

*На правах рукописи*



**Хайруллина Лариса Батыевна**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕГАЗОВОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОМБИНИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Специальность 05.26.03 - Пожарная и промышленная безопасность  
(нефтегазовая отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа – 2018

Работа выполнена на кафедре «Техносферная безопасность» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент  
**Пермяков Владимир Николаевич**

Официальные оппоненты:

**Иванов Валерий Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
НИИ интроскопии МНПО «Спектр» /  
главный научный сотрудник

**Ковшова Юлия Сергеевна**  
кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет» /  
кафедра «Технологические машины и  
оборудование», доцент

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет» (г. Самара)

Защита состоится 26 июня 2018 года в 14:00 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 ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Вероятность техногенных аварий и катастроф на объектах нефтегазовой отрасли ежегодно возрастает, с исчерпанием ресурса нефтегазового оборудования (более половины технологических аппаратов, сосудов и трубопроводов отработали свой нормативный срок).

Важной составляющей обеспечения промышленной безопасности нефтегазового оборудования в различных условиях эксплуатации является обнаружение опасных дефектов в конструкциях сложной геометрической формы и больших пространственных объемов. Отличительной особенностью данных объектов является функционирование в углеводородной среде, что ограничивает набор экспериментальных методов, позволяющих оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции.

Одним из эффективных направлений решения проблемы является усовершенствование метода хрупких тензочувствительных покрытий (ХТП) путем разработки нового тензопокртия и совмещения его с методом акустической эмиссии (АЭ). Метод хрупких покрытий хорошо зарекомендовал себя при испытаниях деталей и конструкций, имеющих сложное пространственное расположение элементов и большую неравномерность полей напряжений на их поверхностях. Метод акустической эмиссии дает возможность детально изучать в реальном времени процессы деформации, перестройки структуры, образования и роста дефектов, разрушения конструкций.

Основной характеристикой метода ХТП является тензочувствительность  $\epsilon_0$  - величина главной деформации растяжения на поверхности образца, детали или конструкции в условиях линейного напряженного состояния  $\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , при котором в хрупком покрытии возникает первая трещина. Известные и применяемые покрытия не обладают достаточной стабильностью величины тензочувствительности  $\epsilon_0$  в углеводородных средах; сложность нанесения состава покрытия на поверхность конструкции и регистрации трещин путем фрагментного их фотографирования и зарисовки – все это является препятствием к применению рассматриваемого метода хрупких покрытий в нефтегазовой промышленности.

Таким образом, разработка нового хрупкого тензочувствительного покрытия, необходимого для проведения комбинированной диагностики напряженно-деформированного состояния нефтегазового оборудования, является актуальной задачей обеспечения промышленной безопасности нефтегазовой отрасли в целом.

### **Степень разработанности темы**

Экспериментальными методами исследования напряженно-деформированного состояния конструкций занимались отечественные и зарубежные специалисты: Н.И. Пригоровский, В.К. Панских, Б.Н. Ушаков, Н.А. Махутов, И.А. Разумовский, В.Н. Пермяков, М.Л. Дайчик, В.В. Москвичев, И.Р. Кузеев, А.М. Лепихин, В.И. Иванов, В.А. Прохоров, И.Е. Васильев, А. Дюрелли, Дж. Холл, Ф. Стерн, Дж. Дохерти, У. Шарп, Д. Оливер, Д. Юнг, Г. Аллеманг, Д. Браун, А. Кабаяси, Р. Роуландс, А. Даниэл, С. Смит, Дж. Дэлли и др.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле специальности 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»: область науки и техники, изучающая причины возникновения, закономерности проявления и развития, методы и средства превентивного и текущего управления природными и техногенными явлениями разрушительного и пожароопасного характера, сопровождающимися значительным ущербом, а именно п.13 – «Разработка методов оценки и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации технических устройств сложных технических систем опасных производственных объектов».

### **Цель работы**

Целью работы является разработка комбинированного метода диагностики напряженно-деформированного состояния оборудования нефтегазовой отрасли на основе новых хрупких тензочувствительных покрытий и акустической эмиссии.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

- 1 Анализ существующих хрупких тензочувствительных покрытий;
- 2 Разработка нового хрупкого тензочувствительного покрытия с необходимыми характеристиками, устойчивого к углеводородным средам;

3 Разработка методики применения хрупкого тензочувствительного покрытия для определения полей деформаций и напряжений в элементах конструкций;

4 Экспериментальная оценка разработанного метода комбинированной диагностики на промышленных объектах.

### **Научная новизна**

1 Для реализации комбинированного метода диагностики промышленной безопасности оборудования объектов нефтегазовой отрасли разработаны составы хрупких покрытий на основе резорциноформальдегидной смолы, обладающих высокой тензочувствительностью ( $\epsilon_0 = 300 \div 1400$ ) и устойчивостью к разрушающему воздействию углеводородных сред.

2 Установлено, что хрупкое тензочувствительное покрытие позволяет повысить чувствительность сигнала акустической эмиссии к уровню напряжений, зафиксировать состояние предразрушения за счет активного растрескивания покрытия на ранних стадиях формирования и развития дефектов.

Показано, что при оценке напряженно-деформированного состояния металлических конструкций нефтегазового оборудования комбинированным методом в местах локализации дефектов появление сигнала акустической эмиссии с поверхности хрупкого тензочувствительного покрытия ( $P = 5,8$  кН) происходит раньше, чем с поверхности исследуемого объекта без покрытия ( $P = 37,5$  кН).

3 Получены расчетно-экспериментальные зависимости характеристик хрупких тензочувствительных покрытий и акустической эмиссии от параметров деформирования материалов и конструкции в штатных и аварийных ситуациях.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1 Принципы формирования тензочувствительных покрытий, стойких при работе в углеводородных средах.

2 Результаты экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов оборудования на основе метода хрупких тензочувствительных покрытий.

3 Методика определения полей деформаций и напряжений в элементах оборудования, основанная на применении метода хрупких покрытий.

4 Комбинированный метод диагностики технического состояния нефтегазового оборудования на основе хрупких тензочувствительных покрытий и акустической эмиссии.

5 Результаты экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов конструкций новыми хрупкими тензочувствительными покрытиями и акустической эмиссией.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей образования, роста и распространения трещин в хрупких тензочувствительных покрытиях в зависимости от напряженно-деформированного состояния металла диагностируемых конструкций, а также в научном обосновании метода дистанционного мониторинга общих и локальных упругопластических деформаций и дефектов опасных объектов на всех стадиях их образования и развития в штатных и аварийных ситуациях.

Практическая значимость работы:

1 На основании установленных закономерностей разработаны составы хрупких тензочувствительных покрытий на основе резорциноформальдегидной смолы с улучшенными эксплуатационными свойствами (патент РФ № 2313551, патент РФ № 2417241) и комбинированный метод диагностики деформаций и напряжений (патент РФ № 2345324), которые могут быть применены при исследовании напряженно-деформированного состояния оборудования нефтегазового комплекса.

2 Комбинированная диагностика неразрушающего контроля используется в учебном процессе для студентов направления «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «ТИУ», использовалась для исследования напряженно-деформированного состояния конструкций вертикального цилиндрического резервуара для нефти и нефтепродуктов.

### **Методология и методы исследования**

Методология исследования заключается в последовательном проведении исследований по изучению методики применения хрупких тензочувствительных покрытий, подбору компонентов состава покрытия, наблюдения за процессом обра-

зования трещин в хрупком покрытии, измерения показателей, оценки эффективности использования комбинированного метода диагностики для исследования напряженно-деформированного состояния.

Поставленные задачи решены методами системного анализа и синтеза, выявления математических зависимостей между множеством взаимосвязанных параметров и характеристик, методами обобщения, теории вероятности, моделирования процессов и натурными исследованиями конструкции элементов соединения трубопроводов.

Методика определения полей упругих деформаций и напряжений с использованием хрупких тензочувствительных покрытий включает нагружение конструкции и фиксирование картин трещин в покрытии.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы подтверждается совпадением экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях, с результатами и исследованиями других авторов, а также с результатами опытно-промышленных испытаний.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на: международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири» (г. Тюмень, 2005 г.); IV-й Всероссийской научно-практической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна» (г. Тюмень, 2006 г.); международной конференции по теории механизмов и механике машин, посвященной 100-летию со дня рождения академика И.И. Артоболевского (г. Краснодар, 2006 г.); 12-й международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (г. Тюмень, 2006 г.); II-й Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (г. Красноярск, 2007 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири» (г. Тюмень, 2007 г.); VI-й Всероссийской научно-практической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна» (г. Тюмень, 2009 г.); IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (Красноярск, 2012); научно-практическом семинаре «Проблемы природно-техногенной безопасности» (г. Красноярск, СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, 25 июня 2013 г.).

**Личный вклад автора** заключается в постановке и реализации задач исследования; в формулировке основных положений научной новизны и практической значимости; в проведении экспериментальных исследований по разработке составов хрупких тензочувствительных покрытий, стендовых исследований напряженно-деформированного состояния конструкций методом хрупких тензочувствительных покрытий и внедрении полученных результатов.

### **Публикации**

Содержание работы опубликовано в 20 печатных научных трудах, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых журналах в соответствии с перечнем ВАК Минобразования и науки РФ. Имеются четыре патента.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из четырех глав, основных выводов, списка использованных источников из 121 наименования; содержит 152 страницы машинописного текста, 56 рисунков, 14 таблиц и приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** выполнен обзор методов оценки и диагностики для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации оборудования. Проведен анализ существующих хрупких тензочувствительных покрытий. Рассмотрены теоретические основы применения методов хрупких тензочувствительных покрытий и акустической эмиссии.

Совмещение метода хрупких покрытий с акустической эмиссией позволит эффективно проводить диагностику повреждений конструкции. При росте трещины или любого дефекта, то есть при увеличении их размеров, выделяется энергия в виде волн напряжения или акустической эмиссии. Даже если дефект является микроскопическим, под действием локального напряжения или деформации он генерирует волны напряжения. Метод АЭ обладает высокой чувствительностью к возникающим и растущим дефектам.



Во второй главе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке нового состава покрытия.

Составы известных и новых разработанных тензочувствительных покрытий представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Типы хрупких тензочувствительных покрытий

Типы покрытий	Характеристики покрытий				
	Тензочувствительность, $\varepsilon_0$ мкм/м	Погрешность измерений, %	Рабочая температура, °С	Окружающая среда	Способ нанесения
«Стресскоут»	300÷800	20		воздух	напыление
«Майбах»		20	140÷150	воздух	расплавление твердой смолы
Керамические покрытия	200÷1800	20	10÷16	воздух, вода, масло	напыление
Канифольные газоплазменного нанесения	400÷1400	20	5÷35	воздух, вакуум	газопламенное порошковое напыление
Канифольные лаковые	500÷1500	20	10÷40	воздух, вакуум	напыление
Оксидные	400÷5000	15	-200÷400	воздух, вода, масло	наклейка оксидированной фольги
Стеклоэмалевые	300÷600	20	-250÷400	воздух, вода, масло, жидкий азот	оплавление стекломали в печи
Эпоксидная (фталеый ангидрид, дибутилфтолат)		20	130÷150	повышенная влажность	нанесение
Эпоксидная (фталеый ангидрид)		20	110÷140	повышенная влажность	нанесение
Резорциноформальдегидная (состав №1) (Пат. № 2313551)	400÷1400	18	0÷50	Воздух, углеводородная среда	нанесение кистью, напыление
Резорциноформальдегидная (состав №2) (Пат. № 2417241)	300÷1200	16	0÷50	воздух углеводородная среда	нанесение кистью, напыление

Каждое из этих покрытий имеет свой диапазон применимости. Основными недостатками существующих покрытий являются трудности нанесения состава

покрытия на испытываемую конструкцию и невозможность использования в углеводородных средах.

Принцип формирования композиции состава хрупкого тензочувствительного покрытия для исследования напряженно-деформированного состояния оборудования нефтегазового комплекса включает следующие, ряд требований к составу покрытия, а именно: хрупкость, прозрачность, высокая чувствительность, хорошая адгезия к конструкционным материалам, заданный предел прочности в интервалах эксплуатационных температур и влажности, устойчивость к углеводородной среде.

В результате поиска был найден оптимальный химический состав хрупкого тензочувствительного покрытия, что позволяет расширить использование данного метода для диагностики напряженно-деформированного состояния оборудования нефтегазового комплекса (пат. № 2313551, пат. № 2417241).

В **третьей главе** изложены результаты исследований свойств и характеристик новых составов хрупких тензочувствительных покрытий.

Величина тензочувствительности  $\varepsilon_0$  определяется тарировкой покрытия на образцах из стали ВСтЗсп в виде плоских прямоугольных балок (280×20×5). Приспособление для тарировки обеспечивает консольный изгиб образцов путем приложения к свободному концу балки изгибающей нагрузки или создания на свободном конце балки фиксированного прогиба. По длине рабочего пролета балки имеет место линейное распределение изгибающих моментов, а на растянутых и сжатых поверхностях по ширине - линейное напряженное состояние с величинами максимальных растягивающих и сжимающих деформаций. Оценка статистического разброса величин тензочувствительности  $\varepsilon_0$  для резорциноформальдегидных покрытий была выполнена в стабильных условиях эксперимента ( $t=18^\circ\text{C}$ ,  $H=30\%$ ), с изменением температуры не более  $\pm 1^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха не более  $\pm 5\%$ . Формирование покрытий и испытаний образцов проводили в одинаковых условиях. Объем выборки или общее число испытаний составляло  $n=65$ .

Измеренные величины тензочувствительности  $\varepsilon_{0j}$ , округленные до  $0,1 \cdot 10^{-4}$ , в виде вариационного ряда представлены в таблице 2.

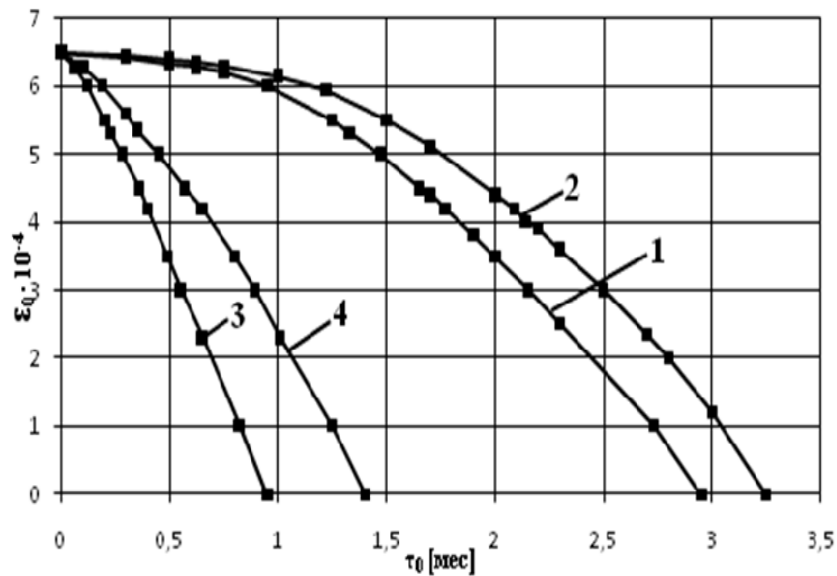
Таблица 2 - Оценка числовых характеристик и параметров распределения

Границы интервала $\varepsilon_{oj} \cdot 10^{-4}$	Число наблюдений $f_j$	Средний интервал $\varepsilon_{oj} f_j \cdot 10^{-4}$	$(\varepsilon_{oj} - \varepsilon_0) \cdot 10^{-4}$	$(\varepsilon_{oj} - \varepsilon_0)^2 \cdot 10^{-8}$	$f_j (\varepsilon_{oj} - \varepsilon_0)^2 \cdot 10^{-8}$
5,5	1	5,5	-1,0	1,0	1,0
5,6	1	5,6	-0,9	0,81	0,81
5,7	1	5,7	-0,8	0,64	0,64
5,8	6	34,8	-0,7	0,49	2,94
5,9	4	23,6	-0,6	0,36	1,44
6,0	4	24,0	-0,5	0,25	1,0
6,1	9	54,9	-0,4	0,16	1,44
6,2	7	43,4	-0,3	0,09	0,63
6,3	5	31,5	-0,2	0,04	0,20
6,4	4	25,6	-0,1	0,01	0,04
6,5	7	45,5	0	0	0
6,6	5	33,0	0,1	0,01	0,05
6,7	4	26,8	0,2	0,04	0,16
6,8	1	6,8	0,3	0,09	0,09
6,9	1	6,9	0,4	0,16	0,16
7,0	1	7,0	0,5	0,25	0,25
7,1	1	7,1	0,6	0,36	0,36
7,2	2	14,4	0,7	0,49	0,98
7,3	1	7,3	0,8	0,64	0,64
$\Sigma$	65	416,6	-	-	12,83

Размах варьирования составляет  $R = \varepsilon_{0max} - \varepsilon_{0min} = 1,8 \cdot 10^{-4}$ .

Все измерения величины  $\varepsilon_{oj}$  попадают в интервал разброса от среднего значения в пределах  $\pm 14\%$ . Коэффициент вариации равен  $6,15\%$ . Выборочное среднее значение тензочувствительности составляет  $650$  мкм/м, погрешность оценки величин напряжений создания и использования покрытий составляет  $17\%$  и в значительной степени зависит от стабильности внешних условий. Тензочувствительность составляет  $\varepsilon_0 = 300 \div 1400$  мкм/м.

Важным свойством хрупких покрытий является нерастворимость в углеводородных средах (рисунок 1). Методика испытания проводилась на образцах с покрытием (№1, 2, 3, 4), которые помещались в газообразные и жидкие среды.



(образец № 1, 3 – газообразная среда; образец № 2, 4 – жидкая среда)

Рисунок 1 - Зависимость работоспособности образцов с хрупким покрытием от времени выдержки в углеводородных средах

На рисунке 1 показаны зависимости тензочувствительности образцов с хрупким покрытием на основе резорциноформальдегидной смолы от времени выдержки в углеводородных средах (жидкой, газообразной).

Согласно методике испытания, образцы находились в одинаковых стабильных условиях окружающей среды. Образцы № 1 и 2 выдерживались при температуре  $-40 \dots +45$  °С и влажности 30...35 %, образцы № 3 и 4 при температуре 15...25 °С и влажности 18...21 %. Период выдержки образцов при пониженной температуре достигал трех месяцев.

При стандартных условиях (15...25 °С) деструкция покрытия происходит быстрее, что связано с испарением свободного фенола. Хрупкое покрытие не растворяется в углеводородных смесях.

При тарировочных испытаниях нового состава покрытия с использованием известной методики, исследовались характеристики тензочувствительности при температуре окружающей среды  $-18 \dots +50$  °С и относительной влажности 20...70%. Это обеспечивало получение хрупкого покрытия с высокой чувствительностью (рисунок 2).

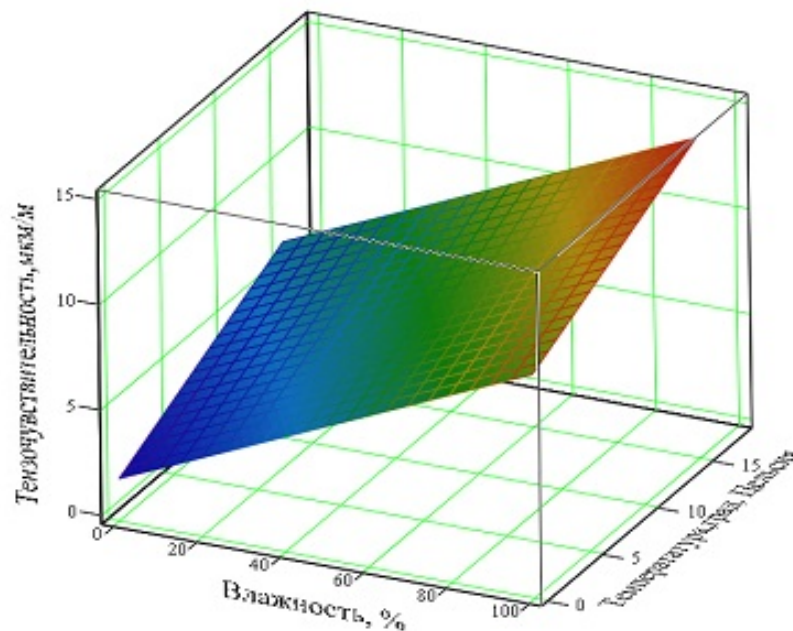


Рисунок 2 - Зависимость тензочувствительности от влажности и температуры

В четвертой главе рассмотрены возможности применения современных средств регистрации и обработки акустических сигналов для наблюдения за процессом трещинообразования в хрупких тензочувствительных покрытиях.

Исследования проводились на натуральных тройниковых соединениях и сосудах. Программа проведения испытания тройникового соединения включала поэтапное нагружение. Максимальный уровень внутреннего давления составлял  $P = 38$  МПа. На рисунке 3 пунктирными линиями отмечены зоны распространения трещин в хрупком покрытии.



Рисунок 3 - Зоны распространения трещин в хрупком покрытии

Образование трещин наблюдалось как на самом шве, так и вблизи продольной оси трубы. В рассматриваемых зонах максимальная плотность трещин в покрытии составляла  $\Psi = 12-18$  трещин/см.

На втором этапе испытаний трещины в хрупком покрытии на поверхности трубы ( $\Psi = 22-38$  трещин/см) получили распространение по всему периметру сварного шва, а вблизи продольной оси – на теле патрубка. Наибольшая численность трещин в покрытии, достигавшая  $\Psi = 22-38$  трещин/см, наблюдалась в области сварного шва, где наряду с трещинами 1-го рода от напряжений  $\sigma_1=105$  МПа появились перпендикулярные к ним трещины 2-го рода от напряжений  $\sigma_2=158$  МПа (рисунок 4)

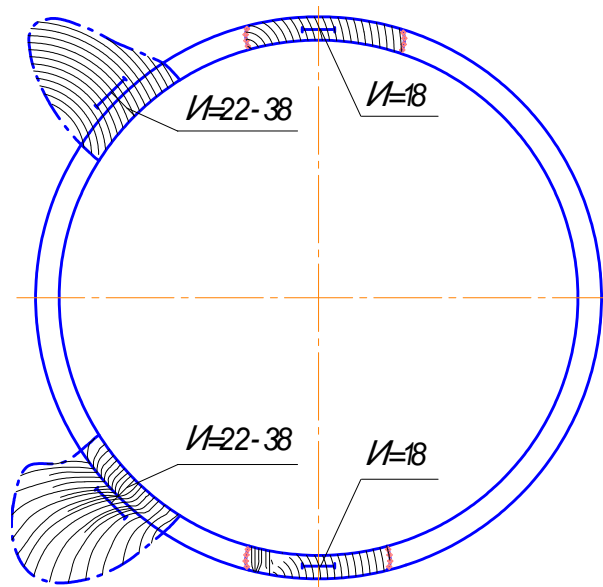


Рисунок 4 - Картина трещин в хрупком покрытии, образовавшаяся на втором этапе испытаний по периметру сварного шва в месте приварки патрубка

Как видно из рисунка 4, картина трещин, образовавшаяся в хрупком покрытии вблизи патрубка относительно продольной оси, имеет несимметричный характер. Это может быть вызвано геометрической неоднородностью, несимметричным положением патрубка относительно центральных осей конструкции, а следовательно, и неравномерными нагрузками, а также влиянием остаточных напряжений в зонах упругопластического деформирования.

Для сравнительного анализа действующих напряжений в тройниковом соединении построена полная трехмерная сеточная модель с учетом свойств стали.

Получены интегральные жесткости – вертикальная, боковая, продольная; параметры напряженно-деформированного состояния конструкции при нагрузке; выявлены зоны концентрации напряжений. Резкое увеличение концентрации напряжений наблюдается в точках вблизи мест приложения сосредоточенных сил, в местах резкого изменения формы тела, в местах сварного шва (рисунок 5).

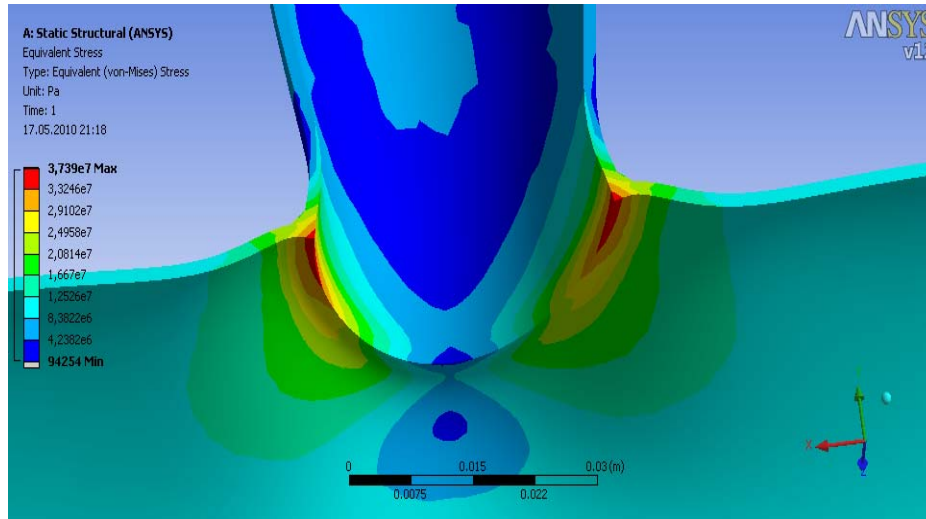


Рисунок 5 - Эквивалентные напряжения

Расчеты по программе ANSYS подтверждают экспериментальные результаты исследования тройникового соединения в лабораторных условиях:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 38,0 \text{ МПа (расчетные);}$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 41,2 \text{ МПа (натурные).}$$

Для регистрации трещин предлагается использовать комбинированный метод акустической эмиссии (патент № 2345324) и составы хрупких тензочувствительных покрытий (патент № 2313551, патент № 2417241). Это позволит повысить оперативность обработки данных дистанционного наблюдения за процессом трещинообразования в труднодоступных местах и проведения дистанционного контроля измеряемых параметров в штатных и аварийных ситуациях.

В данной работе исследованы возможности применения метода хрупких покрытий совместно с акустико-эмиссионным, что позволяет вывести метод ХТП

из визуальных на дистанционный уровень и повысить чувствительность метода в 100 и более раз.

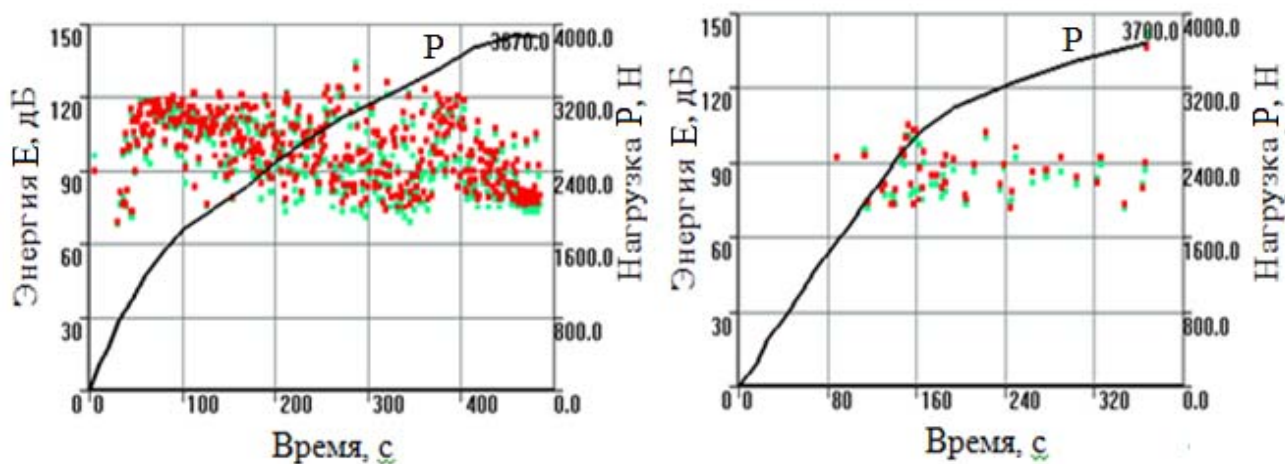
В проводимых испытаниях использовались оксидные покрытия.

Комплекс акустической эмиссии A-Line32D представляет собой многоканальную цифровую систему сбора и обработки акустико-эмиссионной информации, получаемой с исследуемого объекта от широкополосных акустико-эмиссионных преобразователей (ПАЭ) G-200 с резонансной частотой 150 кГц.

Предварительные усилители имеют полосу пропускания 30 – 500 кГц, а коэффициент усиления – 26 дБ. При испытаниях образцов использовались два ПАЭ, установленных на расстоянии 210 мм. Скорость ультразвуковых волн при вычислении координат источников АЭ составляла 3000 м/с. Параметры импульса АЭ зависят от параметров хрупкого покрытия (толщины, ширины, скорости звука в материале покрытия, прочности покрытия).

При возникновении в покрытии деформаций  $\epsilon_1$ , превышающих величину пороговой деформации  $\epsilon_0$ , используемые датчики фиксируют импульсы возмущений, возникающие при образовании трещин в хрупком покрытии.

На рисунок 6 представлены графики зависимости энергии сигналов  $E$  (обозначены точками) АЭ и величины нагрузки  $P$  (сплошные линии) от времени нагружения ( $t$ ) в процессе разрушения образца с покрытием (а) и без покрытия (б) при испытании образцов на разрыв.



а) образец с покрытием

б) образец без покрытия

Рисунок 6 - Зависимость энергии сигналов АЭ и уровня нагрузки от времени нагружения



В образце с покрытием (рисунок 6а) амплитуда сигналов достигает уровня 90 дБ в начале нагружения и повышается до уровня 120 дБ при  $P=34,50$  кН. При этом энергия отдельных сигналов АЭ достигает 125 дБ и выше. С течением времени (от 400 с) амплитуда и энергия сигналов АЭ заметно падает до 60 и 105 дБ соответственно. Это связано с тем, что покрытие растрескивается и происходит пластическая деформация основного материала.

На образце без покрытия (рисунок 6 б) при максимальной амплитуде сигналов АЭ при уровне нагрузки, соответствующей началу пластической деформации материала, энергия сигналов соответствует 75 дБ и 105 дБ, затем падает и составляет перед разрушением образца 55 и 90 дБ соответственно.

Подобная динамика свидетельствует о том, что тензочувствительное покрытие позволяет повысить чувствительность к началу пластической деформации основного металла и возникающим растущим дефектам. При этом образование трещин регистрируется на более ранних стадиях деформации. Сигналы АЭ с большой энергией в образце (рисунок 6а) вызваны образованием трещин в тензочувствительном покрытии.

На рисунке 7 приведены графики изменения активности АЭ ( $\dot{N}$ ) и уровня нагрузки ( $P$ ) от времени ( $t$ ) образцов с покрытием (а) и без покрытия (б).

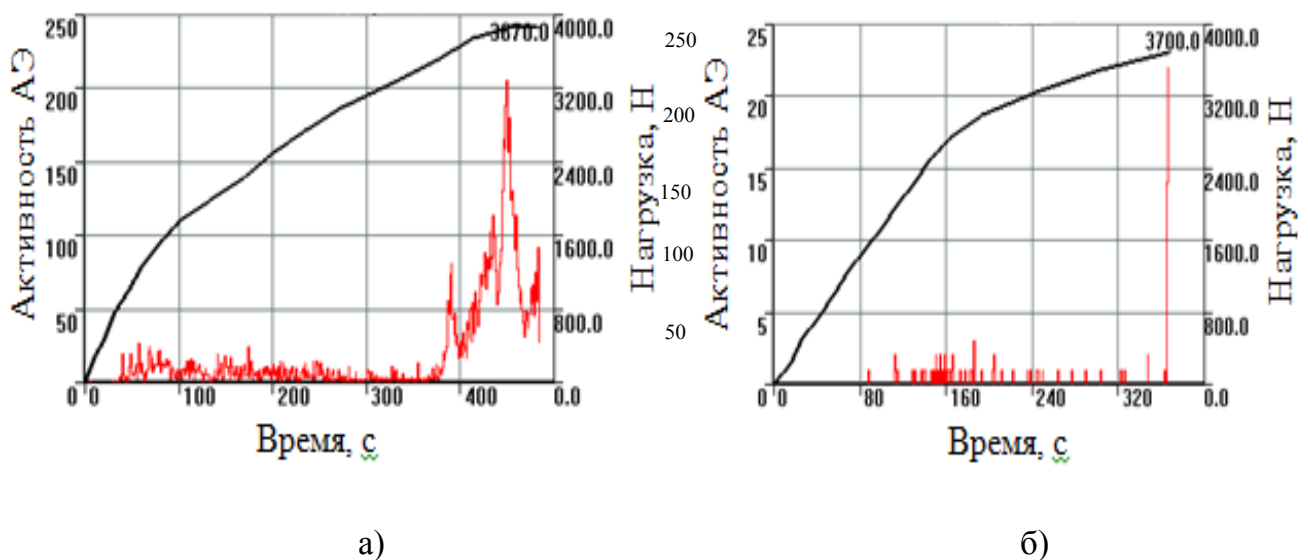


Рисунок 7 - Графики изменения активности сигналов АЭ и уровня нагрузки от времени нагружения образцов с покрытием (а) и без покрытия (б)

Активность АЭ ( $\dot{N}$ ) образца с хрупким тензочувствительным покрытием в области упругих деформаций вызвана образованием трещин в покрытии (рисунок

7а), заметна уже в области упругой деформации при  $P = 7,5$  кН и постепенно возрастает с ростом нагрузки до уровня  $P = 34,5$  кН, соответствующего началу перехода материала образца в область пластической деформации.

Затем активность сигналов АЭ резко повышается и достигает своего максимума при  $P = 3825$  Н, после чего заметно снижается и вновь возрастает лишь перед разрушением образца. Активность АЭ на образце без покрытия (рисунок 7б) увеличивается в начале области пластической деформации при  $P = 2700$  Н, затем резко возрастает при нагружении свыше  $P = 3600$  Н и растет вплоть до разрушения.

Активность АЭ на графике (рисунок 7а) существенно больше, чем в образце без покрытия. В области упругих деформаций сигналы АЭ вызваны образованием микротрещин в покрытии, что связано с некоторой неоднородностью НДС покрытия. В области пластической деформаций активность АЭ вызвана как существенной активизацией разрушения покрытия при увеличении уровня деформации, так и структурной перестройкой материала подложки с последующим разрушением объекта.

В работе проведены натурные экспериментальные исследования стального вертикального цилиндрического резервуара для нефти и нефтепродуктов (РВС-1000 №6). АЭ-контроль резервуаров выполнялся в соответствии с нормативными требованиями.

Проведенные эксперименты подтвердили применимость разработанного комбинированного метода для диагностики напряженно - деформированного состояния нефтегазового оборудования в штатных и аварийных ситуациях.

Следовательно, хрупкие тензочувствительные покрытия с заданной пороговой деформацией совместно с системой регистрации и обработки акустических сигналов могут быть применены в качестве устройства неразрушающего контроля для дистанционного слежения за уровнем деформаций (напряжений) в исследуемых элементах конструкций и позволяют регистрировать импульсы образования трещин в хрупком покрытии, начиная с момента их зарождения до полного их разрушения.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Анализ существующих хрупких тензочувствительных покрытий показал, что каждое из известных покрытий имеет свои характеристики и диапазон применимости, не обладает достаточной стабильностью величины тензочувствительности в углеводородных средах, а процесс нанесения их на исследуемую поверхность - трудоемкий, требующий дополнительных мер по электро- и пожаробезопасности.

2 Определены принципы формирования тензочувствительных покрытий, стойких при работе в углеводородных средах; изложены результаты исследований их свойств и характеристик и разработаны составы покрытий на основе резорциноформальдегидной смолы (патент № 2313551, патент № 2417241), которые могут эффективно использоваться при реализации комбинированного метода для визуального и дистанционного мониторинга напряженно-деформированного состояния оборудования в области деформаций 0,05 - 7 %.

3 Получены характеристики величины тензочувствительности хрупких покрытий широкого диапазона ( $E=300\div 1400$ ), устанавливающие зависимости от параметров отверждения, нагрузки, влажности, температуры, времени выдержки в углеводородной смеси.

4 Разработана методика применения хрупкого тензочувствительного покрытия для раннего выявления опасных напряженных зон и повреждений конструкции.

Разработан новый комбинированный метод для визуальной и дистанционной диагностики напряженно-деформированного состояния оборудования и конструкций (патент № 2345324) в штатных и аварийных ситуациях.

5 В процессе экспериментальных исследований показано, что использование разработанного покрытия в комбинированном методе визуального и дистанционного мониторинга напряженно-деформированного состояния, позволяет зафиксировать состояние предразрушения за счет активного растрескивания покрытия на ранних стадиях формирования и развития дефектов. При этом разработанные покрытия более стойкие при работе в углеводородной среде, чем известные аналоги.

**Основное содержание работы представлено в следующих работах:**

*Материалы, опубликованные в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утвержденных ВАК РФ:*

1. Пермяков, В.Н. Хрупкое тензочувствительное покрытие на основе резорциноформальдегидной смолы / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – №2. – Том 75. – М.: ООО Издательство «ТЕСТ-ЗЛ», 2009. – С. 53-55.

2. Махутов, Н.А. Анализ напряженно-деформированного состояния оборудования нефтегазохимических заводов и трубопроводного транспорта в условиях эксплуатации / Н.А. Махутов, В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. –№2. – М.: ВИНТИ, 2009. - С. 69 – 74.

3. Дистанционный мониторинг состояния нефтегазохимического оборудования / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина // Известия вузов. Нефть и газ. – 2012. – №5. – С.111-115.

4. Пермяков, В.Н. Диагностика тензочувствительными покрытиями / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина // Известия вузов. Нефть и газ. – 2012. – №6. – С.120-124.

5. Л.Б. Хайруллина Метод оценки и диагностики оборудования нефтегазовых объектов // Научный журнал. Технологии техносферной безопасности. №4 - 2017 - (<http://academygps.ru/ttb>).

*в других изданиях:*

6. Пермяков, В.Н. Тензочувствительные материалы на основе синтетических смол / В. Н. Пермяков, Л. Б. Хайруллина //Материалы международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири». – Тюмень: ТюмГНГУ. 2005. – С. 207.

7. Хайруллина, Л.Б. Моделирование заданных свойств тензочувствительных покрытий / Л.Б. Хайруллина // Материалы международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири». – Тюмень: ТюмГНГУ. 2005. – С. 208.

8. Пермяков, В.Н. Новые материалы хрупких покрытий для мониторинга опасных объектов в криозоне / В. Н. Пермяков, Л. Б. Хайруллина // Материалы Международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С. 288-289.

9. Пермяков, В.Н. Мониторинг опасности высокорисковых объектов / В. Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С.27-28.

10. Пермяков, В.Н. Искусственные тензочувствительные покрытия / В.Н. Пермяков, Л. Б. Хайруллина // Материалы международной конференции по теории механизмов и механике машин. – Краснодар: КГТУ, 2006. – С.241-242.

11. Пермяков, В.Н. Технология получения искусственных тензочувствительных покрытий / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина // Материалы 12-ой международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С.172.

12. Пермяков, В.Н. Тензочувствительное покрытие для углеводородных сред / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина // Материалы II Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем». – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2007. – С.288-289.

13. Пермяков, В.Н. Мониторинг состояния поврежденных объектов добычи, транспортировки и переработки углеводородов / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2007. – С.240-241.

14. Пермяков, В.Н. Хрупко-акустический метод диагностики потенциально опасных объектов / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина, С.А. Никифоров // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна». – Тюмень: ТюмГНГУ, 2008. – С.26-28.

15. Пермяков, В.Н. Дистанционный мониторинг нефтегазохимического оборудования / В. Н. Пермяков, Л. Б. Хайруллина // Материалы IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем». – Красноярск: СКТБ «Наука» КНУ СО РАН, 2012. – С.54-56.

16. Хайруллина, Л.Б. Диагностика машин и оборудования нефтегазохимического комплекса /Л.Б. Хайруллина // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Тюменского индустриального института. -Тюмень: ТюмГНГУ. -2013. - С.107-111.

*патенты:*

17. Патент на изобретение № 2305011. Устройство и способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы / В. Н. Пермяков, Н. А. Махутов, Мартынович В.Л., Савин О.С, Л. Б. Хайруллина - опубликовано 27.08.2007.- бюл. №24.

18. Патент на изобретение № 2313551. Хрупкое покрытие на основе искусственных смол / В.Н. Пермяков, Н.А. Махутов, Л.Б. Хайруллина, Н.Н. Паршуков - опубликовано 27.12.2007. - бюл. №36.

19. Патент на изобретение № 2345324. Способ исследования деформаций и напряжений / В. Н. Пермяков, Н. А. Махутов, Л. Б. Хайруллина - опубликовано 27.01.2009. - бюл.№3.

20. Патент на изобретение № 2417241. Хрупкое покрытие на основе резорциноформальдегидных смол / В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина, Н.Н. Паршуков - опубликовано 27.04.2011 - бюл.№3.