

УДК 665.7:[62-46:539.3]

РАСЧЕТ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ФРОНТА ТРЕЩИНЫ В ОБЕЧАЙКЕ РЕАКТОРА КОКСОВЫХ КАМЕР

И. Н. Будилов

budilov02@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 11.11.2015

Аннотация. Выполнен трехмерный упругий расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) реактора и силовых и энергетических параметров разрушения для эллиптической трещины, расположенной в цилиндрической обечайке. 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: Реактор; обечайка; прочность; напряженно-деформированное состояние; коэффициент интенсивности напряжений; интеграл Черепанова – Райса.

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 диаметром 5500 мм, высотой 27,2 м, вместимостью 540 м³, с верхним полусферическим 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 штуцер для вывода паров при операции прогрева камеры, а также для разогрева камеры при пуске.

В эксплуатации реактора из-за циклического характера работы реактора наблюдается появление дефектов типа трещин в обечайке корпуса, что оказывает влияние на напряженно-

деформированное состояние и в целом на надежность всего реактора. В данной работе была сделана оценка влияния расположения трещины в зоне обечайки аппарата на силовые и энергетические параметры разрушения.

Для оценки опасности таких трещин выполнен трехмерный численный эксперимент, который состоит из моделирования и последующего расчета методом конечного элемента (МКЭ). Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_1 , K_2 , K_3 и энергетический интеграл J рассчитывали 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 рассчитывали по известной методике по скорости высвобождения энергии с помощью формулы $K^2 = EJ / (1 - \nu^2)$. Скорость высвобождения энергии рассчитывали методом виртуального продвижения трещины [3].

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

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

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

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

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

Таблица 1

Механические характеристики

Температура Т, °С	Характеристики			
	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль Юнга, Е, 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 до 500 °С определялись линейной аппроксимацией.

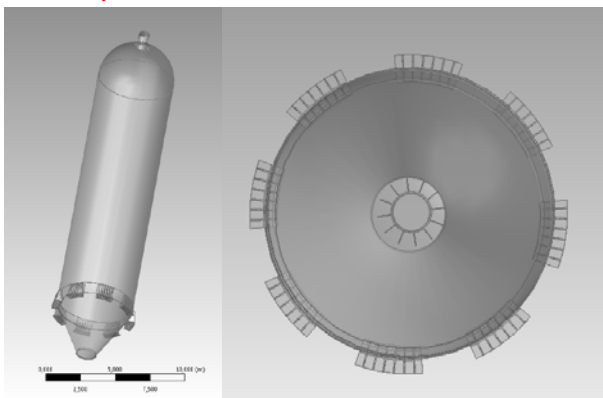


Рис. 1. Общий вид реактора

Все расчеты были выполнены в статической постановке в пакете ANSYS/Workbench [2]. Один из вариантов сетки конечных элементов для полноразмерного объекта реактора приведен на рис. 4, а, в.

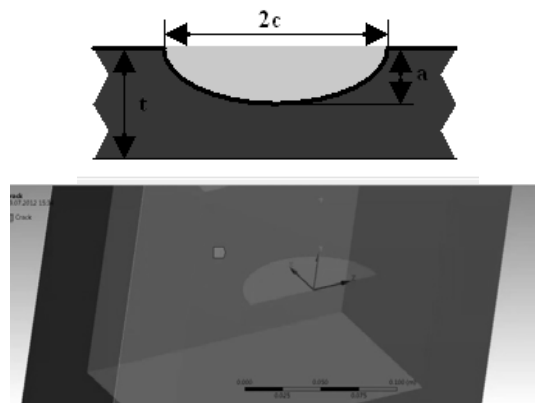


Рис. 2. Форма трещины и ее размеры

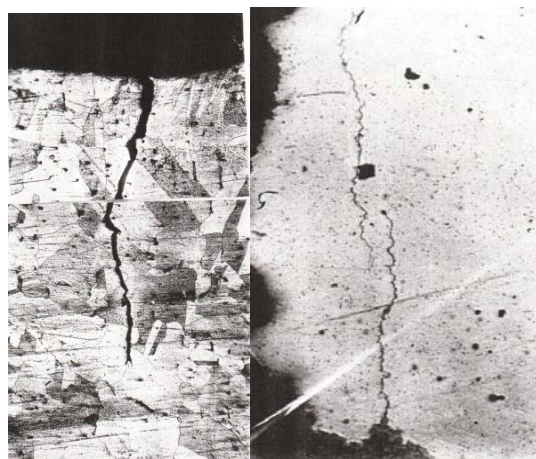


Рис. 3. Примеры трещин в обечайке реактора

Эллиптическая трещина в сварном соединении обечайки реактора распространялась не более чем на 0,4 толщины стенки листа.

Расчетные параметры конечно-элементной модели. На первом этапе был выполнен упругий расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) реактора МКЭ. Твердотельная модель реактора, граничные условия и сетка конечных элементов для этого расчета показаны на рис.4. На рис.6 приведено общее НДС в виде изополюс эквивалентных напряжений в реакторе с учетом внутреннего давления и температуры теплоносителя. Во всех частях КЭ модели реактора использовали четыре элемента по толщине стенки. Установлено, что максимальные напряжения наблюдаются в зоне сварных швов пере-

сечения 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.4, в и рис.7.

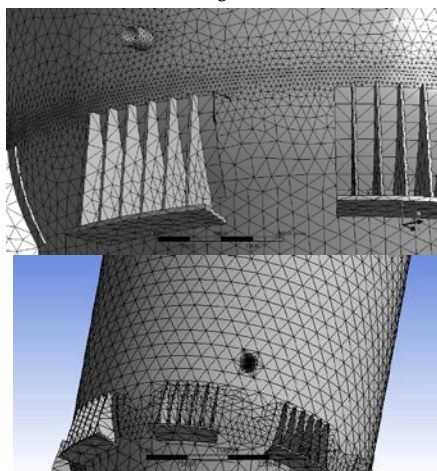
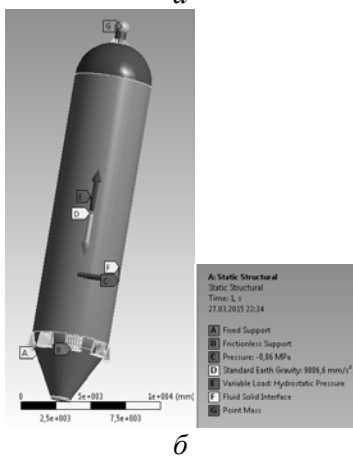
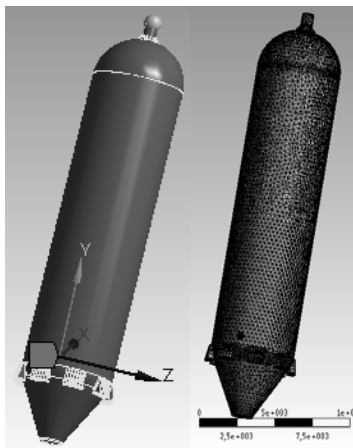


Рис. 4. Твердотельная и КЭ-модель (а), граничные условия (б), КЭ-модель с учетом трещины (в)

Теория метода расчета. Коэффициенты интенсивности упругих напряжений первого, второго и третьего рода K_I , K_2 и K_3 , как было отмечено выше, рассчитывали по скорости высвобождения энергии, определяемой методом виртуального продвижения трещины [2-3]. На рис.5 показаны координаты трещины и контур интегрирования, который использовался для расчетов.

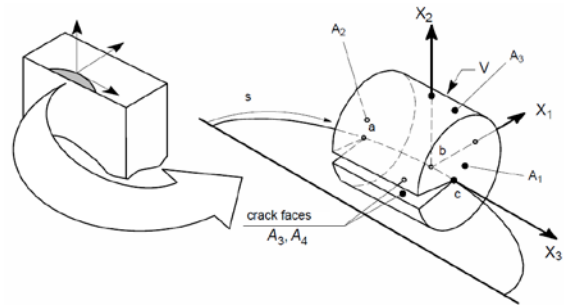


Рис. 5. КЭ-модель трещины

Напряжения в вершине трещины описываются следующими соотношениями:

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

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

Силловые параметры разрушения определяли как $K_I = \sqrt{JE^*}$, $K_{II} = \sqrt{JE^*}$, $K_{III} = \sqrt{\frac{JE^*}{1+\nu}}$, $E^* = E/(1 - \nu^2)$ – плоское деформированное состояние;

$E^* = E$ – для плоского напряженного состояния.

Энергетический интеграл определяли по формуле:

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

где

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

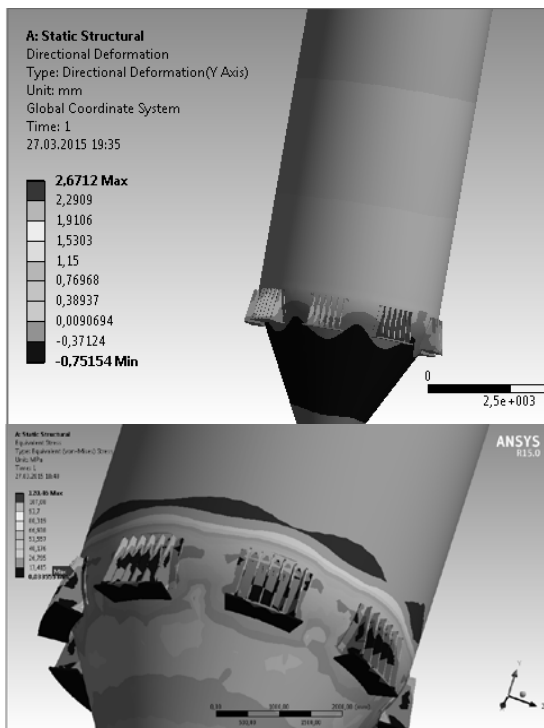


Рис. 6. Поля напряжений в реакторе при действии эксплуатационных нагрузок ($\sigma_{eqv} = 120,46$ МПа)

Конечно-элементная модель (КЭМ) реактора состояла из 956731 двадцатиузлового изопараметрического элемента и сгенерирована с помощью программы *ANSYS/WORKBENCH* [2].

Граничные условия. Граничные условия и сетка конечных элементов показаны на рис. 4, б. В опорных стойках аппарата задавались ограничения перемещения по вертикали, в зоне опоры подвижной стойки задавались контактные условия с учетом проскальзывания опор-

ной поверхности стойки. К штуцерам прикладывались нагрузки в виде осевых сил и моментов от обвязки технологическими трубопроводами. Температура среды реактора задавалась 475 °С.

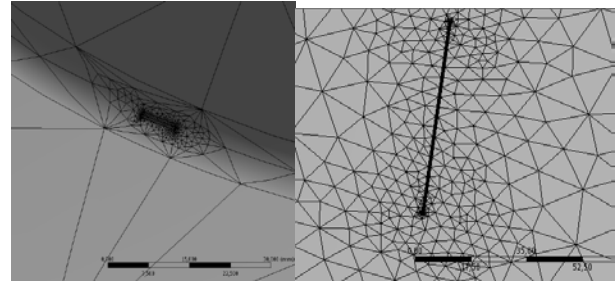


Рис. 7. КЭ-модель трещины



Рис. 8. Напряжения по Мизесу в области вершины трещины

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* [2]. В результате образовалась гибридная конечно-элементная модель реактора с эллиптической трещиной. Область с трещиной с радиально-кольцевой структурой КЭ показана на рис.7 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 [3].

Трещина моделировалась в форме эллипса с параметрами $C=2,0-28,0$ мм, $a=0,4-6,0$ мм, располагалась в зоне радиусного перехода от патрубка к обечайке реактора. Ориентацию трещины выбирали таким образом, чтобы ось X распо-

лагалась вдоль короткого радиуса эллипса, а ось Z – вдоль длинной стороны фронта 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, измерялась от конца трещины, находящегося на поверхности реактора. Для анализируемой нами 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.

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.4, в. На рис.9 показана область раскрытия трещины и изополосы перемещений.

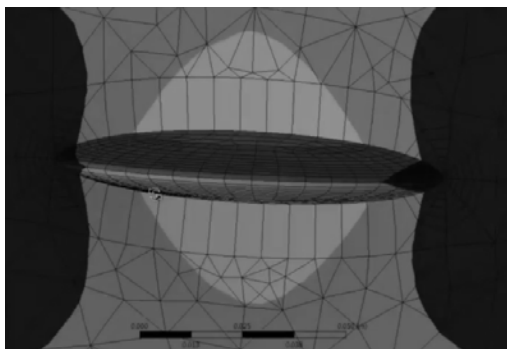


Рис. 9. Раскрытие трещины

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 полуэллипса.

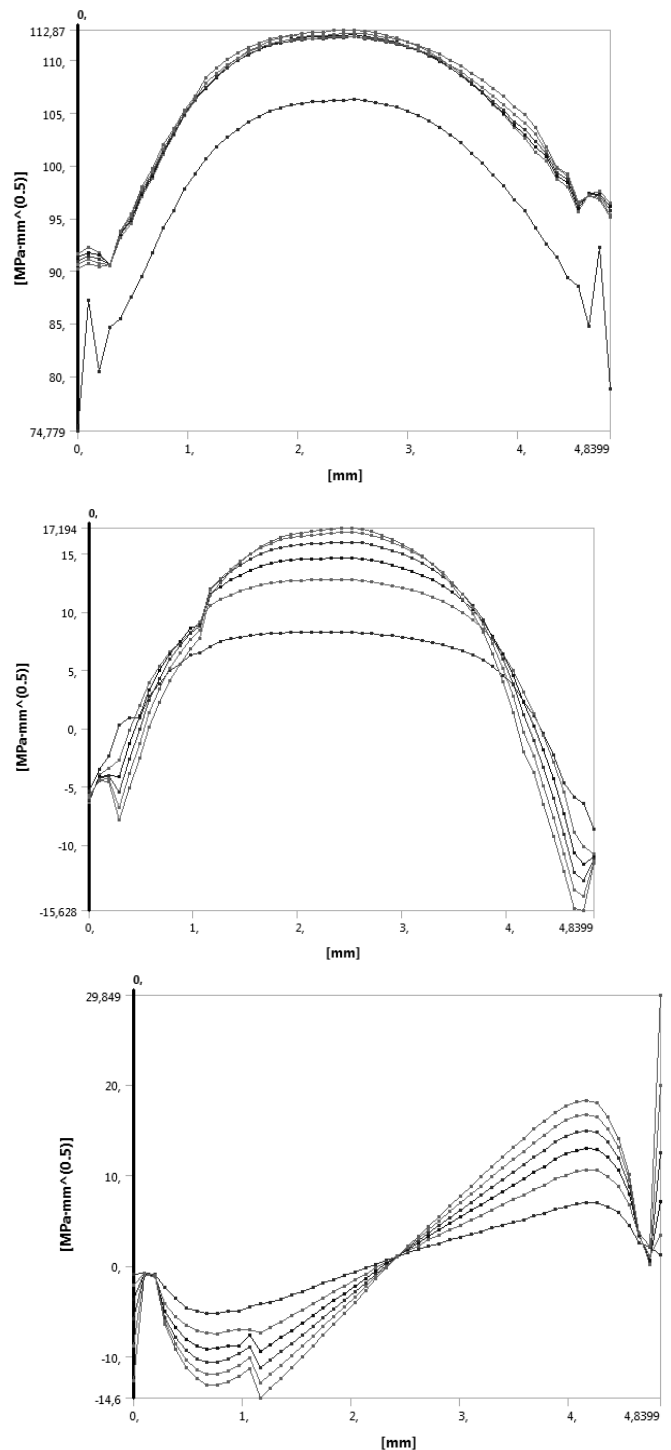


Рис. 10. Значения силовых параметров разрушения K_1 , K_2 , K_3
 $2C=10,0$ мм; $a=2,0$ мм

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

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

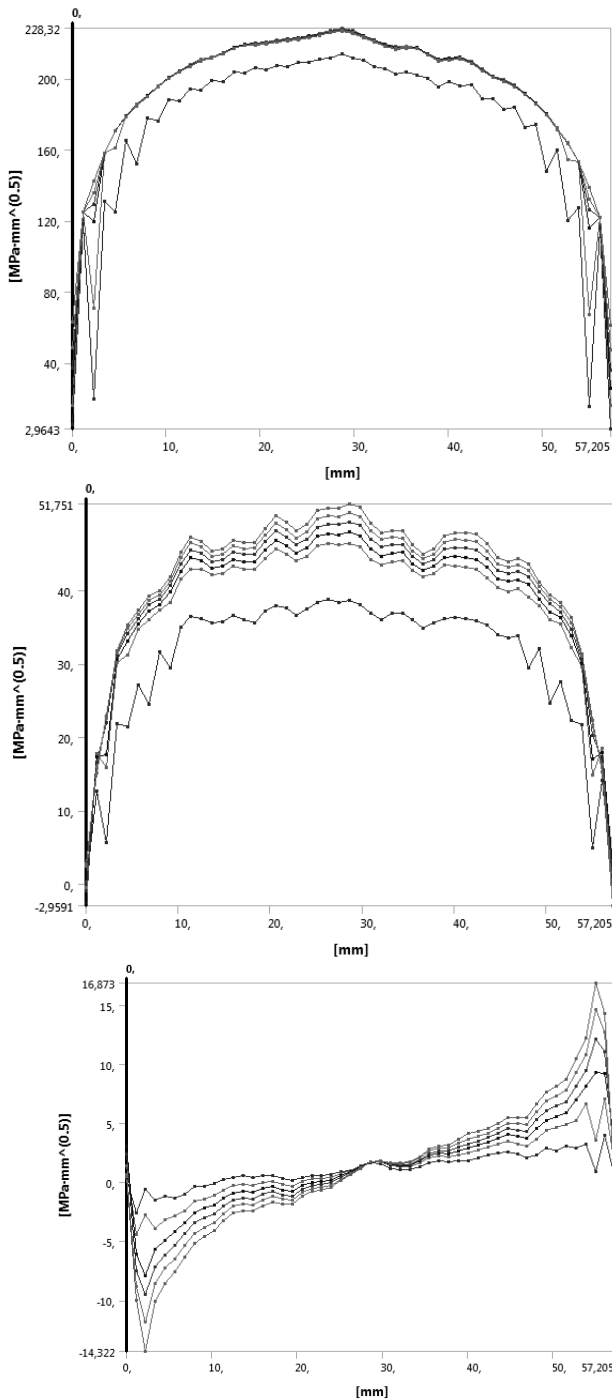


Рис. 11. Значения силовых параметров разрушения K_I , K_2 , K_3 :
 $2C=28,0$ мм; $a=4$ мм

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.

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

Поэтому был выполнен численный эксперимент по оценке влияния формы трещины и места ее расположения и угла наклона 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 24 мм при глубине 8,0 мм.

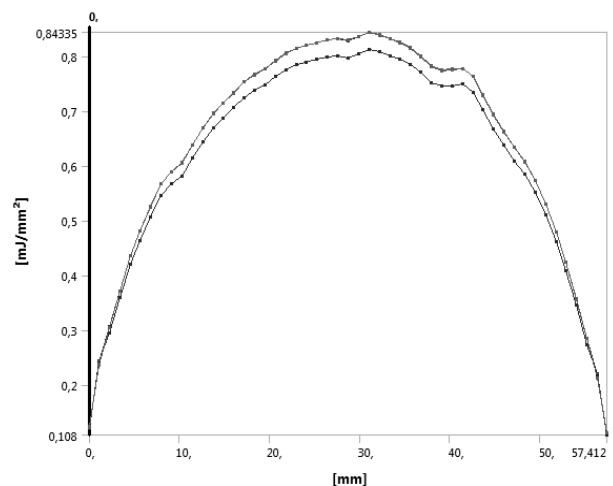


Рис. 12. Значения интеграла J
 $2C=28,0$ мм; $a=4$ мм

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_I) достигает максимума в наиболее удаленной по фронту точке фронта трещины, а при выходе на поверхность K_I уменьшается. Так, например, для трещины с параметрами $C=24$ мм и $a=8$ мм, расположенной под углом 45° к оси реактора, увеличение КИН K_I по фронту трещины достигает значений $398,67$ МПа \times мм $^{1/2}$.

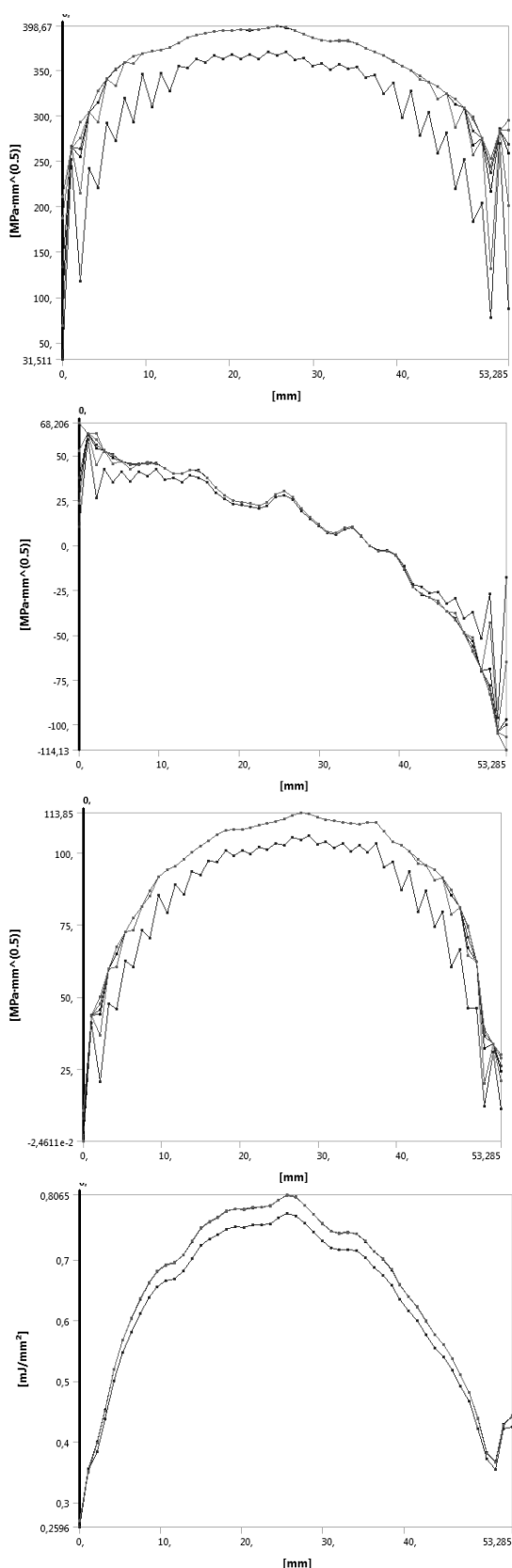


Рис. 13. Зависимости КИН (K_1 , K_2 , K_3) и J -интеграла для трещины расположенной под углом 45° к оси реактора $1-2c=24$ мм; $a=8$ мм

В табл. 2 представлены обобщенные значения силовых и энергетических параметров раз-

рушения для всего диапазона рассматриваемых длин трещин, расположенных в наиболее нагруженной цилиндрической части корпуса реактора.

Наблюдаемое изменение K_I 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 [4–7] для различных длин трещин и хорошо совпадают с приведенными данными.

Следует признать, что приведенные выше сравнения с опубликованными решениями носят приближенный характер вследствие неполной информации о геометрии объекта и условиях нагружения.

Таблица 2

Значения силовых и энергетических параметров разрушения

a/C , мм	K_I , МПа× ×мм ^{1/2}	K_2 , МПа× ×мм ^{1/2}	K_3 , МПа× ×мм ^{1/2}	J , мДж/м 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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен упругий расчет силовых и энергетических параметров разрушения для эллиптической трещины, расположенной в зоне обечайки реактора. Получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений первого, второго и третьего рода и энергетического интеграла с учетом формы трещины, ее размеров 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 52857.5-2007.** Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. М.: Стандартиформ, 2008. 27 с. [GOST P 52857.5-2007. *Vessels and vehicles. Norms and methods of strength calculation. Calculation of shells and the bottoms from the effects of bearing loads.* Federal standard R P 52857.5-2007, Moscow, Standatrinform, 2008.]
2. **Ansys Release 15.** Dokumentation.Canonsburg: Ansys Inc.
3. **Морозов Е. М., Никишков Г. П.** Метод конечных элементов в механике разрушения. 2-е изд. М.: Издательство ЛКИ/URSS, 2008. 256 с. [E. M. Morozov, G. P. Nikishkov. Method of final elements in mechanics of destruction. 2-nd ed. М.: LKI Publishing / URSS, 2008.]
4. **Справочник** по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 томах / под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 1060 с. [Stress intensity factors handbook in 2 Volumes / Y. Murakami. Moscow, 1990.]
5. **Bergman M.** "Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes." in Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 18, pp. 1155–1172, 1995.
6. **Yuh J. Chao, X. K. Zhu.** "Constraint-modified J-R curves and its application to ductile crack growth", International Journal of Fracture, 106 pp. 135–160, 2000, Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, Columbia, SC 29208.
7. **Yuh J. Chao, Li Zhang.** "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.

ОБ АВТОРЕ

БУДИЛОВ Игорь Николаевич, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по технологии и оборудованию сварочн. пр-ва (УАИ, 1978). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. механики разрушения, прочности элементов ГТД и нефтехимических ТУ.

METADATA

Title: Computation power and energy parameter destruction in the area of crack front in the shell reactor.

Authors: I. N. Budilov

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: budilov02@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 1 (71), pp. 3–10, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: It completed a three-dimensional elastic analysis of stress-strain state (SSS) of the reactor and the power and energy parameters for the destruction of an elliptical crack located in a cylindrical shell. It was found that for an elliptical crack power and energy parameters of nonlinear fracture vary along the crack front. Qualitative and quantitative ratios for KIN and J-integral on the crack front, given its size and shape of the front and angle.

Keywords: Reactor; shell; strength; stress-strain state; coefficient of stress intensity; Cherepanov integral – Raysa.

About authors:

BUDILOV Igor Nikolaevich, prof. of the department of strength of materials. Dipl. engineering technology and welding equipment production (UAI, 1978). Dr. of technical sciences in heat engines of aircraft (UGATU, 1998). Studies of fracture mechanics, strength elements of turbine engines and petrochemical engineering construction.