

## Исследование напряженно-деформированного состояния фундамента вертикального резервуара с учетом динамики эксплуатационных нагрузок

*А.Ю. Прокопов, К.Э. Ткачева*

*Ростовский государственный строительный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) фундамента под вертикальный стальной резервуар при последовательном действии нагрузок при возведении и эксплуатации.

**Ключевые слова:** фундамент, резервуар, грунт, напряженно-деформированное состояние, заполнение, объемная модель, шаговый метод последовательных нагружений, зависимости, модуль деформации.

В настоящее время в период эксплуатации вертикальных стальных резервуаров (далее РВС) наблюдается тенденция роста аварийных ситуаций, связанных с потерей несущей способности отдельных элементов, потерей устойчивости и неравномерными осадками основания [1-3, 6-12]. Причинами возникновения таких ситуаций могут быть ошибки в проектировании, брак строительно-монтажных работ, изменение гидрогеологических условий на площадке эксплуатируемого РВС, а также нагрузки, не учитываемые на стадии проектирования, к которым можно отнести многократно повторяющиеся в период эксплуатации нагрузки от давления хранимого продукта при заполнении и опорожнении резервуара.

Для оценки напряженно-деформированного состояния (далее НДС) фундамента под РВС с учетом влияния нагрузок от веса хранимых продуктов при заполнении резервуара авторами выполнено численное моделирование на объемных конечно-элементных моделях в ПК «Лира»[4, 5].

К моделированию был принят фундамент под резервуар для хранения нефтепродуктов вместимостью 5 тыс.м<sup>3</sup>, представленный монолитной железобетонной плитой диаметром 20 м, толщиной 500 мм с монолитным

железобетонным ребром (кольцом) под стенкой резервуара высотой 1 м и шириной 2 м с выступами за пределы стенки резервуара на 1 м и устройством песчаной подушки внутри кольца.

Расчет выполнен шаговым методом последовательных нагружений с учетом изменения расчетной схемы на каждом шаге приложения нагрузки[5]. На 1-м шаге моделируется нагрузка от веса фундамента, 2-й шаг – моделируется добавление нагрузки от веса конструкций резервуара при его сооружении (стены, днища и крыши), 3-й шаг – добавление нагрузки от давления нефтепродуктов при заполнении резервуара.

Грунтовое основание моделировалось сплошной, однородной, упруго-пластической средой, предусматривающей образование зоны упругих деформаций, в которой распределение напряжений подчиняется закону Гука, и зоны пластических деформаций, в которой распределение напряжений происходит в соответствии с условием предельного состояния Кулона-Мора.

Нагрузка от веса конструкций резервуара прикладывалась к железобетонному ребру на расстоянии 1 м от края по периметру опирания стенки на ребро. Нагрузка от давления нефтепродуктов при моделировании заполнения представлена равномерно распределенной по днищу резервуара. Для расчета величины нагрузки принята средняя плотность нефтепродуктов  $870 \text{ кг/м}^3$ .

Для построения моделей использовались физически нелинейные конечные элементы (КЭ): для фундамента – КЭ №236 и №234, для грунтов – КЭ №276 и №274, предназначенные для моделирования работы грунта на сжатие с учетом сдвига в соответствии с теорией прочности Кулона-Мора.

Оценка НДС производилась для разных инженерно-геологических условий (основание было представлено суглинками, супесями и глинами), и разных характеристик материала фундамента (при использовании бетонов В15, В20 и В25).

---

Анализ результатов расчета показал, что во всех исследуемых случаях происходит увеличение напряжений в фундаменте при приложении нагрузки от веса конструкций резервуара (2-й шаг нагружения) и снижение напряжений при моделировании заполнения резервуара нефтепродуктами (3-й шаг нагружения). При этом при моделировании возведения металлоконструкций резервуара максимальные напряжения в фундаменте зафиксированы в кольцевой части под стенкой резервуара, а при заполнении резервуара нефтепродуктами максимальные напряжения наблюдались в плитной части. Максимальные значения напряжений в фундаменте зафиксированы при моделировании из бетона класса В25, а максимальные изменения напряжений в фундаменте отмечены при моделировании из бетона В15. В грунтах максимальные значения напряжений зафиксированы в глинах. Максимальные изменения напряжений в грунтах на 1-м шаге нагружения зафиксированы в супеси, на 2-м – в суглинках. Максимальные изменения напряжений в грунтах на 3-м этапе нагружения отмечены в суглинках при моделировании фундамента из бетона В15 и в глинах, при моделировании фундамента из бетона классов В20 и В25.

В результате расчета были найдены зависимости максимальных напряжений в фундаменте от модуля деформации бетона и модуля деформации грунтов для каждого шага нагружения (табл. 1).

Таблица № 1

Зависимости максимальных напряжений в фундаменте от модуля деформации бетона и модуля деформации грунтов

Этап	Зависимость
I – сооружение фундамента	$\sigma = 0,004E_B - 0,002E_G + 1,1$
II – сооружение металлоконструкций	$\sigma = 1,07E_B - 0,003E_G + 7,8$
III – заполнение нефтепродуктами	$\sigma = 1,05E_B - 0,003E_G + 9,1$

Изменение напряжений в фундаменте на разных этапах нагружения в большей степени зависит от деформационных характеристик материала фундамента.

Характер изменения напряжений при сооружении резервуара и при заполнении нефтепродуктами будет зависеть от конструктивных параметров резервуара, его диаметра и вместимости, с учетом которых рассчитывается нагрузка от веса нефтепродуктов.

При многократном опорожнении и заполнении резервуара нефтепродуктами напряжения в фундаменте и элементах конструкции могут возрастать.

Важно отметить, что неравномерная осадка основания, осадка типа «крен», и, как следствие, смещение центра тяжести, могут привести к неравномерному распределению нагрузки от давления хранимого продукта в опорной поверхности фундамента в местах контакта с днищем резервуара и к увеличению напряжений в стенке и соединительных узлах уторного шва.

### Литература

1. Волчков А.Р. Фундаменты вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. №4(16). С. 52-56.

2. Мансурова С.М., Тляшева Р.Р., Ивакин А.В., Шайзаков Г.А., Байрамгулов А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния стального цилиндрического резервуара с учетом эксплуатационных нагрузок // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2014. №1. С. 329-343.

3. Оленев Н.М. Хранение нефти и нефтепродуктов. М.: Недра. 1964. 429с.

4. Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф., Гаптлисламова К.Н. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и взаимного



влияния подземных конструкций существующих и вновь возводимых сооружений в береговой зоне морского порта Тамань // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104

5. Прокопова М.В., Ткачева К.Э., Васьковцова Я.С. Моделирование работы конструкций с учетом этапности возведения // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. Вып. 17. Донецк: Норд-Пресс, 2011. С. 45-47.

6. Сильницкий П.Ф., Тарасенко М.А., Тарасенко А.А. Расчет фундаментного кольца с дефектами // Нефть и газ. 2011. №5. С. 75-77.

7. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Эволюция взглядов на вопросы определения величины допустимых осадок резервуаров // Фундаментальные исследования. 2014. №12. С. 67-84.

8. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований.— М.: АСВ. 2009. 336 с.

9. Чирков С.В., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Конечно-элементная модель вертикального стального резервуара с усиливающими элементами при его подъеме гидродомкратами // Фундаментальные исследования. 2014. № 9. С. 1003-1007.

10. Чмшкян А.В. Взаимодействие конического штампа с неоднородным основанием // Инженерный вестник Дона, 2012, № 4, Ч. 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1391.

11. Khmeleva A.I. Foundations of vertical steel tanks for oil and oil products // Modern scientific researches and innovations. 2015. № 5. pp. 60-66.

12. Tarasenko A.A., Silnitskiy P.F., Tarasenko D.A. The problems of designing the heat insulation for bases of vertical steel cylindrical tanks constructed in the cryolithozone/ Tenth International conference on permafrost. TICOP. Resources and risks of permafrost areas in a changing world Proceedings. 2012. pp. 583-584.

---

## References

1. Volchkov A.R. Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov. 2014. №4 (16). pp. 52-56.
  2. Mansurova S.M., Tljasheva R.R., Ivakin A.V., Shajzakov G.A., Bajramgulov A.S. Neftegazovoe delo. 2014. №1. pp. 329-343.
  3. Olenev N.M. Hranenie nefiti i nefteproduktov [Storage of oil and oil products]. M. Nedra. 1964. 429p.
  4. Prokopov A.Ju., Akopjan V.F., Gaplislamova K.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2013. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104).
  5. Prokopova M.V., Tkacheva K.E., Vas'kovcova Ja.S. Sovershenstvovanie tehnologii stroitel'stva shaht i podzemnyh sooruzhenij. Vyp. 17. Doneck. Nord-Press. 2011. pp. 45-47.
  6. Sil'nickij P.F., Tarasenko M.A., Tarasenko A.A. Neft' i gaz. 2011. №5. pp. 75-77.
  7. Tarasenko A.A., Chepur P.V. Fundamental'nye issledovanija. 2014. №12. pp. 67-84.
  8. Fundamenty stal'nyh rezervuarov i deformacii ih osnovanij [Foundations for steel tanks and strain their bases]. M. ASV. 2009. 336 p.
  9. Chirkov S.V., Tarasenko A.A., Chepur P.V. Fundamental'nye issledovanija. 2014. № 9. pp. 1003-1007.
  10. Chmshkjan A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012. № 4. Ch. 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1391](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1391).
  11. Khmeleva A.I. Foundations of vertical steel tanks for oil and oil products. Modern scientific researches and innovations. 2015. № 5. pp. 60-66.
  12. Tarasenko A.A., Silnitskiy P.F., Tarasenko D.A. The problems of designing the heat insulation for bases of vertical steel cylindrical tanks constructed in the cryolithozone. Tenth Internmational conference on permafrost.
-



TICOP. Resources and risks of permafrost areas in a changing world Proceedings.  
2012. pp. 583-584.