

**Аналитическое и численное решения задачи влияния патрубков приема
и раздачи на напряженно-деформированное состояние стенки резервуара**

П. В. Чепур*, А. А. Тарасенко, В. А. Иванов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

**chepur_p_v@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается проблема определения напряженно-деформированного состояния стенки в зоне узла сопряжения с прямо-раздаточным патрубком (ПРП). Указано, что одним из существенных факторов, влияющих на общее напряженно-деформированное состояние стенки резервуара, являющейся тонкой оболочкой согласно основным законам строительной механики, выступает наличие или отсутствие осадок оснований и фундаментов конструктивных элементов резервуара.

В статье использованы классические методы строительной механики (существующие аналитические решения), а также применены численные методы, в частности — метод конечных элементов с реализацией в программном комплексе ANSYS.

Разработанная численная модель резервуара РВСП-20000 с применением метода конечных элементов в ПК ANSYS позволила определить перемещения, деформации и напряжения в конструкциях в зоне узла сопряжения прямо-раздаточного патрубка и стенки РВСП.

Как показал численный расчет в настоящей статье с применением МКЭ-комплекса, ПРП, имеющий соединение с резервуаром на уровне максимальных радиальных смещений стенки от гидростатического давления хранимой жидкости, создает очень опасное измененное напряженно-деформированное состояние в контактной зоне стыка. Это свидетельствует о необходимости контроля над наличием несовместных деформаций фундаментов ПРП и самого резервуара и, при необходимости, принятия соответствующих мер инженерно-технического характера.

Ключевые слова: резервуар, РВС, РВСП, напряженно-деформированное состояние, патрубок, напряжения, деформации, осадка

Для цитирования: Чепур, П. В. Аналитическое и численное решения задачи влияния патрубков приема и раздачи на напряженно-деформированное состояние стенки резервуара / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко, В. А. Иванов. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-6-127-135 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 6. – С.127–135.

**Analytical and numerical solutions to the problem of the influence
of pipes for receipt and distribution on the stress-strain state of the tank wall**

Petr V. Chepur*, Alexander A. Tarasenko, Vadim A. Ivanov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**chepur_p_v@mail.ru*

Abstract. The article considers the problem of determining the stress-strain state of the tank wall in the area where it connects with receiving and dispensing pipes (PRP). One of the significant factors influencing the overall stress-strain state of the tank wall, which is a thin shell according to fundamental laws of structural mechanics, is the presence or absence of settlement of the bases and foundations of the structural elements of the tank.

The article uses both classical structural mechanics methods, and existing analytical solutions. In addition to applying numerical methods, particularly the finite element method (FEM), implemented through the ANSYS software package. The developed numerical model of the RVSP-20000 tank using the finite element method in ANSYS PC allowed to determine the displacements, deformations, and stresses in the structures in the junction area of the receiving and dispensing pipe and the RVSP tank wall. The numerical calculations revealed. As the numerical calculation in this article using the FEM complex has shown, the PRP, which has a connection with the reservoir at the level of maximum radial displacements of the wall from the hydrostatic pressure of the stored liquid, creates a significantly altered and potentially hazardous stress-strain state in the contact zone. This highlights the necessity of monitoring potential incompatible deformations in the foundations of both the PRP and the reservoir itself, and, if needed, implementing appropriate engineering measures.

Keywords: tank, vertical steel structure, vertical steel structure, stress-strain state, branch pipe, stress, deformation, settlement

For citation: Chepur, P. V., Tarasenko, A. A. & Ivanov V. A. (2024). Analytical and numerical solutions to the problem of the influence of pipes for receipt and distribution on the stress-strain state of the tank wall. *Oil and Gas Studies*, (6), pp. 127-135. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-6-127-135

Введение

Вертикальные стальные резервуары объемом свыше 20 000 м³ являются сооружениями повышенного уровня ответственности [1], что предполагает наличие особых подходов к контролю и обеспечению их работоспособного состояния. Хранящиеся в подобных резервуарах горючие жидкости при аварийных ситуациях могут приводить к катастрофическим последствиям. Во избежание инцидентов, связанных с нарушением целостности конструкций резервуаров, необходимо детально рассматривать случаи, приводящие к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС). В особенности, научный и практический интерес вызывают нестандартные и экстремальные режимы эксплуатации, возникающие по различным причинам: природные климатические изменения и катаклизмы, накопительный эффект от ошибок на этапах проектирования и строительства, несанкционированные внешние антропогенные воздействия.

Одним из существенных факторов, влияющих на общее напряженно-деформированное состояние стенки резервуара, являющейся тонкой оболочкой согласно основным канонам строительной механики, выступает наличие или отсутствие осадок оснований и фундаментов конструктивных элементов резервуара. В работах А. А. Тарасенко [2, 4, 5] и Е. Е. Семина [3] рассмотрены проблемы влияния осадки на НДС резервуаров. В труде [6] сделан акцент на неравномерную осадку наружного контура днища, а в работе [7] проанализированы случаи с наличием зон локальных неоднородностей. Однако большой практический интерес вызывают также случаи изменения НДС стенки в зонах наличия элементов локальной жесткости, чем могут яв-

ляться люки и патрубки, технологические трубопроводы и подключаемое оборудование. В настоящей статье авторы постарались рассмотреть проблему появления зон с повышенными локальными напряжениями вокруг массивного узла примыкания трубопровода приема и раздачи нефти, присоединенного к стенке наиболее распространенного типоразмера РВСП-20000.

Объект и методы исследования

Объект исследования — технологический узел примыкания патрубка приема и раздачи нефти к стенке вертикального стального резервуара с понтоном РВСП-20000. Приемо-раздаточный патрубок ППР является технологическим оборудованием вертикальных цилиндрических резервуаров. Патрубок — комплектующее изделие приемо-раздаточного устройства ПРУ, которое служит для подсоединения запорной арматуры, сливно-наливного оборудования и др. Приемо-раздаточный патрубок ППР устанавливается на стенке в нижнем поясе резервуара и имеет отдельный от резервуара фундамент (рис. 1). Как следствие, при появлении осадки основания и фундамента резервуара или опоры ППР (в данной статье причины появления и развития осадок не рассматриваются) развиваются несовместные перемещения. Именно это явление и приводит к появлению опасных напряжений и деформаций в узле присоединения ППР к стенке.



Рис. 1. Узел приема и раздачи нефти РВСП-20000

В работах [9] представлены зависимости, иллюстрирующие влияние ППР на напряженно-деформированное состояние стенки резервуара при изменении горизонтальной оси патрубка на варьируемый угол ϕ . Для оценки влияния жесткого сопряжения патрубка со стенкой была рассмотрена задача изгиба длинной оболочки под воздействием сосредоточенной радиально направленной силы [9]. В настоящей статье предлагается с исполь-

зованием численных методов расширить результаты существующих исследований: помимо зависимости эквивалентных напряжений от высоты стенки угла отклонения оси ϕ , получить эпюры распределения перемещений и напряжений по криволинейным поверхностям резервуара и самого трубопровода (патрубка).

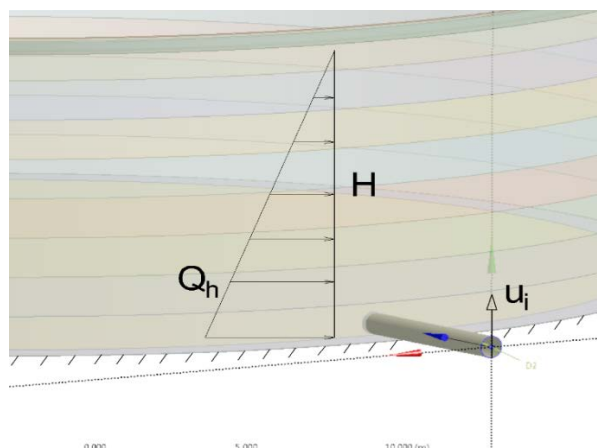


Рис. 2. Расчетная схема РВС-20000 и трубопровода ПРУ

В расчетную схему входят следующие параметры: сооружение РВСП-20000, 8 поясов стенки, толщина 1-го пояса $\delta = 0,013$ м; радиус стенки $r = 22,8$ м; высота $H = 12$ м; уровень налива нефти $h = 11,4$ м; плотность нефти $\rho = 865$ кг/м³; диаметр наружный трубопровода $d_t = 0,82$ м; толщина стенки трубопровода $\delta_t = 6$ мм; высота оси трубопровода при врезке в 1-й пояс стенки $h_{от} = 0,71$ м.

Граничные условия учитывают жесткое закрепление резервуара по всей площади опирания. Однако несовместность деформаций отдельных фундаментов (РВС и трубопровода ПРУ) учитывается поэтапным подъемом незакрепленного конца патрубка в интервале от 0,01 до 0,1 метра, что, согласно работам и тестовым расчетам [8], можно считать оптимальным значением.

Дополнительная непроектная нагрузка, связанная с несовместным перемещением резервуара и трубопровода, задается поэтапно и включает в себя восемь интервалов в соответствии с графиком на рисунке 3.

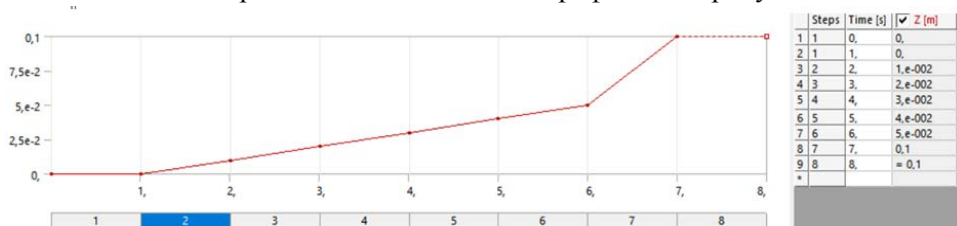


Рис. 3. Шаги приращения вертикального перемещения патрубка

Подходы, связанные с использованием численного метода и реализацией в ПК ANSYS, представлены в статьях авторов [4–8], опубликованных ранее.

Результаты, полученные с помощью предложенной расчетной схемы, предлагается сравнить с аналитическим решением [9], согласно которому соответствующие напряжения в стенке определялись следующим образом:

$$\sigma_x = \frac{E\mu}{1-\mu^2} \left(\frac{dv}{d\varphi} + \frac{w}{r} \right) + \frac{6M_x}{\delta^2} + \gamma_{ст}(h_p - x) + \frac{G_{кр}}{2\pi r \delta}; \quad (1)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{E\mu}{1-\mu^2} \left(\frac{dv}{d\varphi} + \frac{w}{r} \right) \pm \frac{6M_\varphi}{\delta^2};$$

$$\sigma_{эКВ} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\varphi^2 - \sigma_x \sigma_\varphi},$$

где E — модуль упругости стали 09Г2С, $E = 200000$ МПа; μ — коэффициент Пуассона, $\mu = 0,25$; h_p — высота стенки резервуара, м; W — радиальные смещения оболочки, м; $G_{кр}$ — вес крыши с учетом всех дополнительных нагрузок, Н.

Результаты исследования

Согласно результатам, а именно, эпюрам распределения эквивалентных напряжений по фон Мизесу, установлено, что резкий рост напряжений наблюдается при перемещении $u = 10$ мм, при величине осадки $u_{\max} = 100$ мм действующие эквивалентные напряжения по фон Мизесу $\sigma_{эКВ}$ имеют очень близкое значение к пределу текучести резервуарной стали 09Г2С, что вполне коррелирует с результатами, полученными в статье [9].

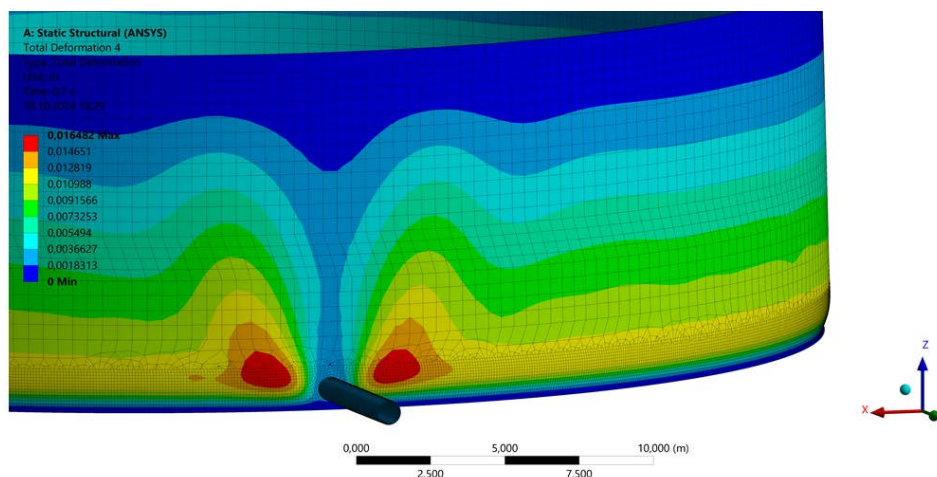


Рис. 4. Эпюра перемещений элементов конструкций при величине осадки $u = 0,01$ м

На рисунке 4 показана эпюра перемещений конструкций РВСП-20000 и прямо-раздаточного патрубка, полученная с помощью программного комплекса ANSYS, реализующего метод конечных элементов.

На рисунке 5 представлена эпюра эквивалентных напряжений в зоне контакта трубопровода ПРУ со стенкой. В данном случае действующие напряжения представлены для случая, при котором параметр осадки $u = 100$ мм.

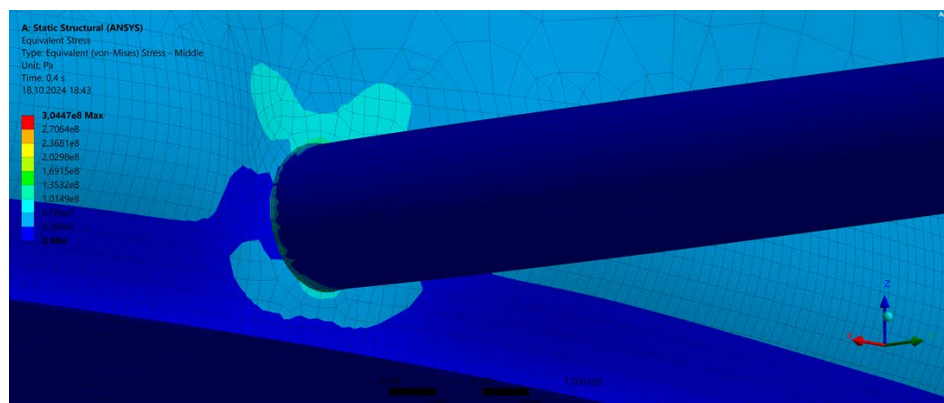


Рис. 5. Эпюра эквивалентных напряжений в стенке при величине осадки $u = 0,1$ м

Полученные эпюры могут быть сгенерированы в рамках постпроцессинговой обработки результатов численного расчета для всех величин осадки в интервале u от 0,01 до 0,1 м с любыми шагом. В данной статье представлены только отдельные иллюстрации с эпюрами.

Обсуждение

Полученные авторами результаты имеют хорошую качественную и количественную корреляцию с результатами, полученными в классическом труде [9]. Действительно, согласно приведенной в нем гипотезе [9], условия деформации реальной конструкции не могут рассматриваться осесимметричными. Жесткое соединение стенки резервуара с патрубками приема и раздачи определяет неосесимметричность радиальной жесткости стенки.

Как показал численный расчет, выполненный авторами с применением МКЭ-комплекса, ПРП, имеющий соединение с резервуаром на уровне максимальных радиальных смещений стенки от гидростатического давления хранимой жидкости, создает очень опасное измененное напряженно-деформированное состояние в контактной зоне стыка. Это свидетельствует о необходимости контроля над наличием несовместных деформаций фундаментов ПРП и самого резервуара и, при необходимости, принятия соответствующих мер инженерно-технического характера.

Выводы

1. Разработанная численная модель резервуара РВСП-20000 с применением метода конечных элементов в ПК ANSYS позволила определить перемещения, деформации и напряжения в конструкциях в зоне узла сопряжения приемо-раздаточного патрубка и стенки РВСП.

2. Установлено, что отклонение величины действующих напряжений в стенке РВСП-20000 в настоящей статье с применением МКЭ отличается от значений напряжений, полученных в статье [9], не более чем на 5 %, причем в меньшую сторону. Это связано в том числе с наличием современных вычислительных возможностей, позволяющих создавать значительно более точную геометрию сооружения с минимальным количеством допущений и упрощений.

3. Также полностью подтверждается полученный тезис [9] о том, что с ростом величины осадки резервуара расчетное максимальное эквивалентное напряжение остается практически неизменным, но происходит перераспределение и рост напряжений в стенке в направлении «сверху вниз».

Список источников

1. ГОСТ 31385-2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия: утв. и введ. в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 июня 2023 г. 2023-08-01. № 462-ст: дата введ. 2023-08-01. – Москва : Российский институт стандартизации. – 2023. – 118 с.

2. Тарасенко, А. А. Закономерности деформирования металлоконструкций крупногабаритного вертикального сварного резервуара при наличии зон проседания основания / А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт : теория и практика. – 2016. – № 1 (53). – С. 32–37.

3. Тарасенко, А. А. Напряженно-деформированное состояние верхнего опорного кольца резервуара при неосесимметричных деформациях корпуса / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 525–529.

4. Семин, Е. Е. Использование программных комплексов при оценке технического состояния и проектирование ремонтов вертикальных стальных резервуаров / Е. Е. Семин, А. А. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2006. – № 4 (6). – С. 85–87.

5. Тарасенко, А. А. Оценка работоспособности крупногабаритного резервуара РВСПК-100000 при образовании зоны неоднородности грунтового основания / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, Ю. Гуань. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 134–136.

6. Тарасенко, А. А. Особенности совместной работы кольцевого фундамента и грунтового основания при наличии зон неоднородности / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 4. – С. 9–13.

7. Тарасенко, А. А. Определение действующих напряжений в полотно-
щах днищ резервуаров отечественных типоразмеров при локальных просадках
оснований / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, А. А. Грученкова. – Текст : непосред-
ственный // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–8. – С. 1665–1670.
8. Чепур, П. В. Оценка воздействия приемо-раздаточного патрубка при
развитии осадки резервуара / П. В. Чепур, А. А. Тарасенко. – Текст : непосред-
ственный // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 540–544.
9. Исследование влияния приемораздаточных патрубков на напряжен-
но-деформированное состояние стенки вертикальных цилиндрических резервуа-
ров / А. А. Тарасенко, Н. В. Николаев, Г. Г. Хоперский [и др.]. – Текст : непосред-
ственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1998. – № 1. –
С. 59–68.

Reference

1. GOST 31385-2023. (2023). Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil
products. General specifications. Moscow, Rossijskij institut standartizacii Publ., 2023,
118 p. (In Russian).
2. Tarasenko, A. A., Gruchenkova, A. A., & Chepur, P. V. (2016). The
regularities of large vertical tank's metal structures deformations in the presence of
subsidence foundation zones. Pipeline transport: theory and practice, (1 (53)), pp. 32-37.
(In Russian).
3. Tarasenko, A. A., & Chepur, P. V. (2014). Stress-strain state of the upper
support ring with non-axisymmetric deformations. Fundamental research. (11-3).
pp. 525-529. (In Russian).
4. Semin, E. E., & Tarasenko, A. A. (2006). The use of software systems in
assessing the technical condition and designing repairs of vertical steel tanks. Pipeline
transport: theory and practice, (4 (6)), pp. 85-87. (In Russian).
5. Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., & Guan, Yu. (2016). Performance
evaluation of large tank RVSPK-100000 in development of differential settlement area.
Oil industry, (4), pp. 134-136. (In Russian).
6. Tarasenko, A. A., & Chepur, P. V. (2016). Aspects of the joint operation
of a ring foundation and a soil bed with zones of inhomogeneity present. Soil Mechanics
and Foundation Engineering, 53(4). pp. 238-243. (In Russian).
7. Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., & Gruchenkova, A. A. (2015).
Determine the magnitude of stresses in the structure of the central part of bottom with
differential settlement for russian tank sizes. Fundamental research, (2-8), pp. 1665-
1670. (In Russian).
8. Chepur, P. V. & Tarasenko, A. A. (2014). Impact assessment reception
dispensers nozzle in the development of settlements tank. Fundamental research. (11-3),
pp. 540-544. (In Russian).
9. Tarasenko, A. A., Nikolaev, N. V., Khoperskiy, G. G. Ovchar, Z. M., &
Sayapin, M. V. (1998). Study of the influence of receiving and dispensing pipes on the
stress-strain state of the wall of vertical cylindrical tanks. Oil and gas studies, (1),
pp. 59-68. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Чепур Петр Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, chepur_p_v@mail.ru, ORCID: [https:// orcid.org/0000-0002-6722-459X](https://orcid.org/0000-0002-6722-459X)

Тарасенко Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3903-0632>

Иванов Вадим Андреевич, доктор технических наук, профессор, консультант кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Petr V. Chepur, Candidate of Engineering, Head of the Department of building mechanics, Industrial University of Tyumen, chepur_p_v@mail.ru, ORCID: [https:// orcid.org/0000-0002-6722-459X](https://orcid.org/0000-0002-6722-459X).

Alexander A. Tarasenko, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Hydrocarbon Resources Transport, Tyumen Industrial University, Russia, ORCID: [https:// orcid.org/0000-0002-3903-0632](https://orcid.org/0000-0002-3903-0632)

Vadim A. Ivanov, Doctor of Engineering, Professor, Consultant of the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена после рецензирования 18.10.2024; принята к публикации 29.10.2024.

The article was submitted 07.10.2024; approved after reviewing 18.10.2024; accepted for publication 29.10.2024.