

*На правах рукописи*



**Смирнов Антон Леонидович**

УДК 622.242

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ  
ЭМИССИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ВЫШЕК ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ  
РЕМОНТА СКВАЖИН**

Специальность: 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы»  
(нефтяной и газовой промышленности)

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

Ухта – 2013

Диссертация выполнена в Ухтинском государственном техническом университете

**Научный руководитель:** – доктор технических наук, профессор  
**Быков Игорь Юрьевич**

**Официальные оппоненты:** – доктор технических наук, профессор  
**Ягубов Зафар Хангусейн оглы**  
Заведующий кафедрой ЭАТП, ФГБОУ  
ВПО «УГТУ»

– кандидат технических наук  
**Кузьминых Дмитрий Владимирович**  
Инженер отдела защиты от коррозии филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» ПечорНИПИнефть в г. Ухта

**Ведущая организация:** Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Защита состоится «31» октября 2013 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: ул. Первомайская, 13, г. Ухта, Республика Коми, 169300.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат размещен на сайте Ухтинского государственного технического университета [www.ugtu.net](http://www.ugtu.net) в разделе «Диссертации».

Автореферат разослан 30 сентября 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.291.02,  
кандидат технических наук



М.М. Бердник

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

По данным Ростехнадзора за последнее десятилетие наблюдался рост аварий (падения) вышек буровых установок и разрушения их частей. Установлено, что наиболее опасными дефектами, влияющими на несущую способность и устойчивость эксплуатируемых вышек, являются различного вида дефекты, из которых особую опасность представляют трещины в сварных соединениях и в зонах концентрации напряжений.

Установлено, что поиск и распознавание дефектов в вышечных конструкциях с большим количеством сварных соединений, затруднен и трудоемок при использовании регламентированных традиционных методов неразрушающего контроля и существующих методик диагностирования. Причем методики в частности РД 08-195-98 не содержат критериальных оценок предельного состояния вышечных конструкций и их остаточного ресурса.

Поэтому проблема эффективности диагностирования, а так же безопасности проведения испытаний вышек подъемных установок с целью оценки их технического состояния является актуальной задачей, решение которой дает развитие и совершенствование для этих целей метода акустической эмиссии (АЭ).

**Цель работы** – совершенствование метода акустической эмиссии при оценке технического состояния вышек подъемных установок для ремонта скважин.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы **основные задачи исследования**:

- анализ существующих методов контроля технического состояния подъемных вышек;
- формирование комплекса методик для проведения исследований;
- компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния вышки подъемной установки;
- лабораторные исследования параметров акустической при осевом сжатии элементов вышечных конструкций;
- оценка эффективности метода акустической эмиссии при статических испытаниях вышечных конструкций на промышленном стенде;
- разработка методики оценки технического состояния вышек подъемных установок при акустико-эмиссионных испытаниях.

### Научная новизна:

1. Критическая длина трещины  $l_{кр}$  для условия сохранения заданного коэффициента запаса прочности  $K_{ст}$  вышечной конструкции или достижения ею предельного состояния ( $K_{ст} = 0$ ) определяется методом итерации в зависимости от критического коэффициента ударной вязкости  $K_{1C}$  материала в момент выполнения равенства  $K_{1C} = K_{ин}$ , где  $K_{ин}$  – коэффициент интенсивности напряжений.

2. Моделированием найдены степенные зависимости нарастания максимального напряжения  $\sigma_{max}$  и коэффициента интенсивности напряжений  $K_{ин}$  в

функции длины  $l_{кр}$  поперечно развивающихся трещин в трубных элементах вышки из стали 09Г2С.

3. Установлено, что разрушение вышечных конструкций возникает при условии выполнения неравенства при показателе активности источника АЭ  $n \geq 5,7$

$$\frac{\Delta N_{i+1}}{\Delta N_i} > \left(1 + \frac{\Delta P_{i+1}}{P_i}\right)^n - 1, \quad (1)$$

где  $N_i$  – суммарный счет АЭ;  $\Delta N_i$  – приращение суммарного счета;  $P_i$  – параметр нагружения;  $\Delta P_i$  – приращение параметра нагрузки.

4. Получено выражение для определения остаточного ресурса вышечной конструкции на основе параметра суммарного счета акустической эмиссии.

**Основные защищаемые положения** включают в себя:

1. Новый алгоритм контроля технического состояния подъемных вышек который отличается тем, что компьютерное (математическое) моделирование предшествует акустико-эмиссионному контролю и включает в соответствии с ГОСТ Р 53006-2008 расчетно-экспертную оценку ресурса безопасной эксплуатации.

2. Комплекс методик для оценки технического состояния вышечных конструкций, включающий математическое моделирование и акустико-эмиссионный контроль.

3. Методику компьютерного моделирования процесса статических испытаний вышек подъемных установок.

4. Принцип обоснования исходных данных путем лабораторных исследований параметров акустической эмиссии при осевом сжатии элементов вышечных конструкций.

5. Рекомендации по оценке результатов контроля и классификации источников АЭ по параметрам суммарного счета и амплитуды сигналов АЭ и ее распределения.

6. Метод расчета остаточного ресурса элементов вышечных конструкций с трещиноподобными дефектами по параметрам акустической эмиссии и трещиностойкости материала.

7. Методику оценки технического состояния вышек подъемных установок при акустико-эмиссионных испытаниях, предназначенную для производственных и учебных целей.

**Практическая значимость работы** состоит в апробации нового алгоритма оценки технического состояния вышек подъемных установок при акустико-эмиссионных испытаниях и разработке методики их проведения на промышленном стенде.

Для проведения исследований сформирован комплекс стандартных методик, обеспечивающих полноту исследований, и предложена методика компьютерного моделирования процесса испытаний вышечных конструкций с оценкой их напряженно-деформированного состояния.

При исследовании параметров акустической эмиссии разработана методика испытаний с использованием лабораторной установки, акустико-эмиссионной системы на специально подготовленных образцах. Разработаны

рекомендации оценки результатов контроля и предложен способ оценки времени до разрушения элемента вышечной конструкции по параметрам АЭ.

Подтверждена эффективность применения метода АЭ при промышленных испытаниях на специализированном стенде с апробацией основных этапов нового алгоритма, исследуемых критериев оценки результатов АЭ-испытаний и принятых способов оценки остаточного ресурса вышки.

Разработана методика оценки технического состояния вышек подъемных установок при акустико-эмиссионных испытаниях и внедрена в практику работы экспертных организаций ООО «ЭкспертСтрой», ООО СРТЦ «ДИТЭКС», ООО НПК «Техресурс» и ООО «Техконтроль».

#### **Достоверность результатов.**

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, базируются на данных, полученных с привлечением современных теоретических и экспериментальных методов исследований, математического моделирования с использованием программно-вычислительных комплексов и измерительной техники, современного исследовательского оборудования и компьютерного обеспечения.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы докладывались на международных научно-технических конференциях «Севергеоэкотех» при Ухтинском государственном техническом университете в 2009–2013 годах, на научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников УГТУ в 2009–2012 годах, а так же на II Всероссийской (XVII) молодежной научной конференции «Молодежь и наука на Севере» при Коми научном центре УрО РАН в 2013г. и на конференциях в рамках научно-педагогической школы «Современные проблемы нефтепромысловой и буровой механики» в 2009–2012 годах, кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности УГТУ.

#### **Публикации.**

Основные результаты исследований опубликованы в 15 работах, в т.ч. 7 в реферируемых изданиях, рекомендованных ВАК по специальности защиты.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 138 наименований и 9 приложений, содержит 242 страницы текста, включая 70 рисунков и 26 таблиц.

Диссертация основана на личных исследованиях автора, которые проводились на опытно-промышленном стенде в ООО «РН-Сервис» (Республика Коми, г. Усинск) и лабораторном стенде ООО «ЭкспертСтрой», а также при численно-математических исследованиях, выполненных на кафедре машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Ухтинского государственного технического университета.

#### **Благодарности.**

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю: профессору, доктору технических наук Быкову Игорю Юрьевичу за внимательное отношение и помощь в период работы над диссертацией.

Автор выражает благодарность руководству ООО «РН-Сервис» за помощь в проведении опытно-промышленных испытаний и коллективу ООО «ЭкспертСтрой» за оказанное содействие.

Автор благодарен сотрудникам кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Ухтинского государственного технического университета заведующему кафедрой, к.т.н. Д.Г. Селиванову и ассистенту Д.А. Борейко.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Введение.

Обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** произведен подробный анализ аварийности и травматизма в нефтегазовом комплексе, анализ распределения дефектов и причин разрушения вышечных конструкций буровых и подъемных установок. Рассмотрены существующие методы оценки технического состояния вышек подъемных установок. При этом выявлено, что для оценки технического состояния крупногабаритных конструкций безальтернативным является метод акустической эмиссии, преимуществом которого, наряду с высокой чувствительностью и точностью регистрации координат обнаруженных дефектов, является однократная установка измерительных датчиков по концам линейного размера изделия в доступном месте с условием охвата всего объема конструкции.

Представлены теоретические основы метода и рассмотрены критерии для оценки предельного состояния металла по параметрам АЭ, использующие такие параметры как, суммарный счет – критерий Иванова-Быкова, амплитуда и амплитудное распределение – амплитудный критерий, и их разновидности.

Сущность практического применения метода акустической эмиссии основана на регистрации акустического сигнала, возникающего при пластичной деформации структуры твердого тела с регистрацией координат источников АЭ и значений его суммарной активности, который оценивается универсальным критерием – показателем степени кривой суммарного счета. Характеристика амплитудных распределений сигнала АЭ также позволяет дать оценку технического состояния вышечных конструкций по амплитудному признаку (критерию).

Определено, что акустико-эмиссионные исследования и компьютерное моделирование процесса нагружения вышечных конструкций в виде предметной модели по методу конечных элементов, могут быть взаимодополняющими, что позволяет сосредоточить поиск дефектов на наиболее напряженных участках конструкции.

В качестве совершенствования процесса технического диагностирования и оценки остаточного ресурса вышечных конструкций, предложен новый алгоритм оценки технического состояния вышек, представленный на рисунке 1, отличающийся тем, что применение метода акустической эмиссии должно сопровождаться комплексом дополнительных методов неразрушающего контроля, включающего визуальный и измерительный контроль, толщинометрию, а также определение прочностных свойств металла.

**Во второй главе** предложен и сформирован комплекс исследовательских методик, необходимых и достаточных для оценки технического состояния и определения свойств металла элементов вышечных конструкций. Научно-

методический комплекс включает: методику визуального и измерительного контроля направленную на выявление изменений формы и размеров поверхностных дефектов; методику измерения толщины стенки предназначенную для измерения остаточной толщины стенки исследуемых образцов и выявления расслоений в металле; методика определения поверхностной твердости и механических испытаний на растяжение необходимых для оценки механических свойств металла образцов; методику количественного состава металла с целью уточнения и идентификации марки стали.

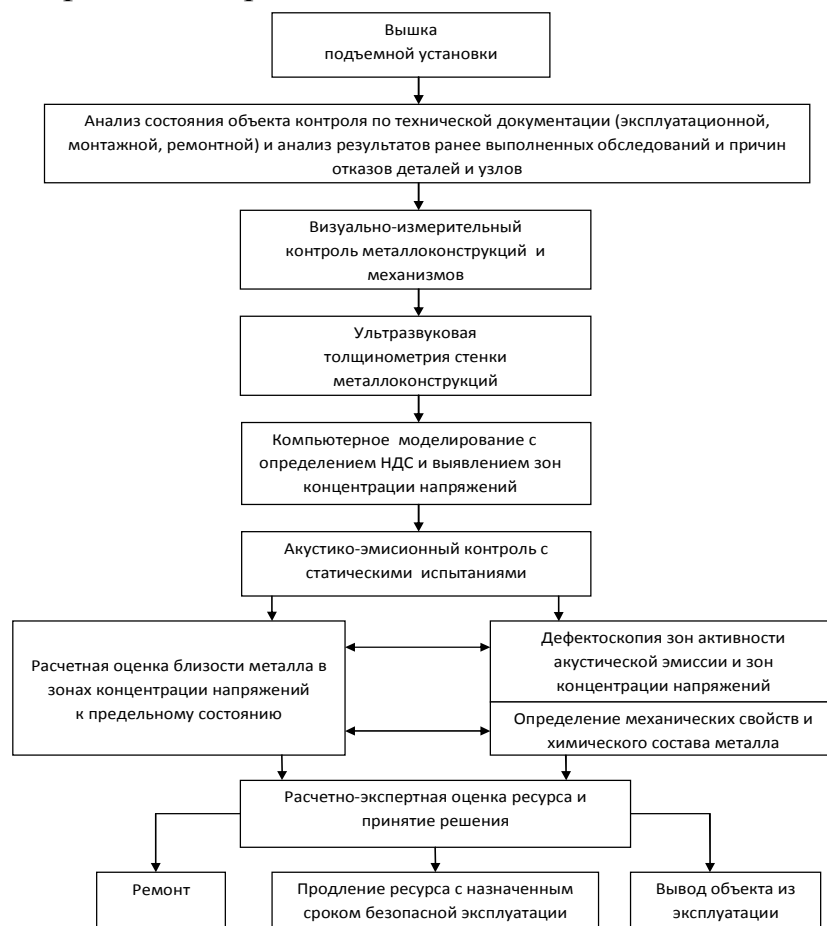


Рисунок 1 – Новый алгоритм оценки технического состояния и остаточного ресурса вышки подъемной установки для ремонта скважин

Для получения достоверных экспериментальных данных и статистической корректности выполняемых измерений применяется методика статистической обработки результатов измерений.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию процесса испытания трубных образцов с характерными дефектами для вышечных металлоконструкций и исследованию напряженно-деформированного состояния вышки подъемной установки с использованием метода конечных элементов.

Для этого предложена методика компьютерного моделирования процесса нагружения вышечных конструкций подъемных установок на основе программного продукта АРМ «WinMachine». В результате моделирования выявляются зоны концентрации напряжений, представляющие собой очаги наибольших нагрузок, сосредоточенных в отдельных узлах вышечных конструкций, что оптимизирует объем последующих обследований методом акустической эмиссии на

вероятность выявления зарождающихся или уже развивающихся дефектов структуры металла в зонах концентрации напряжений.

Методика предусматривает моделирование процесса статических испытаний трубных образцов и вышки подъемной установки, который состоит из следующих основных этапов:

- создание 3-х мерного эскиза трубного образца или вышечной конструкции в системе АСКОН «КОМПАС-3D».
- импорт модели в APM «WinMachine» (трубного образца или сборочной единицы вышки).
- генерация конечных элементов (сетки) и статический расчет по матричным уравнениям конечных элементов в автоматическом режиме программы.

Моделирование испытаний трубных образцов заключается, в получении информации об их напряженном состоянии при сжатии с различными видами дефектов (продольная сквозная трещина с размерами  $l = 40$  мм и  $b = 1$  мм, кольцевая несквозная трещина с размерами  $h = 2,5$  мм и шириной  $b = 1$  мм и поперечная сквозная трещина с размерами  $l = 40$  мм и  $b = 1$  мм). При этом дефект моделируется в виде сквозной или частичной трещины, нанесенной на вспомогательной плоскости, касательной к образующей модели образца, как показано на рисунке 2.

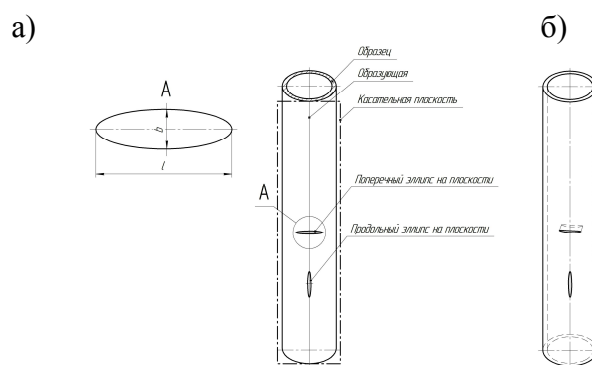


Рисунок 2 – След моделируемого дефекта на поверхности модели трубного образца: а – эскиз дефекта на плоскости, касательной к образующей образца; б – след моделируемого дефекта

На рисунке 3 представлены результаты моделирования в виде карт и графиков распределения коэффициента запаса по пределу текучести  $n_{\text{ст}}$  от приложенной нагрузки для трубного образца с поперечной трещиной.

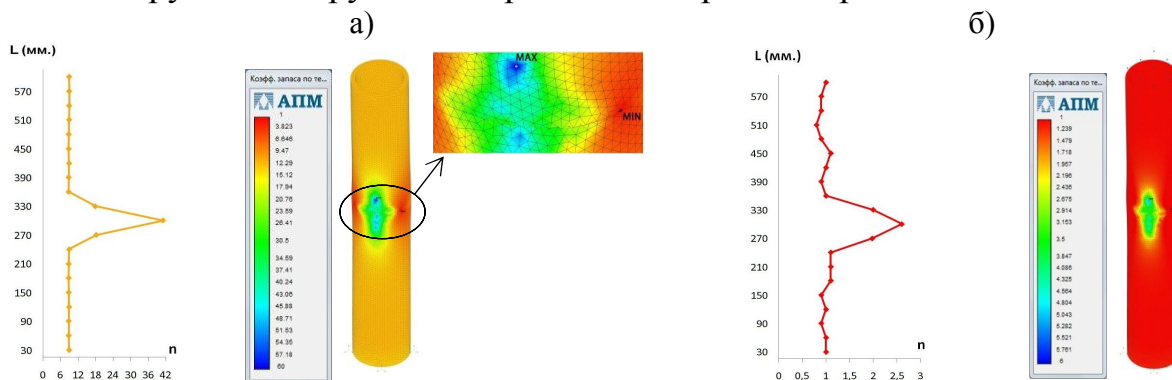


Рисунок 3 – Результаты КЭ-анализа образца с поперечной трещиной: а – при  $P = 53$  кН; б – при  $P = 600$  кН



По результатам компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния при осевом сжатии 4-х типов трубных образцов без дефектов, и с дефектами, сделаны следующие выводы:

1) Максимально допустимая нагрузка при осевом сжатии образца с продольной сквозной трещиной длиной 40 мм и шириной 1 мм оказалась на 15% меньше, чем для образца без дефектов, а для образца с кольцевой трещиной нагрузка составила на 60% меньше, чем для бездефектного образца. При сквозном продольном дефекте несущая способность образца нарушается в меньшей мере, чем при соизмеримом сквозном поперечном дефекте максимально допустимая нагрузка, для которого составила лишь 13,25% от нагрузки для бездефектного образца. Таким образом, наиболее опасным дефектом структуры материала образца при соизмеримых геометрических параметрах является поперечная сквозная трещина. Соотношение опасности при этом можно записать как 1:0,85:0,6:0,13.

2) Зоны концентрации напряжений при любом виде нагружения и принятых параметрах сквозной поперечной и кольцевой трещин находятся в её вершинах, что подтверждается положениями теории механики разрушения.

Для оценочного компьютерного моделирования вышечной конструкции с использованием метода конечных элементов выбрана вышка подъемного агрегата А-50М с наружным диаметром несущих ног 100 мм, наружными диаметрами поперечин и раскосов 60 мм.

Проведение компьютерного моделирования проводится в несколько этапов:

1. Задают исходные данные.
2. Выбирают элемент вышечной конструкции с зоной максимальной концентрации напряжений.
3. Создают геометрический образ элемента вышки.
4. Для выбранного элемента подбирают максимально допустимую нагрузку, при которой не нарушается условие прочности.
5. Далее в элементе вышечной конструкции задают наиболее опасную сквозную поперечную трещину с начальными размерами длины  $l = 1$  мм и ширины  $b = 1$  мм и рассчитывают НДС с приложением максимальной нагрузки, определенной для бездефектного образца.

6. Моделируют процесс роста сквозной поперечной трещины, изменяя её длину  $l$  от 1 мм до некоторой критической величины с шагом 0,5...1 мм. Для каждого случая рассчитывают коэффициент интенсивности напряжений  $K_{ин}$ , МПа·м<sup>1/2</sup>, по формуле:

$$K_{ин} = \sigma_{max} \sqrt{\frac{\pi \cdot h}{Q}} \cdot F_i(\lambda), \quad (1)$$

где  $\sigma_{max}$  – максимальное действующее напряжение, МПа;  $h$  – глубина трещины, м;  $F_i$  – корректировочный коэффициент;  $\lambda$  – константа, зависящая от размеров и материала образца.

$$\lambda = \frac{[12 \cdot (1 - \nu^2)]^{1/4} \cdot a}{\sqrt{R \cdot t}}, \quad (2)$$

$Q$  – квадратный корень из полного эллиптического интеграла второго рода, определяемый приближенной формулой:

$$Q = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^{1.65}, \quad (3)$$

где  $a$  – полудлина трещины, м;  $t$  – толщина стенки оболочки, м;  $R$  – внутренний радиус, м;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Расчет ведут до тех пор, пока  $K_{ин}$  не сравняется с критическим коэффициентом ударной вязкости  $K_{1C}$ . При достижении  $K_{ин}$  критического значения  $K_{1C}$ , (для стали 09Г2С  $K_{1C} = 24 \dots 37 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ ) возникает неконтролируемый катастрофический рост трещины, и разрушение конструкции происходит за доли секунды.

Условие, при котором не возникнет катастрофического роста трещины

$$K_{1C} \geq K_{ин}, \quad (4)$$

8. Для каждого из значений  $K_{1C}$  находят критическое значение длины трещины и напряжение, при которых  $K_{ин} = K_{1C}$ .

Целью моделирования является оценка скорости роста дефекта заданного типа, и максимальной безопасной его длины для дальнейшего определения времени роста трещины до разрушения.

На первом этапе строится исходная модель вышки подъемной установки, и прикладывается испытательная нагрузка к оси кронблока под углом 3 градуса к вертикали, увеличенная на 25% от максимально допустимой  $P_{исп} = 750 \text{ кН}$ , как показано на рисунке 4.

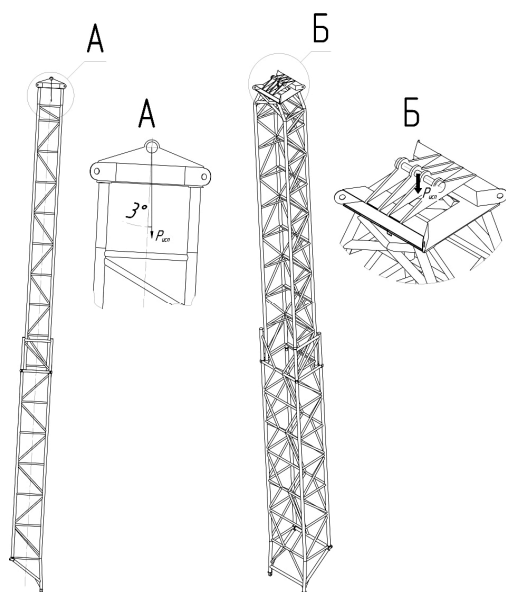


Рисунок 4 – Исходная модель вышки и схема приложения нагрузки

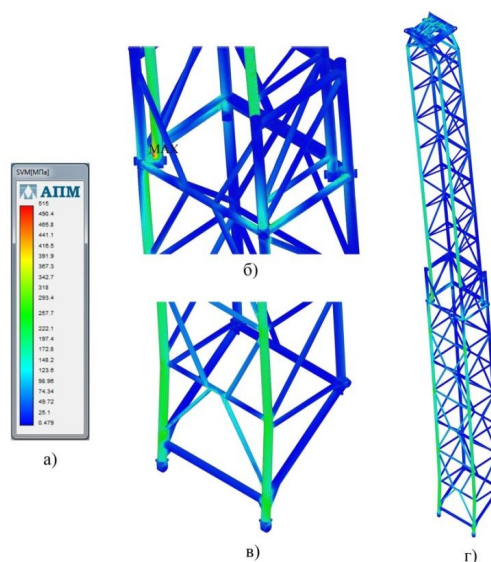


Рисунок 5 – Карта распределения напряжений по вышке подъемной установки а – шкала напряжений; б – карта распределения напряжений в узле стыковки секций; в – карта распределения напряжений в элементах нижней секции; г – карта распределения напряжений по телу конструкции

С помощью программного комплекса для конечно-элементного анализа производится статический расчет модели вышки. Для оценки результатов рас-

чета рассматривается карта распределения напряжений по телу конструкции, представленная на рисунке 5. Нагружение модели показывает, что наиболее опасными зонами, испытывающими максимальную нагрузку, являются места сопряжения передних ног вышки с замковым устройством соединения секций, а так же передние ноги нижней секции.

На следующем этапе для исследования динамики изменения прочностных характеристик материала конструкции с ростом трещины выбирают элемент вышки, как показано на рисунке 6.

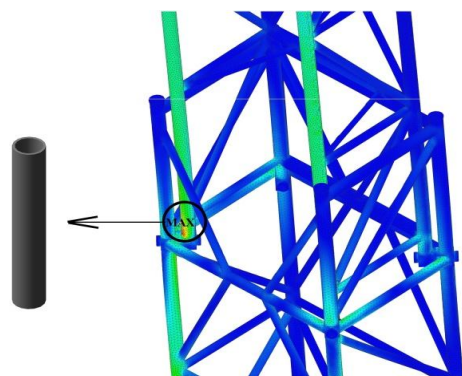


Рисунок 6 – Основная зона концентрации напряжений в модели вышечной конструкции

В выбранном трубном элементе  $D_n = 100$  мм,  $d_{вн} = 85,6$  мм моделируется поперечная сквозная трещина, путем вырезания эллипса с диагоналями  $l = 40$  мм и  $b = 1$  мм.

Затем производится конечно-элементный анализ образца с приложением нагрузки  $P = 400$  кН, которая определена как соизмеримая с предельной прочностью материала по текучести. По результатам анализа фиксируются максимальные напряжения и коэффициенты запаса прочности. И по формуле (1) вычисляются значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{ин}$ . Результаты расчетов сводятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчета изменения коэффициента интенсивности напряжений при увеличении длины трещины

Критический коэффициент ударной вязкости, $K_{1C}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	Длина трещины, $l$ , мм	Максимальное напряжение, $\sigma_{max}$ , МПа	Коэффициент интенсивности напряжений, $K_{ин}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	Коэффициент запаса прочности, $n$
	1,0	237,3	3,144954	1,84
	2,0	246,8	5,751602	1,765
	3,0	266	8,573833	1,617
	4,0	325	13,11785	1,595
	<b>4,5</b>	<b>342,7</b>	<b>15,1389</b>	<b>1,432</b>
	5,0	353,3	16,90029	1,341
	6,0	362,2	19,82392	1,318
<b>24,0</b>	<b>6,4</b>	<b>418,6</b>	<b>24,00345</b>	<b>1,121</b>
	7,0	469,7	28,70249	1,073
	8,0	480,7	32,21086	1,059
	8,5	493,4	34,43525	1,029
<b>37,0</b>	<b>8,9</b>	<b>514,3</b>	<b>37,00009</b>	<b>1,008</b>
	9,0	549,8	39,84404	0,9083

В таблице 1 серая зона соответствует пороговому значению для коэффициента запаса прочности равного 1.4, т.е. значению, ниже которого условие прочности не выполняется:

$$K_{\sigma T} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}} \geq 1,5, \quad (5)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, МПа;  $\sigma_{\max}$  – максимальное действующее напряжение, МПа.

По результатам моделирования трещины в трубном узле вышки найдены её критические длины для стали 09Г2С при  $K_{IC} = 24 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  и  $37 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , которые составляют  $l_{кр} = 6,4 \text{ мм}$  и  $l_{кр} = 8,9 \text{ мм}$  соответственно. При достижении трещиной критических размеров начнется катастрофическое неконтролируемое разрушение конструкции.

Далее по результатам моделирования трещины шириной  $b = 1 \text{ мм}$  для стали 09Г2С найдены зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины, максимального напряжения от длины трещины и коэффициента интенсивности напряжений от максимального напряжения. Выявленные зависимости представлены в виде графиков на рисунке 7.

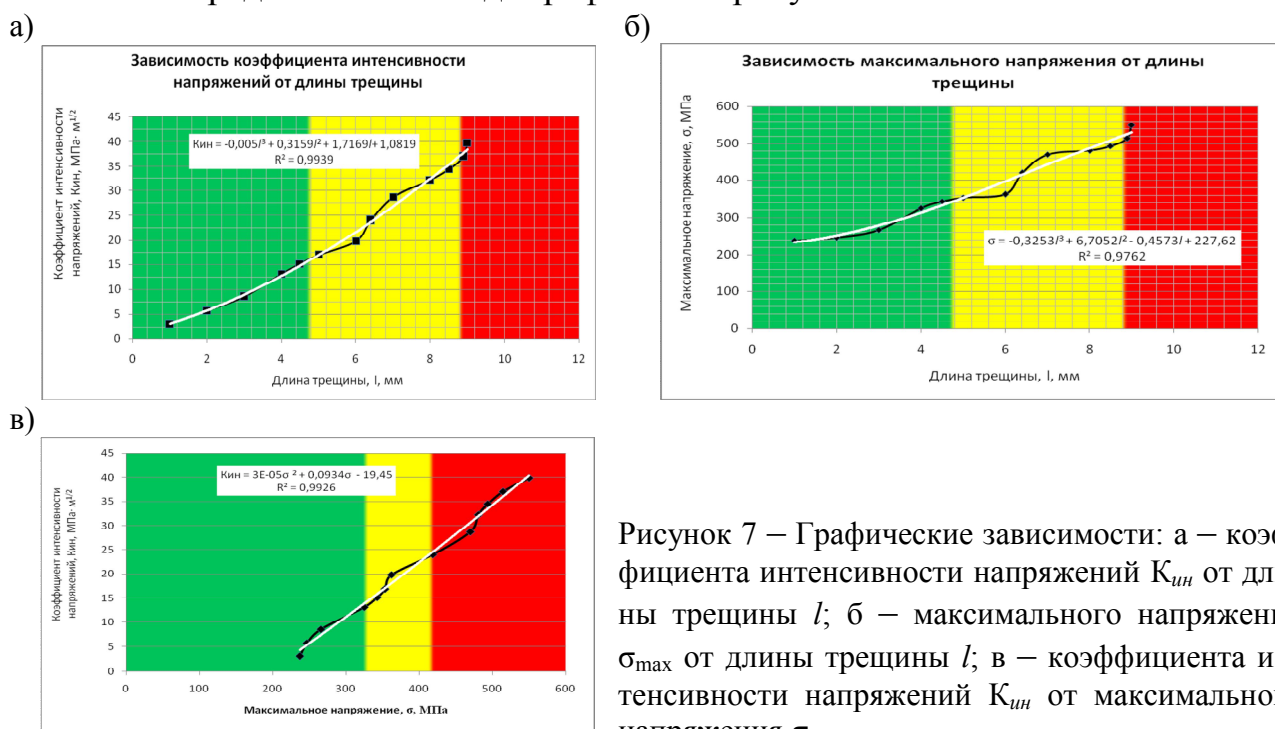


Рисунок 7 – Графические зависимости: а – коэффициента интенсивности напряжений  $K_{III}$  от длины трещины  $l$ ; б – максимального напряжения  $\sigma_{\max}$  от длины трещины  $l$ ; в – коэффициента интенсивности напряжений  $K_{III}$  от максимального напряжения  $\sigma_{\max}$

Результатом аппроксимации для рассматриваемых зависимостей являются полиномиальные кривые третьей степени, уравнения которых имеют вид:

$$K_{III} = -0,005 \cdot l^3 + 0,3159 \cdot l^2 + 1,7169 \cdot l + 1,0819, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \quad (6)$$

$$\sigma_{\max} = -0,3253 \cdot l^3 + 6,7052 \cdot l^2 - 0,4573 \cdot l + 227,62, \text{ МПа} \quad (7)$$

$$K_{III} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^2 + 0,0934 \cdot \sigma - 19,45, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \quad (8)$$

При помощи компьютерного моделирования и конечно-элементного анализа также получены зависимости максимального напряжения  $\sigma_{\max}$  от длины трещины  $l$  при различном критическом коэффициенте  $K_{IC}$  в зоне развития трещины. Эта графическая зависимость представлена на рисунке 8.

Предложенная методика моделирования вышки подъемной установки позволяет для каждого конкретного случая найти максимальное напряжение и рассчитать нагрузку разрушения для рассматриваемой конструкции в зависимо-

сти от критического коэффициента ударной вязкости материала и геометрии трещиноподобного дефекта.

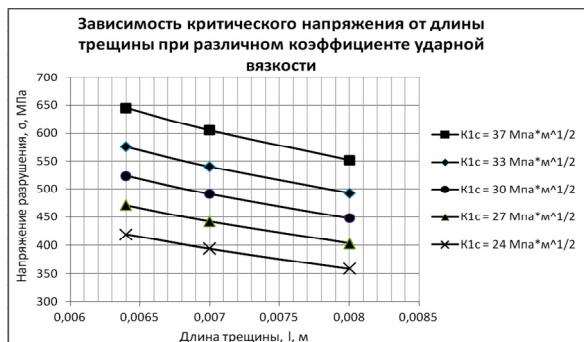


Рисунок 8 – Зависимость максимального разрушающего напряжения от длины трещины в зоне ее развития при различном значении  $K_{1c}$ : 1 – при  $K_{1c} = 37$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 2 – при  $K_{1c} = 33$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 3 – при  $K_{1c} = 30$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 4 – при  $K_{1c} = 27$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 5 – при  $K_{1c} = 24$  МПа·м<sup>1/2</sup>

Рисунок 9 – Зависимость максимального разрушающего напряжения от длины трещины в зоне ее развития при различном значении  $K_{1c}$ : 1 – при  $K_{1c} = 37$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 2 – при  $K_{1c} = 33$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 3 – при  $K_{1c} = 30$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 4 – при  $K_{1c} = 27$  МПа·м<sup>1/2</sup>; 5 – при  $K_{1c} = 24$  МПа·м<sup>1/2</sup>

Исследования проводятся на прессовой испытательной установке, оборудованной системой регистрации акустических сигналов и манометром для контроля сжимающей нагрузки (рисунок 9).

Исследования проводятся на прессовой испытательной установке, оборудованной системой регистрации акустических сигналов и манометром для контроля сжимающей нагрузки (рисунок 9).

Для создания нагрузки применяется гидравлический пресс П-500 с максимальным усилием 5000 кН. Оценка качества и количества акустических сигналов, возникающих при нагружении исследуемых образцов, производится АЭ системой «Эксперт-2014» с резонансными преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ).

Образцы отбираются методом резки несущих элементов (труб) вышки серийного подъемника А-50М, отработавшего нормативный срок службы (более 20 лет), и подготавливаются к исследованию в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506-85, ГОСТ 30768-2001, ГОСТ 25.503-97 и др.

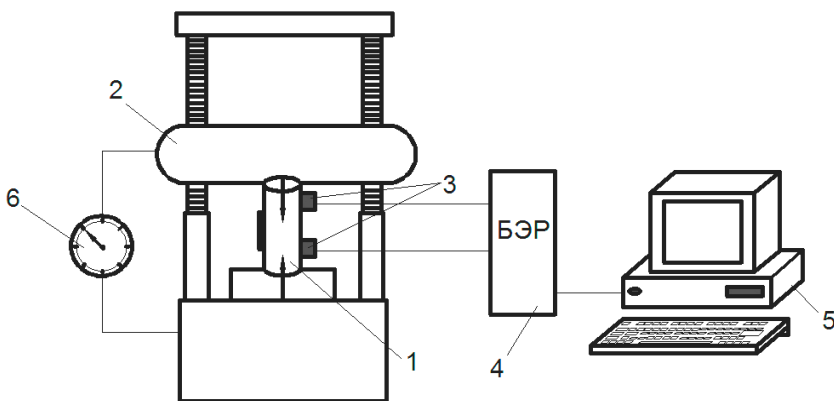


Рисунок 9 – Схема испытательной установки: 1 – испытательный образец; 2 – нагружающее устройство; 3 – преобразователи акустической эмиссии (датчики); 4 – блок электронный регистрирующий; 5 – портативный компьютер с ПО «Эксперт-2014»; 6 – манометр

Перед началом испытаний проводится исследование в соответствии с методиками, изложенными в главе 2. Для получения достоверных данных в процессе исследований структурных и прочностных изменений металла образцов проводят необходимую подготовку на основе положений теории планирования эксперимента.

На наружную поверхность образцов наносится разметка в виде сетки. Количество полученных пересечений, а, следовательно, и число измерений определяется расчетом при планировании эксперимента и дальнейшей статической обработке полученных результатов включающих: расчет числа потребных измерений  $N_{opt}$ ; проверку полученной статической выборки на наличие грубых ошибок; проверку выборок на нормальность распределения и расчет погрешности измерений.

Оптимальный объем проводимых измерений  $N_{opt}$  по нормальному закону

распределения вычисляется по формуле:

$$N_{\text{опт}} = \frac{z^2(\gamma)}{4 \cdot \Delta P_{\text{max}}} - z^2(\gamma), \quad (9)$$

где  $\Delta P_{\text{max}}$  – заданное значение максимальной абсолютной погрешности;  $z(\gamma)$  – критическое значение выборки в функции уровня доверительности  $\gamma=1-\alpha$ ;  $\alpha$  – уровень значимости.

Определено, что количество измерений с учетом 10% - го запаса должно составлять не менее  $N_{\text{опт}} = 72$ . Погрешность  $\Delta z$  измерительно-вычислительных операций при обработке результатов толщинометрии не превышает  $\pm 0,12$  мм, при обработке данных поверхностной твердости находится в пределах  $\pm 4,83$  НВ.

На следующем этапе для проведения экспериментальных исследований на образцы наносятся искусственные дефекты в соответствии с ГОСТ 25.503-97 и ГОСТ 25.506-85 с учетом проведенного анализа дефектности в выщечных конструкциях и результатов моделирования вышки подъемной установки. Типы образцов с разметкой и искусственными дефектами представлены на рисунке 10.

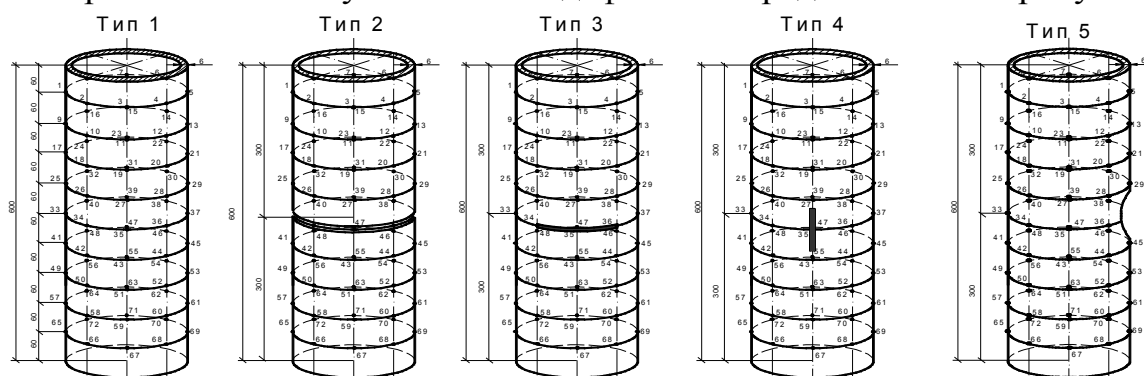


Рисунок 10 – Типы образцов с разметкой: Тип 1 – образец, подвергнутый равномерной коррозии без искусственных дефектов; Тип 2 – образец с кольцевой несквозной трещиной; Тип 3 – образец с поперечной сквозной трещиной; Тип 4 – образец с продольной сквозной трещиной; Тип 5 – образец с искусственной деформацией

При механическом нагружении и исследовании изменения структуры материала образцов методом АЭ получают значения нагрузки, времени испытаний и параметров АЭ. По полученным данным производят расчеты показателя степени  $n$  по параметрам суммарного счета, нагрузки и времени приложения нагрузки в обобщенном выражении для суммарного счета:

$$N = aP^n, \quad (10)$$

где  $N$  – суммарный счет АЭ;  $a$ ,  $n$  – параметры, зависящие от физико-механических свойств материала и роста трещины;  $P$  – параметр нагружения.

Так как по своей природе АЭ является дискретным процессом, накопление суммарного счета имеет вид ступенчатой функции. То, используя полученные зависимости суммарного счета, нагрузки и времени испытаний, выражение для показателя степени в соответствии с критерием Иванова-Быкова будет иметь вид:

$$\Delta n_i = \frac{\Delta N_i P_i}{\Delta P_i N_i}, \quad (11)$$

где  $\Delta n_i$  – приращение показателя степени;  $P_i$  – значение нагрузки, при ко-

тором произошла регистрация  $i$ -го акта акустической эмиссии;  $\Delta P_i$  – приращение параметра нагружения;  $N_i$  – суммарный счет после регистрации  $i$ -го акта акустической эмиссии;  $\Delta N_i$  – приращения суммарного счета.

Классификацию источников АЭ проводят по численным значениям параметра  $n_i$  кривой суммарного счета ( $n_i < 1$  – неопасно,  $n_i = 1$  – опасно,  $1 < n_i < 6$  – критично,  $n_i > 6$  – катастрофично).

В результате лабораторных исследований акустического поведения образцов из элементов вышечных конструкций при их осевом сжатии получены экспериментальные зависимости между суммарным счетом АЭ и процессом развития дефектов в исследуемом материале образцов. При этом на близость объекта к разрушению указывает значение экспериментально полученного показателя степени  $n \geq 5,7$ , и выполнение предложенного критерия:

$$\frac{\Delta N_{i+1}}{\Delta N_i} > \left(1 + \frac{\Delta P_{i+1}}{P_i}\right)^4 - 1, \text{ при } n=4, \quad (12)$$

который показывает, что приращение суммарного счета происходит со скоростью, превышающей скорость, определяемую степенью  $n$ , т.е. превышение левой части выражения (12) над правой, свидетельствует о возрастании показателя степени  $n > 4$  в выражении (10).

Экспериментально определено, что резкое изменение формы кривой зависимости  $N(t)$  представленной на рисунке 11, а, при увеличении деформации свидетельствует о смене механизмов разрушения материала образцов. В образцах с дефектами структуры регистрация АЭ начиналась раньше, чем в образцах без дефектов и параметр классификации  $n$  в образцах с трещиноподобными дефектами больше.

В зависимости от вида амплитудного распределения и установления соответствия максимального уровня амплитуд предельному состоянию источники классифицируют по амплитудному критерию отбраковки:

$$U_{ак} > U_{II} = U_{III} + 6, \text{ дБ} \quad (13)$$

где  $U_{ак}$  – уровень амплитуд импульсов АЭ соответствующий предельному состоянию, дБ;  $U_{II}$  – уровень порогового напряжения, дБ;  $U_{III}$  – уровень напряжения шумов, дБ.

Выявленные источники разделяют на 4 класса по количеству сигналов с амплитудами выше установленных критерием.

Установлено также, что на близость объекта к разрушению указывает наличие трех и более источников АЭ III класса. При этом стадия начала развития трещины определяется наличием сигналов с амплитудой более 66 дБ и характерным их распределением.

Определено, что наиболее информативными параметрами при определении процесса разрушения образцов является зависимость суммарного счета АЭ от нагрузки и времени (рисунок 11, а) и распределение максимальных амплитуд (рисунок 11, б). На этих зависимостях хорошо различаются участки, определяющие состояние материала образцов, включая стадию, предшествующую разрушению.

Экспериментально определено, что разрушение материала образца соответствует максимальному значению параметра суммарного счета АЭ и макси-

мальному значению разрушающей нагрузки, при этом максимальные значения амплитуд сигналов получены в момент разгрузки деформированных образцов.

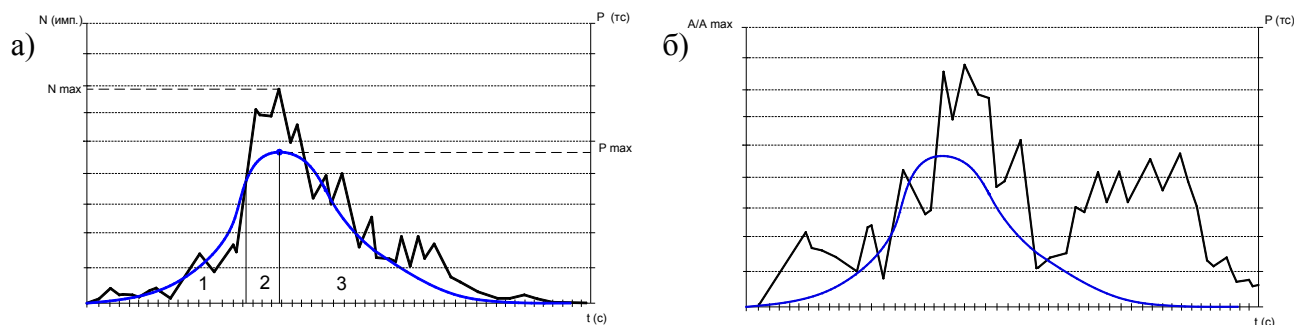


Рисунок 11 – Совмещенные диаграммы параметров АЭ при испытаниях цилиндрического образца с краевой поперечной трещиной (Тип3): а – нагрузка  $P$  – время  $t$  и суммарный счет  $N$  – время  $t$ ; б – амплитудное распределение  $A/A_{max}$  – время  $t$ .

Разработанная методика лабораторных исследований параметров АЭ позволяет классифицировать источники АЭ по степени их опасности для различных дефектов по критерию Иванова-Быкова с использованием параметров нагрузки и времени испытаний для всех типов образцов, и по амплитудному признаку с использованием полученных характеристик распределения амплитуд для каждого типа образца. Сделан вывод об обязательном использовании нескольких критериев оценки результатов АЭ-контроля вследствие того, что каждому типу дефекта могут быть присущи несколько различных источников АЭ.

Используя гипотезу о том, что суммарный счет  $N$  пропорционален числу источников в пластически деформируемом объеме, который характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений, связь между ними согласно ГОСТ 27655-88, составит:

$$N = aK_{ин}^n, \quad (14)$$

где  $N$  – суммарный счет акустической эмиссии;  $a$  – параметр, зависящий от физико-механических свойств материала и чувствительности аппаратуры;  $K_{ин}$  – коэффициент интенсивности напряжений;  $n$  – показатель классификации, используемый для оценки состояния материала.

Так же известно, что приближенно зависимость суммарного счета АЭ можно рассчитать по формуле:

$$N = \frac{1}{E} K_{ин}^2, \quad (15)$$

где  $E$  – модуль Юнга.

Используя выражение, предложенное В.А. Перфиловым для количественного определения времени до разрушения материала, основанное на связи параметров акустической эмиссии и вязкости разрушения материала, можно определить остаточный ресурс элемента выщечной конструкции с трещиноподобным дефектом:

$$\tau = \frac{2 \cdot \left( \frac{\dot{N}}{a} \right)^{2/n}}{(n-2) \cdot \sigma_{max}^2 \cdot Y^2 \cdot V}, \quad (16)$$

где  $\dot{N}$  – акустический параметр материала,  $n$  и  $a$  – константы материала,  $Y$  – коэффициент определяемый типом и размером дефекта (трещины) и формой



образца,  $Y = 1,12$  – для краевой и  $Y = 0,7$  – для внутренней сквозной трещины;  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение;  $V$  – скорость роста трещины.

Учитывая, формулу П. Париса вместо  $K_{ин}$  используем средний размах коэффициента интенсивности напряжений за один цикл нагружения  $\Delta K_{ин}$ , и так как акустический параметр  $\dot{N}$  за время  $t$  численно равен числу импульсов в единицу времени  $t$ , то подставляя приближенную формулу суммарного счета (15) в выражение (16), получим выражение для расчета остаточного ресурса трубного элемента выщечной конструкции с развивающейся трещиной:

$$\tau = \frac{2 \cdot \left( \frac{\Delta K_{ин}^2}{a \cdot E} \right)^{2/n}}{(n-2) \cdot \sigma_{\max}^2 \cdot Y^2 \cdot V}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение,  $\sigma_{\max} = 514,3$  МПа, при  $K_{1C} = 37,0$  из таблицы 1;  $V$  – скорость роста трещины, из формулы П. Париса:

$$V = a(\Delta K_{ин})^n = 4,82 \cdot 10^{-14} \cdot (2,821)^{7,6} = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}, \quad (18)$$

где  $a$  – параметр зависящий от физико-механических свойств материала, для стали 09Г2С,  $a = 4,82 \cdot 10^{-14} \text{ м/(с} \cdot \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2})$ ;  $n$  – параметр классификации определяемый экспериментально,  $n = 7,6$  – для образца с поперечной сквозной трещиной;  $\Delta K_{ин}$  – средний размах коэффициента интенсивности напряжений:

$$\Delta K_{ин} = \frac{K_{i+1} - K_i}{k} = \frac{33,859}{12} = 2,821 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}, \quad (19)$$

где  $i$  – номер эксперимента по порядку;  $k$  – общее число циклов нагружения (экспериментов).

Подставляя имеющиеся экспериментальные данные показателя степени  $n$ , размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_{ин}$  и максимального напряжения  $\sigma_{\max}$  в уравнение (17), остаточный ресурс выщечной конструкции нарушенной поперечным сквозным дефектом начальной длины не менее 1 мм до определенного ранее критического значения 8,9 мм составит примерно 54,3 суток.

**Пятая глава** посвящена оценке эффективности метода акустической эмиссии при статических испытаниях выщечных конструкций на промышленном стенде.

Для этого на базе предприятия ООО «РН-Сервис» (Республика Коми, г. Усинск) сконструирован и смонтирован стенд для статических испытаний передвижных подъемных установок с применением метода акустической эмиссии. Общий вид этого стенда в сборе представлен на рисунке 12.

Для повышения информативности, качества и безопасности проведения испытаний, а так же полноценного использования потенциала специализированного стенда испытания проводят под контролем метода акустической эмиссии. При этом появляется возможность решить широкий круг научно-исследовательских задач:

- изучить процессы зарождения дефектов и их обнаружения и классификации реальных выщечных металлоконструкций;
- определить степень эффективности применяемого метода АЭ для контроля оценки опасности дефектов;

– усовершенствовать методологию оценки технического состояния и проведенный АЭ – испытаний вышек подъемных установок.

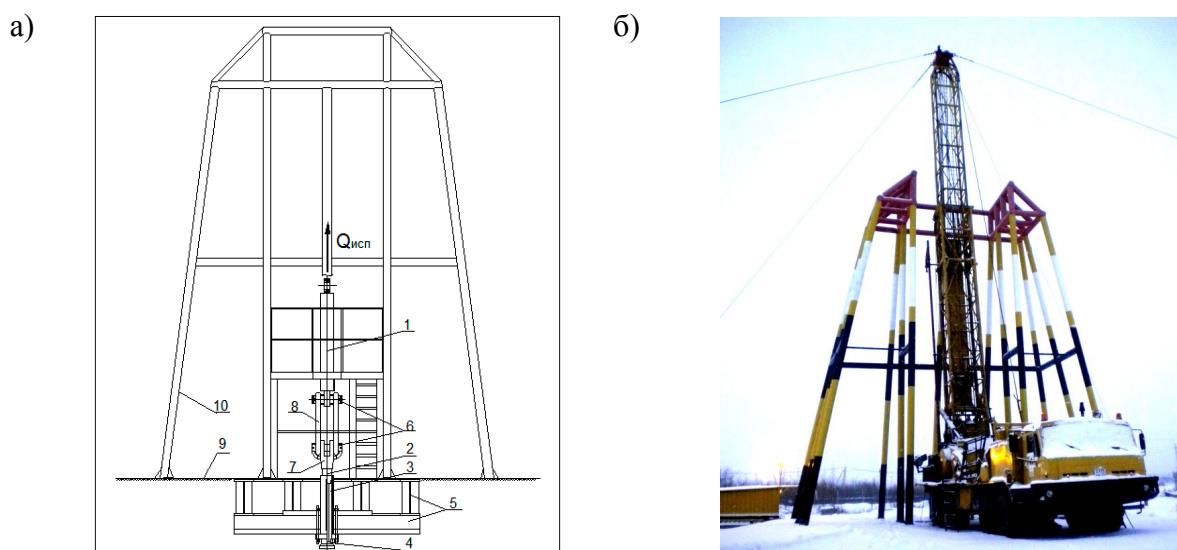


Рисунок 12 – Общий вид (а) и фото (б) установочной площадки испытательного стенда: 1 – гидроцилиндр, 2 – переходник, 3 – центральный якорь, 4 – планшайба, 5 – усиление из двутавровых балок, 6 – палец, 7 – серьга, 8 – шарнирная сцепка, 9 – площадка обслуживания, 10 – опоры ограждения.

Методика проведения испытаний основывается на разработанном алгоритме оценки технического состояния и остаточного ресурса вышки подъемной установки для ремонта скважин (см. рисунок 1).

Для опытных испытаний выбран агрегат для освоения и ремонта скважин А-50М с допустимой нагрузкой на крюке 75 тс.

Стендовые испытания проводятся в циклическом режиме в три этапа с нагрузкой  $P_{исп1} = 0,6P_n$ ,  $P_{исп2} = 1,0P_n$ , и  $P_{исп3} = 1,25P_n$ , с временем действия нагрузки 10 минут, после каждого этапа вышка полностью разгружается. Используемая аппаратура и программа обработки АЭ-информации позволяет определить местоположение источников АЭ-сигналов по времени их прихода на датчики, установленные на металлоконструкции вышки. И отображает их положение в виде индикаций источника АЭ на карте локаций. Для обработки сигналов на карте локаций выделяются зоны повышенной концентрации АЭ, которые в совокупности формируют полный образ источников АЭ.

Результаты испытаний представлены на графической модели вышки (рисунок 13, а). При этом показатель степени  $n$  для идентифицированных источников находился в интервале 1,2 – 2,1 и критерий (12) не выполнялся. Амплитуда зарегистрированных сигналов АЭ не превышала экспериментально полученного порогового значения 66 дБ.

Сопоставив полученные результаты, были выявлены совпадения координат полученных ЗКН и зон повышенной активности АЭ. Всего выявлено 12 зон акустической активности при 10 зонах концентрации напряжений, установленных моделированием, из них совпадение результатов по наличию развивающихся дефектов установлено в 8-ми случаях, что свидетельствует о высокой эффективности метода АЭ (таблица 2).

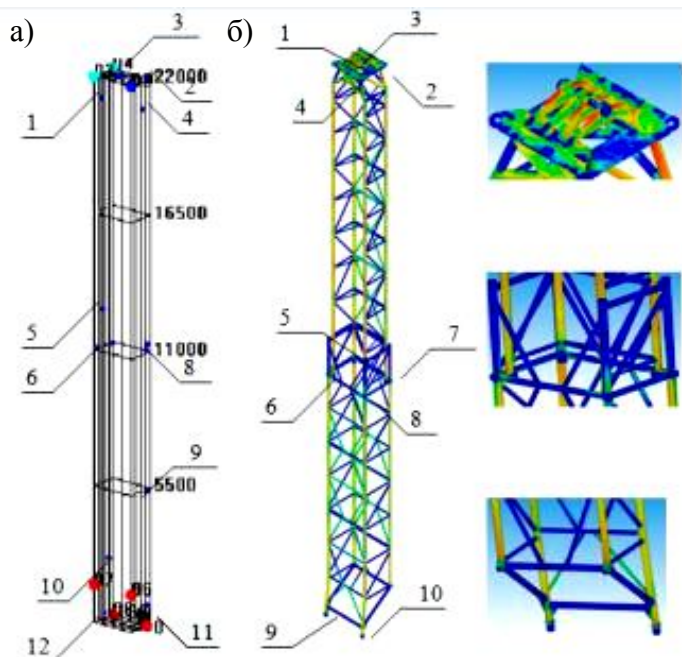


Рисунок 13 - Сопоставление компьютерной и графической (с локационной картой результатов АЭ) моделей исследуемой вышки. а – результаты компьютерного моделирования вышки, б – результаты АЭ испытаний вышки

При этом зоны несовпадения следует характеризовать, как зоны потенциальной опасности с неразвивающимися на момент испытаний дефектами. Обосновано также, что моделирование напряженного состояния вышечных конструкций является взаимодополняющим и оптимизирующим методом оценки их технического состояния и методически должен предшествовать акустическим исследованиям.

Показано, что применение метода акустической эмиссии при статических испытаниях существенно снижает объем традиционных методов неразрушающего контроля и позволяет своевременно определить место дефекта и классифицировать его по степени опасности, а в совокупности с результатами испытаний дает исчерпывающую информацию для оценки технического состояния (ресурса) металлоконструкций подъемной установки.

Таблица 2 – Выявленные зоны активности и напряженности.

№ п/п	Элемент конструкции (узел)	Общее количество выявленных зон	Количество зон активности выявленных методом АЭ	Количество зон концентрации определенных МКЭ	Общие выявленные зоны
1	Кронблок	7	3	4	2
2	Верхняя секция	9	5	4	4
3	Нижняя секция	6	4	2	2
4	Итого:	22	12	10	8

Определяющими параметрами в зависимости от критерия предельного состояния и доминирующего механизма повреждения для вышечных металлоконструкций являются: глубина и площадь поверхностного разрушения, например, трещины или различного вида коррозии, остаточная толщина стенки элементов конструкции, также прямолинейности элементов и напряженное состояние материала конструкции, его механические характеристики и характер прилагаемых нагрузок. Исходя из этого, определено три основных варианта (модели) назначения и определения остаточного ресурса вышки:

1. Расчетная оценка остаточного ресурса по данным об уменьшении толщины стенки металлоконструкции или по скорости коррозии;
2. Измерение параметров дефектности конструкции и базовых характеристик материала с использованием методов НК и последующий расчет коэффициентов запасов прочности (по пределам текучести, прочности и устойчивости);
3. АЭ-оценка развития магистральной трещины.

Так как по результатам обследования и испытаний вышки не обнаружены дефекты в виде трещин, то расчет и оценку ресурса проведем по скорости коррозии и предельным состояниям.

Оценка остаточного ресурса при уменьшении толщины стенки производится по наихудшим результатам измерения в местах наибольшего разрушения по скорости коррозии. При фактической толщине стенки  $S_{\text{факт}} = 7,6$  мм остаточной ресурс вышки составляет  $T = 7,1$  года.

По результатам оценки аварийности и дефектности вышечных конструкций определено, что их предельные состояния соответствуют первой группе предельных состояний, при которых происходит исчерпание несущей способности (прочность, устойчивость) сооружений при соответствующих комбинациях нагрузок, которые могут также сопровождаться разрушениями любого вида (вязкое, усталостное, хрупкое), с образованием трещин.

В соответствии с методом расчёта по предельным состояниям используется несколько критериев, каждый из которых имеет определённый вклад в обеспечение надёжности конструкции и гарантии не возникновения предельного состояния. Расчет ресурса проводят по разработанному алгоритму, учитывающему необходимые предельные состояния представленному на рисунке 14.

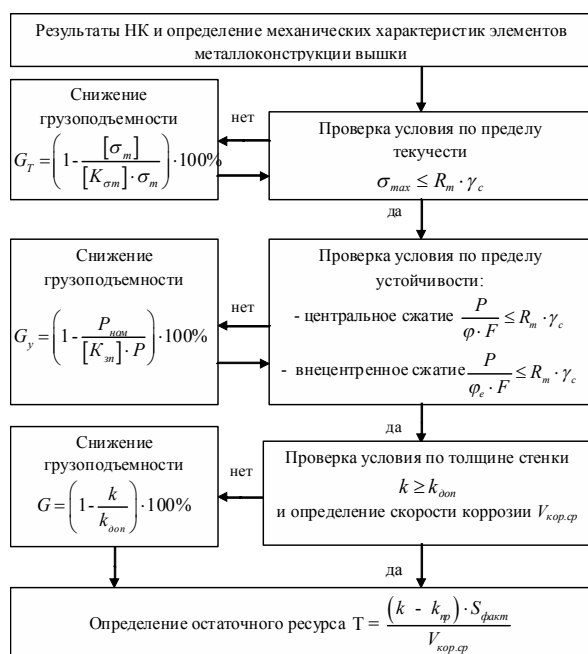


Рисунок 14 – Алгоритм оценки остаточного ресурса вышки по предельным состояниям

При выполнении условий по пределам текучести и устойчивости, проверка условия по толщине стенки при минимальном значении, полученном при обследовании вышки  $S_{\text{факт}} = 7,6$  – не выполняется. Для этого снижается фактическая грузоподъемность вышки на  $G = 3,7$  %. Далее рассчитывается остаточный ресурс со сниженной грузоподъемностью при скорости коррозии  $V_{\text{кор}} = 0,056$

мм/год, остаточный ресурс составляет  $T = 5,3$  года. При выполнении всех условий предельных состояний снижение грузоподъемности не требуется.

**Глава 6** определяет практическую ценность работы, основанную на апробации нового алгоритма и разработке методики оценки технического состояния вышек подъемных установок при АЭ испытаниях.

Разработанная методика акустико-эмиссионных испытаний вышек подъемных установок, предлагает порядок их обследования по усовершенствованному новому алгоритму с учетом требований промышленной безопасности и реализацией современных и более эффективных принципов диагностирования, точного определения параметров конструкции (НДС, трещиностойкости и т.д.) и методов оценки безопасной эксплуатации.

При разработке методики учитывались рекомендации для оценки результатов АЭ-испытаний полученных при исследованиях параметров АЭ при осевом сжатии элементов вышечных конструкций и предложена оценка остаточного ресурса тремя вариантами с использованием основных определяющих параметров надежности для вышечных конструкций.

### **Основные выводы:**

1. Выявлена высокая трудоемкость традиционных методов неразрушающего контроля для обнаружения дефектов структуры металла вышечных конструкций на ранней стадии их зарождения и развития. Обоснована актуальность применения для этой цели метода акустической эмиссии и предложен новый алгоритм оценки технического состояния и прогноза безопасной эксплуатации вышек подъемных установок для ремонта скважин.

2. Разработана методология исследований, представленная комплексом расчетных, лабораторных, стендовых и промышленных методик, обеспечивающих получение исчерпывающих исходных данных для оценки технического состояния вышечных конструкций подъемных установок для ремонта скважин.

3. Предложена методика компьютерного моделирования процесса испытаний вышечных конструкций подъемных установок на основе программного продукта «WinMachine» позволяющая выявлять зоны концентрации напряжений, представляющие собой очаги наибольших нагрузок, сосредоточенных в отдельных узлах вышечных конструкций.

4. В результате лабораторных исследований акустического поведения образцов из элементов вышечных конструкций при их осевом сжатии получена экспериментальная зависимость между параметрами АЭ (суммарным счетом и амплитудой) и процессом развития дефектов в исследуемом материале образцов. Это позволило обосновать графический метод идентификации стадии предразрушения вышечных конструкций, отличающихся закономерностью, при которой увеличение числа импульсов АЭ с повышением нагрузок начинает подчиняться степенному закону и отвечать критерию развития дефектов. На близость объекта к разрушению указывает выполнение критерия  $(\Delta N_{i+1}/\Delta N_i) > [(1 + \Delta P_{i+1}/P_i)^n - 1]$  при показателе степени  $n \geq 5,7$ , и/или наличие трех и более источников АЭ III класса определенных по амплитудному признаку. При этом стадия начала развития трещины определяется наличием сигналов с

амплитудой более 66 дБ и характерным распределением максимальных амплитуд сигнала.

5. Выполнена оценка эффективности метода АЭ при стендовых испытаниях вышечных конструкций серийной подъемной установки А-50М на промышленном испытательном стенде. В результате испытаний выявлено 12 зон акустической активности при 10 зонах концентрации напряжений, установленных моделированием, из них совпадение результатов по наличию развивающихся дефектов установлено в 8-ми случаях, что свидетельствует о высокой эффективности метода АЭ. При этом зоны несовпадения следует характеризовать, как зоны потенциальной опасности с неразвивающимися на момент испытаний дефектами.

6. Сформулированы рекомендации по оценке результатов контроля методом акустической эмиссии и остаточного ресурса вышечных конструкций подъемных установок по основным определяющим параметрам дефектности. Предложен метод расчета остаточного ресурса трубного элемента вышки, нарушенного трещиной, с использованием параметра акустической эмиссии.

7. Разработана методика оценки технического состояния вышек подъемных установок при акустико-эмиссионных испытаниях, предлагающая порядок обследования вышек по усовершенствованному (новому) алгоритму с учетом требований промышленной безопасности и реализацией современных и более эффективных принципов диагностирования, точного определения параметров конструкции (НДС, трещиностойкости и т.д.) и методов оценки безопасной эксплуатации.

#### **По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Смирнов А.Л. Эффективность метода акустической эмиссии при диагностировании технического состояния промыслового трубопровода / А.Л. Смирнов, И.Ю. Быков // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (16–20 апреля 2008 г.): В 2 ч.; ч. I. – Ухта: УГТУ. – С. 152–157.
2. Смирнов А.Л., Быков И.Ю. Анализ существующих методов контроля технического состояния металлоконструкций буровых установок // X международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех-2009»: материалы конференции (18–20 марта 2009 г., Ухта): в 4 ч.; ч. 1. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 299–303.
3. Смирнов А.Л., Быков И.Ю. Результаты проведения стендовых испытаний подъемных установок с применением метода акустической эмиссии // XI международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех-2010»: материалы конференции (17–19 марта 2010 г., Ухта): в 5 ч.; ч. 5. – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 95–100.
4. Смирнов А.Л. Разработка методики контроля технического состояния вышечных конструкций подъемных установок / А.Л. Смирнов, И.Ю. Быков // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (13–15 апреля 2010 г.): в 3 ч.; ч. I / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 190–195.

5. Смирнов А.Л., Быков И.Ю. Методы диагностирования и испытаний металлоконструкций буровых вышек // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2010. – №3. – С. 5–9.
6. Смирнов А.Л., Быков И.Ю. Диагностирование технического состояния промыслового трубопровода методом акустической эмиссии // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2010. – №3. – С. 28–31.
7. Смирнов А.Л., Ляпин М.Н., Зайцев А.П., Быков И.Ю. Специализированный стенд для проведения статических испытаний вышек подъемных установок // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2010. – №8. – С. 21–25.
8. Смирнов А.Л., Ляпин М.Н., Зайцев А.П., Быков И.Ю. Опыт применения метода акустической эмиссии при проведении стендовых испытаний вышек подъемных установок // Инженер-нефтяник. – М.: ООО «Ай Ди Эс Дриллинг», 2010. – №4. – С. 35–38.
9. Смирнов А.Л. Критерии оценки технического состояния вышечных металлоконструкций по параметрам акустической эмиссии / А.Л. Смирнов, И.Ю. Быков // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (17–20 апреля 2012 г.): в 3 ч.; ч. I / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2012. – С.162–168.
10. Смирнов А.Л., Быков И.Ю. Исследование структуры металла методом акустической эмиссии при осевом сжатии элементов буровых мачт // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2012. – №8. – С. 8–14.
11. Смирнов А.Л., Борейко Д.А., Быков И.Ю. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических образцов с искусственными дефектами // Инженер-нефтяник. – М.: ООО «Ай Ди Эс Дриллинг», 2013. – №1. – С. 40–43.
12. Смирнов А.Л., Борейко Д.А., Быков И.Ю. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния вышки подъемной установки для ремонта скважин // Территория НЕФТЕГАЗ. – М.: ЗАО «Камелот Пабблишинг», 2013. – №4. – С. 18–23.
13. Смирнов А.Л. Использование метода акустической эмиссии для изучения несущей способности трубных образцов с искусственными дефектами / Смирнов А.Л., Борейко Д.А., Быков И.Ю. //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.
14. Соловьев В.В. Методы контроля технического состояния металлоконструкций буровой установки: метод. указания к выполнению лабораторной работы/ В. В. Соловьев, А. Л. Смирнов. – Ухта: УГТУ, 2010. – 12 с.; ил.
15. Смирнов А.Л. Методика оценки технического состояния вышек подъемных установок при акустико-эмиссионных испытаниях / А.Л. Смирнов, И.Ю. Быков. – Ухта : УГТУ, 2013. – 47 с.

---

*Отпечатано в отделе оперативной полиграфии  
Ухтинского государственного технического университета  
Республика Коми, г. Ухта, ул. Октябрьская, 13.  
Усл. печ. л. 1,5. Подписано в печать 27.09.2013 г.  
Тираж 100 экз. Заявка № 2982.*