

# *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: 10.31660/0445-0108-2-98-106

УДК 621.642.39.03

### **Исследование влияния цилиндрической жесткости стенки на напряженно-деформированное состояние резервуара при локальной осадке**

**А. А. Грученкова\*, П. В. Чепур, А. А. Тарасенко**

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия*

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

**Аннотация.** В работе численно исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) резервуара РВС-20000 при расположении просадочной зоны вблизи стенки резервуара. Разработана численная модель резервуара в соответствии с реальными геометрическими размерами, учитывающая все конструктивные элементы сооружения и максимальные эксплуатационные нагрузки. При моделировании локальной осадки с целью учета пространственной работы грунта была использована модель грунтового основания Пастернака. Расчет НДС резервуара производился при значениях радиуса просадочной зоны от 1 до 10 м. Выбор такого интервала обусловлен тем, что более чем в 92 % случаев резервуары, имеющие локальные осадки днища, попадают в данный диапазон значений.

Установлены зависимости максимальных действующих напряжений в стенке РВС от положения области неоднородности в грунтовом основании. Установлена граница зоны действия краевого эффекта от стенки РВС. В случае расположения центра области неоднородности в данной зоне, необходимо проводить дополнительный анализ НДС металлоконструкций резервуара при назначении предельной осадки.

**Ключевые слова:** вертикальный стальной резервуар; напряженно-деформированное состояние; область неоднородности; просадочная зона; метод конечных элементов

### **Studying of the wall cylindrical rigidity influence on the stress-strain state of the tank during local settlement**

**Alesya A. Gruchenkova\*, Petr V. Chepur, Aleksandr Tarasenko**

*Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia*

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

*Abstract.* The article numerically researched the stress-strain state of the tank RVS-20000 at the settlement zone is located near the tank wall. A numerical model of the tank was developed in accordance with the actual geometric dimensions, taking into account all structural elements of the structure and the maximum operating loads. When modeling local settlement to account for the spatial work of the soil, the model of the Pasternak soil base was used. The stress-strain state calculation of the tank was performed at values of the radius of the drawdown zone from 1 to 10 m. The choice of this interval is due to the fact that in more than 92 % of cases, tanks with local bottom settlements fall within this range of values.

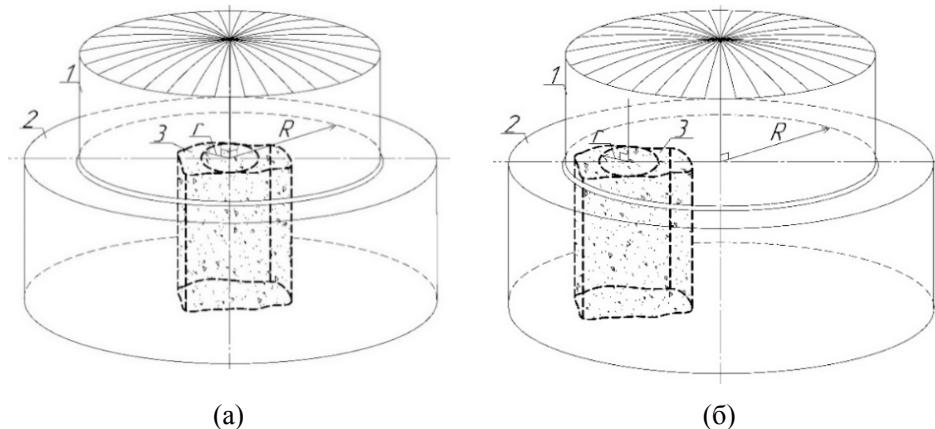
The dependences of the maximum acting stresses in the wall of the internal combustion engine on the position of the inhomogeneity area in the soil base are established. The boundary of the zone of action of the edge effect from the tank wall is established. If the center of the heterogeneity area is located in this zone, it is necessary to conduct additional analysis of the tank metal structures stress-strain state when assigning the maximum settlement.

*Key words:* vertical steel tank; strain-stress state; area of inhomogeneity; settlement zone; finite element method

## Введение

Вертикальные стальные резервуары (РВС) для хранения нефти являются одним из наиболее ответственных объектов магистрального транспорта углеводородного сырья. Анализ причин аварий РВС показал, что неравномерные осадки, вызванные локальной неоднородностью грунтового основания, являются причиной разрушения вертикальных стальных резервуаров в 46 % случаев [1–4]. Локальные осадки оснований развиваются в результате изменения структуры грунтового массива под воздействием эксплуатационных нагрузок и собственного веса грунта, а также дополнительных факторов, таких как оттаивание ледовых прослоек в замерзшем грунте, изменение уровня грунтовых вод [5–7]. Нормативными документами регламентировано количество скважин, пробуриваемых при проведении изысканий: для резервуаров объемом более  $5\ 000\ м^3$  — не менее 5 скважин, для резервуаров объемом менее  $5\ 000\ м^3$  — 4 скважины. Учитывая, что площадь оснований современных резервуаров может достигать  $7\ 000\ м^2$ , инженерно-геологические разрезы, построенные по данным изысканий, не всегда отражают в полной мере действительный грунтовый состав естественного основания, что приводит к появлению просадочных зон в процессе эксплуатации [8, 9]. В пределах площади днища локальная неоднородность может располагаться в его центральной части и вблизи стенки РВС (рис. 1).

В первом случае область неоднородности находится за пределами краевого эффекта от стенки, и решить данную задачу можно аналитическим методом; во втором случае область неоднородности находится вблизи стенки и подвержена влиянию цилиндрической жесткости стенки — в данном случае определить параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) резервуара возможно лишь численными методами [10–13]. Так, авторами была поставлена задача исследовать НДС РВС-20000 при расположении области неоднородности в окрестностях стенки численным методом.



*Рис. 1. Расположение локальной неоднородности основания — в центральной части днища (а), вблизи стенки (б): 1 — стенка резервуара; 2 — искусственно уплотненное грунтовое основание; 3 — локальная неоднородность; R — радиус резервуара; r — радиус окружности, вписанной в область локальной неоднородности*

### Объект и методы исследования

Для решения поставленной задачи в программном комплексе ANSYS [14] была разработана численная модель резервуара РВС-20000, максимально приближенная к реальной конструкции и состоящая из следующих конструктивных частей: центральной части днища, окрайки, стенки, кольца жесткости в верхнем поясе, балочного каркаса и настила стационарной крыши. В разработанной модели одновременно были приложены максимальные эксплуатационные нагрузки: вес хранимой жидкости  $P$ , избыточное давление  $P_{изб}$ , вакуумметрическое давление  $P_{вак}$ , вес снегового покрова и стационарного оборудования крыши  $P_{сн.+об}$ . [15]. При создании численной модели резервуара для построения сетки в центральной части днища, окрайке, стенке, кольце жесткости и листовом настиле крыши был выбран оболочечный четырехугольный четырехузловый конечный элемент с шестью степенями свободы SHELL181; в несущих балках каркаса стационарной крыши — линейный двухузловой балочный элемент с шестью степенями свободы BEAM188; в связующих балках крыши — двухузловой конечный элемент с шестью степенями свободы BEAM4 [16, 17]. Моделирование выполнялось в нелинейной постановке для возможности анализа возникновения зон с предельными значениями напряжений и деформаций. Выбор материалов и указание их свойств для созданной модели производились в связанном с блоком анализа модуле управления материалами Engineering Data. В библиотеке нелинейных материалов для выполнения нелинейного анализа (General Nonlinear Materials) была выбрана сталь 09Г2С. Для учета физической нелинейности экспериментально полученная кривая «напряжение — деформация» для стали 09Г2С была аппроксимирована зависимостью, состоящей из 4 отрезков: первый отрезок соответствует пределу пропорциональности ( $\sigma_{пп}$ ,  $\varepsilon_{пп}$  — напряжения и деформации, соответствующие пределу пропорциональности), второй — пределу текучести ( $\sigma_{тек}$ ,  $\varepsilon_{тек}$  — напряжения и деформации, соответствующие пределу текучести), третий — площадке текучести ( $\sigma_{пл.т.}$ ,  $\varepsilon_{пл.т.}$  — напряжения и деформации, соответствующие площадке текучести), четвертый — пределу временного сопротивления ( $\sigma_b$ ,  $\varepsilon_b$  — напряжения и деформации, соответствующие временному сопротивлению) (таблица).

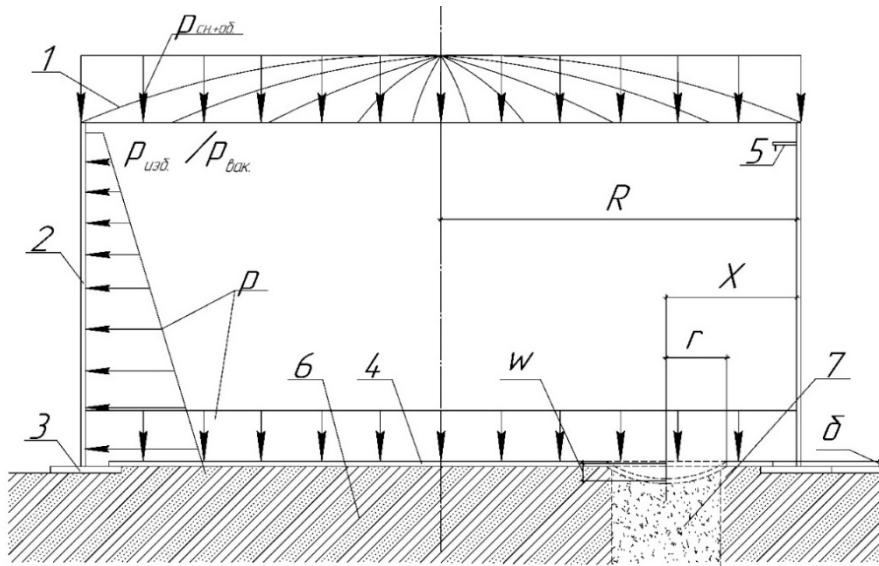
**Упругопластические характеристики стали 09Г2С**

Характеристики стали							
$\sigma_{\text{пп}},$ МПа	$\varepsilon_{\text{пп}},$ %	$\sigma_{\text{тек}},$ МПа	$\varepsilon_{\text{тек}},$ %	$\sigma_{\text{пл.т.}},$ МПа	$\varepsilon_{\text{пл.т.}},$ %	$\sigma_b,$ МПа	$\varepsilon_b, \%$
320	0,0016	325	0,00363	373	0,01501	470	0,021

Для моделирования упругого закрепления днища резервуара в контакте с просадочной зоной и основанием РВС было введено граничное условие «elastic support». С целью учета пространственной работы грунта была использована модель грунтового основания Пастернака [18], учитывающая дискретные коэффициенты постели, определяющие деформационные характеристики основания. Для области неоднородности был введен коэффициент постели  $k_1$ , для основания резервуара за пределами области неоднородности —  $k_2$ .

### Экспериментальная часть

Расчетная схема для проведения численного эксперимента представлена на рисунке 2. Область неоднородности характеризуется следующими геометрическими параметрами: радиальный размер —  $r$ , расстояние от стенки до центра области неоднородности —  $X$ . В первом случае расстояние от стенки до центра области неоднородности равно радиусу просадочной зоны —  $X = r$ ; во втором случае —  $X = r + 2$  м; в третьем —  $X = r + 4$  м; в четвертом —  $X = r + 6$  м; в пятом —  $X = r + 8$  м; в шестом случае —  $X = r + 10$  м. Расчет НДС резервуара производился при следующих значениях радиуса просадочной зоны: 1, 2, 4, 6, 8, 10 м.



*Рис. 2. Расчетная схема: 1 — крыша резервуара; 2 — стена резервуара; 3 — окрайка днища; 4 — центральная часть днища резервуара; 5 — кольцо жесткости; 6 — грунтовое основание резервуара с коэффициентом постели  $k_2$ ; 7 — локальная неоднородность грунтового основания с коэффициентом постели  $k_1$ ;  $R$  — радиус резервуара, м;  $r$  — радиус области локальной неоднородности основания;  $X$  — расстояние от стенки до центра области неоднородности;  $\delta$  — толщина днища;  $w$  — вертикальная составляющая осадки*

Для моделирования подготовленного искусственно уплотненного основания резервуара за пределами области неоднородности был задан коэффициент постели  $k_2 = 2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^3$ . Задаваемый для области неоднородности коэффициент постели  $k_1$  изменялся в интервале от 0,3 до 5 МН/м<sup>3</sup>. Минимальное значение  $k_1$  выбрано исходя из того, что в случае значения  $k_1$  менее 0,3 МН/м<sup>3</sup> происходит потеря сходимости решения при расчете, что соответствует случаю отсутствия грунта в просадочной зоне.

### Результаты

По результатам расчетов численной модели РВС-20000 были получены эпюры распределения максимальных напряжений в стенке резервуара (рис. 3) при различных геометрических размерах и расположениях области неоднородности в основании.

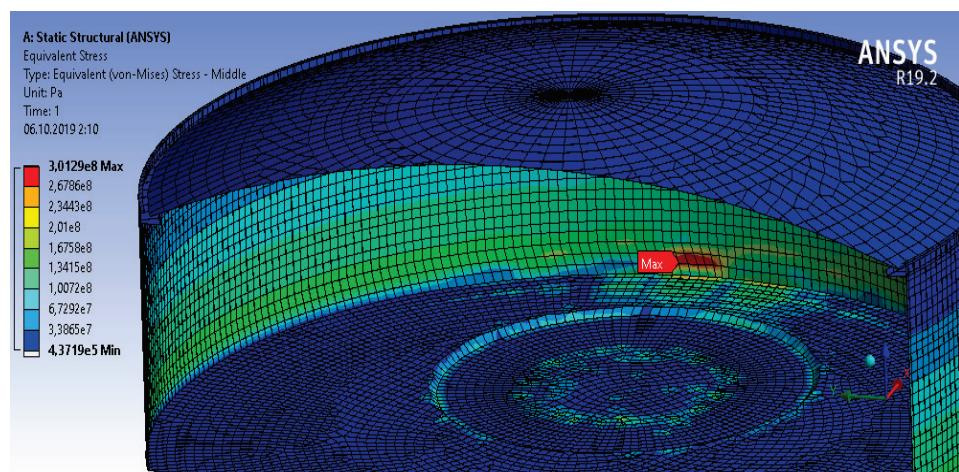


Рис. 3. Максимальные эквивалентные напряжения в стенке РВС-20000  
при  $\delta = 6 \text{ мм}$ ,  $r = 10 \text{ м}$ ,  $X = 8 \text{ м}$

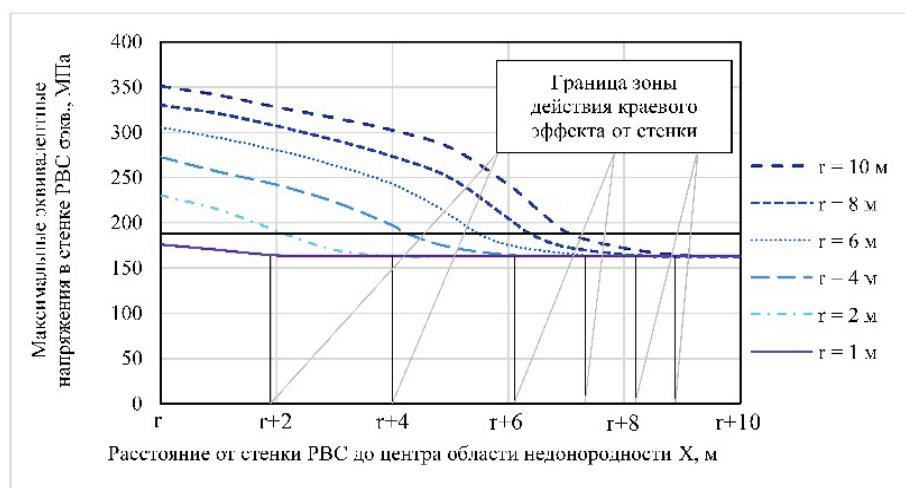


Рис. 4. Зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке РВС-20000  
от положения области неоднородности

На основании результатов численного эксперимента были установлены зависимости максимальных эквивалентных напряжений в стенке РВС-20000 для заданных радиусов просадочной зоны от положения локальной неоднородности относительно стенки РВС для случая максимально допустимой осадки (рис. 4). По результатам обработки полученных зависимостей была установлена граница зоны действия краевого эффекта от стенки РВС при наличии области неоднородности в основании (рис. 5).



Рис. 5. Граница зоны действия краевого эффекта от стенки резервуара

По результатам обработки полученных зависимостей было получено выражение (1), позволяющее определять границы зоны действия краевого эффекта от стенки РВС при максимально допустимой осадке:

$$X = r + 3,0323 \cdot \ln(r) + 1,8956 , \quad (1)$$

где  $X$  — расстояние от стенки до центра области неоднородности грунтового основания, м;  $r$  — радиус области неоднородности, м.

### Обсуждение

Анализ графических зависимостей показал, что при радиусе области неоднородности, равном 1 м, напряжения в стенке не достигнут допускаемых ( $[\sigma] = 188$  МПа), даже при максимально близком расположении к стенке. Кроме того, установлено, что при определенном расположении области неоднородности наступает момент, при котором максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара начинают увеличиваться. Увеличение напряжений в стенке объясняется появлением краевого эффекта от цилиндрической оболочки РВС. Для каждого радиального размера локальной неоднородности грунтового основания построен отсекающий отрезок, характеризующий границу зоны действия краевого эффекта от стенки РВС при максимально допустимой величине осадки. Так, по результатам обработки полученных данных была установлена зависимость границы зоны действия краевого эффекта от радиуса области неоднородности. В пределах данной зоны максимально до-

пускаемая величина осадки должна быть меньше, чем предельная, согласно требованиям нормативно-технической документации<sup>1,2</sup>. В случае расположения центра области неоднородности в данной зоне необходимо проводить дополнительный анализ НДС металлоконструкций резервуара при назначении предельной осадки.

### **Выводы**

Разработана конечно-элементная модель резервуара РВС-20000 в программном комплексе ANSYS с максимальной степенью детализации конструктивных элементов. Разработана расчетная схема и решена контактная задача взаимодействия резервуара РВС-20000 с грунтовым основанием на основе модели Пастернака, учитывающей деформацию грунта за пределами области неоднородности.

Установлены зависимости максимальных действующих напряжений в стенке РВС от положения области неоднородности в грунтовом основании. Получена зависимость, позволяющая определить границу зоны действия краевого эффекта от стенки РВС.

### **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. Кононков [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 the Geotechnical Division. – 1980. – Vol. 106, Issue GT2. – P. 153–169.
6. Clarke J. S. Recent tank bottom and foundation problems // Proceedings of American Petroleum Institute. 36<sup>th</sup> Midyear Meeting, Division of Refining. – 1971 (May). – Available at: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&id=PASCAL7573000698>.
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). – 1978. – Vol. 11, Issue 2. – P. 21–26.
8. Горелов А. С. Неоднородные грунтовые основания и их влияние на работу вертикальных стальных резервуаров: моногр. – СПб.: Недра, 2009. – 216 с.
9. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. – 200 с.
10. Слепнев И. В. Напряженно-деформированное упругопластическое состояние стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при неравномерных осадках оснований: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1988. – 225 с.
11. Буренин В. А. Исследование влияния неравномерных осадок на напряженно-деформированное состояние стального вертикального цилиндрического резервуара: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 1980. – 157 с.
12. 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.
13. Грученкова А. А., Тарасенко А. А. Напряженно-деформированное состояние резервуара на грунтовом основании с локальной неоднородностью // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. – № 3. – С. 96–101. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-3-96-101

<sup>1</sup> ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия [Электронный ресурс]. – Введ. 2017-03-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200138636>.

<sup>2</sup> Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Серия 03. Выпуск 69. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с.

14. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учеб. пособ. / В.А. Бруяка [и др.]. – Самара: СамГТУ, 2010. – Ч. 1 – 271 с.
15. Нехаев Г. А. Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления. – М.: ACB, 2005. – 216 с.
16. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ.; под ред. Б. Е. Победря. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
17. Лаевский Ю. М. Метод конечных элементов (основы теории, задачи): моногр. – Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 1999. – 166 с.
18. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластиинки и оболочки / Пер. с англ. В. И. Контовта; под ред. Г. С. Шапиро. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, – 1966. – 636 с.

### **References**

1. Galeev, V. B. (1987). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie rezervuarov, postroennykh na slabых pereuvlazhnennykh gruntakh: diss. dokt. tekhn. nauk. Tyumen, 668 p. (In Russian).
2. Rozenshteyn, I. M. (1995). Avarii i nadezhnost' stal'nykh rezervuarov. Moscow, Nedra Publ., 253 p. (In Russian).
3. Konovalov, P. A., Mangushev, R. A., Sotnikov, S. N., Zemlyanskiy, A. A., & Tarasenko, A. A. (2009). Fundamenti stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovaniy. Moscow, Assotsiatsii stroytel'nykh vuzov Publ., 336 p. (In Russian).
4. Tarasenko, A. A. (1999). Razrabotka nauchnykh osnov metodov remonta vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov: diss. dokt. tekhn. nauk. Tyumen, 299 p. (In Russian).
5. Bell, R. A., & Iwakiri, J. (1980). Settlement comparison used in tank-failure study. Journal of the Geotechnical Division, 106(GT2), pp. 153-169. (In English).
6. Clarke, J. S. (1971). Recent tank bottom and foundation problems. Proceedings of American Petroleum Institute. 36<sup>th</sup> Midyear Meeting, Division of Refuting. (In English). Available at: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&id=PASCAL7573000698>
7. Penman, A. D. M. (1978). Soil-structure interaction and deformation problems with large oil tanks. Proceedings of the International Symposium on Soil-Structure Interaction, University of Roorkee (India), 11(2), pp. 21-26. (In English).
8. Gorelov, A. S. (2009). Neodnorodnye gruntovye osnovaniya i ikh vliyanie na rabotu vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov. St. Petersburg, Nedra Publ., 216 p. (In Russian).
9. Safaryan, M. K. (1987). Metallicheskie rezervuary i gazgol'dery. Moscow, Nedra Publ., 200 p. (In Russian).
10. Slepnev, I. V. (1988). Napryazhenno-deformirovannoe uprugoplasticheskoe sostoyanie stal'nykh vertikal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov pri neravnomernykh osadkakh osnovaniy: diss. kand. tekhn. nauk. Moscow, 225 p.
11. Burenin, V. A. (1980). Issledovanie vliyaniya neravnomernykh osadok na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie stal'nogo vertikal'nogo tsilindricheskogo rezervuara: diss. kand. tekhn. nauk. Ufa, 157 p. (In Russian).
12. Tarasenko, A. A., Nikolaev, N. V., Khoperskiy, G. G., & Sayapin, M. V. (1997). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie stenki rezervuara pri neravnomernykh osadkakh osnovaniya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz, (3), pp. 75-79. (In Russian).
13. Gruchenkova, A. A., & Tarasenko, A. A. (2019). The stress-strain state of the tank on soil foundation with local inhomogeneity. Oil and Gas Studies, (3), pp. 96-101. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2019-3-96-101
14. Bruyaka, V. A., Fokin, V. G., Soldusova, E. A., Glazunova, N. A., & Adeyanov, I. E. (2010). Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench. Chast' 1. Samara, Samara State Technical University Publ., 271 p. (In Russian).
15. Nekhaev, G. A. (2005). Proektirovanie i raschet stal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov i gazgol'derov nizkogo davleniya. Moscow, ASV Publ., 216 p. (In Russian).
16. Zienkiewicz, O. C. (1971). The finite element method in engineering science. London, McGraw-Hill, 521 p. (In English).
17. Laevskiy, Yu. M. (1999). Metod konechnykh elementov (osnovy teorii, zadachi). Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 166 p. (In Russian).
18. Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). Theory of plates and shells. 2<sup>nd</sup> edition. New York, McGraw-Hill, 580 p.

### **Сведения об авторах**

**Грученкова Алеся Анатольевна**, ассистент кафедры нефтегазового дела, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: alesya2010-11@yandex.ru

**Чепур Петр Владимирович**, к. т. н., доцент кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

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

### **Information about the authors**

**Alesya A. Gruchenkova**, Assistant at the Department of Oil and Gas Industry, Industrial University of Tyumen, e-mail: alesya2010-11@yandex.ru

**Petr V. Chepur**, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen

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