

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ (технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2019-3-96-101

УДК 621.642.39.03

Напряженно-деформированное состояние резервуара на грунтовом основании с локальной неоднородностью

А. А. Грученкова*, А. А. Тарасенко

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

*e-mail: alesya2010-11@yandex.ru

Аннотация. В работе численно исследовано напряженно-деформированное состояние резервуара при появлении локальной области неоднородности в грунтовом основании. Установлены размеры зоны влияния области неоднородности основания на работу стенки резервуара. Сформулированы предложения по корректировке требований российской нормативно-технической документации.

Ключевые слова: вертикальный стальной резервуар; напряженно-деформированное состояние; область неоднородности; грунтовое основание; метод конечных элементов

The stress-strain state of the tank on soil foundation with local inhomogeneity

Alesya A. Gruchenkova*, Aleksandr A. Tarasenko

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*e-mail: alesya2010-11@yandex.ru

Abstract. This article aims to numerically investigate the stress-strain state of the tank at the appearance a local area of inhomogeneity in the soil foundation. We have established the size of the zone of influence of the inhomogeneity area of the base on the work of the tank wall. Also, we have formulated proposals to adjust the requirements of the Russian regulatory and technical documentation.

Key words: vertical steel tank; stress-strain state; area of inhomogeneity; soil foundation; finite element method

Введение

Вертикальные цилиндрические стальные резервуары (РВС) являются одним из наиболее ответственных объектов магистрального транспорта нефти. Мировой опыт эксплуатации РВС, исследования отечественных [1–4] и зарубежных ученых [5–8] доказывают, что одной из главных причин аварий резервуаров является неравномерная осадка их оснований. В последние годы районы строительства и эксплуатации РВС перемещаются в регионы с преобладанием слабонесущих, переувлажненных и многолетнемерзлых грунтов. При этом участились случаи возникновения аварийных ситуаций, вызванных деформациями металлоконструкций резервуара из-за наличия или возникновения локальных неоднородностей грунтового основания [9].

При наличии области неоднородности в основании резервуара отмечается развитие неравномерной осадки, в свою очередь, приводящей к увеличению уровня напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных частей РВС. Исследованию НДС резервуара при неравномерных осадках основания посвящены труды [4, 10–13]. Однако существующие аналитические зависимости не позволяют оценить НДС резервуара при неравномерной осадке основания с достаточной точностью. Отличия в конструкции и применяемых материалах препятствуют использованию результатов исследований зарубежных ученых и требований западных стандартов для оценки НДС резервуаров отечественных типоразмеров. Требования действующих российских^{1, 2} и зарубежных нормативных документов^{3, 4, 5} к назначению предельной величины локальной осадки днища представлены в таблице.

Так, авторами была поставлена задача исследовать напряженно-деформированное состояние резервуара РВС-20000 при наличии области неоднородности в грунтовом основании.

Требования нормативно-технической документации в части определения допустимых величин локальных осадок днища РВС

Источник	Критерий оценки	
РБ Серия 03-69 ГОСТ 31385-2016	$f \leq 0,0308R$, мм	
API 653	Центральная часть днища	Вблизи краевой зоны
	$B_B = 0,37R$	$B_\alpha = B_e - (B_e - B_{ew}) \cdot \sin \alpha$
BS 2654 (Великобритания) Eurocode EN 14015-2004	Величина осадки назначается проектной организацией	

¹ ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – Введ. 2017-03-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 96 с.

² РБ Серия 03. Выпуск 69. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – М.: ЗАО «НТИЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с.

³ API 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. Fourth Edition. – Washington, 2009. – 166 p.

⁴ BS 2654. Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with butt-welded shells for the petroleum industry. – 1989. – 103 p.

⁵ EN 14015-2004. Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above. – 2004. – 236 p.

Объект и методы исследования

Для решения поставленной задачи численным методом в программном комплексе (ПК) ANSYS [14] была разработана конечно-элементная модель резервуара РВС-20000 в соответствии с реальными геометрическими размерами. Предлагаемая модель учитывает окрайку, полотнище днища, стенку, кольцо жесткости и стационарную крышу. В разработанной конечно-элементной модели одновременно были приложены эксплуатационные нагрузки согласно действующим нормативным документам: вес хранимой жидкости (плотность 865 кг/м^3) при максимальном уровне налива (10,92 м), избыточное давление (2 кПа), вес стационарного оборудования крыши (49 кН). Расчеты были выполнены для марки резервуарной стали 09Г2С.

Для проверки достоверности предлагаемой численной модели была решена верификационная задача: произведен расчет задачи изгиба днища в осесимметричной постановке численным методом, реализуемым в ПК ANSYS, и с использованием широко известного аналитического решения (1), затем было произведено сравнение полученных результатов.

Аналитическое решение задачи изгиба днища РВС С. П. Тимошенко приводит в работе [15]. Дифференциальное уравнение изгиба днища имеет вид

$$D_2 \frac{d^4 w_2}{dx^4} + kw(x) = p_0, \quad (1)$$

где D — цилиндрическая изгибная жесткость днища; p_0 — давление столба жидкости; k — коэффициент постели грунтового основания; w — прогиб днища.

Экспериментальная часть

Для моделирования осадки днища, вызванной областью неоднородности основания, предлагается использовать модель грунтового основания Пастернака с двумя коэффициентами постели.

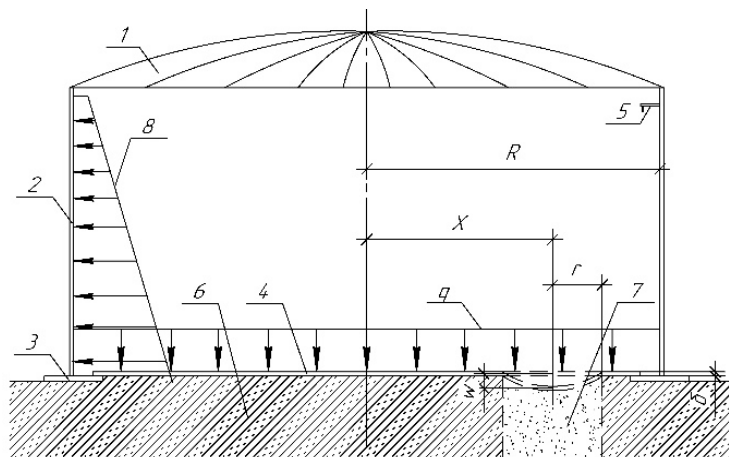


Рисунок. **Расчетная схема:** 1 — стационарная крыша; 2 — стенка; 3 — окрайка; 4 — центральная часть днища; 5 — кольцо жесткости; 6 — грунтовое основание с коэффициентом постели k_2 ; 7 — область неоднородности с коэффициентом постели k_1 ; 8 — гидростатическая нагрузка на стенку; q — равномерно распределенная гидростатическая нагрузка; R — радиус резервуара; r — радиус области неоднородности; X — расстояние от центра днища до центра области неоднородности; w — прогиб днища; δ — толщина днища

При моделировании локальной осадки дна толщиной δ для области неоднородности основания радиусом r задавался переменный коэффициент постели k_1 , для основания РВС за пределами области неоднородности был задан коэффициент постели k_2 , равный $2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^3$. Для расчетов принимались следующие радиальные размеры зоны неоднородности в основании $r = 1, 2, 4, 6, 8, 10 \text{ м}$. Расчеты выполнялись при различных вариантах расположения области неоднородности относительно стенки резервуара (координата X). Предлагаемая расчетная схема представлена на рисунке.

Результаты

Различие результатов аналитического и численного расчетов для задачи верификации модели составило не более 3 %, что подтвердило достоверность разработанной конечно-элементной модели резервуара РВС-20000.

По результатам численного эксперимента были получены эпюры распределения напряжений в днище при различных величинах локальной осадки. На основании полученных результатов были установлены зависимости действующих эквивалентных напряжений в днище РВС от величины осадки, вызванной областью неоднородности грунтового основания, для днищ толщиной 6 (рис. 2) и 9 мм.

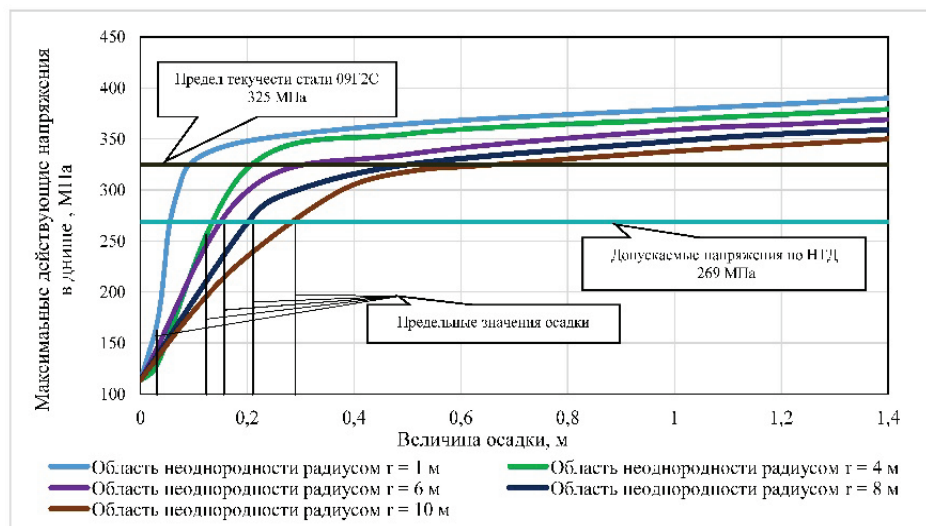


Рис. 2. Зависимости максимальных действующих эквивалентных напряжений в днище толщиной 6 мм от величины осадки для заданных радиусов области неоднородности

При варьировании расстояния от центра днища резервуара до центра области неоднородности (координата X) для всех значений r были определены величины напряжений, возникающих в стенке резервуара, при предельных значениях осадок, установленных из рисунка 2.

По результатам обработки вычислений, полученных на основе разработанной конечно-элементной модели резервуара, были установлены зависимости максимальных действующих напряжений в стенке резервуара от координаты X (рис. 3).

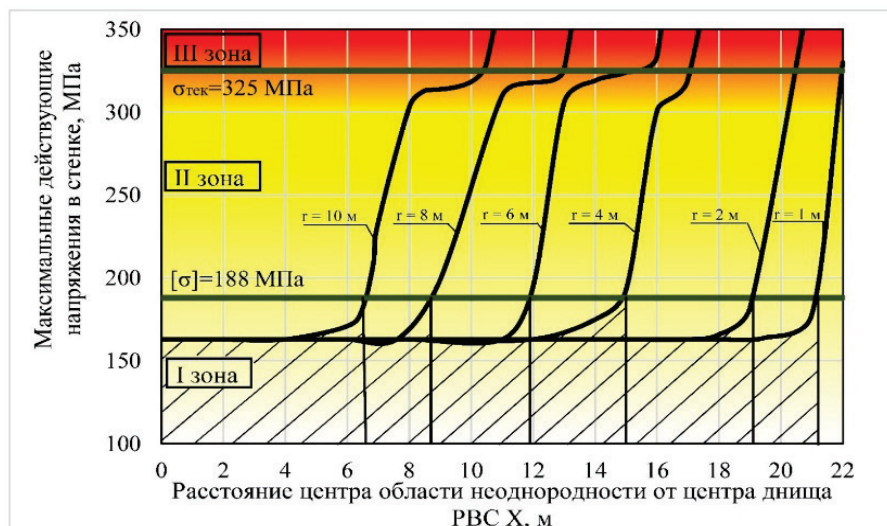


Рис. 3. Зависимости максимальных действующих эквивалентных напряжений в стенке резервуара от положения области неоднородности относительно стенки РВС (для дна толщиной 6 мм)

Обсуждение

Анализ зависимостей на рисунке 2 показал, что предельные величины локальных осадок центральной части дна ограничены по допускаемым напряжениям $[\sigma] = 269$ МПа и соответствуют значениям осадки, регламентированным действующей нормативно-технической документацией^{6,7}. По результатам анализа полученных графических зависимостей (см. рис. 3) установлены области наступления предельного состояния в стенке резервуара. Так зона I соответствует уровню НДС резервуара, при котором действующие напряжения не превышают допускаемые по нормативно-технической документации и составляют 188 МПа. В пределах этой зоны предельное состояние наступить не может. Зона II ограничена пределом текучести стали 09Г2С (325 МПа). При попадании точки пересечения прямой X и кривой r в данную область возможно возникновение предельного состояния в конструкции РВС при определенных условиях. Если точка пересечения находится в зоне III, требуется выводить резервуар из эксплуатации для проведения ремонта, так как может произойти разрушение конструкции РВС.

Требования стандарта Американского института нефти API 653⁸ к назначению предельной величины локальной осадки дна учитывают ее положение относительно стенки резервуара. В требованиях действующей отечественной нормативно-технической документации положение локальной осадки в пределах дна не учитывается. Полученные результаты численного расчета позволили установить, что при возникновении локальной области неоднородности в грунтовом основании напряженно-деформированное состояние металлоконструкций РВС зависит от расположения области неоднородности относительно стенки резервуара. Следовательно, требования отечественной нормативной базы к предельной величине локальной осадки дна требуют корректирования.

⁶ ГОСТ 31385-2016. – С. 6.

⁷ РБ Серия 03. Выпуск 69. – С. 177–179.

⁸ API 653. – Р. 24–26.

Выводы

Разработана и верифицирована численная модель резервуара РВС-20000 в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. Определены пределы деформирования полотнища днища резервуара. Установлены размеры и положения области неоднородности основания, вызывающие недопустимые напряжения в стенке резервуара РВС-20000 (см. рис. 3). Установлено, что положение локальной области неоднородности грунтового основания относительно центра резервуара существенно влияет на формирование уровня НДС стенки сооружения. Сформулированы предложения по корректировке требований российской научно-технической документации в части назначения предельных величин локальных осадок днища.

Библиографический список

1. Галеев В. Б. Напряженно-деформированное состояние резервуаров, построенных на слабых переувлажненных грунтах: дис. ... д-ра. техн. наук. – Тюмень, 1987. – 668 с.
2. Розенштейн И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров. – М.: Недра, 1995. – 253 с.
3. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / П. А. Коновалов [и др.]. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 336 с.
4. Тарасенко А. А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: дис. ... д-ра. техн. наук. Тюмень, 1999. – 299 с.
5. Bell R. A., Iwakiri J. Settlement comparison used in tank-failure study // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 1980. – Vol. 106. – P. 153–169.
6. Clarke J. S. Recent tank bottom and foundation problems // Proceedings of American Petroleum Institute. 36th. Midyear Meeting, Division of Refuting. – May 1971. – P. 1.
7. Penman A. D. M. Soil-structure interaction and deformation problems with large oil tanks // Proceedings of the International Symposium on Soil-Structure Interaction, University of Roorkee, India. – 1977. – Vol. 1. – P. 521–526.
8. Ямамото С., Кавано К. Расследование причины аварии нефтехранилища. – Сан-Диего, 1976.
9. Горелов А. С. Неоднородные грунтовые основания и их влияние на работу вертикальных стальных резервуаров: моногр. – СПб.: Недра, 2009. – 220 с.
10. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. – 200 с.
11. Слепнев И. В. Напряженно-деформированное упруго-пластическое состояние стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при неравномерных осадках оснований: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1988. – 225 с.
12. Буренин В. А. Исследование влияния неравномерных осадок на напряженно-деформированное состояние стального вертикального цилиндрического резервуара: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 1980. – 157 с.
13. Напряженно-деформированное состояние стенки резервуара при неравномерных осадках основания / А. А. Тарасенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1997. – № 3. – С. 75–79.
14. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / В. А. Бруйка [и др.]. – Самара: СамГТУ, 2010. – 271 с.
15. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

Сведения об авторах

Грученкова Аlesia Анатольевна, аспирант кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: alesya2010-11@yandex.ru

Тарасенко Александр Алексеевич, д. т. н., профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Alesya A. Gruchenkova, Postgraduate at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: alesya2010-11@yandex.ru

Aleksandr A. Tarasenko, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen