

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин, А.Н. Оценка безопасности магистрального трубопроводного транспорта при техническом регулировании / А.Н. Воронин, В.К. Липский, П.С. Серенков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 6. – С. 145 – 150.
2. Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. Методология описания сети процессов: монография / П.С. Серенков, А.Г. Курьян, В.Л. Соломахо. – Минск : БНТУ, 2006. – 484 с.
3. ТК РБ 4.2-МР-05-2002. Методика и порядок работ по определению, классификации и идентификации процессов. Описание процессов на базе методологии IDEF0. Методические рекомендации. – Минск : БелГИСС, 2002. – 52 с.
4. СТБ ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования. – Введ. 26.09.2001. – Минск : БелГИСС, 2001. – 23 с.

**УДК 621.64:539.4**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В СТЕНКЕ РВС ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ**

**А. А. Герасименко**

*ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет»  
«Горный», Санкт-Петербург, Россия*

Возникновение дефектов в процессе эксплуатации стальных вертикальных резервуаров (РВС) является неизбежным процессом из-за коррозионного износа и малоциклового усталости металла. При этом наиболее опасными дефектами в стенке РВС принято считать усталостные трещины. Для того чтобы определить степень опасности дефекта, необходимо уметь предсказывать, как будет развиваться трещина при данных режимах эксплуатации и каким будет ее критический размер. С точки зрения механики разрушения скорость развития трещины в стенке резервуара зависит от напряженно-деформированного состояния (НДС) в вершине трещины, характеризующегося коэффициентом интенсивности напряжений (КИН). Следовательно, актуальной задачей является определение возможного срока безопасной эксплуатации РВС с учетом фактического напряженного состояния стенки резервуара с дефектом.

В представленной работе выполнена оценка полей напряжений при отсутствии и наличии дефектов в стенке резервуара с помощью метода конечных элементов. При моделировании НДС варьировались глубина проникновения и местоположение дефекта, уровень заполнения нефтепродуктом, что позволило получить аналитическую зависимость К-тарировочной функции для уравнения, связывающего скорость роста трещины и КИН.

Объектом исследования являлись РВС номинальным объемом 5000, 10000 и 20000 м<sup>3</sup>, ослабленные поверхностными несквозными трещинами.

Научная новизна работы заключается в том, что получены аналитические зависимости для расчета КИН первого пояса РВС, учитывающие геометрические параметры несквозной поверхностной трещины, конструктивные особенности резервуаров и условия эксплуатации.

Расчет КИН проводился для трещины с постоянным отношением глубины  $b$  к полудлине  $a$ :  $b/a = 1/3$  (рис. 1). Моделировался продольный дефект, т. к. в цилиндрической оболочке, нагруженной внутренним давлением, максимальные главные напряжения реализуются вдоль образующей корпуса резервуара и способствуют раскрытию и росту трещины. Поскольку нижние пояса находятся в наиболее напряженных условиях, то трещина рассчитывалась в первом поясе на равном удалении между прямо-раздаточными патрубками и вне зоны влияния прямо-раздаточных патрубков на НДС.

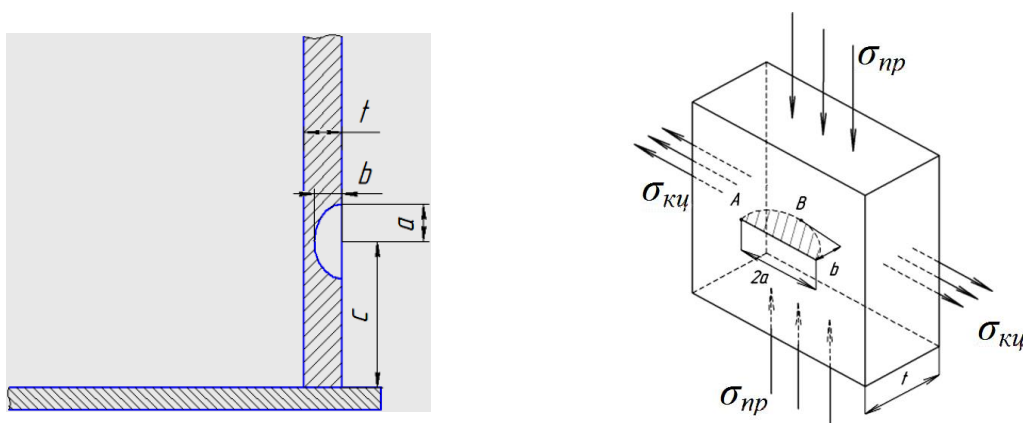


Рис. 1. Схематичное изображение моделируемой части стенки резервуара с поверхностной несквозной трещиной

Для расчета КИН первоначально необходимо было определить номинальное НДС конструкции. Задача решалась в упругой постановке в условиях статического нагружения. Моделировалась  $1/4$  конструкции резервуара конечными элементами типа Shell, при этом учитывались различная толщина поясов стенки и усиливающий лист прямо-раздаточных патрубков.

К модели резервуара прикладывались следующие нагрузки и закрепления: жесткое закрепление по нижней кромке первого пояса; условия симметрии на боковые сечения резервуара; нагрузка от собственного веса стенки; распределенная нагрузка от веса крыши, оборудования и равномерно распределенного снега; гидростатическое давление; нагрузка по давлению в газовой полости резервуара.

Верификация конечно-элементной модели РВС проводилась путем сравнения полученных эпюр распределения кольцевых и продольных напряжений со значениями, рассчитанными по рекомендациям «Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» [1].

Расчет КИН по фронту трещины проводился с использованием методики подмоделирования. Моделировалась часть стенки резервуара размером  $400 \times 400$  мм, в которой отдельно создавалась трещина. На границы подмодели интерполировались граничные условия из полной модели резервуара. Трещина моделировалась регулярной гексаэдрической конечно-элементной сеткой (рис. 2). Техника, используемая при расчете КИН, верифицировалась на готовых опубликованных решениях. Погрешность вычислений не превышала 2%.

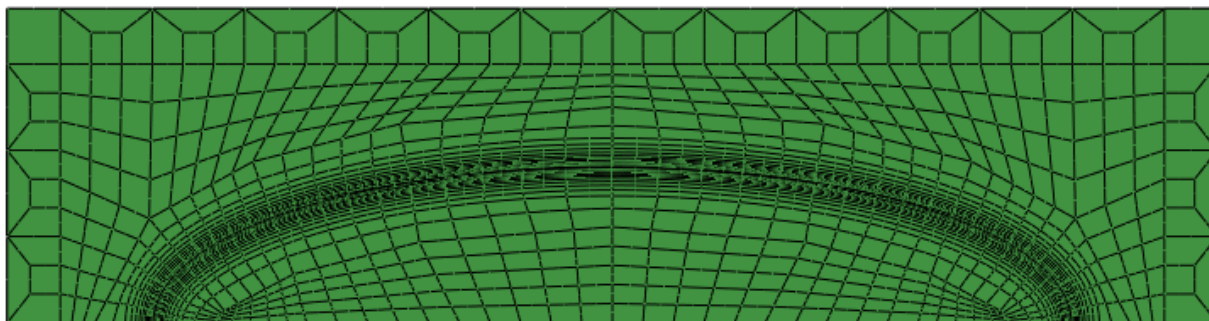


Рис. 2. Конечно-элементная модель поверхностной трещины

На рисунке 3 представлено изменение КИН вдоль фронта трещины в процессе роста дефекта для РВС-10000 при максимальном наполнении резервуара. Трещина моделировалась на расстоянии  $c = 0,4h_n$ , что составляет 796 мм от днища до центра трещины, между патрубками. Для этого же случая на рисунке 4 показана зависимость КИН самой глубокой точки фронта поверхностной полуэллиптической трещины от отношения глубины трещины к толщине стенки. Установлено, что КИН возрастает с увеличением уровня налива нефтепродукта, глубины и длины трещины.

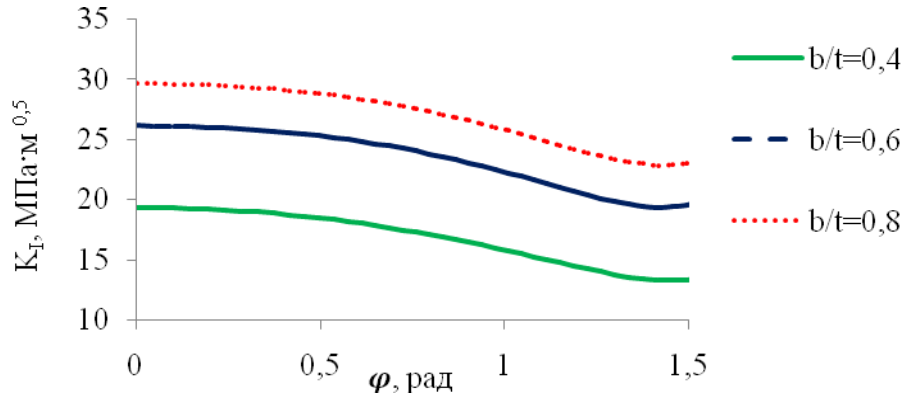


Рис. 3. Распределение КИН вдоль фронта трещины при  $b/a = 1/3$  и  $c = 0,4h_n$

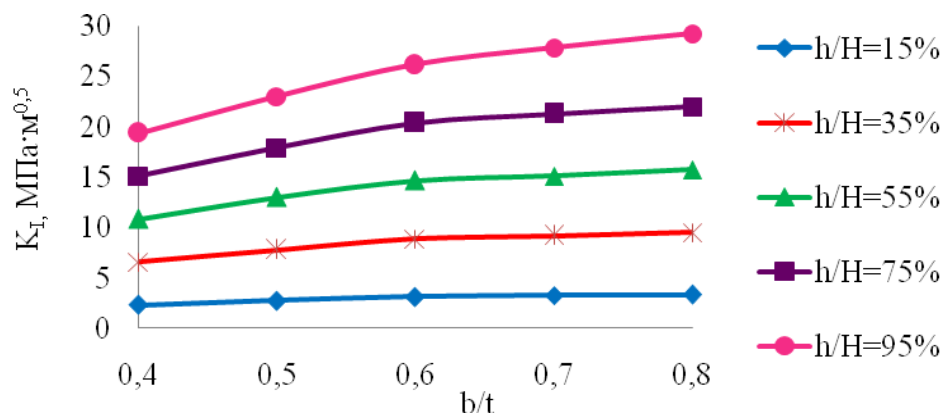


Рис. 4. КИН самой глубокой точки фронта трещины при  $b/a = 1/3$  и  $c = 0,4h_n$

Для оценки остаточного ресурса резервуара были определены аналитические выражения К-тарировочных функций путем нормирования значений КИН на величину  $\sigma^{FEM} \sqrt{\pi b}$ . Установлено, что в общем виде К-тарировочные функции могут быть описаны с коэффициентом детерминации 0,991 полиномом второго порядка

$$Y_I(b/t, c, h/H) = a + d \cdot (h/H) + e \cdot (b/t) + f \cdot (h/H)^2 + i \cdot (h/H) \cdot (b/t) + j \cdot (b/t)^2, \quad (1)$$

где  $a, d, e, f, i, j$  – коэффициенты, зависящие от типоразмера РВС и месторасположения дефекта.

Таким образом, аналитическое выражение КИН можно представить в следующем виде

$$K_I = \sigma^{FEM} \cdot \sqrt{\pi b} \cdot Y_I(b/t, c, h/H). \quad (2)$$

Таким образом, проведен анализ напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных резервуаров при эксплуатационных условиях нагружения и дефектах. Получены K-тарировочные функции первых поясов резервуаров, учитывающие изменение геометрических параметров поверхностной трещины в процессе эксплуатации и конструктивные особенности резервуаров. Использование полученных K-тарировочных функций позволяет повысить точность расчета КИН для поверхностных трещин различной формы в плане по сравнению с традиционным методом расчета на 10 – 20 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – Сер. 03. – Вып. 69. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с.