

УДК 621.791.052³**А.И. АЙНАБЕКОВ; К.В. АВРАМОВ; У.С. СУЛЕЙМЕНОВ****ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С ВМЯТИНАМИ В СТЕНКЕ**

Исследуется напряженно-деформированное состояние цилиндрических резервуаров с сферическими вмятинами. Для численных расчетов напряженно-деформированного состояния используется ANSYS, который реализует метод конечных элементов. Исследуется зависимость коэффициента концентраций напряжений от параметров вмятин. На основании конечно-элементного анализа выведены аппроксимирующие соотношения для коэффициентов концентрации напряжений, которые могут использоваться при расчетах цилиндрических резервуаров различных размеров с различными вмятинами.

Ключевые слова: цилиндрический резервуар с вмятинами, статическое напряженно-деформируемое состояние, коэффициент концентрации напряжений.

Введение. Вертикальные цилиндрические резервуары являются ответственными конструкциями, разрушения которых могут привести к экологическим катастрофам, значительным материальным затратам и людским жертвам. Несмотря на постоянное совершенствование технологии изготовления и монтажа цилиндрических резервуаров, полный учет в расчетах напряженно-деформируемого состояния (НДС) стенки резервуара эксплуатационных нагрузок и влияние вмятин различной формы не проводился [1, 2]. Вместе с этим зоны вмятин в стенке вертикальных цилиндрических резервуаров с точки зрения концентрации напряжений являются наиболее опасными и малоизученными [3]. Особо следует подчеркнуть, что нет системности в оценке концентрации напряжений в зоне вмятин, а существующие нормативные документы на строительство и эксплуатацию резервуаров для нефти и нефтепродуктов не учитывают особенностей НДС в зоне вмятин в расчетах прочности и долговечности резервуаров, не разработаны методы и методики этих расчетов [4, 5, 6].

В этой работе представлены результаты конечно-элементного анализа НДС цилиндрических резервуа-

ров с сферическими вмятинами. На основании конечно-элементного анализа выведены аппроксимирующие соотношения для коэффициентов концентрации напряжений, которые могут использоваться при расчетах цилиндрических резервуаров различных размеров с различными вмятинами.

Постановка задачи и расчет НДС резервуаров с вмятинами в стенке. Исследуется цилиндрический резервуар со сферической вмятиной. Причины образования вмятины не рассматриваются. Предполагается, что в области вмятины нет остаточных напряжений. Такие модели НДС в области вмятин изучаются в работах [1, 3]. Фотографии вмятин в резервуарах представлены на рис.1. Стенки резервуаров рассматриваются тонкими цилиндрическими оболочками. Поэтому сдвигами пренебрежем. Предполагается, что оболочка изготовлена из изотропного материала, который находится в области упругости. Напряжения и деформации удовлетворяют закону Гука. Перемещения и деформации предполагаются малыми. Поэтому справедливы линейные формулы Коши.

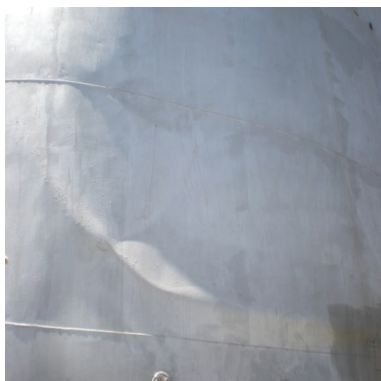
*a**б*

Рисунок 1 – Вмятины в стенках резервуаров: *a* – резервуар объемом 3000 м³ нефтебазы LRP «RTS Oil»;
б – резервуар объемом 2000 м³ нефтебазы LRP «Turkestan Oil Product»

Исследовалось НДС вертикального цилиндрического резервуара объемом 3000 м³, поперечное сечение которого представлено на рис. 2. Радиус такого цилиндрического резервуара составляет 9,5 м. Резервуар имеет дно в виде круглой пластины толщиной 0,095 м. Как следует из рис. 2, резервуар состоит из четырех поясов. Каждый из поясов является участком

оболочки с постоянным поперечным сечением. Предполагается, что резервуар полностью заполнен мазутом. Из визуального осмотра парка резервуаров следует, что вмятины наблюдаются в верхней части резервуаров. Рассмотрим вмятину внизу верхнего четвертого пояса конструкции. Следуя работе [1], для описания сферической вмятины введем два безраз-

мерных параметра:

$$\xi = \frac{r_B}{\sqrt{Rt}}; \quad \zeta = \frac{f}{t},$$

где R – радиус резервуара; t – толщина резервуара в месте вмятины; r_B – радиус вмятины; f – глубина вмятины. Параметр ξ является безразмерным радиусом вмятины, а параметр ζ – безразмерной глубиной вмятины. Эти два безразмерных параметра полностью определяют геометрию сферических вмятин. Для расчетов используется пакет программ ANSYS. Резервуар с вмятиной разбивается на оболочечные конечные элементы. В качестве конечных элементов используется shell 8 nodes 281.

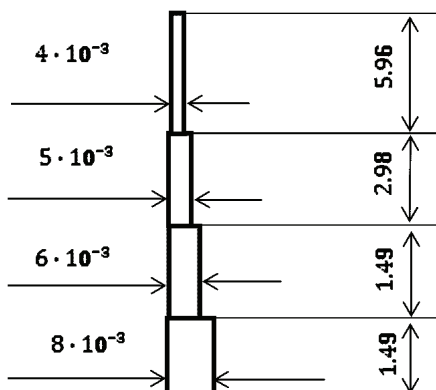


Рисунок 2 – Поперечное сечение вертикального цилиндрического резервуара. Все размеры представлены в метрах

Рассмотрим результаты моделирования НДС в резервуарах. На рис. 3 представлено поле эквивалентных напряжений в резервуаре с вмятиной, которая имеет безразмерные параметры $\xi = 5$; $\zeta = 10$. На этом рисунке представлено значительное возрастание величин эквивалентных напряжений в области вмятины. Подчеркнем, что вмятина является концентратором напряжений. Поле напряжений вдали от вмятин имеет преобладающую только окружную составляющую тензора напряжений. Все остальные компоненты этого тензора близки к нулю. Несмотря на переменность

поперечного сечения, окружные напряжения могут быть вычислены по формуле, которая справедлива для резервуаров с постоянным поперечным сечением [7]:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\gamma(d-x)R}{t}, \quad (1)$$

где γ – удельный вес жидкости; d – высота заполнения резервуара мазутом; x – продольная координата резервуара, которая отсчитывается от дна. Подчеркнем, что при расчете резервуара с переменным поперечным сечением в (1) используется значение толщины резервуара в рассматриваемой точке конструкции.

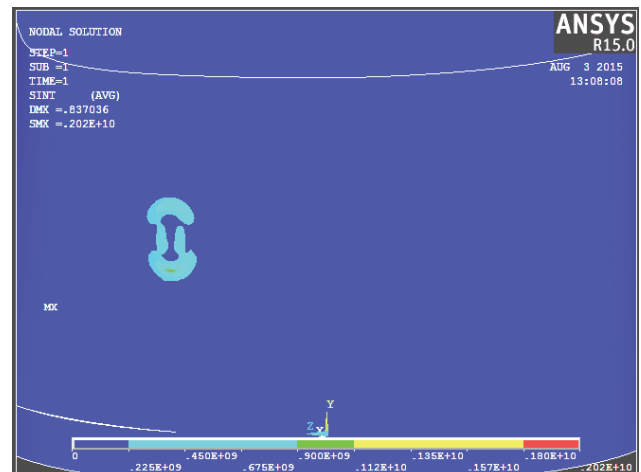


Рисунок 3 – Поле эквивалентных напряжений в резервуаре с параметрами вмятины $\xi = 5$; $\zeta = 10$

На рис. 4 представлено поле эквивалентных напряжений в области вмятины. Как показали проведенные расчеты, наибольшие напряжения наблюдаются в нижней части вмятины. Дело в том, что в нижней части вмятины больше величины внутреннего давления мазута. При больших значениях относительной глубины вмятины ζ максимальные напряжения наблюдаются только на нижней границе вмятины, а при малых значениях ζ область максимальных напряжений углубляется вверх по вмятине.

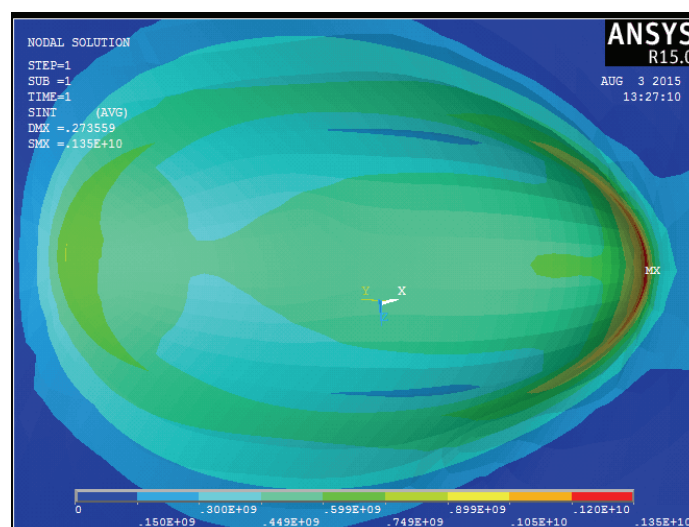


Рисунок 4 – Поле эквивалентных напряжений в области вмятины с параметрами $\xi = 9$; $\zeta = 10$

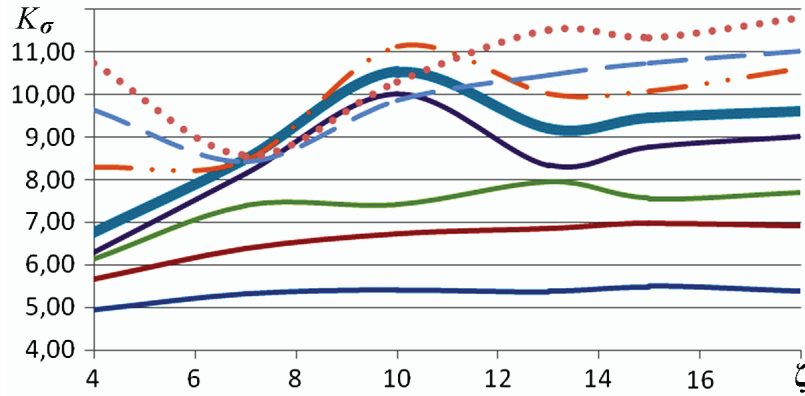


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений от безразмерной глубины вмятины ζ при следующих значениях безразмерного радиуса вмятины $\xi = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9$

Численный анализ коэффициента концентрации напряжений. Расчет НДС резервуара проводился для различных сферических вмятин, которые различались значениями безразмерных параметров ξ и ζ . Для каждой вмятины определялся коэффициент концентрации напряжений (ККН) K_σ . Результаты расчета ККН представлены на рис. 5. На этом графике представлена зависимость K_σ от безразмерной глубины вмятины ζ . Подчеркнем, что расчеты проводились для разных значений безразмерного радиуса вмятины ξ . Расчеты, представленные на рис. 5, проводились для следующих значений безразмерного радиуса вмятины $\xi = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9$.

Кривые, представленные на рис. 5, разделим на две группы. Первая группа кривых отвечает малым и средним значениям радиусов вмятин. Эти кривые не пересекаются (рис. 5). Они соответствуют следующим значениям параметра $\xi = 2; 3; 4; 5; 6$. Вторая группа кривых соответствует большим значениям радиуса вмятины $\xi = 7; 8; 9$. Эти кривые пересекаются.

Теперь постоим аппроксимацию для всех кривых, представленных на рис. 5. Воспользуемся гипотезой из [1], о том, что коэффициент концентрации напряжений в зоне дефекта определяется двумя параметрами ξ и ζ :

$$K_\sigma = \Phi(\zeta; \xi). \quad (2)$$

Графики, представленные на рис.5, отвечают разным значениям $\xi = \xi_i; i = 1, 2, \dots$. Для каждого значения ξ_i построим свой аппроксимирующий полином ККН:

$$\hat{K}_\sigma^{(i)} = B_0^{(i)} + B_1^{(i)}\zeta + B_2^{(i)}\zeta^2 + \dots + B_N^{(i)}\zeta^N.$$

По значениям коэффициентов $B_0^{(i)}$ при $\xi_i; i = 1, 2, \dots$ построим аппроксимирующий полином этих коэффициентов $A_0(\xi)$. Аналогичные аппроксимирующие полиномы построим для коэффициентов $B_1^{(i)}; B_2^{(i)}; \dots$. В результате получим набор аппроксимирующих полиномов $A_1(\xi); A_2(\xi); \dots$. Теперь ККН K_σ можно приближенно представить в следующем виде:

$$\hat{K}_\sigma = A_0(\xi) + A_1(\xi)\zeta + A_2(\xi)\zeta^2 + A_3(\xi)\zeta^3 + \dots + A_N(\xi)\zeta^N, \quad (3)$$

где

$$A_i(\xi) = C_i^{(0)} + C_i^{(1)}\xi + C_i^{(2)}\xi^2 + \dots + C_i^{(M)}\xi^M. \quad (4)$$

Предложенная методика была реализована в среде Maple. Для построения полиномов использовался метод наименьших квадратов. Численные расчеты показали, что для достаточно точной аппроксимации ККН в разложении (3) необходимо взять полином четвертой степени ($N = 4$). Для аппроксимации коэффициентов полинома (3) $A_i(\xi)$ необходимо взять полиномы 8 степени. Эти полиномы принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} A_0(\xi) &= -2932.819593 + 4739.787673\xi - \\ &- 3088.600506\xi^2 + 1051.449043\xi^3 - 199.9660076\xi^4 + \\ &+ 20.49071825\xi^5 - 0.8834190214\xi^6 - \\ &- 0.1057641244 \cdot 10^{-1}\xi^7 + 0.1534902519 \cdot 10^{-2}\xi^8; \\ A_1(\xi) &= 1547.740613 - 2491.860794\xi + \\ &+ 1618.964794\xi^2 - 549.1935107\xi^3 + 104.0659131\xi^4 - \\ &- 10.63271499\xi^5 + 0.4588122494\xi^6 + \\ &+ 0.5210563682 \cdot 10^{-2}\xi^7 - 0.780204147 \cdot 10^{-3}\xi^8; \\ A_2(\xi) &= -274.7108192 + 441.5732885\xi - \\ &- 286.2826226\xi^2 + 96.87859904\xi^3 - 18.31070278\xi^4 + \\ &+ 1.867058413\xi^5 - 0.0806446753\xi^6 - \\ &- 0.875201980 \cdot 10^{-3}\xi^7 + 0.134717180 \cdot 10^{-3}\xi^8; \\ A_3(\xi) &= 19.14967549 - 30.75832151\xi + \\ &+ 19.91979618\xi^2 - 6.731902434\xi^3 + 1.270493320\xi^4 - \\ &- 0.129382936\xi^5 + 0.5590475921 \cdot 10^{-2}\xi^6 + \\ &+ 0.591138894 \cdot 10^{-4}\xi^7 - 0.924321462 \cdot 10^{-5}\xi^8; \\ A_4(\xi) &= -0.4557765815 + 0.7317841\xi - \\ &- 0.47363243\xi^2 + 0.159937905\xi^3 - 0.301573987 \cdot 10^{-1}\xi^4 + \\ &+ 0.306873918 \cdot 10^{-2}\xi^5 - 0.132635084 \cdot 10^{-3}\xi^6 - \\ &- 0.137743733 \cdot 10^{-5}\xi^7 + 2.17761112 \cdot 10^{-7}\xi^8. \end{aligned}$$

Полученный полином (3) может использоваться для приближенных расчетов коэффициентов концентрации напряжений других резервуаров с другими размерами вмятин.

Заключение. Проведенное конечно-элементное моделирование показало, что в области вмятины на-

блюдается значительное увеличение эквивалентных напряжений. Наибольшее увеличение эквивалентных напряжений наблюдается в нижней части вмятины. Это объясняется тем, что в этой части значительно больше величина внутреннего давления. Для инженерных расчетов эквивалентных напряжений достаточно знать коэффициент концентрации напряжений в области вмятины. Он может быть определен на основании аппроксимационных полиномов, опубликованных в этой статье.

Авторы статьи выражают благодарность Г. Ю. Мартыненко и О. К. Морачковскому за полезные обсуждения проблем, рассмотренных в этой статье. Работа выполнена согласно договора на выполнение научно-исследовательских работ в рамках государственного заказа № 416 на выполнение НИР по теме «Исследование прочности и долговечности вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения мазута на ТЭЦ с вмятинами в стенке и разработка методики нормирования их ресурса и геометрических размеров дефектов» с Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Список литературы: 1. Лихман В.В. Концентрация напряжений в резервуарах с локальными несовершенствами формы / В.В. Лихман, Л.Н. Копысцкая, В.М. Муратов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1992. – № 6. – С. 22-24. 2. Кузнецов В.В. Проблемы отечественного резервуаростроения / В.В. Кузнецов, Г.П. Кандаков // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 5. – С. 17-19. 3. Прохоров В.А. Оценка параметров риска эксплуатации резервуаров для хранения нефтепродуктов в условиях севера / В.А. Прохоров: дисс. докт.

техн. наук. – Якутск, 1999. – 300 с. 4. СН РК 3.05-24-2004. Инструкция по проектированию, изготовлению и монтажу вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – Введ. 2005-01-01. – Астана: 2004. – 78 с. 5. ВБН В.2.2-58.2-94 Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов с давлением насыщенных паров не выше 93,3 кПа. – К.: Госкомнефтегаз, 1994. – 98 с. 6. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – Введ. 2003.06.19. – М.: Госгортехнадзор России, 2002. – 83 с. 7. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П.Тимошенко, С.Войновский-Кригер. Пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Физматгиз, 1963. – 635 с.

Bibliography (transliterated): 1. Lihman V.V. Koncentraciya napryazhenij v rezervuarah s lokal'nymi nesovershenstvami formy. V.V. Lihman, L.N. Kopytskaya, V.M. Muratov. Himicheskoe i neftyanoe mashinostroenie. 1992. No 6. 22-24. Print. 2. Kuznecov V.V. Problemy otechestvennogo rezervuarostroeniya. V.V. Kuznecov, G.P. Kandakov. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2005. No 5. 17-19. Print. 3. Prohorov V.A. Ocenka parametrov riska ekspluatatsii rezervuarov dlya hraneniya nefteproduktov v usloviyah severa. V.A. Prohorov: diss. dokt. tehn. nauk. Yakutsk, 1999. 300. Print. 4. SN RK 3.05-24-2004. Instrukciya po proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu vertikal'nyh cilindricheskikh stal'nyh rezervuarov dlya nefii i nefteproduktov. Vved. 2005-01-01. Astana: 2004. 78. Print. 5. VBN V.2.2-58.2-94 Rezervuary vertikal'nye stal'nye dlya hraneniya nefii i nefteproduktov s davleniem nasyschennyh parov ne vyshe 93,3 kPa. Kyuyiv: Goskomneftegaz, 1994. 98. Print. 6. PB 03-605-03. Pravila ustrojstva vertikal'nyh cilindricheskikh stal'nyh rezervuarov dlya nefii i nefteproduktov. Vved. 2003.06.19. Moscow: Gosgortehnadzor Rossii, 2002. 83. Print. 7. Timoshenko S.P. Plastinki i obolochki. S.P. Timoshenko, S. Vojnovskij-Kruger. Per. s angl. pod red. G.S. Shapiro. Moscow: Fizmatgiz, 1963. 635. Print.

Поступила (received) 20.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Айнабеков Алпысбай Иманкулович – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика» Южно-Казахстанского государственного университета имени М. Ауэзова, г. Шымкент; тел.: 8(7252) 30-09-70; e-mail: dinamika-nauka@rambler.ru

Ainabekov Alpysbay Imankulovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of "Mechanics" South Kazakhstan State University named after M. Auezov, Shymkent ; tel.: 8(7252) 09.30.70 ; e-mail: dinamika-nauka@rambler.ru

Аврамов Константин Витальевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИПМаш НАН Украины, г. Харьков; тел.: 068 605 74 21; e-mail: kvavr@kharkov.ua

Avramov Konstantin Vitalievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, leading Researcher of IPMach NAS of Ukraine, Kharkov; tel.: 068 605 74 21; e-mail: kvavr@kharkov.ua

Судейменов Уланбаатор Сейтказиевич – доктор технических наук, и.о. профессора кафедры «Архитектура и дизайн» Южно-Казахстанского государственного университета имени М. Ауэзова, г. Шымкент; тел.: 8(7252) 30-02-53; e-mail: dinamika-nauka@rambler.ru

Suleimenov Ulaanbaator Seytkazievich – Doctor of Technical Sciences, acting Professor of Department of «Architecture and Design» South Kazakhstan State University named after M. Auezov, Shymkent ; tel.: 8 (7252) 02.30.53; e-mail: dinamika-nauka@rambler.ru