

И. Н. Будилов, Г. В. Кулясов, Ю. В. Лукащук, В. В. Шевела

## ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ КАК ЭЛЕМЕНТ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена методика численного моделирования напряженно-деформированного состояния с оценкой силовых параметров разрушения технических устройств (ТУ) нефтехимического оборудования при наличии в нем дефектов применительно к объектам Ростехнадзора. Технология разработана и опробована на основе математических моделей кода ANSYS и FEA-CRACK (с использованием средств моделирования и генерации конечно-элементной модели), предназначенного для решения широкого спектра термпрочностных и мультифизических задач. *Промышленная безопасность; математическое моделирование; прочность; дефекты сварного шва*

Одной из важнейших задач в области промышленной безопасности является оценка оборудования при наличии в них дефектов технологического характера (непровары сварных швов, поры, включения, коррозионные язвы, вмятины и т. п.), которые не могут быть надежно выявлены в процессе дефектоскопии (ультразвуковой, акустико-эмиссионной, цветной, капиллярной) или по каким либо причинам не могут быть устранены в процессе эксплуатации.

Любое нарушение режимов эксплуатации, неучтенные технологические и эксплуатационные дефекты могут привести к серьезным последствиям и авариям, сопровождающимися значительными материальными затратами и техногенными катастрофами. Переменные циклические напряжения от внутреннего давления, вибрационные нагрузки и колебания температуры при сменах режимов эксплуатации, а также агрессивные среды приводят к тому, что происходит также и постоянный рост накопленных повреждений в материале конструкции, что в свою очередь приводит к существенному росту скрытых или до поры не выявленных технологических дефектов.

Вопрос оценки дефектов в конструкции актуален еще и потому, что основное оборудование, применяемое в нефтехимии и трубопроводном нефтегазовом комплексе, уже выработало свой ресурс, требует капитального ремонта и замены. Оценка ресурса такого оборудования является неотъемлемой частью экспертизы промышленной безопасности ТУ и должна опираться на достаточно полную и точную информацию о состоянии материала оборудования. Важная часть этой информации может быть

получена методами неразрушающего контроля (НК), другая часть может быть получена из изучения технической документации. Но этих данных бывает часто недостаточно и процедура экспертизы промышленной безопасности ТУ носит формальный характер и не отвечает должным образом на вопрос о значениях остаточного ресурса. Экспертиза промышленной безопасности ТУ выполняется, как правило, высококвалифицированными специалистами, которые в силу тех или иных обстоятельств дают субъективную оценку остаточного ресурса ТУ в основном из-за отсутствия достоверных и апробированных методик оценки остаточного ресурса, только основываясь на свой опыт.

Аналитические методы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС), широко используемые при проектировании ТУ, не могут в полной мере ответить на вопрос о реальном состоянии оборудования, так как основное их предназначение – расчет отдельных элементов (днищ, обечаек, штуцеров), а не конструкции в целом. Дополнение имеющейся информации соответствующими расчетными численными методами оценки НДС позволит существенно повысить достоверность оценки ресурса нефтехимического оборудования.

Не вызывает сомнения и доказана многочисленными исследованиями высокая достоверность оценок НДС и эффективность применения методик метода конечного элемента при анализе НДС на реальных объектах ТУ нефтехимической промышленности. Современные CAE-технологии, основанные на автоматизированных численных методах расчета, позволяют существенно расширить круг решаемых задач, в том числе позволяют решать сложные мультифизические и смешанные задачи высокой

размерности. Из имеющихся на данный момент коммерческих программных комплексов метода конечного элемента для практической реализации изложенного выше подхода к моделированию разрушения сосудов и трубопроводов наиболее подходят программы ANSYS и FEA-CRACK [1, 2].

Основой создания точных конечно-элементных моделей является проведение толщинометрии и НК качества сварных соединений. Наличие дефектов в сварных швах, в том числе и «недопустимых» в соответствии с нормами [3], часто не является препятствием к дальнейшей эксплуатации сосудов и аппаратов при условии численных их расчетов с привлечением последних достижений линейной и нелинейной механики разрушения.

Вопросы, связанные с определением реальной опасности выявленных методами неразрушающего контроля дефектов, оценкой ресурса ТУ с дефектами пока разработаны и апробированы недостаточно, отсутствуют и обученные специалисты, владеющие вопросами механики деформируемого твердого тела и линейной механики разрушения.

Решение задачи оценки прочности оборудования при наличии дефектов в конструкции требует решения сложных задач с применением геометрически и физически нелинейных моделей на основе метода конечных элементов [1].

Предлагаемая методика оценки опасности дефектов, учитывающая их реальные размеры и нагруженность конструкции, позволяет оценить на практике степень опасности реальных дефектов.

Данная работа посвящена оценке НДС на основе численного моделирования и оценке силовых параметров разрушения в сварных швах с технологическими дефектами. В силу того, что аналитические решения в такой постановке достаточно сложны, то для решения задач НДС при наличии дефектов необходимо использовать численные методы, в данном случае это метод конечных элементов, особенно если речь идет об объемной постановке.

## 1. ОБЩАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА

В работе на примере расчета деаэратора на основе геометрии, паспортных данных, данных толщинометрии был выполнен расчет НДС с учетом внутреннего давления при расчетной

температуре. Также учитывалось наличие технологических дефектов в сварных швах, выявленных методами ультразвукового контроля. Расчет выполнялся с применением современных вычислительных комплексов ANSYS v.11 и FEA-CRACK v.3.1.11.

Конечно-элементная модель (рис.1, б) была построена автоматической разбивкой на конечные элементы твердотельной модели (рис.1, а), построенной в CAD-системе SOLIDWORKS с максимальным приближением геометрии модели к реальной конструкции, и состояла из библиотечных оболочечных конечных элементов пакета ANSYS. Модель учитывала геометрические особенности аппарата (реальную толщину стенки), вес конструкции и реальные условия закрепления в виде ограничений на перемещения в местах крепления аппарата.

Результаты расчета при действии внутреннего давления в виде изолиний интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в МПа показаны на рис. 2, а. Анализ полей НДС в данной модели позволил выявить наиболее нагруженные зоны, которые находятся на внутренней поверхности патрубка на уровне его стыка с обечайкой. Большие значения эквивалентных напряжений в этой зоне связаны с наличием больших окружных напряжений. Из рис. 2 видно, что эквивалентные напряжения распределяются неравномерно в различных сечениях аппарата. В местах врезки штуцеров, зоне соединения обечайки и днища напряжения существенно возрастают.

На рис. 2, б приведена картина распределения интенсивности напряжений при действии осевой силы от гравитации и изгибающего момента  $M_x$ , обусловленного действием ветровой нагрузки.

Таким образом, наиболее опасным является сочетание внутреннего давления, осевой силы и ветровой нагрузки. Поэтому дальнейшие расчеты проводились для этого сочетания нагрузок.

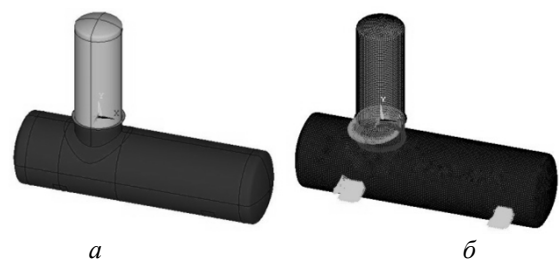


Рис. 1. Твердотельная (а) и конечно-элементная (б) модель деаэратора D-1

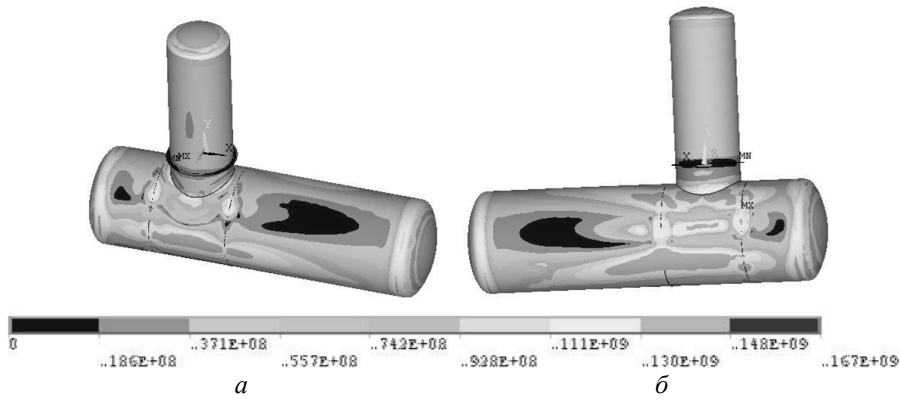


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений (Па) в конструкции при действии осевой силы (а) и изгибающего момента  $M_x$  (б)

Таблица 1

Дефекты сварного шва

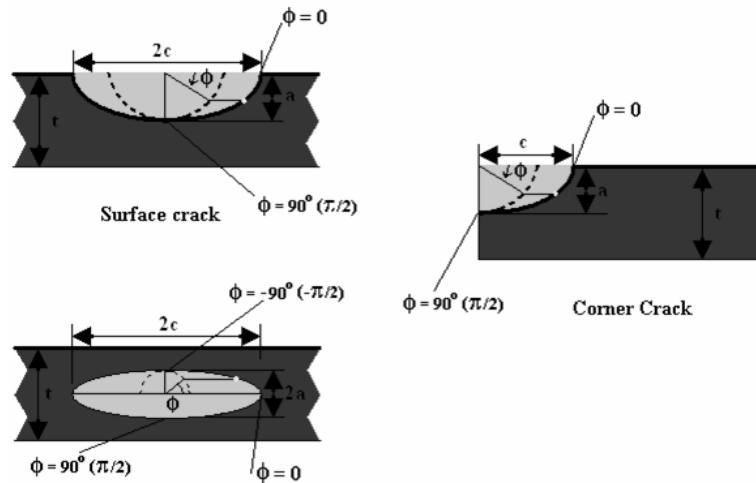



Рис. 3. Формы дефектов

2. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ В ДЕФЕКТАХ СВАРНЫХ ШВОВ

Отдельного внимания заслуживает оценка силовых и энергетических параметров разрушения в зоне технологических дефектов. В табл. 1 приведены наиболее часто встречающиеся дефекты технологического характера в сварных швах реальных конструкций ТУ.

На рис. 3 показано обозначение, принятое в расчетах, и параметры формы дефекта, который может располагаться в произвольном месте элемента конструкции.

Элементы конструкции со специальной генерацией конечно-элементной сетки в области дефекта показаны на рис. 4–6. Процедура разбивки на конечные элементы была максимально автоматизирована с помощью вычислительного комплекса FEA-CRACK [2].

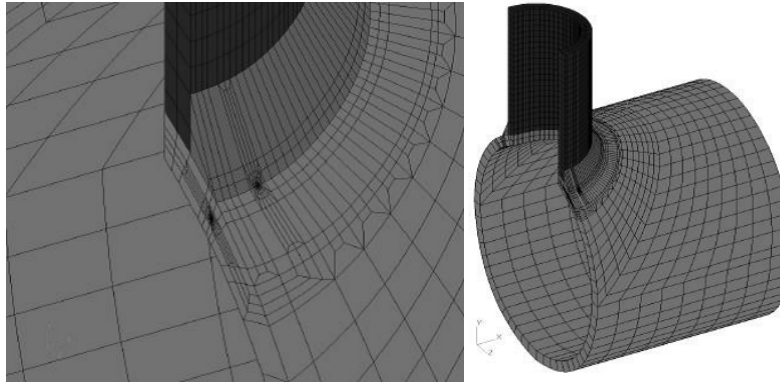


Рис. 4. Фрагменты конечно-элементной модели в зоне пересечения обечаек

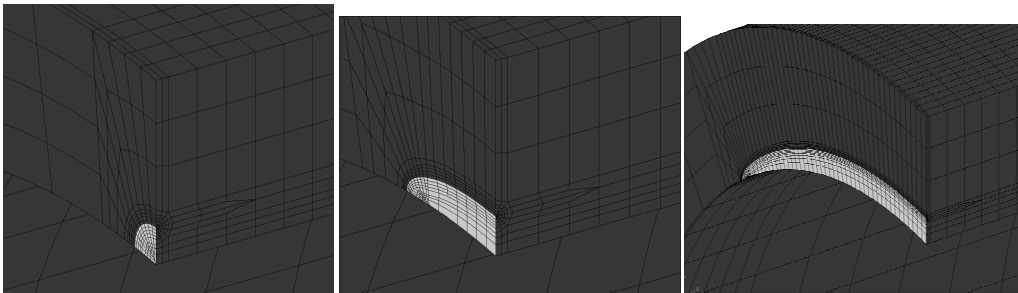


Рис. 5. Форма фронта дефекта по внутренней стороне обечайки

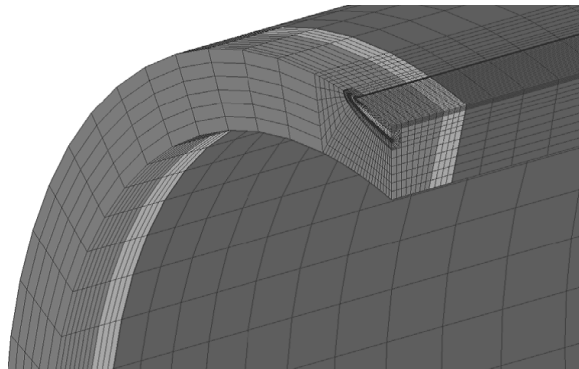


Рис. 6. Форма фронта дефекта по наружной стороне обечайки

### 3. ОЦЕНКА ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ

Дефект типа «эллиптическая трещина» моделировался тонким разрезом (рис. 3), где напряжения и деформации описывались соотношением:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} f_1(\Theta) \\ f_2(\Theta) \\ f_3(\Theta) \end{bmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} f_2(\Theta) \\ f_4(\Theta) \\ f_6(\Theta) \end{bmatrix} + O(r),$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \Phi_{ij}(\Theta),$$

где  $r$ ,  $\Theta$  – полярные координаты с полюсом в вершине трещины;  $K_I$ ,  $K_{II}$  – коэффициент интенсивности напряжений.

Перемещения у вершины трещины описывались асимптотическим уравнением:

$$U = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left( (2\kappa - 1) \cos \frac{\Theta}{2} - \cos \frac{3\Theta}{2} \right) +$$

$$+ \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left( (2\kappa + 3) \sin \frac{\Theta}{2} + \sin \frac{3\Theta}{2} \right) + O(r),$$

$$V = \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left( (2\kappa + 1) \sin \frac{\Theta}{2} - \sin \frac{3\Theta}{2} \right) +$$

$$+ \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left( (2\kappa - 3) \cos \frac{\Theta}{2} + \cos \frac{3\Theta}{2} \right) + O(r),$$

$$W = \frac{2K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\Theta}{2} + O(r);$$

где  $G, \nu$  – модуль упругости при сдвиге и коэффициент Пуассона.

Расчет силовых критериев и интеграла Черепанова-Райса выполнялся по известным формулам [4]:

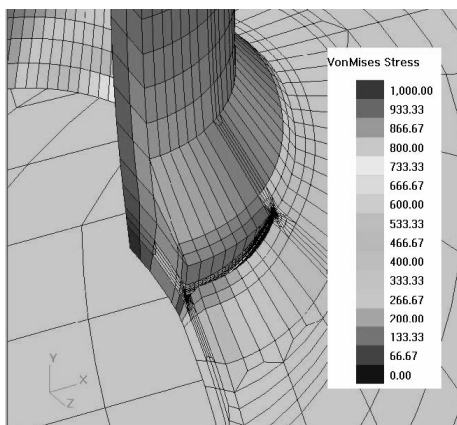
$$K_I = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{\pi}{2L}} \Delta U_i, \quad i = 1, 2, 3$$

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - \sigma_{ij} u_j \frac{\partial U_i}{\partial x} dS \right),$$

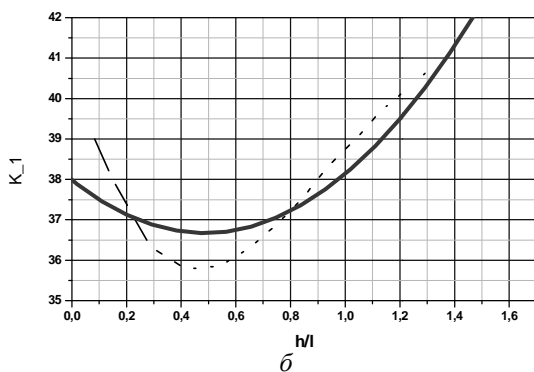
$$G = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2,$$

где  $\Delta U_i$  – функция перемещения в вершине трещины.

На рис. 7 показаны значения (изолинии) эквивалентных напряжений в зоне сварного шва приварки патрубка к обечайке.



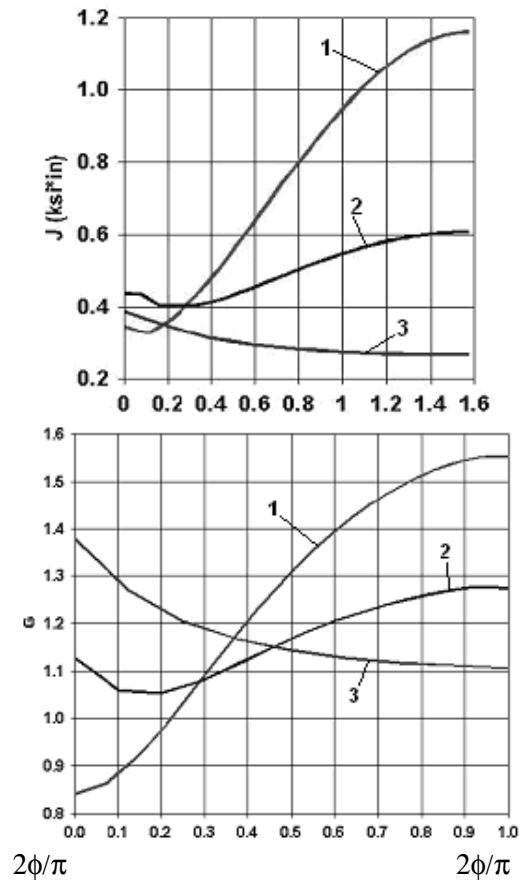
а



**Рис. 7.** Распределение интенсивности напряжений (Па) в зоне усиления сварного шва при наличии технологического дефекта (а) и изменение силового параметра (КИН) по фронту трещины (б)

Графики изменения значения  $J, G$ -интеграла показаны на рис. 8. Установлено, что значения  $I$ - и  $G$ -интегралов существенно изменяются по

фронту эллиптического дефекта и достигают своего максимума в центре фронта трещины ( $\phi = 2\pi$ ).



**Рис. 8.** Распределение коэффициента интенсивности напряжений и  $G$ -интеграла по фронту дефекта: 1 –  $h/l=0,4$ ; 2 –  $h/l=0,3$ ; 3 –  $h/l=0,25$ ;

Эта информация является основной для оценки безопасности дефекта по критерию  $K_I \leq K_{Ic}$  ( $I_1 \leq I_{1c}$  и  $G_1 \leq G_{1c}$ ) и рекомендуется для использования в расчетах при оценке остаточного ресурса при проведении процедуры ЭПБ ТУ.

На основе представленных подходов могут быть получены обобщенные данные по оценке допустимости дефектов с использованием силового критерия разрушения.

### ВЫВОДЫ

Разработан и продемонстрирован подход к моделированию разрушения элементов ТУ на основе ANSYS и FEA-CRACK-вычислительной технологии, которая эффективна для моделирования НДС и оценки влияния внешнего воздействия.

Широкие функциональные возможности FEA-CRACK-технологии, совмещенные со средствами моделирования ANSYS и отображением результатов в графическом виде, существенным набором в базе данных материалов, возможностью решения задач Лагранжевой, Эйлеровой и совмещенной постановках, возможность решения задач линейной и нелинейной механики разрушения, позволили разработать эффективные вычислительные технологии, обеспечивающие качественно новый подход к анализу безопасности ТУ при проведении экспертизы промышленной безопасности ТУ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSYS User`s Manual for version 14.0. Theory.
2. FEA-CRACK User`s Manual for version 3.0.13 (Structural Reliability Technology).
3. ОТУ 2-92. Сосуды и аппараты. Общие ТУ на ремонт корпусов. Волгоград, 1992. 148с.
4. **Черепанов Г. П.** Механика разрушения. М.: Наука, 1983. 295с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Будилов Игорь Николаевич**, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по технологии и оборудованию сварочн. произв-ва (УГАТУ, 1998). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (ЧПИ, 1972). Иссл. в обл. механики разрушения, прочности элементов ГТД.

**Кулясов Геннадий Викторович**, техн. дир. ООО «Техническая диагностика». Дипл. инженер по машинам и обработке металлов давлением (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела, прочности элементов конструкций нефтехим. оборудования.

**Лукашук Юрий Валентинович**, доц. каф. ОКМиМ. Дипл. инженер по автоматизации машиностроительн. пром-ти (УАИ, 1972). Канд. техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УАИ, 1981). Иссл. в обл. прочности и надежности элементов конструкций методами комп. моделирования.

**Шевела Владислав Владимирович**, зав. отд. ГУП «БашНИИнефтемаш». Дипл. инженер по материаловедению в машиностроении (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела, прочности элементов конструкций нефтехим. оборудования.