

# Моделирование напряженно-деформированного состояния вышечной конструкции подъемной установки для ремонта скважин

Многие статические задачи сопротивления материалов, с которыми приходится в настоящее время сталкиваться исследователям и инженерам, не поддаются аналитическому решению, поэтому единственной возможностью их теоретического анализа является компьютерное моделирование с использованием конечно-элементных (КЭ) комплексов.



**Дмитрий Андреевич БОРЕЙКО** – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности», ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», e-mail: diacont\_dboreyko@mail.ru

# Д

ля оценочного компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ) было выбрана

вышка подъемного агрегата АПРС-40 с наружным диаметром несущих ног 100 мм, наружными диаметрами поперечин и раскосов 60 мм. Максимальная длина стороны тетраэдра – 27 мм.

Для создания 3D-модели вышечной конструкции подъемной установки (ВКПУ) применяется система автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС-3D.

Для КЭ анализа созданной 3D-модели применяется программный прикладной инженерный пакет APM FEM. Работа программы основана на фундаментальной теории напряженно-деформированного состояния (НДС). APM FEM представляет собой инструмент для подготовки трехмерной модели с последующим КЭ анализом. С помощью модуля APM FEM можно создать поверхностную или твердотельную модели, задать материал, указать граничные условия и организовать КЭ сетку.

При этом процедура генерация конечных элементов проводится автоматически. Кроме того, расчетная модель APM FEM интегрирована с САПР КОМПАС-3D, что также позволяет экспортировать ее в сторонние САПР, использующие формат STEP 203 или SAT.

После генерации КЭ сетки система позволяет провести следующие виды расчетов:

## 1. Статический расчет.

Основным уравнением системы APM FEM для решения статической задачи является уравнение равновесия («матричное уравнение конечных элементов»)

$$K \cdot x = F, \quad (1)$$

где:  $K$  – матрица жесткости системы;  $F$  – вектор внешних силовых факторов;  $x$  – вектор неизвестных узловых перемещений.

## 2. Расчет на устойчивость.

При расчете конструкций нагрузка приводится к узлам. Вектор узловых сил  $P$  представляется в виде:

$$P = p \cdot F, \quad (2)$$

где:  $p$  – скалярная величина, называемая параметром нагружения;  $F$  – вектор внешней нагрузки.

## 3. Деформационный расчет.

Уравнение равновесия системы для деформационного расчета записывается в виде:

$$K \cdot \bar{\Delta} + L(\bar{\Delta}) \cdot \bar{\Delta} = F, \quad (3)$$

где:  $\bar{\Delta}$  – вектор перемещений;  $L(\bar{\Delta})$  – геометрическая матрица системы.

## 4. Нелинейный расчет.

При учете нелинейного поведения выражение для деформаций представляется в виде:

$$\{\varepsilon\} = ([B_0] + [B_{NL}(q)]) \cdot \{q\}, \quad (4)$$

где:  $q$  – вектор перемещений;  $[B_0]$  – линейные деформации;  $B_{NL}$  – нелинейный член.

**В результате выполненных системой APM FEM расчетов можно получить следующую информацию:**

- карту распределения нагрузок, напряжений, деформаций в конструкции;
- коэффициент запаса устойчивости конструкции;
- частоты и формы собственных колебаний конструкции;
- массу и момент инерции модели, координаты центра тяжести.

**Процесс анализа состоит из нескольких этапов:**

1. Создание закреплений, т.е. граничных условий по перемещениям в опорах или определенных узлах конструкции.
2. Приложение нагрузки к поверхности узла (детали).
3. Создание КЭ-сетки с заданными параметрами максимального размера тетраэдров, коэффициента разрежения в объеме и максимального коэффициента сгущения сетки на поверхности.
4. Статический расчет в автоматическом режиме программы.
5. Просмотр результатов расчета и создание отчета.

Применяемые средства расчета являются сертифицированными программными продуктами, апробированными на достаточном количестве верификационных задач с известными аналитическими решениями.

**Исходные данные для компьютерного моделирования и анализа НДС:**

1. Геометрические размеры вышки подъемной установки (наружный диаметр ног, поперечин и раскосов, толщины стенок труб).
2. Физико-механические характеристики материала вышки (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел прочности и др.).
3. Испытательная нагрузка, приложенная к элементам вышки.
4. Геометрические размеры искусственного дефекта (протяженность в окружном направлении, ширина).

**Алгоритм проведения компьютерного моделирования и анализа заключается в следующем:**

1. Задают исходные данные.
2. Создают геометрический образ элемента вышки (с дефектом).
3. Для созданной модели вышки производят расчет НДС с нагрузкой, увеличенной на 25% от максимально допустимой – 75 тс. По результатам расчета определяют зоны концентрации напряжений (ЗКН).
4. Выбирают элемент ВКПУ с зоной максимальной концентрации напряжений.

5. Для выбранного элемента подбирают максимально допустимую нагрузку, при которой не нарушается условие прочности.
6. Далее в элементе ВКПУ создают сквозную эллиптическую трещину с начальными размерами длины  $l = 1$  мм и ширины  $b = 1$  мм и рассчитывают НДС, с приложением максимальной нагрузки, определенной для бездефектного образца.
7. Моделируют процесс роста трещины, изменяя только ее 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:

$$K_{ин} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot h}{Q}} \cdot F_i(\lambda), \quad (5)$$

где:  $\sigma$  – среднее окружное напряжение, МПа;  $h$  – глубина трещины, м;  $\lambda$  – константа, зависящая от размеров и материала образца:

$$\lambda = \frac{\left[12 \cdot (1 - \nu^2)\right]^{1/4} \cdot a}{\sqrt{R \cdot t}}, \quad (6)$$

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

$$Q = 1 + 1,464 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^{1,65}, \quad (7)$$

$a$  – полудлина трещины, м;  $F_i$  – корректировочный коэффициент, определяемый по таблице с учетом параметра  $\lambda$ ;  $t$  – толщина стенки оболочки, м;  $R$  – внутренний радиус, м;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Расчет ведут до тех пор, пока Кин не сравняется с параметром трещиностойкости материала – коэффициентом ударной вязкости  $K_{1C}$ . Этот момент является критическим, при котором начинается неконтролируемый, катастрофический рост трещины с огромной скоростью и разрушение конструкции происходит за доли секунды.

Условие, при котором не возникнет катастрофический рост трещины, выглядит следующим образом:

$$K_{1C} \geq K_{ин}, \quad (8)$$

где:  $K_{1C}$  – коэффициент ударной вязкости материала; для стали 09Г2С  $K_{1C} = 24...37$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

8. Для одного из значений  $K_{1C}$  находят критическое значение длины трещины и напряжение, при которых  $K_{ин} = K_{1C}$ .
9. Определяют скорость «вязкого» роста трещины по формуле:

$$V = A \cdot K_{кин}^n, \quad (9)$$

где:  $A$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала;  $n$  – экспериментальный коэффициент.

10. Рассчитывают критическую скорость роста трещины в момент начала неконтролируемого разрушения по формуле:

$$v_{кр} = 0,38 \cdot v_s \cdot \left(1 - \frac{l}{l_{кр}}\right), \quad (10)$$

где:  $v_s$  – скорость звука в среде, для стали,  $v_s = 5100$  м/с;  $l$  – начальная длина трещины, м;  $l_{кр}$  – критическая длина трещины, м.

Целью настоящей работы является оценка скорости роста трещиноподобного дефекта и максимальной безопасной длины трещины для дальнейшей оценки времени ее роста до разрушения (времени «жизни» узла с растущим дефектом).

**Задача решалась в несколько этапов.**

**Первый этап.** С помощью программного комплекса АСКОН «КОМПАС-3D» была спроектирована исходная модель ВКПУ, представленная на рис. 1.

**Второй этап.** С помощью программного комплекса APM FEM исходная модель была нагружена нагрузкой 60 тс, приложенной к оси кронблока и, далее преобразована в сетку конечных элементов. В табл. 1 представлены исходные данные КЭ-сетки модели, а внешний вид сетки представлен на рис. 2.

**Третий этап.** Был произведен статический расчет ВКПУ в автоматизированном режиме. Для оценки результатов расчета рассматривается карта распределения запаса по текучести, представленная на рис. 3.



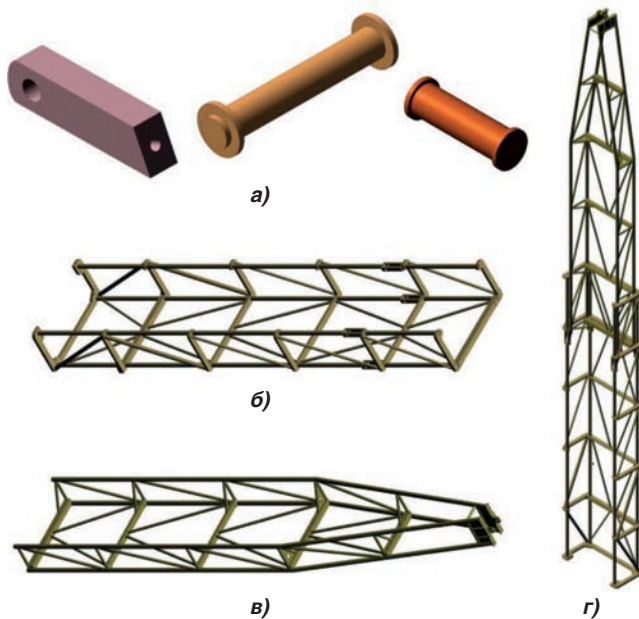


Рис. 1. Твердотельная пространственная модель мачты агрегата АПРС-40  
а – клин опорный, оси; б – секция нижняя;  
в – секция выдвигная; г – сборка

Таблица 1. Исходные и выходные параметры сетки конечных элементов твердотельной модели мачты АПРС-40

Параметр	Значение
Тип конечного элемента	тетраэдр
Длина стороны конечного элемента, мм	20,0
Коэффициент сгущения на поверхности	3,0
Коэффициент разрежения в объеме	1,0
Общее количество элементов в сетке, шт.	2711097
Количество узлов в сетке, шт.	808764

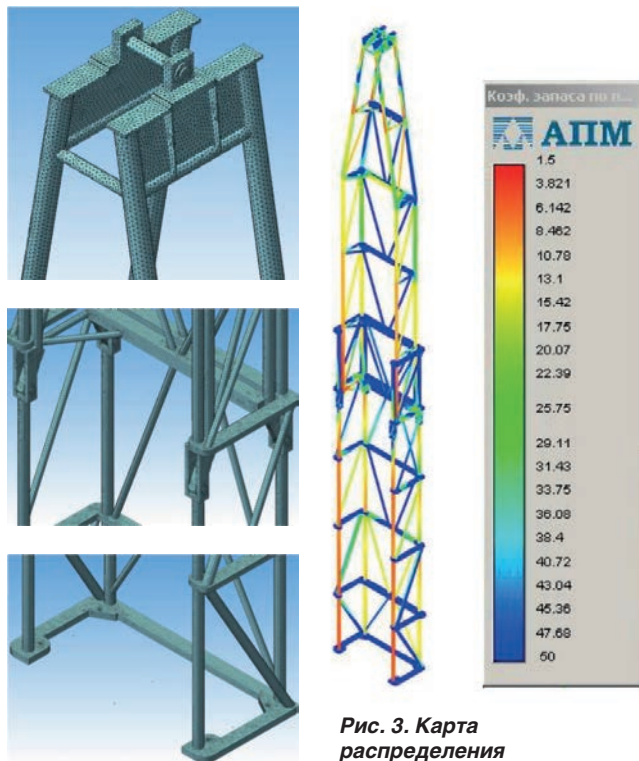


Рис. 2. КЭ сетка модели ВКПУ АПРС-40

Рис. 3. Карта распределения коэффициента запаса по пределу текучести материала

**Четвертый этап.** По результатам статического расчета были определены ЗКН, которые являются потенциально опасными. Как и ожидалось, наиболее опасными зонами являются места соединения ног нижней и верхней секций вышки. Далее для исследования роста трещины был выбран наиболее нагруженный элемент ВКПУ, как показано на рис. 4.

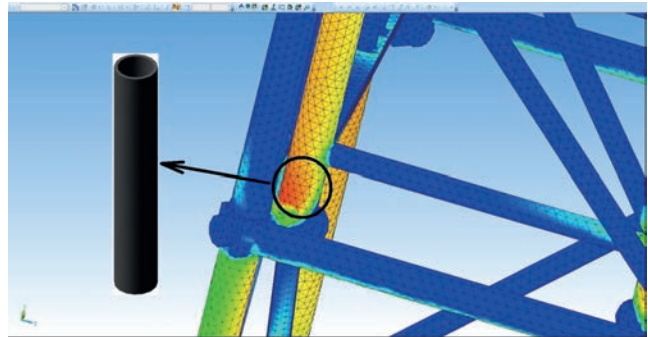


Рис. 4. Основные ЗКН в модели ВКПУ

**Пятый этап.** В выбранном элементе была смоделирована эллиптическая трещина с начальными размерами эллипса  $l = 1$  мм и  $b = 1$  мм, представленная на рис. 5.

Произведен КЭ-анализ образца с приложением односторонней растягивающей нагрузки  $P = 40$  тс, по результатам анализа фиксировалось значение максимального напряжения и коэффициента запаса прочности. Затем по формуле (5) вычислялось значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{ин}$ .

Далее моделировался рост длины трещины от  $l = 1$  мм до критической длины с шагом  $1 \pm 0,5$  мм, для каждой длины фиксировалось значение максимального напряжения, коэффициента интенсивности напряжений и коэффициента запаса прочности. Так как для стали 09Г2С значение коэффициента ударной вязкости, являющееся пороговым значением  $K_{ин}$ , лежит в диапазоне  $24 \dots 37$  МПа·м<sup>1/2</sup>, то результатом расчета был определен интервал длин трещины при различном пороговом значении  $K_{ин}$ . Результаты расчетов сведены в табл. 2.

В таблице оранжевая зона соответствует стали с  $K_{IC} = 24$  МПа·м<sup>1/2</sup>, синяя – стали с  $K_{IC} = 37$  МПа·м<sup>1/2</sup>, зеленая – пороговому значению для коэффициента запаса прочности. Из таблицы видно, что при любой критической длине трещины нарушается условие по запасу прочности, которое выглядит следующим образом:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma_{max}} \geq 1,4, \quad (11)$$

где:  $\sigma_B$  – предел прочности материала, МПа;  $\sigma_{max}$  – максимальное действующее напряжение, МПа.

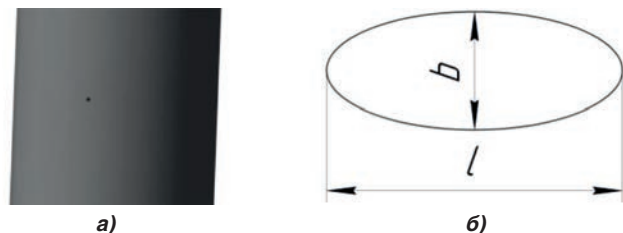
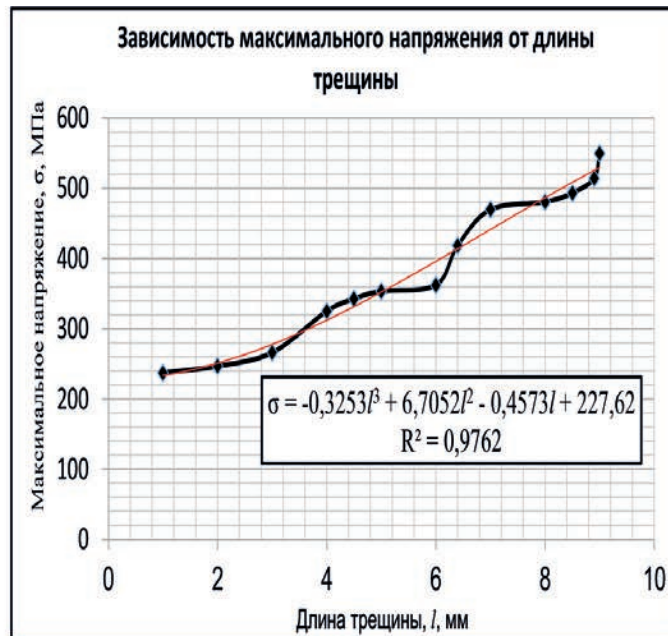
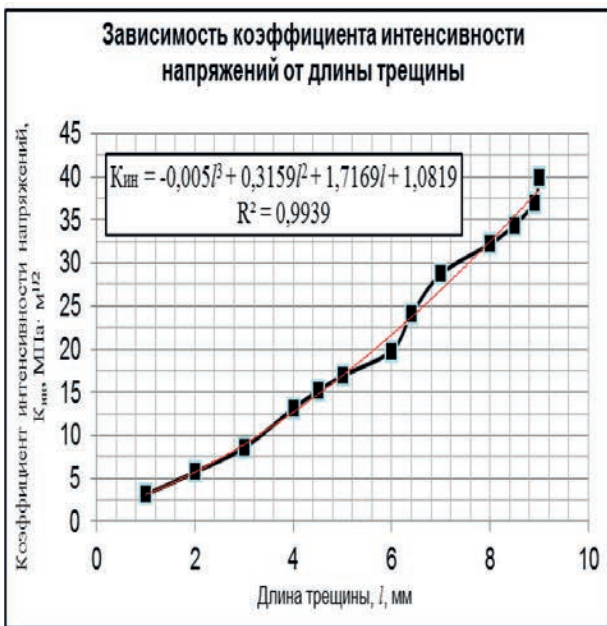


Рис. 5. Модель эллиптической трещины  
а – модель трещины, б – размеры трещины



а) б)  
Рис. 6. Графические зависимости: а – зависимость  $\sigma$ - $l$ , б – зависимость  $K_{ин}$

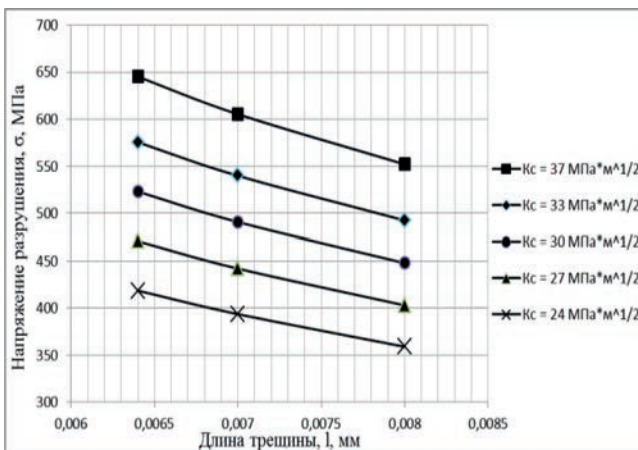


Рис. 7. Зависимость максимального разрушающего напряжения от длины трещины при различном значении  $K_{Ic}$

Поэтому, для двух найденных критических длин трещины (6,4 мм и 8,9 мм), методом подбора моделированием были найдены максимально допустимые нагрузки, при которых выполняется условие 3.11. Нагрузки составили для трещины длиной 6,4 мм – 32 тс, для трещины длиной 8,9 мм – 31 тс.

По результатам моделирования были найдены зависимости различных параметров друг от друга. Выявленные зависимости представляются в виде графиков.

На рис. 6 представлены 2 графика зависимости от длины трещины максимального действующего напряжения и коэффициента интенсивности напряжений.

Результатом аппроксимации для обеих зависимостей являются полиномиальные кривые третьей степени, уравнения которых так же представлены выше на рис. 6. По данным зависимостям можно сделать вывод, что теория о росте  $K_{ин}$  и  $\sigma$  при росте дефекта подтверждается и КЭ-анализом.

Таблица 2. Результаты расчета процесса роста трещины

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

При помощи компьютерного моделирования и КЭ-анализа также были получены зависимости максимального напряжения от длины трещины при различном коэффициенте  $K_{Ic}$ . Данная графическая зависимость представлена на рис. 7.

Очевидно, что чем меньше параметра трещиностойкости материала  $K_{Ic}$ , тем меньше необходимо приложить усилие, чтобы создать разрушающее напряжение в трещиноподобном дефекте. Аналогично и с длиной трещины: чем больше трещина, тем меньше усилие необходимо приложить, чтобы конструкция разрушилась. Все эти утверждения подтверждались на различных конструкциях теоретически и экспериментально. В данной работе они были подтверждены на имитационной компьютерной модели ВКПУ АПРС-40. По данным зависимостям можно для каждого конкретного случая подобрать максимальное напряжение и рассчитать нагрузку, которая его создаст.



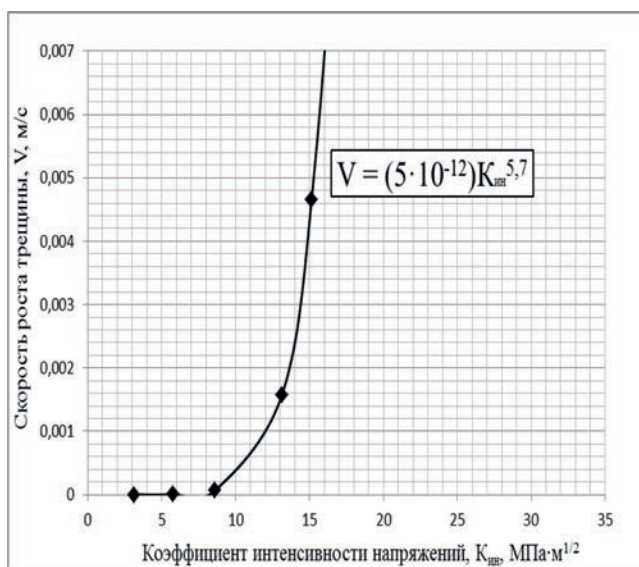


Рис. 8. Зависимость скорости роста трещины от  $K_{ин}$

По формуле (9) далее была рассчитана скорость роста трещины в момент перед самым началом разрушения, который еще относится к «вязкому» росту трещины. Построено графическое отображение скорости роста трещины с увеличением ее длины и, следовательно, коэффициента интенсивности напряжений  $K_{ин}$  (рис. 8).

При помощи выведенной зависимости скорости роста трещины можно судить о том, через какое время наступит предельное состояние для узла и конструкции в целом.

### Выводы по результатам моделирования:

1. Компьютерное моделирование позволило выявить и наглядно показать все ЗКН в ВКПУ, а также все параметры опасных зон вплоть до коэффициента запаса прочности по пределу текучести. В результате приложения к кронблоку ВКПУ агрегата АПРС-40 испытательной нагрузки 1,25·Р минимальный коэффициент запаса прочности по пределу текучести составил 1,6, что допустимо, однако близко к минимуму 1,5.
2. По результатам моделирования трещины в опорном трубном узле ВКПУ были найдены ее критические длины для различных типов стали 09Г2С с  $K_{IC} = 24$  МПа·м<sup>1/2</sup> и 37 МПа·м<sup>1/2</sup>. Эти величины соответствуют длинам трещины 6,4 мм и 8,9 мм и означают, что при достижении трещины данных размеров начнется катастрофическое неконтролируемое разрушение. Следовательно, имеется возможность эксплуатации с данными видами дефектов, но лишь некоторое непродолжительное время и при ограничении нагрузки до 32 тс.
3. Вычисленная скорость «вязкого» роста трещины до значения 8,9 мм при  $K_{IC} = 37$  МПа·м<sup>1/2</sup> составила  $4,1 \cdot 10^{-3}$  мм/с. При превышении длины 8,9 мм начнется катастрофическое неконтролируемое разрушение конструкции.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Новиков А. С., Сериков Д. Ю., Гаффанов Р. Ф. Бурение нефтяных и газовых скважин. - М.: Нефть и газ, 2017 – 307 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. – Т. 7: В 2 кн. – Кн. 1: Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2006 – 829 с.
3. Борейко Д. А., Быков И. Ю., Сериков Д. Ю. Анализ опыта лабораторных исследований металлов при помощи пассивных методов неразрушающего контроля // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2021 – №5 – С. 19–23.
4. Сегерлинд Л. Ж. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. – Москва: МИР, 1979 – 389 с.
5. Борейко Д. А., Быков И. Ю., Сериков Д. Ю. Обзор методов и методик технического диагностирования работоспособности шарошечных буровых долот // Межд. науч. конференция «Рассохинские чтения» УГТУ, Ухта. 2021 – С. 66–69.
6. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2 т.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
7. Борейко Д. А., Сериков Д. Ю. Применение метода конечно-элементного анализа для автоматизации оценки начальных испытательных нагрузок при проведении исследований напряженно-деформированного состояния трубных образцов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021 – №4 – С. 38–42.
8. Еремин К. И., Шаповалов Э.Л., Науменко В.Д. Влияние анизотропии проката на циклическую и статическую трещиностойкость сталей 09Г2С и ВСтЗсп // Сварочное производство. – 1992 – №12 – С. 2–3.
9. Мягков К. А., Гаффанов Р. Ф., Сериков Д. Ю. Анализ существующих методик расчета резьбовых фланцевых и межфланцевых соединений // Оборудование и техноло-гии для нефтегазового комплекса. – 2017 – №1 – С. 42–46.
10. Быков И. Ю., Смирнов А. Л. Исследование структуры металла методом акустической эмиссии при осевом сжатии элементов буровых мачт // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012 – № 8 – С. 8–14.
11. Цхадая Н. Д., Борейко Д. А., Сериков Д. Ю. Пассивные методы контроля – действенный инструмент повышения эффективности оценки технического состояния нефтегазового оборудования // Инженер нефтяник: науч.-техн. журн. – М., 2021 – №3 – С. 15–19.
12. Борейко Д. А., Сериков Д. Ю., Смирнов А. Л. Анализ методик оценки технического состояния металлоконструкций нефтегазового оборудования на основе метода акустической эмиссии // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2021 – №7 – С. 15–19.
13. Сериков Д. Ю., Борейко Д. А. Автоматизированная оценка напряженно-деформированного состояния оболочковой конструкции газоконденсатной разделительной емкости со скрытым расслоением металла // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021 – №6 – С. 29–32.
14. Борейко Д. А., Сериков Д. Ю. Анализ методов моделирования элементов конструкций машин и агрегатов для автоматизации оценки их напряженно-деформированного состояния // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021 – №3 – С. 35–39.
15. Гаффанов Р. Ф., Сериков Д. Ю. Анализ существующих методик расчета наплавки и защитных покрытий на прочность // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019 – №7 – С. 34–37.