

¹ А. И. Айнабеков, д-р техн. наук¹ У. С. Сулейменов, д-р техн. наук² К. В. Аврамов, д-р техн. наук¹ М. А. Камбаров, канд. техн. наук¹ Х. А. Абшенов, канд. техн. наук¹ Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова,

г. Шимкент,

e-mail: dinamika-nauka@rambler.ru)

² Институт проблем машиностроения

им. А. Н. Подгорного НАН Украины,

г. Харьков, e-mail: kvavr@kharkov.ua

Ключові слова: криволинейная трещина, температурное поле, концевые зоны пластических деформаций, температурные напряжения.

УДК 621.791.052

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С ВМЯТИНАМИ

Розглядаються модельні конструкції для експериментального дослідження напружено-деформованого стану резервуарів із вм'ятинами. Наведено результати експериментальних досліджень напружено-деформованого стану у зоні вм'ятини. Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану використовується метод скінченних елементів. Досліджується залежність коефіцієнта концентрації напружень від параметрів сферичної вм'ятини.

Введение

Вертикальные цилиндрические резервуары – чрезвычайно ответственные конструкции. Их поломка может привести к экологическим катастрофам, людским жертвам и значительным материальным затратам [1]. Несмотря на постоянное совершенствование технологии изготовления и монтажа цилиндрических резервуаров, в этих конструкциях встречаются геометрические несовершенства формы, которые оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние корпуса резервуара и приводят к значительной местной концентрации напряжений. Наиболее опасными участками вертикальных цилиндрических резервуаров являются зоны вмятин, которые плохо исследованы [2, 3]. Подчеркнем, что существующие нормативные документы на строительство и эксплуатацию резервуаров для нефти и нефтепродуктов не учитывают особенностей напряженно-деформированного состояния в зоне вмятин [4–6].

В настоящей работе обсуждаются результаты экспериментальных исследований особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны вмятин в стенке цилиндрического резервуара. Представлены результаты численного моделирования НДС вертикальных цилиндрических резервуаров со сферическими вмятинами. Численно исследуется зависимость коэффициента концентрации напряжений от размеров сферической вмятины.

1. Метод экспериментального исследования

В статье рассматривается прочность вертикального цилиндрического резервуара. Стенки резервуара представляют собой тонкостенную цилиндрическую оболочку, а его дном является круглая пластинка. Поскольку резервуар заполнен мазутом, то на его стенки действует статическое внутреннее давление. Предполагается, что в верхней части резервуара находится вмятина, которая является концентратором напряжений. Предмет нашего исследования – статическое напряженно-деформируемое состояние (НДС) резервуара. Экспериментально исследовать такие большие резервуары часто затруднительно. В этом случае изготавливают модельные конструкции. Известно, что достоверность экспериментальных данных и их адекватность реальным явлениям во многом зависит от правильного выбора масштаба модели. В связи с этим, основываясь на рекомендациях [7, 8] и учитывая особенности работы оболочечных конструкций, техническую возможность изготовления модели, масштаб моделирования принят 1:10 к натурной конструкции типового вертикального цилиндрического резервуара объемом 5000 м³. Тонкостенность корпуса резервуара и технологические ограничения в масштабах основной конструкции не позволяют достичь полного геометрического подобия между моделью и натурным объектом. В связи с этим геометрическое подобие конструкции было

заменено аффинным (двухмасштабным) соответствием модели и конструкции. Габаритные размеры моделей составляют 1200×1000×160 мм. Стенка модели изготовлена из листов стали марки ВстЗсп толщиной 1 мм. Она свальцована под радиус 2280 мм. Общий вид модели стенки резервуара с вмятинами приведен на рис. 1. На фрагменте стенки модели резервуара сделаны вмятины сферической и эллипсовидной форм. Основные геометрические размеры вмятин представлены в таблице. Вмятины на модели М1 производились смятием стенки специальным штампами, а на модели М2 – подбором способа и схемы сварки концевых частей листа стенки. Лицевую сторону моделей стенок резервуаров обозначим через поверхность А, а тыльную сторону – поверхностью Б.

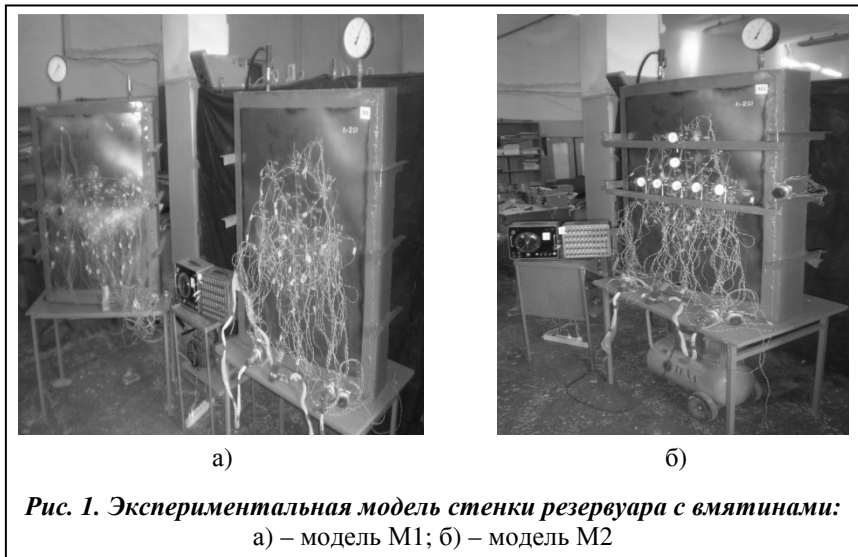


Рис. 1. Экспериментальная модель стенки резервуара с вмятинами: а) – модель М1; б) – модель М2

Форма и геометрические размеры вмятин на стенке модели

Модель	Поверхность модели	Форма вмятины	Радиус вмятины, мм		Глубина вмятины, мм	
			малый	большой	начальная	установившаяся
М 1	А	сферическая	252	□	4,32	3,68
	Б	эллипсовидная	185	820	3,53	2,71
М 2	А	эллипсовидная	175	830	4,86	3,73
	Б	эллипсовидная	190	640	2,84	1,84

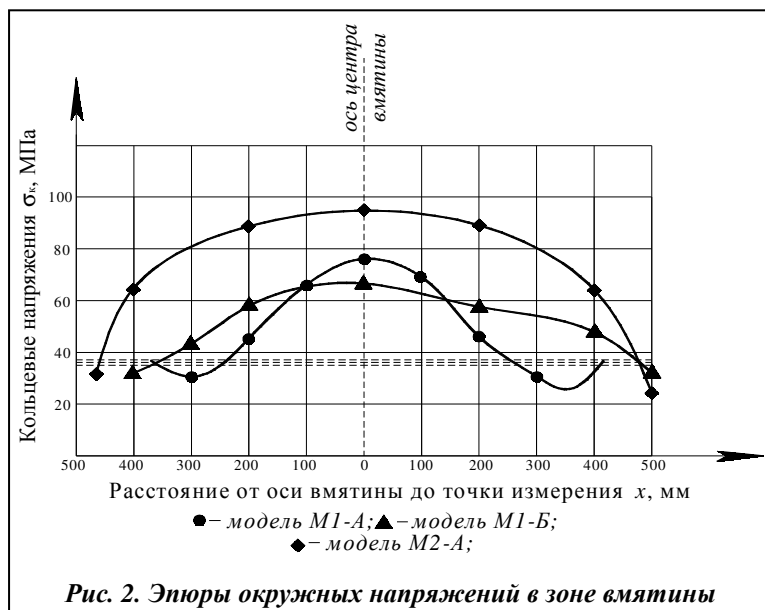
Нагрузка от внутреннего давления жидкости в резервуаре имитировалась воздухом, нагнетаемым на поверхность оболочки компрессором; НДС стенки модели в зоне вмятин определялось тензометрическим измерением относительных деформации. При выявлении явления «выщелкивания» (хлопка) тонкостенной оболочки нагружение останавливалось и снимались показания приборов. Оценка НДС вмятины в модели производилась тензометрическим методом, который предполагает измерения относительных деформаций. Тензорезисторы располагались в зоне дефекта таким образом, чтобы измерить окружные и продольные напряжения по контуру вмятины, а также в местах максимального выгиба и резкого изменения формы стенки. Для определения номинальных напряжений в стенке модели тензорезисторы располагались с учетом краевого эффекта в зоне соединения стенки с корпусом модели.

Коэффициент концентрации напряжений определялся как отношение напряжений в характерных точках зоны вмятины к напряжениям вдали от вмятины.

2. Результаты экспериментального анализа

Экспериментально определялись окружные напряжения вдали от вмятин. Рассмотрим результаты тензометрирования модели М1. При внешнем давлении 10 кПа окружные напряжения на сторонах А и Б составили 11,8 и 11,92 МПа соответственно, а при внешнем давлении 30 кПа – 53,61 и 35,36 МПа. В модели М2 при внешнем давлении 10 кПа окружные напряжения на сторонах А составили 12,25 МПа, при внешнем давлении 30 кПа – 34,91 МПа.

Результаты измерений окружных напряжений в характерных точках зоны вмятин представлены на рис. 2. Из этого рисунка следует, что местный дефект в виде вмятины приводит к изменению поля напряжений и к локальному возмущению напряжений в зоне вмятины.



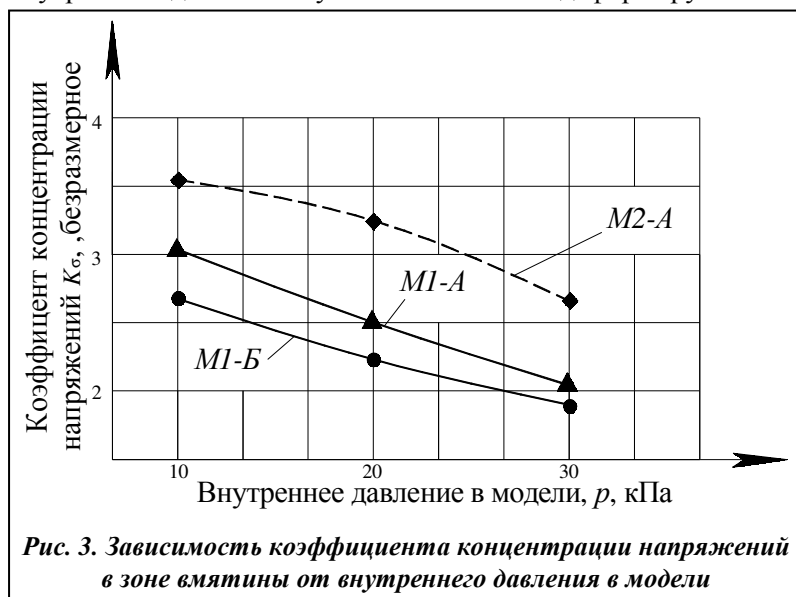
вания» стенки в зоне вмятины до достижения максимального уровня давления не наблюдалось.

В модели M2 при достижении внутреннего давления в 26 кПа наблюдался эффект «выщелкивания» стенки в зоне вмятины, который сопровождался хлопком и резким выгибом центральной зоны вмятины наружу. Момент времени выщелкивания стенки в зоне вмятины сопровождался переходом участка максимальных напряжений и деформации к боковым контурным точкам, с резким увеличением напряжений в граничных зонах вмятины. В середине дефекта хлопок сопровождался мгновенной разгрузкой в связи с уменьшением глубины вмятины в результате ее выгиба.

Установлено, что с ростом внешнего давления коэффициенты концентрации напряжений в центральной зоне вмятины уменьшились: в модели M1 на поверхности А – на 30%, а на поверхности Б – на 31%; в модели M2 на стороне А – 26%. Это объясняется выпрямлением вмятин при увеличении внутреннего давления в модели.

Экспериментальные зависимости коэффициента концентрации напряжений от внутреннего давления представлены на рис. 3.

Замечено, что в моделях с характерными выгибами границ вмятин коэффициенты концентрации напряжений в зоне берегов вмятины намного больше, чем в моделях, где границы вмятин плавно переходят в основную стенку модели. При плавных выгибах границ вмятин в процессе нагружения внутренним давлением указанная область деформируется совместно с зоной стенки модели по



Обнаружено, что в наружной приграничной области вмятины имеется зона разгрузки, где местные напряжения ниже номинальных. Так, в модели M1 на поверхности А окружные напряжения уменьшились в 1,2, а на поверхности Б в 1,06 раза. В модели M2 на поверхности А это снижение составило 1,15. Снижение напряжений на наружных зонах границы вмятины, вероятно, связано с распирающим влиянием согнутой части вмятины.

В моделях M1 и M2 на поверхностях Б наблюдался плавный переход контура вмятины к поверхности стенки, зона максимальных напряжений на начальной стадии нагружения находится в середине вмятины. Эффекта «защелкивания» стенки в зоне вмятины до достижения максимального уровня давления не наблюдалось.

наружным границам вмятины, что приводит к более сглаженному виду эпюры напряжений в этой зоне.

3. Численное моделирование НДС в резервуарах

Экспериментальные исследования проводились на модельных системах. Рассматривался участок резервуара под действием постоянного внутреннего давления. В численных исследованиях моделировалось НДС в реальных резервуарах под действием нагрузок, которые отражают условия их эксплуатации. Рассмотрим цилиндрический резервуар со сферической вмятиной.

Предполагается, что в области вмятины нет остаточных напряжений. 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.

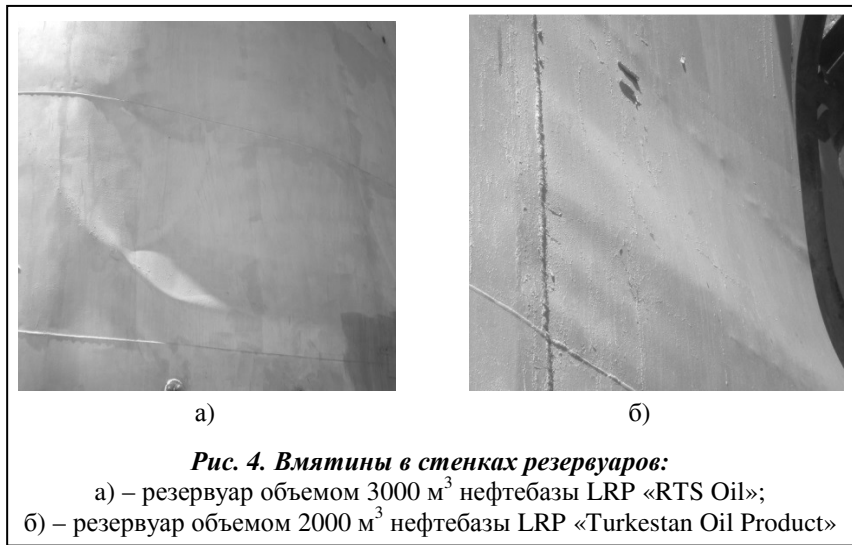


Рис. 4. Вмятины в стенках резервуаров:

- а) – 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, поперечное сечение которого представлено на рис. 5. Радиус такого цилиндрического резервуара составляет 9.5 м. Резервуар имеет дно в виде круглой пластины толщиной 0.095 м. Как следует из рис.5, 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 безразмерных параметра

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

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.

Рассмотрим результаты моделирования НДС в резервуарах. На рис. 6 представлено поле эквивалентных напряжений в резервуаре с вмятиной, которая имеет безразмерные параметры $\xi = 5$, $\zeta = 10$. На этом рисунке показано значительное возрастание величин эквивалентных напряжений в области вмятины. В поле напряжений вдали от вмятин преобладает только окружная составляющая 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]

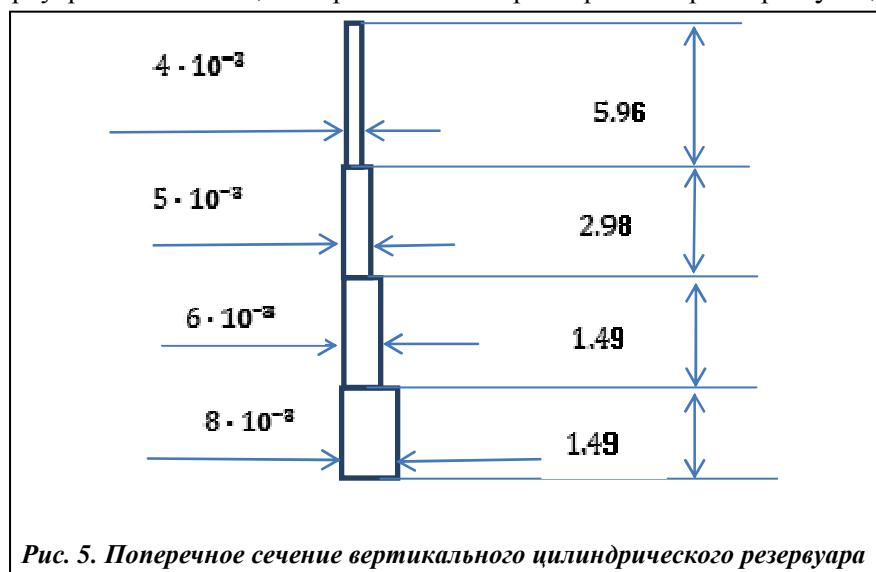


Рис. 5. Поперечное сечение вертикального цилиндрического резервуара

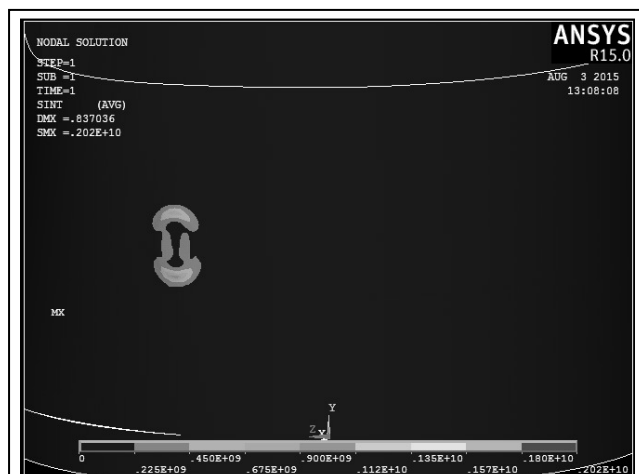


Рис. 6. Поле эквивалентных напряжений в резервуаре с параметрами вмятины $\xi = 5, \zeta = 10$

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

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 формуле (1) используется значение толщины резервуара в рассматриваемой точке конструкции.

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. 7. На этом графике показана зависимость K_{σ} от безразмер-

ной глубины вмятины ζ . Подчеркнем, что параметр K_{σ} дан для разных значений безразмерного радиуса вмятины $\xi = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9$.

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

Заключение

Комплексными экспериментальными исследованиями моделей резервуара с вмятинами установлены особенности распределения напряжений, их концентрация в зоне вмятины, а также зависимость напряжений от геометрических размеров и формы вмятины. Во вмятинах значительных геометрических размеров установлен эффект «выщелкивания» стенки модели, в результате которого происходит перераспределение напряжений в зоне вмятины.

Полученные результаты исследования позволяют более полно и достоверно оценить напряженное состояние стенки резервуара в зоне вмятины, обосновать необходимость учета концентрации напряжений в зоне вмятин, разработки методики расчета прочности и долговечности резервуаров для

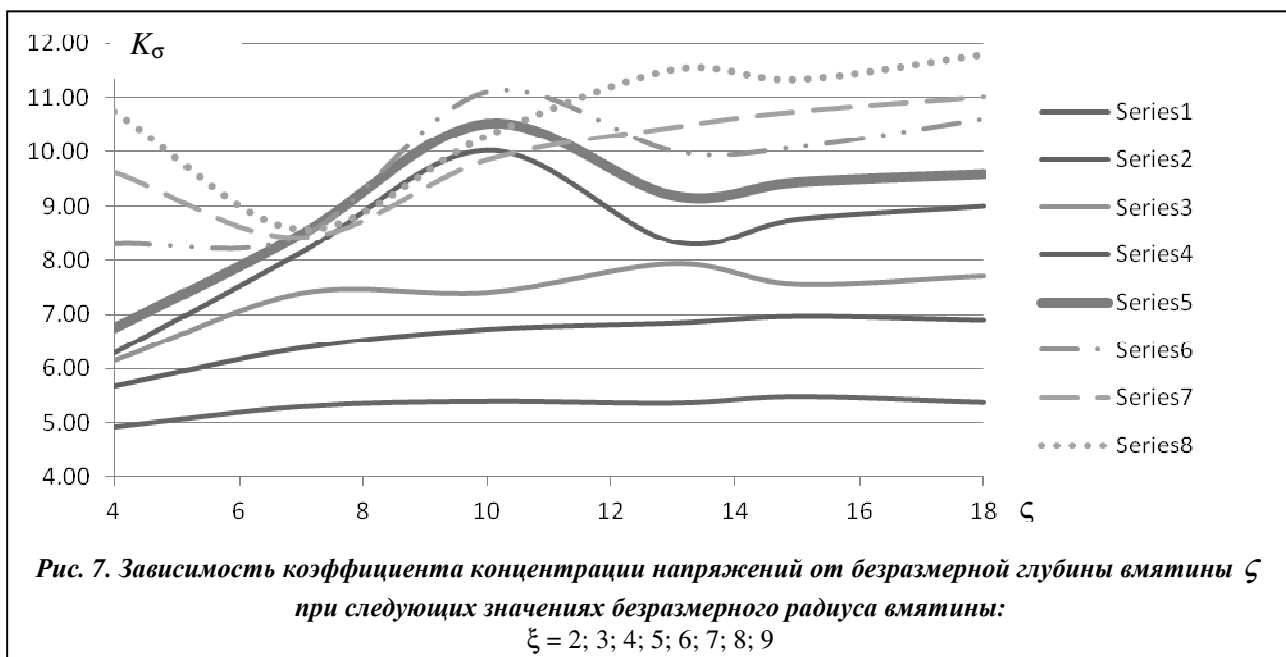


Рис. 7. Зависимость коэффициента концентрации напряжений от безразмерной глубины вмятины ζ при следующих значениях безразмерного радиуса вмятины: $\xi = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9$

вмятин, а также создают предпосылки по нормированию предельных геометрических размеров вмятин, значительно дополняют ранее известные данные о напряженно-деформированном состоянии стенки резервуара в зоне вмятины и дают возможность совершенствования норм проектирования.

Работа выполнена согласно договору в рамках государственного заказа по программе «Грантовое финансирование научных исследований» с Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

1. *Лихман, В. В.* Концентрация напряжений в резервуарах с локальными несовершенствами формы / В. В. Лихман, Л. Н. Копысицкая, В. М. Муратов // Хим. и нефт. машиностроение. – 1992. – № 6. – С. 22–24.
2. *Кузнецов, В. В.* Проблемы отечественного резервуаростроения / В. В. Кузнецов, Г. П. Кандаков // Пром. и граждан. стр-во. – 2005. – № 5. – С. 17–19.
3. *Прохоров, В. А.* Оценка параметров риска эксплуатации резервуаров для хранения нефтепродуктов в условиях севера : Дис. ... д-ра. техн. наук / В. А. Прохоров. – 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. – Киев: 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. *Питлюк, Д. А.* Испытания строительных конструкций на моделях / Д. А. Питлюк. – Л.: Стройиздат, 1971. – 160 с.
8. *Моссаковский, В. И.* Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек / В. И. Моссаковский, Л. И. Маневич, А. М. Мильцын. – Киев: Наук. думка, 1977. – 138 с.

Поступила в редакцию 01.08.15