

УДК 539.3

*И.Н. СМИРНОВА, Р.Ю. БАННИКОВ*  
*Пермский государственный технический университет*

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА УГЛОВАТОСТЬ И ДЕПЛАНАЦИЯ

Приводится численный конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния в зоне дефекта сварного шва вертикального цилиндрического резервуара в рамках деформационной теории упругопластичности. Рассматриваются два дефекта: смещение кромок сварного шва и угловатость. Определяются значения коэффициента концентрации напряжений (ККН) в зависимости от величины дефекта и уровня нагрузки, которые сравниваются с данными, обобщающими результаты инженерных методик.

Вертикальные цилиндрические резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов являются объектами повышенного внимания, так как их разрушение может привести к серьезным экономическим и экологическим последствиям. Разрушение резервуаров может быть вызвано рядом причин, среди которых можно выделить концентраторы напряжений, возникающие в районах несовершенств и дефектов форм. Концентраторы напряжений могут возникать как в процессе эксплуатации, так и во время монтажа резервуара. Существующие нормативные документы, основанные на инженерных методиках, позволяют оценивать остаточный ресурс такого рода конструкций, но они в ряде случаев предъявляют завышенные требования, запрещая эксплуатацию резервуаров, которые могли бы успешно эксплуатироваться в течение еще значительного срока. Следовательно, актуальной является проблема анализа такого рода конструкций с имеющимися дефектами форм. Одними из наиболее опасных дефектов являются депланация и угловатость. Рассмотрим последовательно эти дефекты.

**Угловатость.** Данный дефект формы стенки характерен для «прямых» вертикальных монтажных стыков резервуаров, изготовленных из рулонных заготовок, обусловлен неправильной технологией сборки и сварки стыковых соединений полотнищ.

Выбирается сечение в месте максимального размера дефекта вертикального сварочного шва резервуара. Сечение симметричное, поэтому левую половину отбрасываем и заменяем связью. Край рассматриваемого фрагмента удален на расстояние, на котором дефект не оказывает влияния на граничные условия. С одной стороны прикладывается распределенная нагрузка, соответствующая окружным напряжениям, возникающим при заполнении резервуара нефтесодержащей жидкостью,

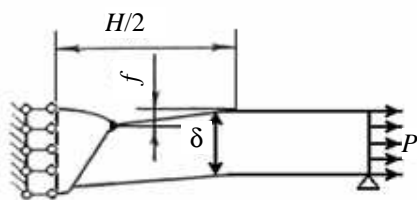


Рис. 1. Схема дефекта угловатость

с обеих сторон имеются закрепления. Схема приведена на рис. 1. На этом рисунке:  $p$  – приложенная распределенная нагрузка;  $\delta$  – толщина стенки резервуара;  $H$  – протяженность дефекта;  $f$  – величина дефекта.

**Депланация.** Данный дефект представляет собой следующее: при сваривании отдельных листов стали встык нельзя добиться идеального

совпадения уровня срединной поверхности оболочки, и поэтому происходит ее искажение, то есть депланация.

Выбирается сечение в месте максимального смещения кромок вертикального сварочного шва резервуара. Края рассматриваемого фрагмента равноудалены от места стыка кромок на расстояние, на котором дефект не оказывает влияния на граничные условия. В силу малой кривизны рассматриваемого фрагмента считается, что у рассматриваемой части она отсутствует. С одной стороны прикладывается распределенная нагрузка, соответствующая окружным напряжениям, возникающим при заполнении резервуара нефтесодержащей жидкостью, с другой стороны стенка закреплена. Схема приведена на рис. 2. На этом рисунке:  $p$  – приложенная распределенная нагрузка;  $\varepsilon$  – величина смещения кромок;  $\delta$  – толщина стенки резервуара;  $H$  – протяженность дефекта.

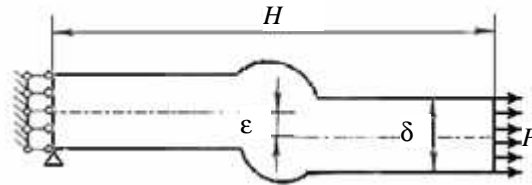


Рис. 2. Схема дефекта депланация

Решается задача о плоско-деформированном состоянии в рамках теории малых упругопластических деформаций. В качестве материала выбрана сталь марки ВСТЗСП (модуль упругости  $E = 1,94 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,35$ ). Кривая деформирования принимается идеализированной и состоит из 3 участков: упругость, площадка текучести (предел текучести – 260 МПа; площадка текучести от 0,134 % до 1,3 % деформации) и упрочнение (предел прочности – 450 МПа).

Для описания упругопластического поведения материала используется следующая система уравнений [1,2]:

- Уравнения равновесия (ПДС):

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} = 0, \\ \frac{d\tau_{xy}}{dx} + \frac{d\sigma_y}{dy} = 0, \\ \frac{d\sigma_z}{dz} = 0, \Rightarrow \sigma_z = \text{const.} \end{cases}$$

- Геометрические соотношения:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{dU_x}{dx}; \\ \varepsilon_y = \frac{dU_y}{dy}; \\ \gamma_{xy} = \frac{dU_x}{dy} + \frac{dU_y}{dx}. \end{cases}$$

- Физические соотношения:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} (\sigma_x - \sigma_0); \\ \varepsilon_y = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} (\sigma_y - \sigma_0); \\ \gamma_{xy} = \frac{3 \varepsilon_i}{2 \sigma_i} \tau_{xy}. \end{cases}$$

где  $\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_x^2 + \frac{3}{2} \gamma_{xy}^2}$  – интенсивность деформаций,

$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2}$  – интенсивность напряжений,

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).$$

- Граничные условия:

угловатость	депланация
$\sigma_x \Big _{x=x_2} = p;$	$\sigma_x \Big _{x=x_2} = p;$
$U_x \Big _{x=x_1} = 0;$	$U_x \Big _{x=x_1} = 0;$
$U_y \Big _{x=x_2, y=0} = 0.$	$U_y \Big _{x=x_1, y=0} = 0.$

Для описания поведения материала в пластической зоне используется критерий текучести Мизеса.

Сначала были проведены численные эксперименты образцов дефектов с наваром (см. рис. 1, 2). Полученные результаты оказались не совсем схожи с экспериментальными данными [3], полученными с применением инженерных методик (рис. 3, 4).

Поэтому было принято решение провести расчёт без наваров (рис. 5, 6), чтобы они не оказывали влияния на напряженно-деформированное состояние образца и чтобы получить зависимость ККН только от размера дефекта без влияния наваров.

На рис. 7–10 представлены результаты расчетов ККН в зависимости от величины угловатости для представленных на рис. 3 возможных отношений кольцевых напряжений к пределу текучести. На рис. 11–13 представлены результаты расчетов ККН при депланации для представленных на рис. 4 возможных отношений кольцевых напряжений к пределу текучести. При этом определялось максимальное значение интенсивности напряжений во всей модели, через которое вычислялся ККН. Расчет проводился методом конечных элементов [4] в программном комплексе ANSYS. Решение упругопластической задачи производилось методом переменных параметров упругости [5].

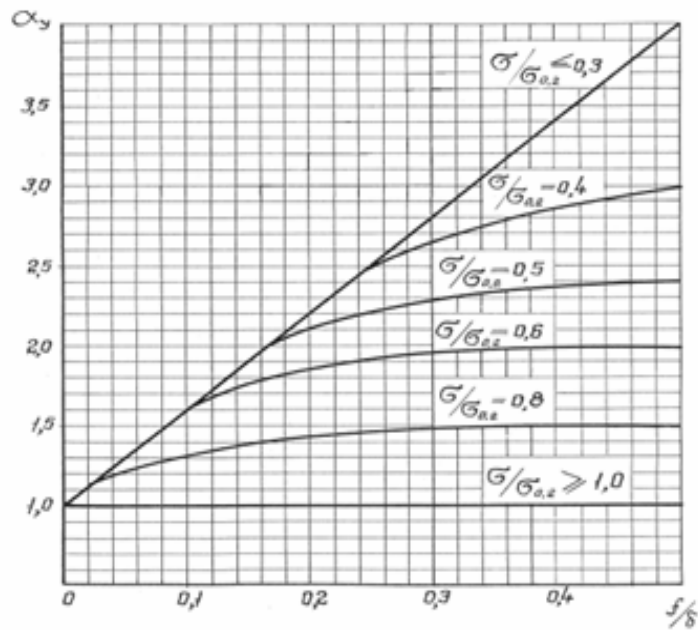


Рис. 3. Коэффициенты концентрации напряжений, учитывающие эффект стыкового соединения типа угловатость:  $\sigma$  – наибольшие кольцевые напряжения на рассчитываемом участке стенки вдали от концентратора напряжений;  $\sigma_{0,2}$  – предел пропорциональности (текучести);  $f$  – величина дефекта;  $\delta$  – толщина стенки резервуара

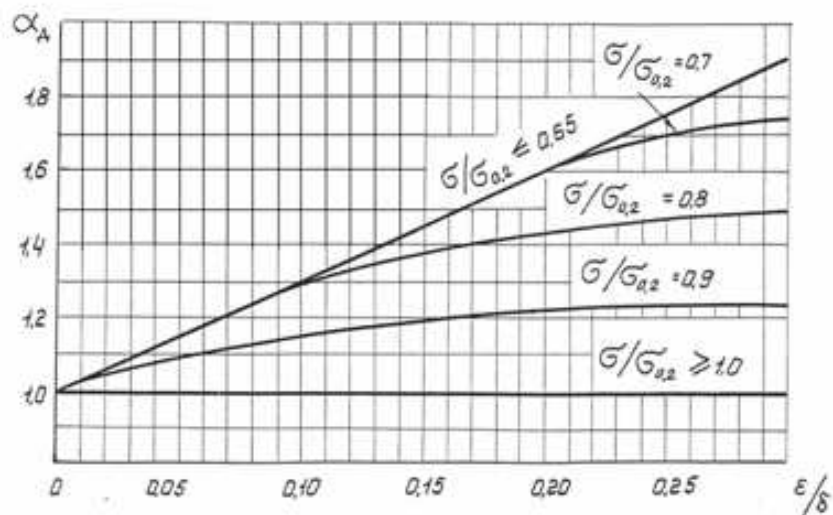


Рис. 4. Коэффициенты концентрации напряжений, учитывающие эффект стыкового соединения типа депланация:  $\sigma$  – наибольшие кольцевые напряжения на рассчитываемом участке стенки вдали от концентратора напряжений;  $\sigma_{0,2}$  – предел пропорциональности (текучести);  $\epsilon$  – смещение кромок сварного шва;  $\delta$  – толщина стенки резервуара

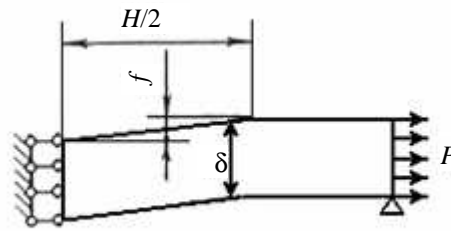


Рис. 5. Схема дефекта угловатость баз навара

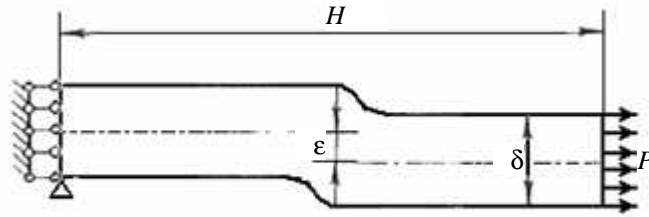
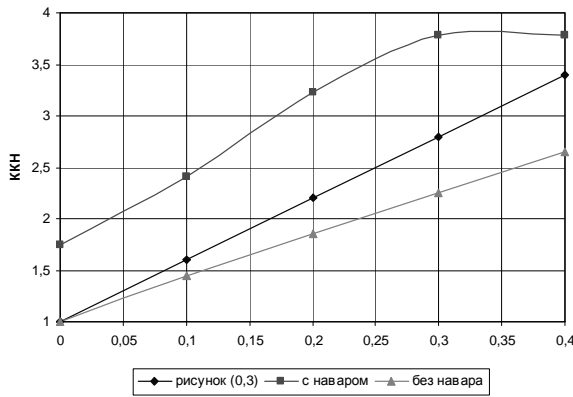
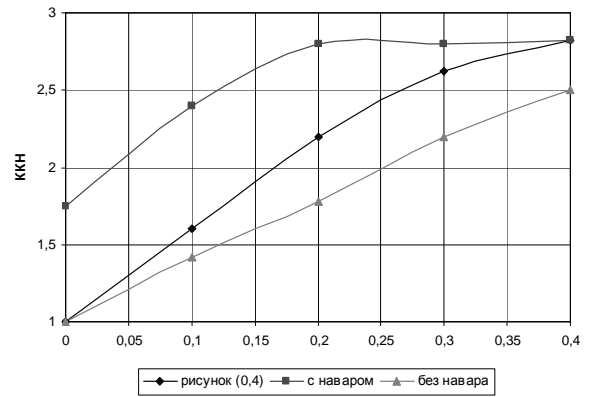
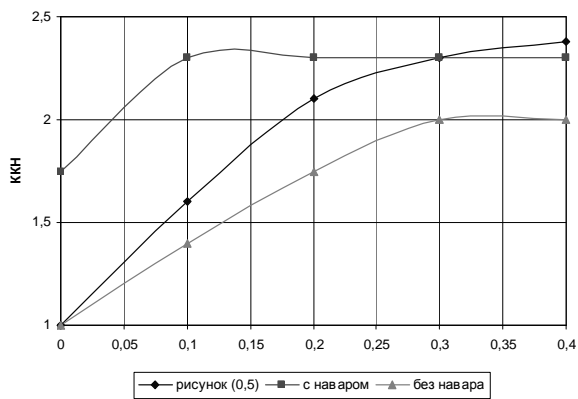
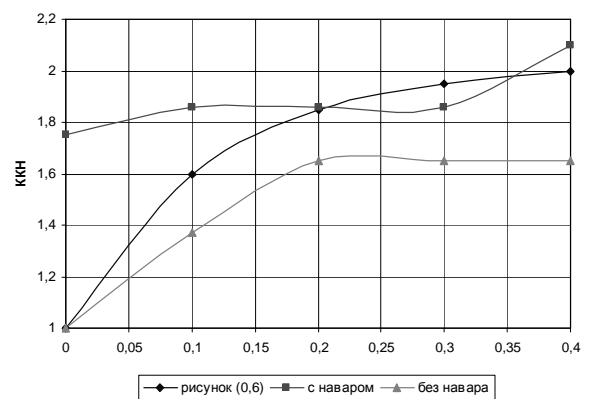


Рис. 6. Схема дефекта депланация баз навара

Рис. 7. ККН, учитывающие дефект стыкового соединения типа угловатость при  $\sigma/\sigma_{0,2} = 0,3$ Рис. 8. ККН, учитывающие дефект стыкового соединения типа угловатость при  $\sigma/\sigma_{0,2} = 0,4$ Рис. 9. ККН, учитывающие дефект стыкового соединения типа угловатость при  $\sigma/\sigma_{0,2} = 0,5$ Рис. 10. ККН, учитывающие дефект стыкового соединения типа угловатость при  $\sigma/\sigma_{0,2} = 0,6$

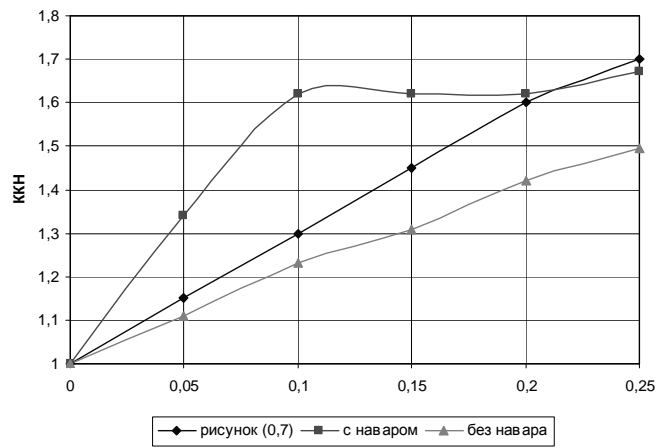


Рис. 11. ККН, учитывающие дефект стыкового соединения типа депланация при  $\sigma/\sigma_{0,2} = 0,7$

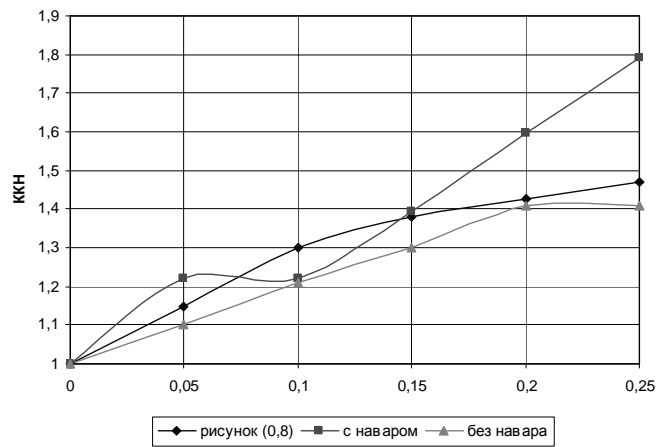


Рис. 12. ККН, учитывающие дефект стыкового соединения типа депланация при  $\sigma/\sigma_{0,2} = 0,8$

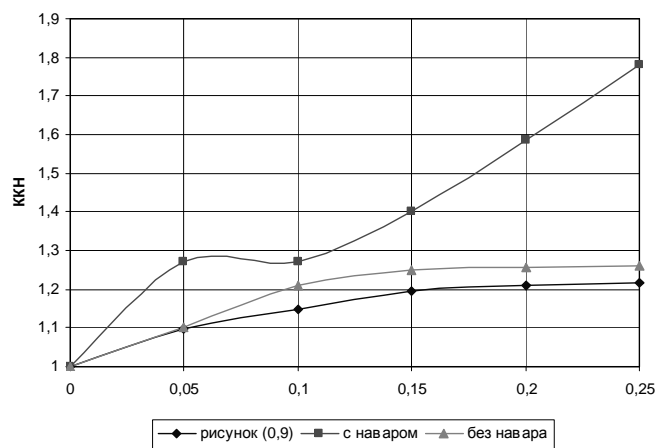


Рис. 13. ККН, учитывающие дефект стыкового соединения типа депланация при  $\sigma/\sigma_{0,2} = 0,9$

Характер полученных кривых изменения ККН отличен от представленных на рис. 3 и 4. Это объясняется тем, что кривые изменения ККН, представленные на этих рисунках, получены из экспериментальных данных с применением инженерных методик.

Зависимость значения ККН от величины дефекта, полученная в ходе численных экспериментов, качественно совпадает с кривыми натуральных экспериментов. Причем в ряде случаев значения ККН из численных экспериментов оказываются ниже кривых, построенных по натурным экспериментам. Это, в свою очередь, позволит повлиять на расчет остаточного ресурса резервуаров и позволит продлить срок их эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Демидов С.П. Теория упругости. – М.: Высш. шк., 1972. – 416 с.
3. ПР-07-003-06. Правила технического диагностирования вертикальных цилиндрических стальных резервуаров со сверхнормативными дефектами ООО «Лукойл-Пермь».
4. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. – М: Недра, 1974. – 239 с.
5. Термопрочность деталей машин / под ред. И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.

Получено 01.05.2009.