

УДК 534.1

КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

¹ **Б. В. Успенский**, канд. техн. наук
Uspensky.kubes@gmail.com

² **С. Н. Буганова**, канд. техн. наук

³ **У. С. Сулейменов**, д-р техн. наук

¹ **К. В. Аврамов**, д-р техн. наук
kvavramov@gmail.com

¹ Институт проблем
машиностроения
им. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков,
ул. Пожарского, 2/10

² Международная образовательная
корпорация «Казахская головная
архитектурно-строительная
академия»
050043, Казахстан, г. Алматы,
ул. Рыскулбекова, 28

³ Южно-Казахстанский
государственный университет
им. М. Ауэзова
160012, Казахстан, г. Шымкент,
пр. Тауке хана, 5

В статье описывается новая методика анализа и прогнозирования коэффициента концентрации напряжений в сварном шве рулонного вертикального резервуара при гидростатической нагрузке. Вертикальные резервуары широко используются для хранения нефтепродуктов. Использование технологии рулонной сборки целесообразно для быстрого и недорогого монтажа нефтяных резервуаров. Однако применение этой технологии при монтаже резервуаров большой емкости приводит к необходимости использования стали толстого проката. В результате появляются существенные угловатости сварных швов, которыми скрепляются стальные листы в рулоне. Такие угловатости представляют собой концентраторы механических напряжений и могут привести к повреждению резервуара. Поэтому проблема моделирования зависимости факторов концентрации напряжений от геометрических параметров угловатости актуальна и важна для обеспечения как экономической, так и экологической эффективности эксплуатации нефтяных резервуаров, собранных рулонным методом. Подход, описанный в данной статье, основан на сочетании численного эксперимента и аппроксимационного подхода. Коэффициент концентрации напряжений зависит от двух безразмерных параметров вмятины. Таким образом, описан метод аппроксимации двухмерной задачи. Этот метод применяется к данным, собранным путём многочисленных вычислительных экспериментов с использованием конечноэлементного подхода, для построения аппроксимирующей модели коэффициента концентрации напряжений. Такая модель может использоваться для прогнозирования значений напряжений, а также прочности и долговечности резервуара. Изменение свойств материала в сварном шве не принимается во внимание. Таким образом, оцениваемое напряжение выше, чем реальное, и представляет собой оценочную оценку. Построена аппроксимирующая модель коэффициента концентрации напряжений в области угловатости сварного шва нефтяного резервуара объёмом 3000 м³ сложной конструкции при гидростатическом нагружении. Бак состоит из четырёх поясов, изготовленных из стали различной толщины. Плотность содержимого бака близка к плотности воды. Обнаружено, что концентрация напряжений увеличивается при приближении к дну резервуара. Поэтому при построении аппроксимирующей модели рассматриваются результаты в наиболее напряжённой области.

Ключевые слова: вертикальный резервуар, гидростатическое нагружение, концентратор напряжений, сварной шов, рулонная сборка, вмятина.

Введение

Рулонный способ изготовления резервуаров для хранения нефтепродуктов является наиболее выгодным с точки зрения трудоёмкости, временных и материальных затрат. Он позволяет провести основные этапы монтажа и сварки элементов металлоконструкций в заводских условиях. На строительной площадке осуществляются только сварка стенки резервуара с днищем и сварка монтажного стыка стенки.

При использовании метода рулонной сборки резервуаров большой ёмкости в конструкции возникают угловатости в области сварного шва, связанные с образованием угловых деформаций во время сварки листов. Такие дефекты характеризуются заострённой формой, расположены по всей высоте резервуара и являются концентраторами механических напряжений в стенках резервуара.

Предполагается, что напряжённо-деформированное состояние (НДС) резервуара описывается гипотезами Кирхгофа теории оболочек [1, 2]. Перемещения срединной поверхности оболочки являются малыми, в результате связь между деформациями и перемещениями срединной поверхности предполагается

линейной. Материал оболочки находится в области упругости. Поэтому связь между напряжениями и деформациями удовлетворяет закону Гука. Подчеркнем, что НДС оболочки в зоне угловатости также описывается упомянутой выше теорией оболочек.

Геометрия конструкции около угловатости достаточно сложна. Поэтому анализ НДС эффективно проводить методом конечных элементов. Результаты конечноэлементного анализа используются для построения аппроксимирующей модели концентрации напряжений в стенке резервуара, которая может быть использована для предсказания значений эквивалентных напряжений по параметрам вмятины. В работах [3, 4] показано, что коэффициент концентрации напряжений зависит от двух параметров: безразмерной глубины и безразмерной ширины вмятины. Подчеркнем, что эти параметры легко поддаются измерению.

В данной работе изложена методика построения аппроксимирующей модели концентрации напряжений в области сварного шва стенки резервуара, собранного методом рулонирования. При расчёте резервуаров на прочность часто используются методы конечноэлементного анализа, эффективность которых напрямую зависит от сложности трёхмерной модели. Использование приближённой методики расчёта концентрации напряжений в области сварного шва может позволить значительно упростить расчёт прочности резервуара за счёт упрощения его трёхмерной модели и сосредоточить расчёт на других элементах конструкции (патрубки, люки, вмятины).

1. Постановка задачи

Исследуется НДС цилиндрического резервуара с дефектом в виде угловатости сварного шва по всей высоте (рис. 1). Ёмкость до краёв заполнена жидкостью плотностью 1000 кг/м^3 . Радиус резервуара $8,95 \text{ м}$;

он состоит из четырёх поясов стали толщиной $8, 6, 5, 4 \text{ мм}$ и высотой $1,49, 1,49, 2,98, 5,96 \text{ м}$ соответственно. Общая высота резервуара равна $11,92 \text{ м}$. Нижний край резервуара закреплён. Угловатость характеризуется двумя параметрами: глубиной f и шириной a (рис. 2). Параметр a изменяется от $0,15$ до $0,5 \text{ м}$, а f – от 1 до 10 см . Модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала резервуара таковы: $2,11 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ и $\nu=0,3$.

В области вмятины возникает значительная концентрация напряжений. Необходимо установить зависимость коэффициента концентрации напряжений K_σ^T от размеров угловатости: $K_\sigma^T \approx \alpha(f/t, a/\sqrt{Rt})$, где t, R – толщина стенки и радиус резервуара; α – искомая функция.

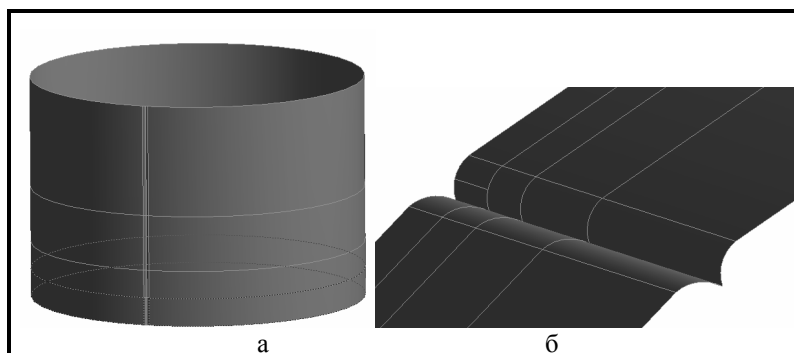


Рис. 1. Модель резервуара с угловатостью в области сварного шва: а – эскиз резервуара; б – вид угловатости сварного шва

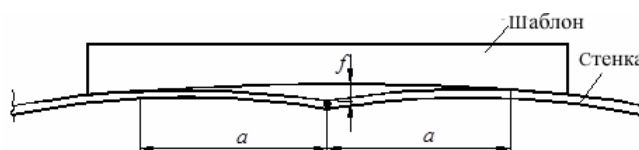


Рис. 2. Геометрия угловатости сварного шва

2. Моделирование в среде конечноэлементного анализа

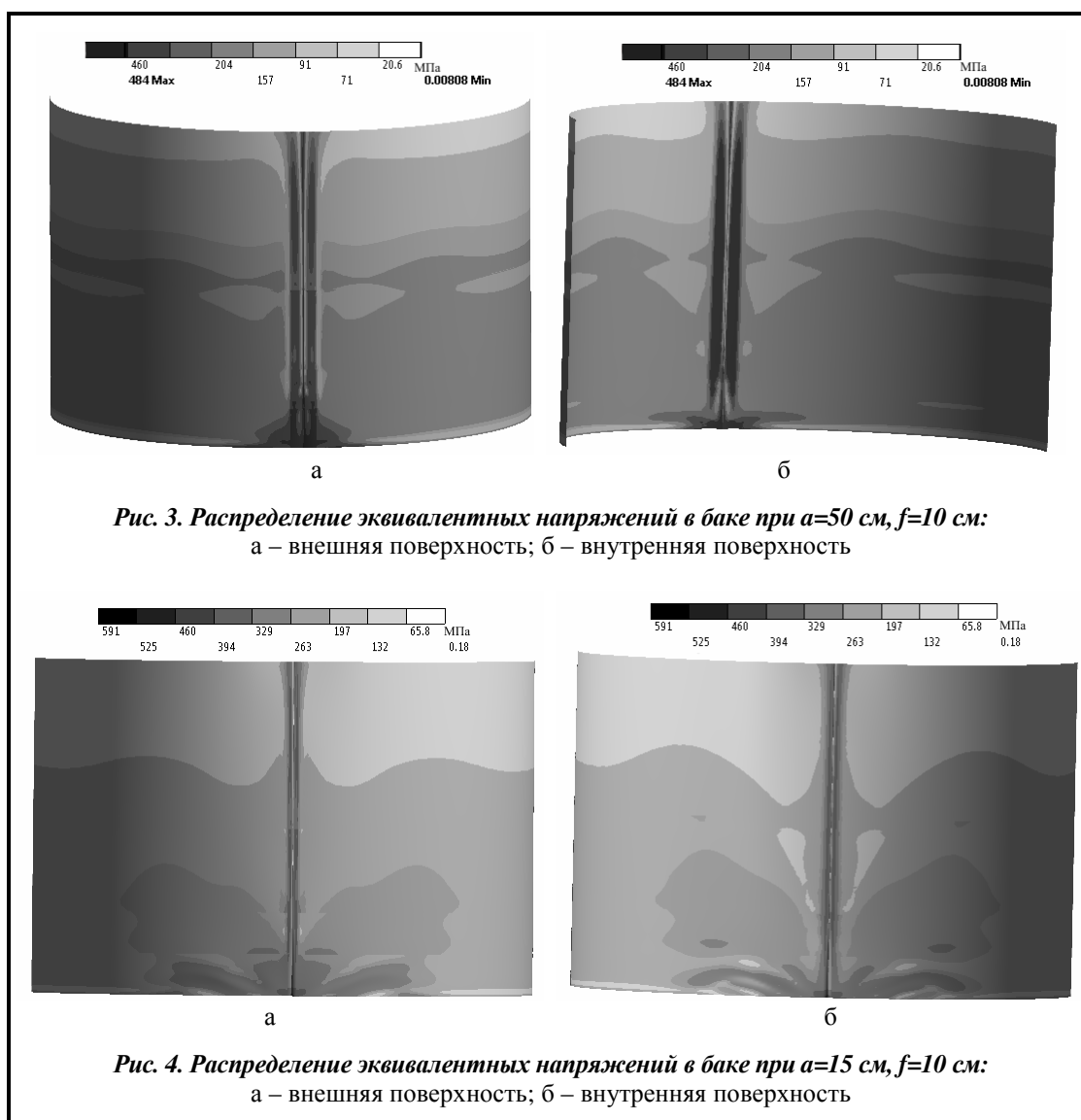
Геометрия конструкции изображена на рис. 1. Для получения конечноэлементной сетки сначала была использована равномерная сетка с размером элемента 6 см по всей поверхности бака, за исключением области дефекта, где проводилось измельчение сетки. Расчёты показали, что наибольшая концентрация напряжений наблюдается у заделки бака около угловатости сварного шва. При этом сама угловатость представляет собой особую область вследствие наличия заострённого гребня. Об этом свидетельствует значительное возрастание эквивалентных напряжений по Мизесу на её гребне при измельчении сетки; при этом возрастание не сопровождается ростом перемещений точек резервуара. Такое поведение характерно для сингулярностей математических моделей, поэтому найденные расчётным способом значения напряжений на гребне угловатости нельзя считать достоверными. Для повышения достоверности результатов в качестве максимального значения напряжений в области дефекта использовалось напряжение на некотором расстоянии от гребня. Кроме того, поскольку максимальные напряжения наблюдаются у осно-

вания резервуара, было принято решение укрупнить конечноэлементную сетку в области, удалённой от сварного шва, а также в области угловатости вдали от заделки. Область, представляющая особый интерес для исследования, подверглась более мелкому разбиению. Адекватность такой конечноэлементной сетки подтверждается тем, что максимальные перемещения точек резервуара практически не меняются при уменьшении конечноэлементной сетки.

Распределение эквивалентных напряжений на поверхности резервуара меняется в зависимости от глубины и ширины дефекта. На рис. 3, 4 показаны распределения эквивалентных напряжений в области шва. Вдали от него НДС бака аналогично НДС бака без дефекта. Из рисунков следует, что возмущение в НДС возникает в области около угловатости.

Для построения модели концентрации напряжений в баке была проведена серия из 80 численных экспериментов, равномерно покрывающая область изменения параметров угловатости $a \in [0,15;0,50]$ м; $f \in [0,01;0,1]$ м.

Были получены значения максимальных эквивалентных напряжений по описанной выше методике и построена табличная зависимость коэффициента концентрации эквивалентных напряжений (ККН) от безразмерных параметров угловатости $\xi = a/\sqrt{Rt}$; $\zeta = f/t$.



3. Модель коэффициента концентрации напряжений

Таблица значений ККН от безразмерных параметров угловатости сварного шва приведена в табл. 1. В первом столбце показаны значения ζ , а в первой строке представлены величины ξ . Данные таблицы были использованы для построения приближённой полиномиальной зависимости.

Таблица 1. Результаты расчетов ККН

ζ	ξ									
	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25	12,50
1,87	1,48	1,76	1,775	1,818	1,859	1,889	1,917	1,946	1,977	2,009
1,68	1,49	1,763	1,783	1,836	1,873	1,905	1,937	1,971	2,002	2,037
1,49	1,50	1,765	1,796	1,851	1,885	1,920	1,956	1,994	2,030	2,066
1,31	1,55	1,769	1,815	1,865	1,903	1,945	1,987	2,030	2,071	2,108
1,12	1,66	1,775	1,836	1,883	1,928	1,973	2,016	2,059	2,116	2,172
0,93	1,75	1,784	1,855	1,904	1,954	2,014	2,066	2,128	2,201	2,273
0,75	1,76	1,800	1,872	1,933	1,995	2,061	2,146	2,234	2,311	2,384
0,56	1,76	1,820	1,899	1,974	2,062	2,176	2,284	2,380	2,468	2,546

При построении приближённой зависимости ККН от безразмерных параметров вмятины использовалась следующая аппроксимация: $K_{\sigma}^T = \sum_{i=0}^4 B_i(\zeta)\xi^i$, где коэффициенты полинома $B_i(\zeta) = \sum_{j=0}^8 b_{ij}\zeta^j$. Для построения этой зависимости проводится двухэтапное применение метода наименьших квадратов (МНК). Сначала производится полиномиальная аппроксимация зависимости $K_{\sigma}^T(\xi)$ при каждом из заданных значений параметра ζ , затем строится приближённая полиномиальная зависимость полученных коэффициентов аппроксимирующих полиномов от ξ . В результате анализа была получена следующая аппроксимация ККН:

$$\begin{aligned}
 K_{\sigma}^T = & (9 - 34,821\zeta + 51,234\zeta^2 + 4,828\zeta^3 - 92,993\zeta^4 + 110,249\zeta^5 - 60,477\zeta^6 + 16,521\zeta^7 - 1,819\zeta^8) + \\
 & + (9 - 68,830\zeta + 224,563\zeta^2 - 408,827\zeta^3 + 454,878\zeta^4 - 317,139\zeta^5 + 135,459\zeta^6 - 32,443\zeta^7 + 3,339\zeta^8)\zeta + \\
 & + (9 - 73,806\zeta + 257,286\zeta^2 - 496,764\zeta^3 + 581,334\zeta^4 - 422,876\zeta^5 + 187,126\zeta^6 - 46,157\zeta^7 + 4,869\zeta^8)\zeta^2 + \\
 & + (9 - 67,802\zeta + 217,804\zeta^2 - 390,588\zeta^3 + 428,486\zeta^4 - 294,909\zeta^5 + 124,513\zeta^6 - 29,515\zeta^7 + 3,010\zeta^8)\zeta^3 + \\
 & + (9 - 68,876\zeta + 224,861\zeta^2 - 409,632\zeta^3 + 456,044\zeta^4 - 318,122\zeta^5 + 135,943\zeta^6 - 32,572\zeta^7 + 3,354\zeta^8)\zeta^4
 \end{aligned}$$

Графический вид зависимости ККН от безразмерных параметров угловатости показан на рис. 5.

Выводы

Предложен метод построения аппроксимирующей модели коэффициента концентрации эквивалентных механических напряжений в стенке вертикального цилиндрического резервуара для хранения нефтепродуктов, сконструированного рулонным методом. Специфическим свойством таких резервуаров является особая форма сварного шва при большой толщине стенки, что приводит к значительной концентрации механических напряжений вблизи шва. Концентрация напряжений происходит в основном в нижней части сварного шва. Коэффициент концентрации напряжений здесь может достигать значений 2,5, что создаёт опасность возникновения трещины в нижних поясах резервуара. Построенная аппроксимирующая модель коэффициента концентрации напряжений вблизи вмятины, моделирующей дефект формы резервуара, позволяет проводить прочностные расчёты резервуара, основываясь на легко измеримых данных о его форме. Предложенная аппроксимирующая модель обладает свойством робастности и позволяет анализировать концентрацию напряжений при параметрах вмятины, значительно отличающихся от экспериментальных точек.

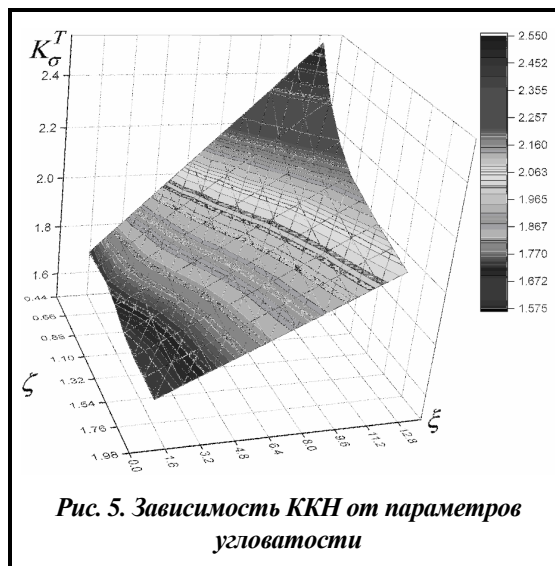


Рис. 5. Зависимость ККН от параметров угловатости

Литература

1. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 580 p.
2. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. М: Машиностроение, 1977. 488 с.
3. Likhman V. V., Kopytskaya L. N., Muratov V. M. Strength of welded storage tanks with shape defects during low-cycle loading. *Strength Materials*. 1995. Vol. 27. Iss.11–12. P.735–740.
4. Алифанов Л. А. Оценка распределений, связанных с локальными дефектами формы стальных резервуаров: Тез. докл. науч.-метод. конф. Норильск, 2001. С. 256–258.

Поступила в редакцию 12.07.2018