

**РАСШИРЕНИЕ СФЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАУЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА
УФИМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВИАЦИОННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
КАК УСЛОВИЕ СОВРЕМЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ВУЗА
(НА ПРИМЕРЕ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПА РЕАКТОРА КОКСОВЫХ КАМЕР
С РАСЧЕТОМ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ)**

С. В. Новиков¹, И. Н. Будилов²

¹ rector@ugatu.su, ² budilov02@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Поступила в редакцию 11.12.2021

Аннотация. Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ) является крупным отраслевым вузом современного авиадвигателестроения. В целях повышения конкурентоспособности университета как в образовательном пространстве, так и в сфере научных исследований происходит диверсификация образовательных программ, направлений научных исследований. На примере разработки цифрового прототипа и выполнения трехмерного упругого расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) реактора и силовых и энергетических параметров разрушения для эллиптической трещины, расположенной в цилиндрической обечайке, рассматривается вариант успешных исследований ученых УГАТУ для нефтегазовой отрасли. В ходе исследования установлено, что для эллиптической трещины силовые и энергетические параметры разрушения нелинейно изменяются вдоль фронта трещины. Получены качественные и количественные соотношения для коэффициентов интенсивности напряжений (КИН и J -интеграла) по фронту трещины с учетом ее размеров, формы фронта и угла наклона.

Ключевые слова: трансформация вуза; диверсификация направлений исследований; цифровой прототип; реактор коксовых камер; обечайка реактора; прочность; напряженно-деформированное состояние; коэффициент интенсивности напряжений; интеграл Черепанова – Райса.

ВВЕДЕНИЕ

Отечественная система высшего образования в настоящее время нацелена на качественные преобразования деятельности. Этому способствует и стремительное развитие Индустрии 4.0, на вызовы которой не могут не отвечать вузы как структуры, осуществляющие подготовку квалифицированных кадров для экономики. Возникновение специальностей на основе смежных компетенций, цифровизация экономики, усложнение технологий производства, сочетающих высокотехнологичные этапы и цифровую обработку больших данных, выдвигают новые задачи перед каждым высшим учебным заведением: требуется подготовка высококвалифицированных кадров, обладающих актуальными компетенциями и способными осваивать новые в ходе профессиональной деятельности.

На наш взгляд, показателем уровня ожиданий и уровня доверия государства к системе высшего образования стала реализация в 2021 году конкурса в рамках масштабной программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» [1]. Эта программа, рассчитанная на долгосрочный период и обеспеченная финансированием, дает возможность университетам развернуть глобальные исследования и планировать амбициозные результаты. УГАТУ принял участие в конкурсе «Приоритет-2030» совместно с ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет». В рамках получаемых средств УГАТУ планирует реализовать ряд проектов по основным направлениям научной деятельности университета.

В то же время в университете происходят процессы глубокой трансформации всех направлений: обновление содержания образования, внедрение актуальных технологий обучения, цифровизация всех сфер деятельности, расширение международного сотрудничества, включение ученых университета в исследования по фронтальным направлениям науки.

Как уже указывалось, одной из перспектив развития сферы научных исследований университета является диверсификация направлений исследований.

Разработки ученых университета традиционно признаны и востребованы в машиностроении, авиадвигателестроении, в сфере информационных технологий.

Увеличение заинтересованности индустриальных партнеров в использовании перспективных разработок, расширение сферы применения результатов научной деятельности университета позволяют реализовать научный потенциал авиационного университета в иных сферах.

Результаты исследований ученых университета востребованы в сфере добычи и переработки нефти и газа.

В 2020 году УГАТУ вошел в состав консорциума инженерных вузов «Недра». Консорциум возглавляет Санкт-Петербургский государственный горный университет. Новые технологии и разработки, выполненные УГАТУ в интересах оборонного комплекса, уже сегодня активно используются в скважинном оборудовании для добычи нефти, в газоперекачивающих агрегатах для выработки электроэнергии. Более 40 типоразмеров электрических машин применяются в нефтяных и газовых компаниях России.

Университет имеет производственную цепочку, позволяющую проводить ремонтные работы двигателей (в том числе наземного применения) по заказу предприятий ПАО «Газпром», включая процессы дефектации, восстановления свойств материала, ремонта. Это позволило объединиться в консорциум с ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» для создания и внедрения новых технологий и оборудования по направлению «Ремонт и восстановление газотурбинных установок и газоперекачивающих станций». Деятельность консорциума направлена на развитие совместных компетенций в создании высокотехнологичной научной продукции и трансфера новых технологий в промышленное производство.

Одним из примеров результативных исследований ученых университета является разработка методики оценки технического состояния аппаратов и устройств нефтехимического производства (НХП) на основе цифровых прототипов и цифровых двойников на примере реактора коксовых камер.

Реактор коксовых камер предназначен для накопления смесового сырья, подаваемого с колонны, через печь, и дальнейшего его коксования и накопления получаемого кокса на установке замедленного коксования нефтеперерабатывающего завода (НПЗ).

Реактор (рис. 1) представляет собой цельносварной пустотелый цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 5500 мм, высотой 27225 мм, вместимостью 540 м³, с верхним полушарическим и нижним коническим днищами с горловинами для ввода гидрорежущего инструмента и выгрузки кокса.

Реактор устанавливается на 6 опорных стойках, расположенных в зоне опорного пояса. Нагретое сырье коксования поступает в реактор через штуцер ввода сырья, расположенный в нижней части конического днища. В верхней и нижней горловине реактора расположены

штуцера вывода паров коксования и вывода паров охлаждения кокса водой, а также штуцера для подачи антивспенивающей присадки и штуцера для вывода паров при операции прогрева камеры, а также для разогрева камеры при пуске.

При эксплуатации реактора из-за циклического характера его работы наблюдается появление дефектов типа трещин в обечайке корпуса, что оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) и, в целом, на надежность всего реактора. Разработанная методика позволяет оценить влияние расположения трещины в зоне обечайки аппарата на силовые и энергетические параметры разрушения.

Для оценки опасности таких трещин исследователями выполнен трехмерный численный эксперимент, который состоит из моделирования и последующего расчета методом конечно-элементного анализа (МКЭ). Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_1 , K_2 , K_3 и энергетический интеграл (J) рассчитаны с учетом формы, расположения на внешней поверхности обечайки, а также с учетом фактических размеров и угла наклона трещины. Коэффициенты интенсивности напряжений K_1 , K_2 , K_3 рассчитаны по известной методике по скорости высвобождения энергии с помощью формулы $K^2 = EJ/(1-\nu^2)$. Скорость высвобождения энергии рассчитана методом виртуального продвижения трещины [4].

Расчет силовых параметров разрушения выполнен на полной 3D-модели реактора, трещина задавалась в зоне сварного соединения обечайки и конического днища. Нагружение задавалось в виде внутреннего давления величиной 0,62 МПа. Учитывались вес аппарата и гидростатическое давление жидкости внутри аппарата и температура среды.

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Цифровой прототип реактора, показан на рис. 1. Геометрия основных силовых элементов реактора соответствует обычной практике проектирования сосудов давления [2]. Реактор изготавливался из стали 12ХН10Т, кроме того, в расчетах учитывалась температура среды 475 °С. Механические характеристики материала, используемые в расчетах, представлены в табл. 1.

В расчетах принимались следующие размеры: толщина стенки (T) реактора составляла 21 мм, диаметр обечайки – 5500 мм, диаметр штуцера – 300 мм. Форма трещины в области стенки опоры приведена на рис. 2, а.

Допустимые напряжения для данного материала при температуре 160 °С равно 145,5 МПа, при 475 °С – 114,0 МПа.

Таблица 1

Механические характеристики

| Температура T , °С | Характеристики | | | |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| | Плотность ρ , кг/м ³ | Модуль Юнга, E , Па | Коэффициент Пуассона, ν | Предел текучести, σ_T , Па |
| 20 | 7900 | 1,98E+11 | 0,36 | 2,25E+8 ÷ 3,15E+8 |
| 500 | 7690 | 1,66E+11 | 0,36 | 1,35E+8 ÷ 2,05E+8 |

Механические свойства в промежутке температур от 20 °С до 500 °С определялись линейной аппроксимацией.

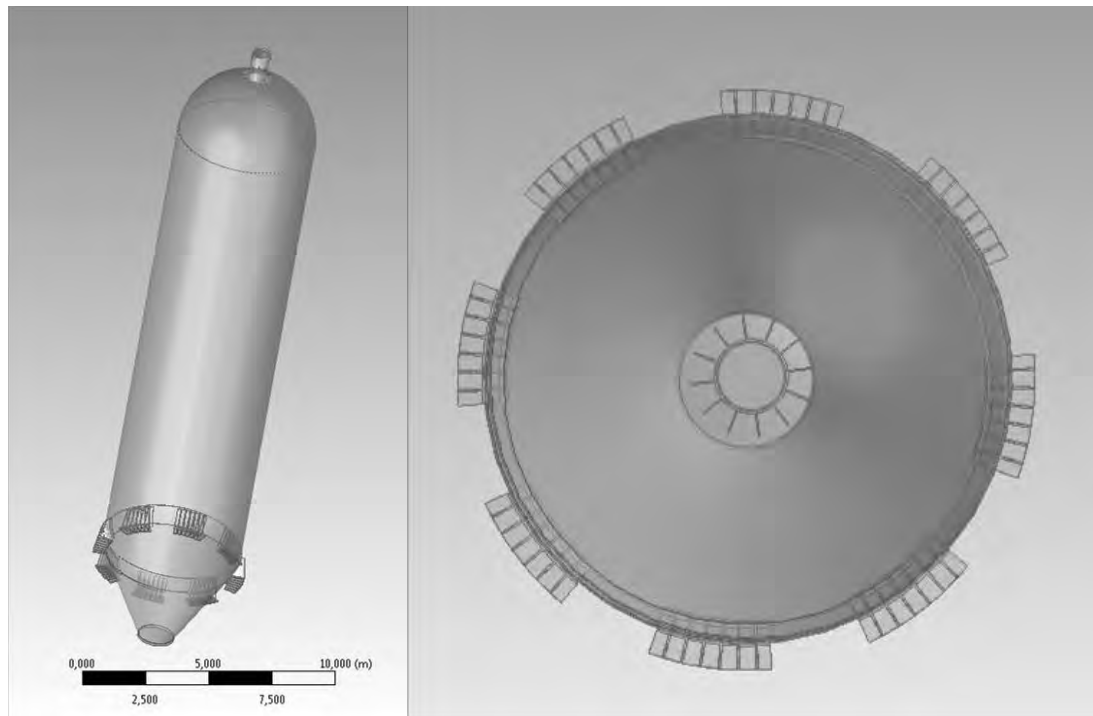


Рис. 1. Общий вид реактора

Все расчеты были выполнены в статической постановке в пакете ANSYS/Workbench [3]. Один из вариантов сетки конечных элементов для полноразмерного объекта реактора приведен на рис. 4, а, в.

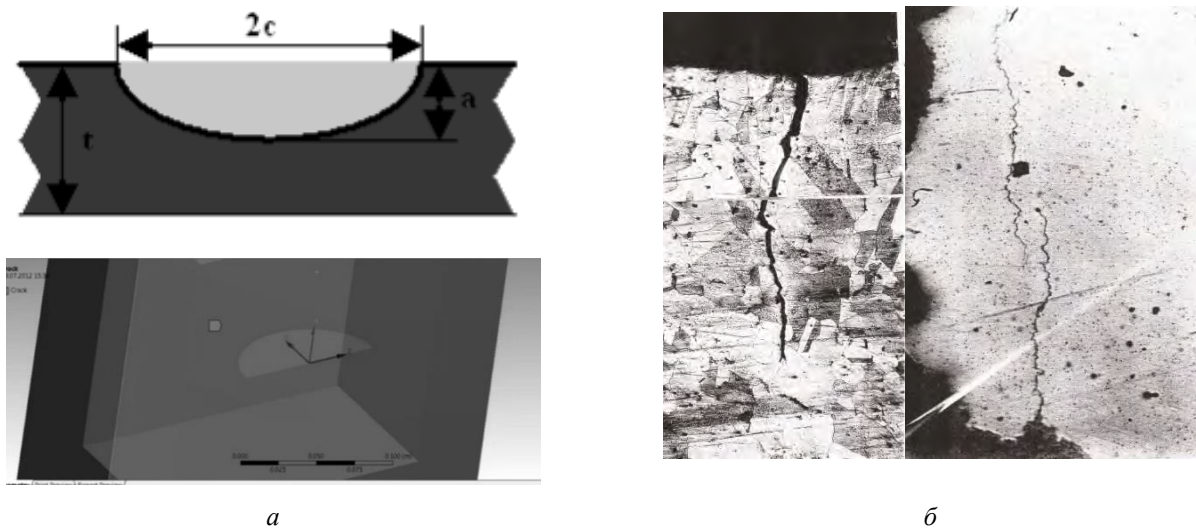


Рис. 2. Форма трещины и ее размеры (а) и примеры трещин в обечайке реактора (б)

Трещина в сварном соединении обечайки реактора, имеющей форму дуги эллипса с малым радиусом a , распространялась не более чем на 0,4 толщины стенки листа.

Расчетные параметры конечно-элементной модели. На первом этапе был выполнен упругий расчет НДС реактора МКЭ. Твердотельная модель реактора, граничные условия и сетка конечных элементов для этого расчета показана на рис. 3, а. На рис. 6 приведено общее НДС в виде изополос эквивалентных напряжений в реакторе с учетом внутреннего давления и температуры теплоносителя. Во всех частях КЭ модели реактора использовались четыре элемента по толщине стенки. Установлено, что максимальные напряжения наблюдаются в зоне сварных швов пересечения обечайки и патрубков, а также в зоне приварки опорных лап реактора. При визуальном осмотре в сварном соединении обечайки, после проведенного

акустико-эмиссионного контроля, были обнаружены поверхностные дефекты (трещины), как это показано на рис. 3. Сетка КЭ, которая в дальнейшем использовалась для расчетов МКЭ в зоне сварного шва с трещиной, показана на рис. 3, в и рис. 6.

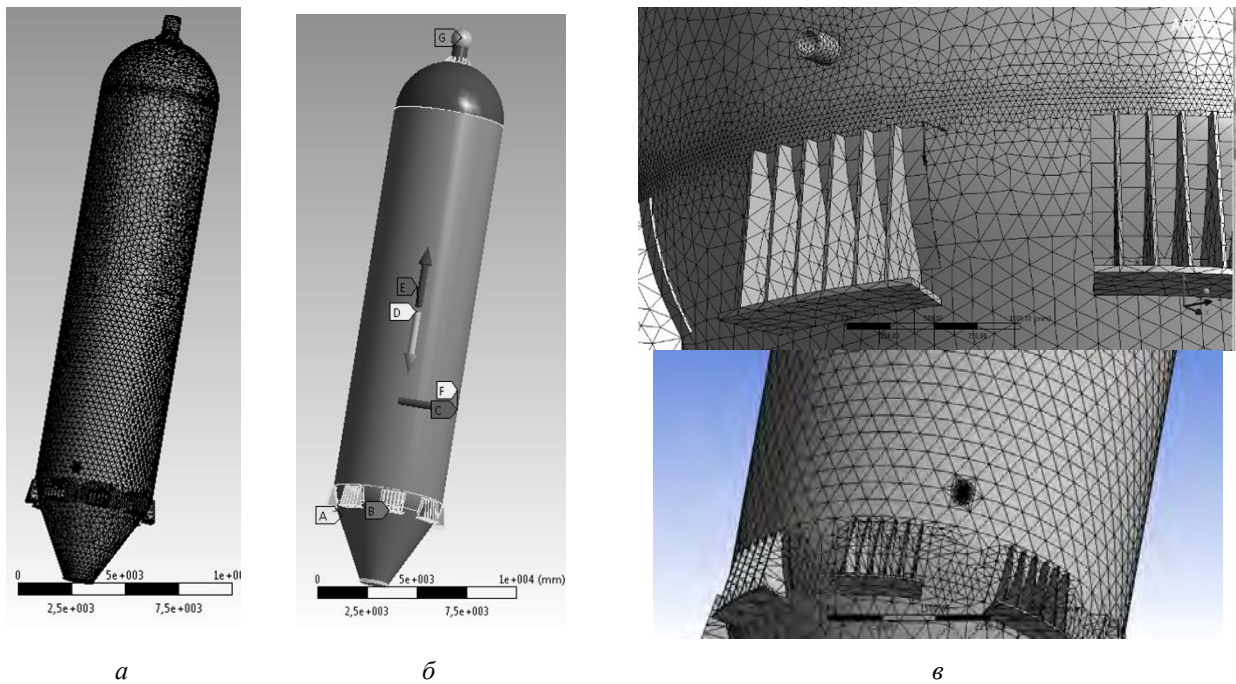


Рис. 3. Твердотельная и КЭ-модель (а), граничные условия (б), КЭ-модель с учетом трещины (в)

Теория метода расчета. Коэффициенты интенсивности упругих напряжений первого, второго и третьего рода K_1 , K_2 и K_3 , как было отмечено выше, рассчитывались по скорости высвобождения энергии, определяемой методом виртуального продвижения трещины [3–4]. На рис. 4 показаны координаты трещины и контур интегрирования, которые использовались для расчетов.

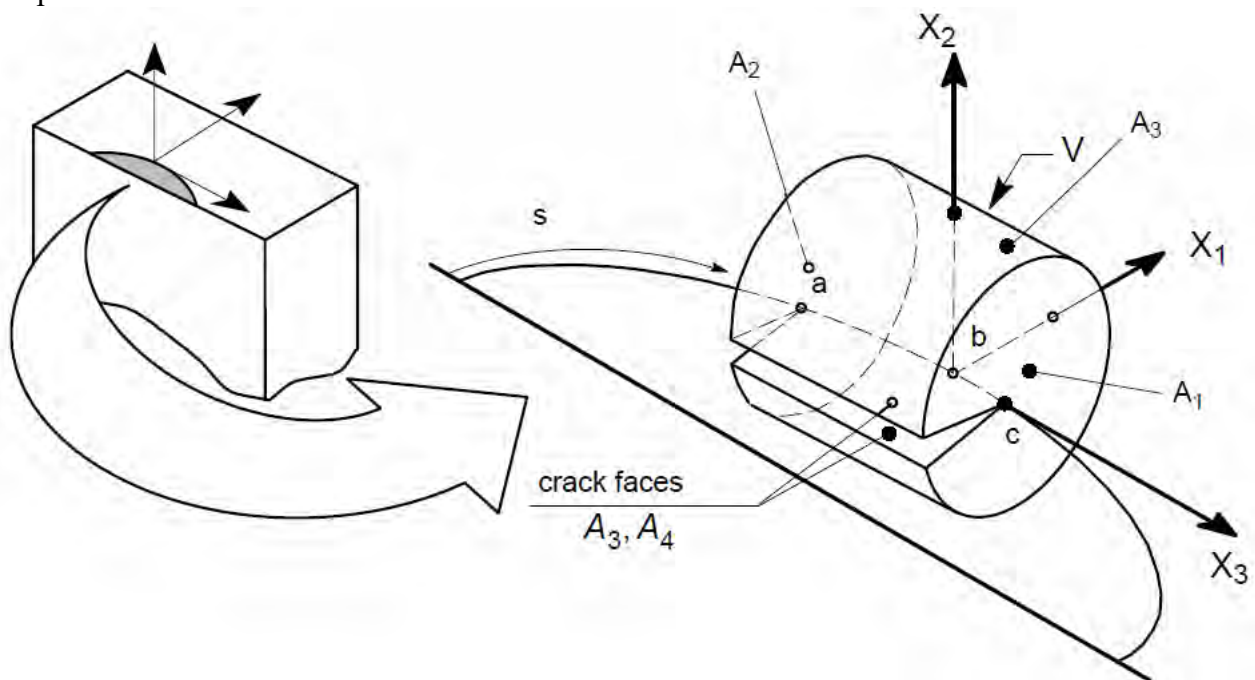


Рис. 4. КЭ-модель трещины

Напряжения в вершине трещины описываются следующими соотношениями [5]:

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I^{(2)} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - K_{II}^{(2)} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right], \\ \sigma_{22}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I^{(2)} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + K_{II}^{(2)} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right], \\ \sigma_{12}^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I^{(2)} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + K_{II}^{(2)} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right], \\ \sigma_{13}^{(2)} &= \frac{K_{III}^{(2)}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}, \quad \sigma_{23}^{(2)} = \frac{K_{III}^{(2)}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2},\end{aligned}$$

$$\sigma_{33}^{(2)} = \begin{cases} \nu(s)(\sigma_{11}^{(2)} + \sigma_{22}^{(2)}) & \text{плоское деформированное состояние} \\ 0 & \text{плоское напряженное состояние} \end{cases}$$

Силовые параметры разрушения определены, как

$$K_I = \sqrt{JE^*}, \quad K_{II} = \sqrt{JE^*}, \quad K_{III} = \sqrt{\frac{JE}{1+\nu}},$$

$E^* = E/(1-\nu^2)$ для плоского деформированного состояния; $E^* = E$ для плоского напряженного состояния.

Энергетический интеграл определен по формуле [6]:

$$\begin{aligned}J(s) &= \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E^*(s)} + \frac{1+\nu(s)}{E(s)} K_{III}^2, \\ J^{(s)}(s) &= \frac{1}{E^*(s)} \left[\left(K_I^{(1)} + K_I^{(2)} \right)^2 + \left(K_{II}^{(1)} + K_{II}^{(2)} \right)^2 \right] + \frac{1+\nu(s)}{E(s)} \left(K_{III}^{(1)} + K_{III}^{(2)} \right)^2 = \\ &= J^{(1)}(s) + J^{(2)}(s) + I(s),\end{aligned}$$

где
$$I(s) = \frac{1}{E^*(s)} \left(2K_I^{(1)}K_I^{(2)} + 2K_{II}^{(1)}K_{II}^{(2)} \right) + \frac{1+\nu(s)}{E(s)} \left(2K_{III}^{(1)}K_{III}^{(2)} \right)$$

$$K_I^{(1)} = \frac{E^*(s)}{2} I(s).$$

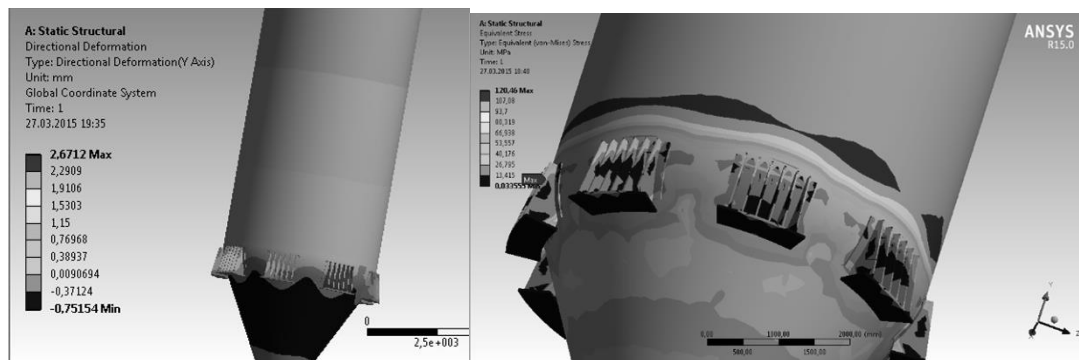


Рис. 5. Поля напряжений в реакторе при действии эксплуатационных нагрузок ($\sigma_{\text{eqv}} = 120,5$ МПа)

Конечно-элементная модель (КЭМ) реактора состояла из 956731 двадцатиузловых изопараметрических элементов и была получена с помощью программы *ANSYS/WORKBENCH* [3–5].

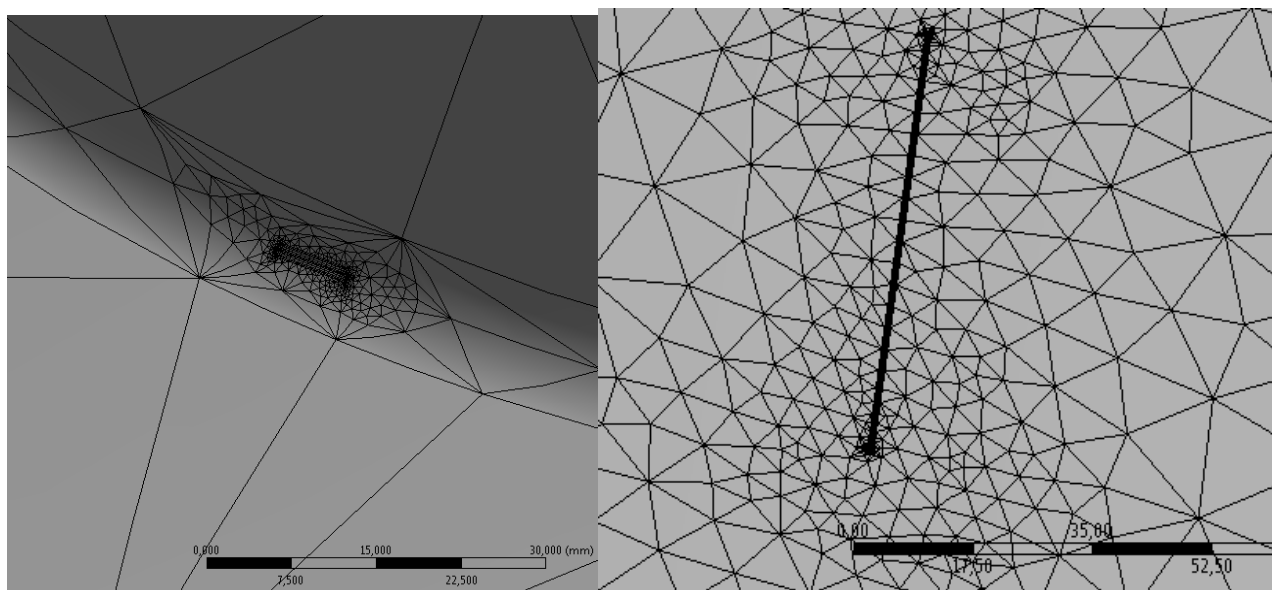


Рис. 6. КЭ-модель трещины

Граничные условия. Граничные условия и сетка конечных элементов показаны на рис. 3, а, б. В опорных стойках аппарата задавались ограничения перемещения по вертикали, в зоне опоры подвижной стойки задавались контактные условия с учетом проскальзывания опорной поверхности стойки. К штуцерам прикладывались нагрузки в виде осевых сил и моментов от обвязки технологическими трубопроводами. Температура среды внутри реактора задавалась $475\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Модель трещины. Область с эллиптической трещиной описывалась изопараметрическими элементами второго порядка и задавалась отдельно от основной модели с помощью инструментария *CRACK* в модуле *Static Structural* [3]. В результате образовалась гибридная конечно-элементная модель реактора с эллиптической трещиной. Область с трещиной с радиально-кольцевой структурой КЭ, показана на рис. 3 и 6 с различным увеличением. Вдоль фронта трещины располагалось шесть элементов, восемь элементов были распределены в радиальном направлении около кончика трещины для моделирования разрушения и сингулярности напряжения типа $1/r$ около кончика трещины [4].

Трещина моделировалась в форме эллипса с параметрами $C = 2,0\text{--}28,0\text{ мм}$, $a = 0,4\text{--}6,0\text{ мм}$, располагалась в зоне радиусного перехода от патрубка к обечайке реактора. Ориентация трещины выбиралась таким образом, чтобы ось X располагалась вдоль короткого радиуса эллипса, а ось Z – вдоль длинной стороны фронта трещины.

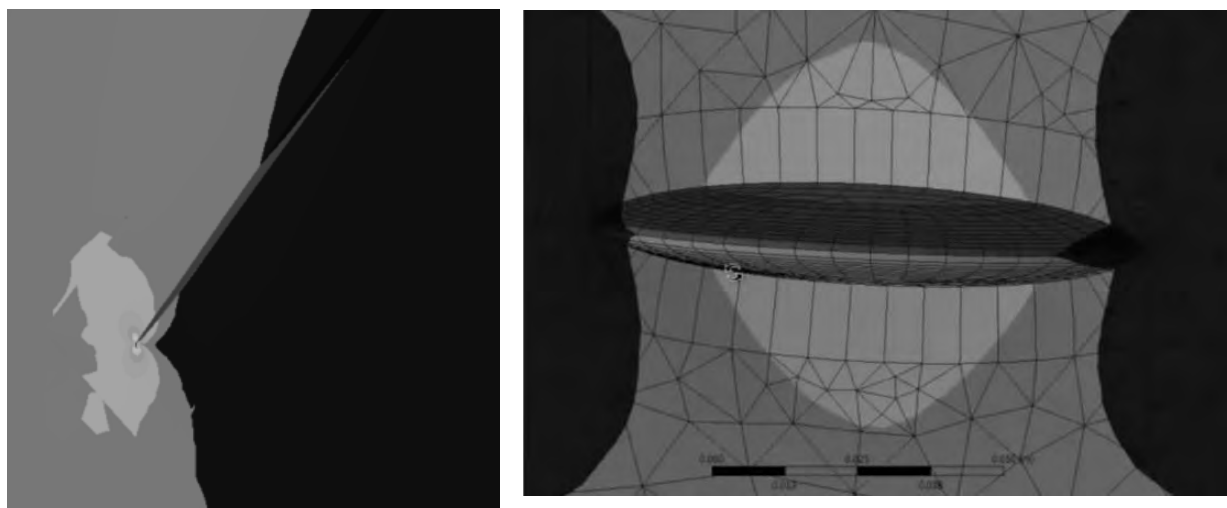


Рис. 7. Напряжения по Мизесу в области вершины трещины и раскрытие трещины

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ

Зависимости силовых параметров разрушения K_1 , K_2 и K_3 и J -интеграла по фронту трещины показаны на рис. 10, 11, где C – длина фронта трещины, измеряемой от конца трещины, находящегося на поверхности реактора. Для анализируемой учеными глубины и длины трещины было установлено, что коэффициенты интенсивности напряжений K_1 , K_2 и K_3 изменяются нелинейно вдоль фронта трещины.

На рис. 8 показаны поля напряжений в области вершины трещины.

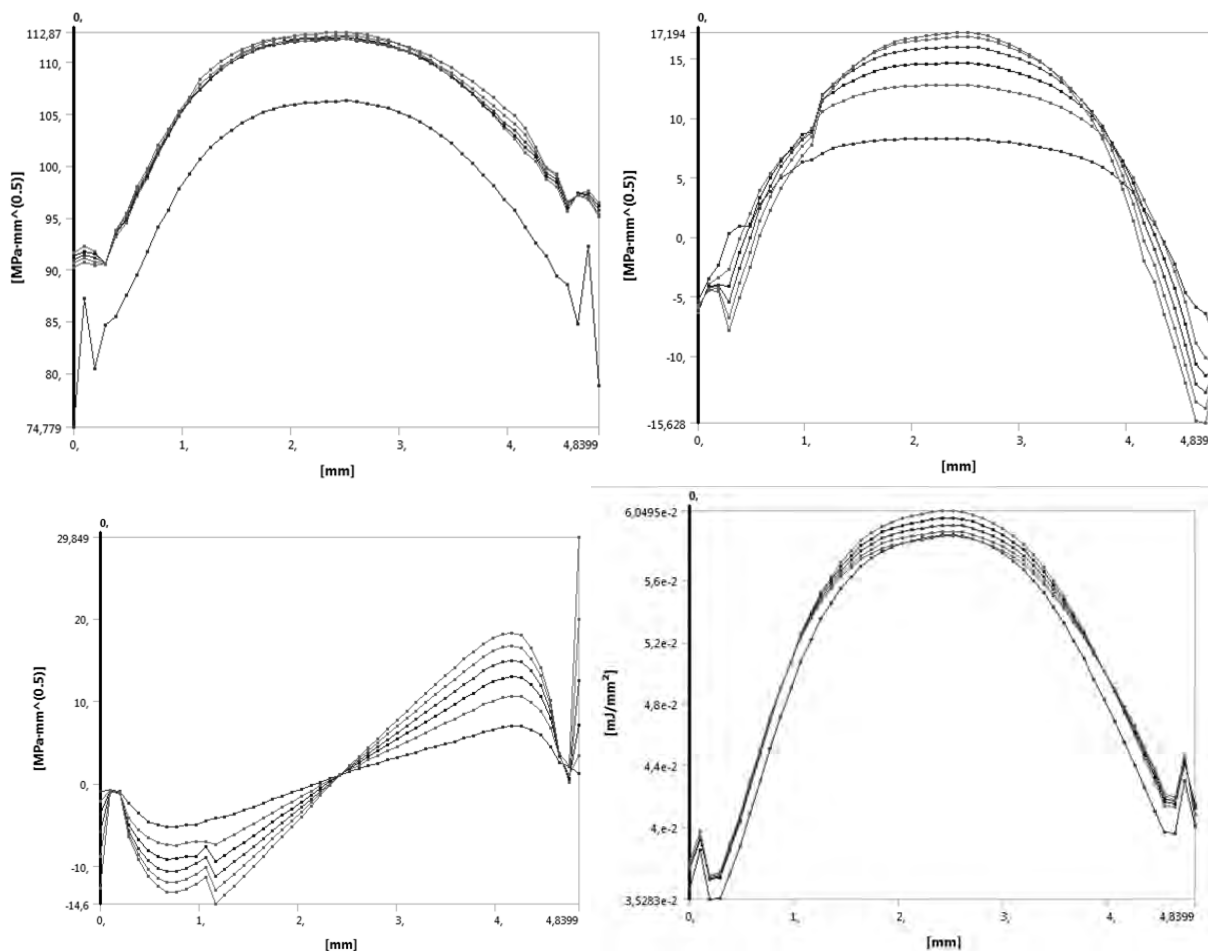


Рис. 8. Значения силовых параметров разрушения K_1 , K_2 , K_3 , J -интеграл:
 $2C = 10,0$ мм; $a = 2,0$ мм

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ И ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ

Неразрушающими методами контроля часто выявляются различные по геометрии трещины, расположенные в зоне сварного шва приварки обечайки и днища реактора. Трещина может образовываться и иметь различную форму, что приведет к изменению значений силовых параметров разрушения и соответственно повлияет на эксплуатационную живучесть такого соединения. Форма трещины может изменяться при изменении глубины трещины при неизменной ее длине, что необходимо также учитывать при анализе конструкционной прочности. Поэтому представляется целесообразным оценить влияние размеров трещины (длины и глубины), а также места залегания трещины на силовые и энергетические параметры разрушения.

В данном расчете трещина располагалась в зоне сварного шва обечайки реактора, как это показано на рис. 3, в. На рис. 8 показана область раскрытия трещины и изополосы перемещений. Результаты расчета силовых параметров разрушения K_1 , K_2 и K_3 и J -интеграла, представлены на рис. 10, 11, расчет выполнен на КЭ модели реактора с эллиптической трещиной, расположенной горизонтально с учетом ее размеров. Длина трещины C варьировалась от 10 до 28 мм при максимальной глубине трещины $a = 2-4$ мм. Трещина задавалась в форме эллипса.

Установлено, что силовые параметры разрушения K_1 , K_2 достигают максимума на максимальной глубине по фронту трещины (рис. 10). С ростом длины трещины $2C$ от 10 до 28 мм наблюдается монотонный рост значений КИН (K_1 , K_2 , K_3) и энергетического интеграла.

При изменении длины трещины с 10 до 28 мм при максимальной глубине по фронту трещины $a = 2,0$ мм рост КИН первого рода (K_1) составляет более 2,0 раз.

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ТРЕЩИНЫ

Трещина может образовываться и иметь различную форму, что приведет к изменению значений силовых параметров разрушения и, соответственно, повлияет на эксплуатационную живучесть такого соединения. Поэтому был выполнен численный эксперимент по оценке влияния формы трещины, места ее расположения и угла на силовые параметры разрушения.

Результаты расчета силовых параметров разрушения для эллиптической формы трещины, расположенной под углом 45° к оси реактора, приведены на рис. 13. При этом геометрия трещины варьировалась по длине $C = 24$ мм, при глубине $a = 8,0$ мм.

Но трещина может быть расположена под определенным углом, что необходимо также учитывать при анализе конструкционной прочности.

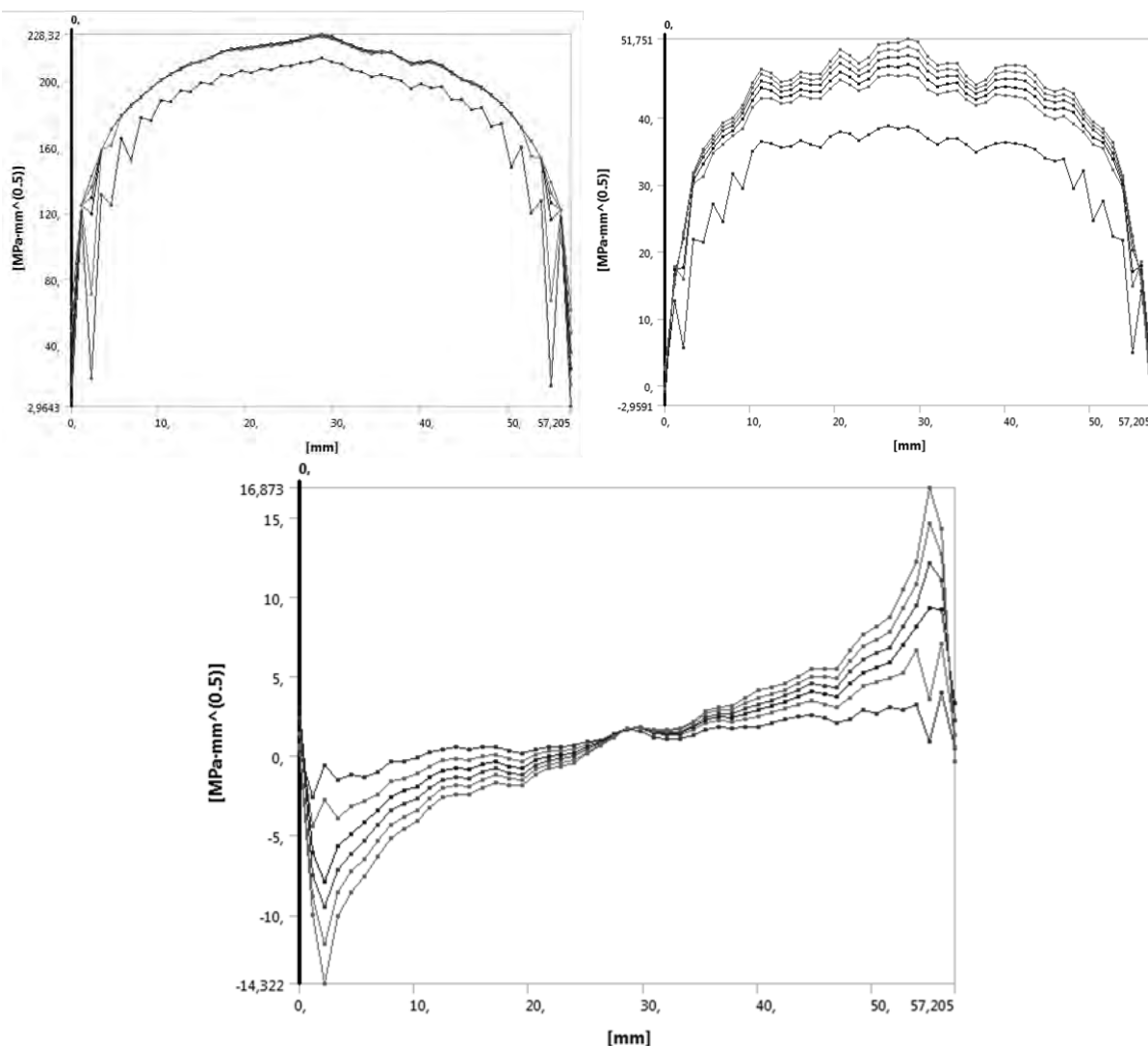


Рис. 9. Значения силовых параметров разрушения K_1 , K_2 , K_3 :
 $2C = 28,0$ мм; $a = 4$ мм

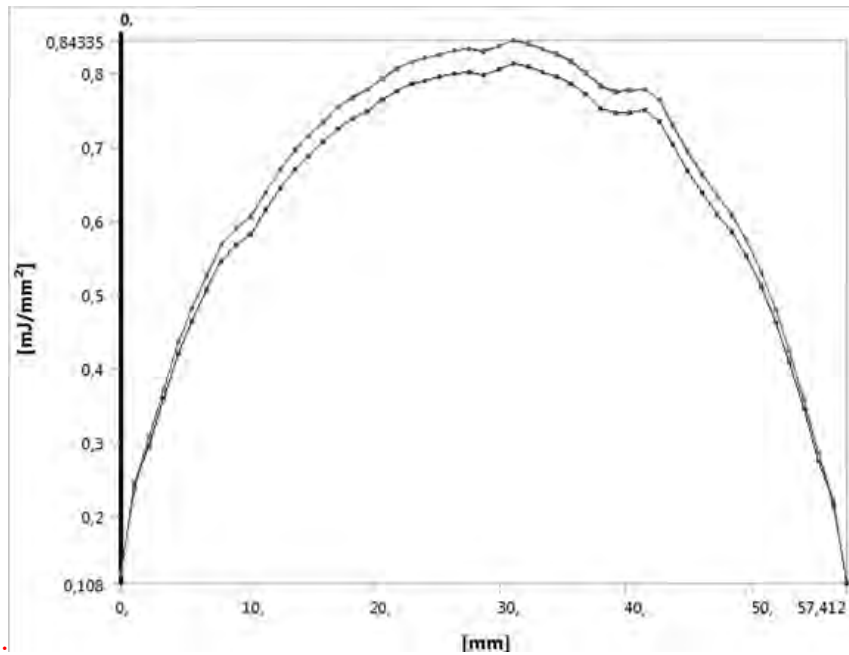


Рис. 10. Значения интеграла Черепанова – Райса:
 $2C = 28,0$ мм; $a = 4$ мм

Установлено, что зависимости коэффициента интенсивности первого рода и J -интеграла от длины трещины по ее фронту, рассчитанные для трещины, расположенной на обечайке реактора, изменяются по фронту трещины и зависят от размеров, формы и угла ее наклона. Так, для эллиптической трещины КИН первого рода (K_1) достигает максимума в наиболее удаленной по фронту точке фронта трещины, а при выходе на поверхность K_1 уменьшается. Так, например, для трещины с параметрами $C = 24$ мм и $a = 8$ мм, и расположенной под углом 45° к оси реактора, увеличение КИН K_1 по фронту трещины достигает значений $398,67$ МПа \times мм $^{1/2}$.

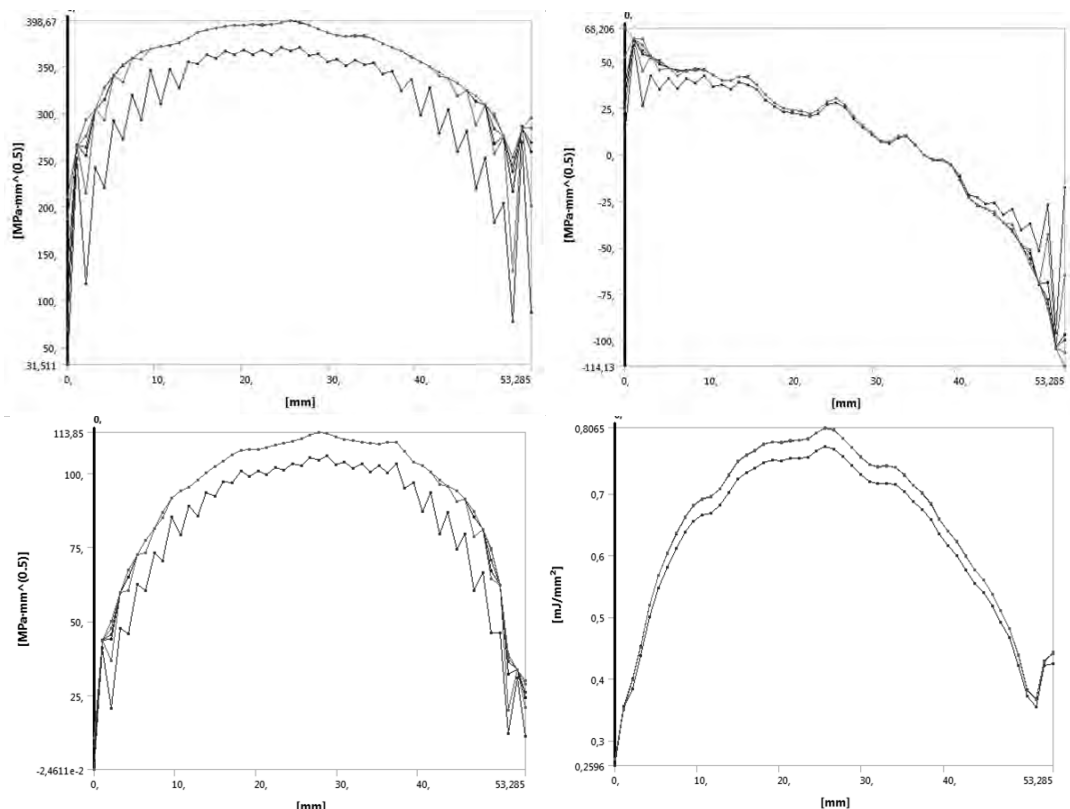


Рис. 11. Зависимости КИН (K_1 , K_2 , K_3) и J -интеграла для эллиптической формы трещины расположенной под углом 45° к оси реактора $1-2c = 24$ мм; $a = 8$ мм

В табл. 2 представлены обобщенные значения силовых и энергетических параметров разрушения для всего диапазона рассматриваемых длин трещин, расположенных в наиболее нагруженной цилиндрической части корпуса реактора.

Таблица 2

Значения силовых и энергетических параметров разрушения

| a/c , мм | K_1 , МПа \times мм $^{1/2}$ | K_2 , МПа \times мм $^{1/2}$ | K_3 , МПа \times мм $^{1/2}$ | J , мДж/мм 2 |
|------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1/2 | 112,87 | 17,19 | -14,6 ÷ 20,0 | 0,061 |
| 1/4 | 85,26 | 19,59 | -10,6 ÷ 14,1 | 0,035 |
| 4/8 | 189,19 | 41,35 | -13,3 ÷ 17,5 | 0,17 |
| 4/12 | 192,51 | 43,53 | -13,4 ÷ 18,0 | 0,18 |
| 4/28 | 228,32 | 51,75 | -14,3 ÷ 16,9 | 0,25 |
| 4/28 | 429,63 | 3,69 ÷ -30,47 | 13,06 | 0,06 |
| 4/34 | 425,30 | 3,47 ÷ -33,44 | 13,01 | 0,06 |
| 4/44 | 334,08 | 2,58 ÷ -25,53 | 5,88 ÷ -22,9 | 0,06 |
| 4/8 | 287,35 | 71,62 ÷ -86,52 | 74,85 | 0,41 |
| 4/32 | 341,07 | 17,72 ÷ -80,44 | 97,06 | 0,58 |
| 4/24 | 327,87 | 22,64 ÷ -84,73 | 94,05 | 0,54 |
| 4/28 | 328,31 | 20,78 ÷ -80,26 | 94,18 | 0,54 |
| 8/24 | 398,67 | 68,20 ÷ -114,13 | 113,85 | 0,81 |
| 8/32 | 417,04 | 68,99 ÷ -123,14 | 120,80 | 0,88 |
| 8/64 | 424,33 | 44,36 ÷ -122,24 | 123,96 | 0,92 |
| 12/24 | 417,99 | 98,80 ÷ -146,05 | 126,4 | 0,89 |
| 12/32 | 484,25 | 104,11 ÷ -151,99 | 140,67 | 1,19 |
| 12/64 | 499,40 | 36,65 ÷ -123,61 | 154,41 | 1,29 |

Наблюдаемое изменение K_1 вдоль фронта трещины качественно согласуется с рядом опубликованных аналогичных упругих расчетов для сравнимых геометрических форм сварного соединения и размеров трещины. Результаты аналогичных трехмерных упругих расчетов методом конечных элементов приводятся в работах авторов [5–8] для различных длин трещин и хорошо совпадают с приведенными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования и разработки методики оценки технического состояния аппаратов и устройств нефтехимического производства (НХП) на основе цифровых прототипов и цифровых двойников на примере реактора коксовых камер проведен упругий расчет силовых и энергетических параметров разрушения для эллиптической трещины, расположенной в зоне обечайки реактора. Исследователями университета получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений первого, второго и третьего рода и энергетического интеграла с учетом формы трещины, ее геометрии и угла наклона. Показано, что для трещины, расположенной в цилиндрической обечайке реактора, коэффициент интенсивности напряжений первого рода может изменяться (возрастать) по фронту трещины в 2,0 и более раза и может достигать максимальных значений в наиболее удаленной точке фронта трещины. При этом наибольшую опасность представляют собой трещины, расположенные в зоне сварного соединения цилиндрической обечайки корпуса реактора.

Аналогичные исследования были проведены учеными УГАТУ для элементов трубопроводного транспорта (гибы трубопровода, обечайка сосуда давления и т.п.), а также для эксплуатации и оценки ресурса лопаток компрессора низкого и высокого давления.

Разработка методики оценки технического состояния на основе цифровых прототипов и цифровых двойников для аппаратов и устройств НХП непосредственно в производстве может быть использована и частично применяется при проведении работ по экспертизе про-

мышленной безопасности на стадии диагностики оборудования и принятии решения о демонтаже оборудования или назначении очередного срока освидетельствования.

Данное исследование относится к области межотраслевых и мультифизических исследований, т.е. подходы и математические методы, разработанные для эксплуатации ГТД, внедряются в сферу эксплуатации оборудования нефтехимического кластера для оценки текущего или остаточного ресурса оборудования.

Представленный пример исследований ученых УГАТУ в межотраслевой сфере отражает тенденции успешной диверсификации научных направлений университета на современном этапе. Успешные разработки университета востребованы в нефтехимическом, газодобывающем кластерах российской экономики, в сфере газопереработки. Это, в свою очередь, способствует открытию в университете новых направлений подготовки высококвалифицированных специалистов и для этих отраслей экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 13.05.2021 № 729 «О мерах по реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»». [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/> (дата обращения 29.11.2021). [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 729 dated 13.05.2021 "On Measures for the Implementation of the Strategic Academic Leadership program "Priority-2030" (2021, Nov. 29). [Online]. Available: <http://publication.pravo.gov.ru/>]
2. **ГОСТ Р 52857.5-2007.** Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. М.: Стандартинформ, 2008. 24 с. [*Vessels and vehicles. Norms and methods of strength calculation. Calculation of shells and the bottoms from the effects of bearing loads*, (in Russian), Federal standart R 52857.5-2007, Moscow, Standartinform, 2008.]
3. **Ansys Release 15.0.** Dokumentation. Canonsburg: Ansys Inc.
4. **Морозов Е. М., Никишков Г. П.** Метод конечных элементов в механике разрушения. 2-е изд. М.: ЛКИ/URSS, 2008. 256 с. [Е. М. Morozov, G. P. Nikishkov, *Finite element method in fracture mechanics*, (in Russian). 2th izd. Moscow: LKI/URSS, 2008.]
5. **Справочник** по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах /под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 1060 с. [Y. Murakami (ed.), *Stress intensity factors handbook in 2 volumes*, (in Russian). Moscow: Mir, 1990.]
6. **Bergman M.** Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1995. Vol. 18, Iss. 10. Pp. 1155-1172. [M. Bergman, "Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes", in *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 18, Iss. 10, pp. 1155-1172, 1995.]
7. **Chao Y. J., Zhu X. K.** Constraint-modified J-R curves and its application to ductile crack growth // *International Journal of Fracture*. 2000. Vol. 106, Iss. 2. Pp. 135-160. [Y. J. Chao, X. K. Zhu, "Constraint-modified J-R curves and its application to ductile crack growth", in *International Journal of Fracture*, vol. 106, Iss. 2, pp. 135-160, 2000.]
8. **Chao Y. J., Zhang L.** Tables of plane strain crack tip fields: HRR and higher order terms // ME-Report 97-1. 1997. Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, Columbia. SC 29208. [Y. J. Chao, L. Zhang, "Tables of plane strain crack tip fields: HRR and higher order terms", in *ME-Report 97-1, Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, 1997.*]

ОБ АВТОРАХ

НОВИКОВ Сергей Владимирович, доц., проф. каф. бухгалтерского учета и налоговых технологий. Дипл. экономист (УГАТУ, 1999). Канд. экон. наук по упр. разв. машиностроит. комплекса региона по соц.-экон. критериям (2002). Заслуженный экономист РБ. Ректор УГАТУ.

БУДИЛОВ Игорь Николаевич, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по техн. и оборуд. свар. пр-ва (УАИ, 1978). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. механики разрушения, механики деформируемого твердого тела.

METADATA

Title: Expanding the scope of using the scientific potential of the Ufa State Aviation Technical University as a condition for the modern transformation of the university (using the example of creating a digital prototype of a coke oven reactor with the calculation of power and energy parameters of destruction).

Authors: S. V. Novikov¹, I. N. Budilov²

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

Email: ¹rector@ugatu.su, ²budilov02@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 111-123, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Ufa State Aviation Technical University is a major industrial university of modern aircraft engine building. In order to increase the competitiveness of the university both in the educational space and in the field of scientific research, there is a diversification of educational programs, directions of scientific research. Using the example of developing a digital prototype and performing a three-dimensional elastic calculation of the stress-strain state (VAT) of the reactor and the power and energy parameters of failure for an elliptical crack located in a cylindrical shell, a variant of successful research by USATU scientists for the oil and gas industry is considered. In the course of the study, it was found that for an elliptical crack, the force and energy parameters of fracture change non-linearly along the crack front. Qualitative and quantitative relations are obtained for the stress intensity coefficients (KIN and J-integral along the crack front, taking into account its size, shape of the front and angle of inclination).

Key words: transformation of the university; diversification of research areas; digital prototype; coke chamber reactor; reactor shell; strength; stress-strain state; stress intensity coefficient; Cherepanov – Rice.

About authors:

NOVIKOV, Sergey Vladimirovch, Assoc., Prof., Dept. of Accounting and tax technologies. Dipl.in Economics (USATU, 1999). Cand. of Economic Sciences in management of development of the mashine-building complex of the region according to socio-economic criteria (2002). Honored Economist of the Republik of Bashkortostan. Rector of USATU.

BUDILOV, Igor Nikolaevich, Prof. of the Dept. of strength of materials. Dipl. engineering technology and welding equipment production (UAI, 1978). Dr. of Tech. Sci. in heat engines of aircraft (USATU, 1998). Studies of fracture mechanics, research in the field of solid mechanics.