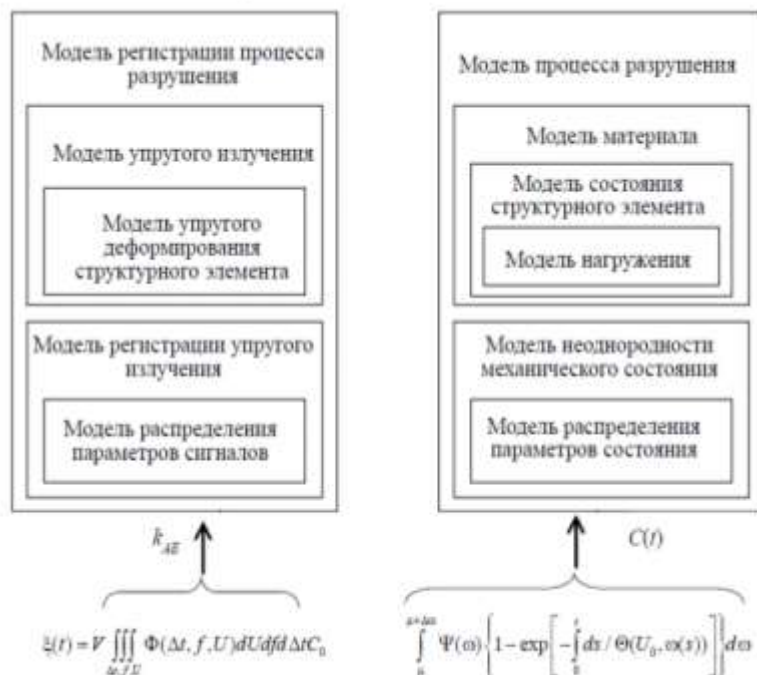


Рисунок 3 – Микромеханическая модель временной зависимости параметров акустической эмиссии материала. V – контролируемый методом АЭ объём материала, $\Phi(\Delta t, f, u)$ – плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Δt (паузам) между ними, амплитуде U и частоте f , C_0 – начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения, $\Psi(\omega)$ – функция плотности распределения значений величины $\omega = \gamma\sigma/KT$ по структурным элементам, μ – нижняя граница изменения этой величины; $\Delta\omega$ – доверительный интервал разброса значений ω по структурным элементам. Вид функции $\Psi(\omega)$ определяется распределениями значений напряжений σ и коэффициента γ в материале, которые связаны с распределением концентраторов напряжений по размерам. $\Theta(U_0, \omega(s)) = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t))/(KT)]$ – время разрушения структурного элемента (формула Журкова С.Н.), $\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-14}$ с – период атомных колебаний, U_0 – энергия сублимации (энергия отрыва атома при переходе тела из твёрдого состояния в газообразное), γ – структурно-чувствительный параметр, K – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, $\omega = \gamma\sigma/(KT)$

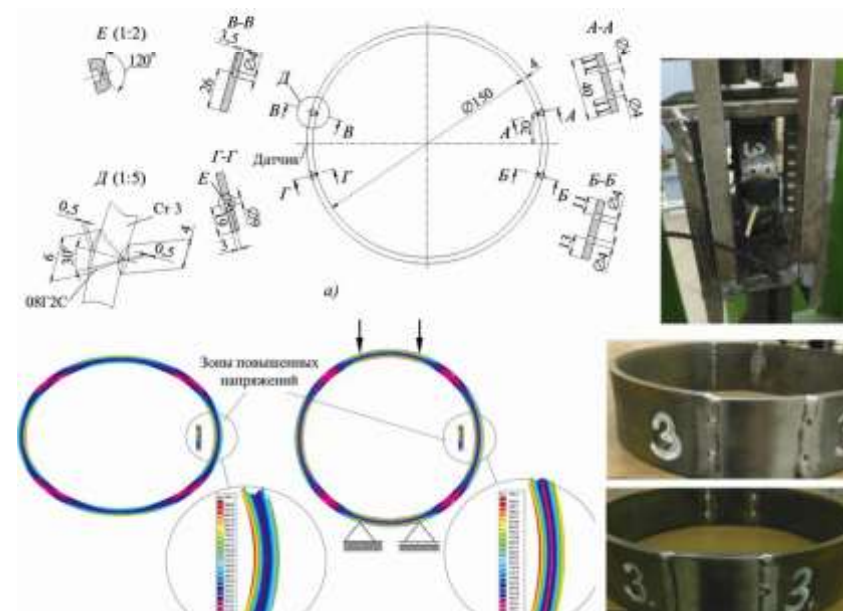


Рисунок 4 – Один из образцов сваренного встык кольца для АЭ-испытания при одноосном сжатии (а), распределение напряжений в кольцевом образце при различных видах нагружения (б); внешний вид образца при испытании (в)