

А.С. Семин, Д.А. Татьянников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**УСТРОЙСТВО ФУНДАМЕНТА НА ИСКУССТВЕННОМ ОСНОВАНИИ
ДЛЯ СТАЛЬНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА**

Интенсивное развитие нефтяной отрасли неразрывно связано с проектированием и строительством резервуаров для хранения сырьевого материала и товарной нефти. В качестве таких конструкций используют вертикальные стальные резервуары. Их особенность заключается в том, что на основание по всей площади дна передаются значительные нагрузки. Неправильная эксплуатация вертикальных стальных резервуаров может привести к аварийной ситуации, связанной с недостаточным обеспечением надежности резервуара и повлекшей за собой возникновение экологической катастрофы. В большинстве случаев добыча нефти осуществляется в районах с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, поэтому необходимо принимать меры для сокращения земляных и строительно-монтажных работ и, как следствие, для снижения стоимости строительства. В качестве такой меры при устройстве основания под фундамент резервуара можно применить грунтовую подушку, армированную геосинтетическим материалом, устройство которой позволит снизить неравномерность деформаций основания. Рассматриваются два варианта устройства основания под резервуар. Для проектного варианта, в качестве которого принимается песчаная грунтовая подушка, выполнен расчет осадки основания по нормативной литературе. Для оценки правильности полученных результатов выполнен расчет в программном комплексе Plaxis 2D. Аналогичные расчеты проведены для предлагаемой нами армогрунтовой подушки. В качестве армирующего материала принята георешетка. Устройство георешетки осуществляется с переменным шагом. Независимо от того, какой получается шаг, последний армирующий слой закладывается по подошве песчаной подушки и кровли грунта основания. Перед выполнением расчета по определению осадки фундамента вычислен общий модуль деформации всего армогрунтового массива на основании исследований З.Г. Тер-Мартirosяна и Р. Кристенсена, которые базируются на механике композитных материалов. После проведения сравнительного анализа двух вариантов были сделаны выводы, что предлагаемый вариант выполнения основания для вертикального стального резервуара с применением георешетки экономически выгоднее и целесообразнее в сравнении с проектным вариантом.

Ключевые слова: резервуар, усиление грунтов, фундаменты резервуаров, георешетка, армогрунтовая подушка, деформации.

A.S. Semin, D.A. Tatiannikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ARRANGEMENT OF AN ARTIFICIAL FOUNDATION FOR A VERTICAL
STEEL TANK**

The intensive development of the oil industry is inextricably linked with the design and construction of storage tanks for raw materials and commercial oil. Vertical steel tanks (VST) are used as such structures. Their peculiarity lies in the fact that significant loads are transferred to the base, over the entire area of the bottom. Improper operation of the VST can lead to an emergency situation associated with insufficient provision of the reservoir reliability and entailing the occurrence of an environmental catastrophe. In most cases, oil production is carried out in areas with unfavorable engineering and geological conditions, therefore, it is necessary to take measures to reduce excavation and construction and installation work and, as a result, to reduce the cost of construction. As such a measure, when arranging a base for the foundation of a tank, it is possible to use a soil cushion reinforced with geosynthetic material, the construction of which will reduce the unevenness of the base deformations. This article discusses two options for arranging a base for a tank. For the design option, which is taken as a sandy soil pad, the calculation of the foundation settlement was carried out according to the regulatory literature. To assess the correctness of the results obtained, a calculation was performed using the Plaxis 2D software package. Similar calculations were carried out for the armored soil cushion offered by us. A geogrid is taken as a reinforcing material. The geogrid is arranged with a variable pitch. Regardless of what step is obtained, the last reinforcing layer is laid along the sole of the sand cushion and the roof of the base soil. Before performing the calculation to determine the foundation settlement, the total deformation modulus of the entire armored soil mass was calculated, based on the research of Z.G. Ter-Martirosyan and R. Christensen, which are based on the mechanics of composite materials. After a comparative analysis of the two options, it was concluded that the proposed version of the base for a vertical steel tank using a geogrid is more cost-effective and more expedient in comparison with the design option.

Keywords: reservoir, soil reinforcement, tank foundations, geogrid, reinforced soil cushion, deformations.

На сегодняшний день стремительное развитие нефтяной отрасли приводит к тому, что возникает необходимость в снижении затрат на строительство при сохранении требуемого уровня качества и поддержании в работоспособном состоянии резервуаров для хранения готовой продукции и сырьевого материала [1]. Как правило, нефтяные месторождения располагаются в труднодоступных для тяжелой техники местах, в районах с неблагоприятными климатическими и грунтовыми условиями [2]. В связи с этим достаточно часто необходимо прорабатывать решения по улучшению характеристик грунтов с целью снижения затрат на земляные и строительные-монтажные работы [3].

К основным типам фундаментов, которые применяются наиболее часто при строительстве резервуаров, можно отнести: сплошную железобетонную плиту, грунтовую подушку и подушку с железобетонными кольцами, свайно-плитный фундамент и фундамент из параллельных балок [4, 5]. Фундаменты на естественном основании можно совмещать с грунтовыми подушками в виде подсыпок на относительно благоприятных грунтовых условиях [6,7].

Замену слабого слоя грунта следует производить при неглубоком его залегании – до 3 м. Обратную засыпку котлована местным или привозным грунтом осуществляют с послойным

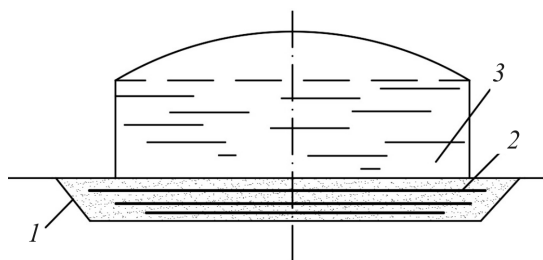


Рис. 1. Основание резервуара, армированное геосинтетическим материалом: 1 – песчано-гравийная подушка; 2 – геосинтетический материал; 3 – РВС

уплотнением. Для того чтобы снизить возможные неравномерные осадки фундамента, данных мероприятий бывает недостаточно, и приходится использовать дополнительные технические решения [8]. В качестве одного из вариантов по улучшению характеристик грунтовой подушки можно предусмотреть ее с армированием геосинтетическими материалами. Благодаря геосинтетикам не только снизится неравномерность деформаций основания, но и уменьшится толщина грунтовой подушки, следовательно, сократятся объемы земляных работ (рис. 1) [9, 10].

Для оценки эффективности применения армированных грунтовых подушек была рассмотрена задача с вариантом проектирования фундамента для вертикального стального резервуара (РВС) – 3000 м³, расположенного на одном из нефтяных месторождений в северной части Пермского края.

Тип резервуара – вертикальный цилиндрический со стационарной крышей и центральной монтажной стойкой. Внутренний диаметр резервуара 18,98 м, высота 12,0 м.

Под стенкой резервуара выполняется монолитный кольцевой железобетонный фундамент размерами в сечении 1,0×0,4 м из бетонной смеси БСТ В25 W6 F150 по ГОСТ 7473-2010. Под фундаментом предусмотрена подготовка из бетонной смеси БСТ В7,5 W6 F150 по ГОСТ 7473-2010 толщиной 100 мм с выходом за габариты фундамента на 100 мм. По периметру кольца выполняются температурно-усадочные швы шириной 500 мм (3 шт.).

На основании анализа данных инженерно-геологических изысканий в геолого-литологическом разрезе изыскиваемой территории до глубины 12,0 м выделено пять инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (табл. 1).

Подземные воды по всей глубине сжимаемой толщи отсутствуют.

Нормативная нагрузка:

$q_n = 11,05 \text{ т/м}^2$ – нормативная нагрузка, передающаяся на подсыпку через днище резервуара;

$q_{1н} = 8,5 \text{ т/м}^2$ – усредненная нормативная нагрузка, передающаяся на подсыпку через кольцевой фундамент.

По СП 22.13330.2016 был произведен расчет осадки основания методом послойного суммирования под стенкой резервуара и под днищем в центре резервуара (рис. 2). Для этого произведено разбиение сжимаемой толщи на элементарные слои мощностью не более $0,4 \cdot b$, где b – ширина кольцевого фундамента, равная 1,0 м.

Таблица 1

Характеристики грунтов

Наименование грунта	$\gamma_{п}$, кН/м ³	$s_{п}$, кПа	$\varphi_{п}$, °	E , МПа
Насыпной песок мелкий средней степени водонасыщения средней плотности (tQ), ИГЭ-1	18,3	0	30	22,78
Песок мелкий средней степени водонасыщения средней плотности (dQ), ИГЭ-2	18,8	0	32	22,75
Песок мелкий водонасыщенный средней плотности (dQ), ИГЭ-3	19,2	0	28	22,68
Суглинок тяжелый песчанистый, тяжелый пылеватый полутвердый (eQ), ИГЭ-4	18,7	24	20	18,84
Алевролит низкой прочности сильновыветрелый размягчаемый ($P1$), ИГЭ-5	20,3	–	–	–

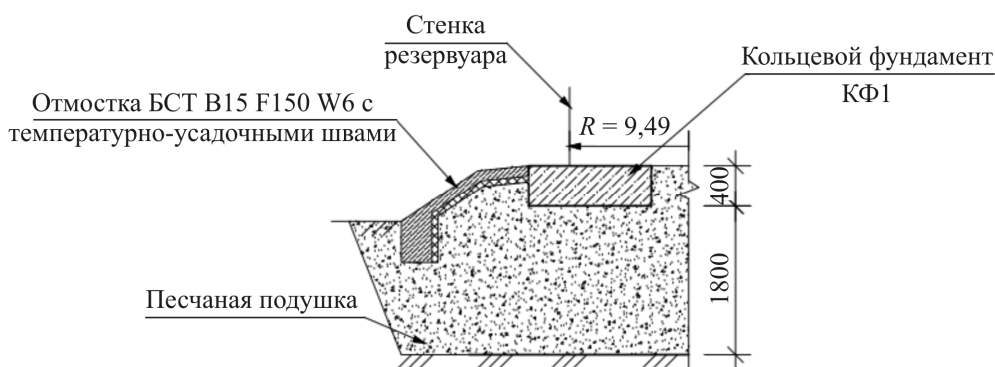


Рис. 2. Расчетная схема кольцевого фундамента резервуара

По результатам расчетов при суммировании полученных осадок для каждого слоя общая осадка для стенки резервуара составила $s_{стен} = 0,0036$ м (3,6 мм), для центра днища резервуара $s_{ц.днищ} = 0,031$ м (31 мм).

При выполнении расчета осадки резервуара в диаметральной направлении согласно РУ 05-85 «Инструкция по проектированию и устройству оснований и фундаментов вертикальных стальных резервуаров в условиях Среднего Приобья» в нескольких точках средняя осадка стенки резервуара будет состоять из осадки фундаментного кольца и крайнего значения при расчете осадки резервуара в диаметральной направлении, которая составила 1,54 см (рис. 3).

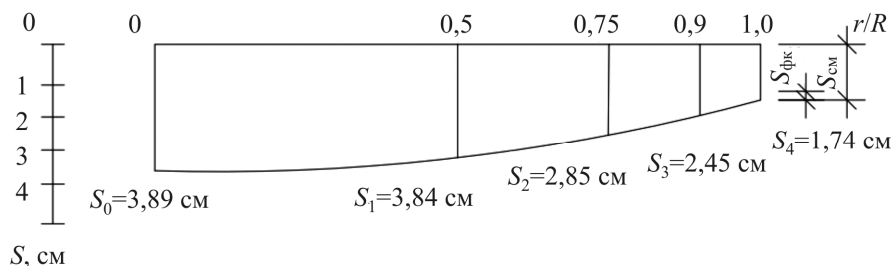


Рис. 3. Профиль осадки резервуара в диаметральной направлении (проектное решение)

Для оценки реальности полученных результатов при расчете по нормативной литературе выполнен расчет в программном комплексе Plaxis 2D.

Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица результатов осадки основания (проектный вариант)

Параметр	Деформации центра резервуара, см	Деформации стенки резервуара, см
Расчет по СП22.13330.2016	3,89	1,74
ПК Plaxis 2D	2,28	3,0
Относительная разница деформаций, %	16	42

Значение расчетных осадок не превышают предельных значений.

Предельное значение осадки $s_u = 150$ мм при эксплуатации (п 3.4.4.1 ВСП 34-01-03).

В качестве решения для снижения неравномерности деформаций основания и уменьшения толщины грунтовой подушки и, как следствие, минимизации земляных работ и снижения затрат на транспортировку песка для обратной засыпки котлована предлагается выполнить армирование песчаной подушки трехосной георешеткой с характеристиками, представленными в табл. 3 [11, 12].

Таблица 3

Сводная таблица результатов осадки основания (проектный вариант)

Характеристика	Георешетка Т×170
Тип полимера	Полипропилен
Поверхностная плотность, г/м ²	290
Модуль упругости, ГПа	1,6
Нагрузка при растяжении при максимальной нагрузке, кН/м, не менее	21,0
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	15

Расчетная схема фундамента резервуара на армированной грунтовой подушке представлена на рис. 4.

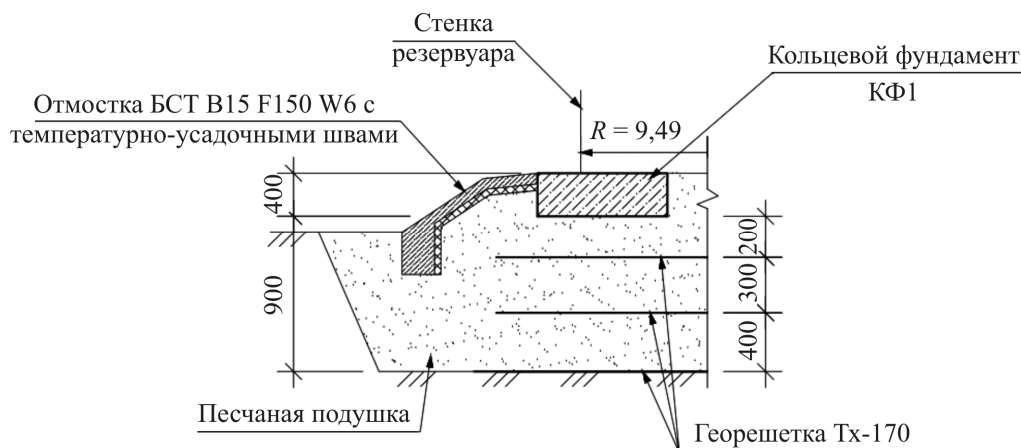


Рис. 4. Расчетная схема для определения модуля деформации армогрунтовой подушки

Георешетка устраивается в песчаную подушку с переменным шагом, который вычисляется по формуле (1):

$$\Delta h = (n - 1)100 + 200, \tag{1}$$

где n – номер армирующего слоя при одинаковой высоте песчаной подушки.

Вне зависимости от шага, для переменного шага армирования последний армирующий слой закладывался по подошве подушки и кровли грунта основания [13].

Для определения осадок фундамента резервуара необходимо вычислить модуль общей деформации всего армогрунтового массива. Опираясь на исследования З.Г. Тер-Мартirosяна и Р. Кристенсена, базирующихся на механике композитных материалов, определен модуль общей деформации армированного массива по формуле (2), который составил 37,12 МПа [14, 15]:

$$E_{\phi} = n_1 E_1 + n_2 E_2 + \frac{n_1 n_2 E_1 E_2 (v_1 - v_2)^2}{n_1 E_1 (1 - v_2^2) + n_2 E_2 (1 - v_1^2)}, \quad (2)$$

где E_1, E_2 – модули деформации (упругости) чередующихся изотропных слоев; v_1, v_2 – коэффициенты Пуассона чередующихся изотропных слоев.

Для армогрунтовой подушки выполнен расчет осадки по нормативной литературе аналогично расчету осадки основания для проектного решения.

При суммировании полученных осадок для каждого слоя общая осадка для стенки резервуара составила $s_{стен} = 0,0028$ м (2,8 мм), для центра днища резервуара $s_{ц.днища} = 0,030$ м (30 мм).

Средняя осадка стенки резервуара будет состоять из осадки фундаментного кольца и крайнего значения при расчете осадки резервуара в диаметральном направлении, которая составила 1,59 см (рис. 5).

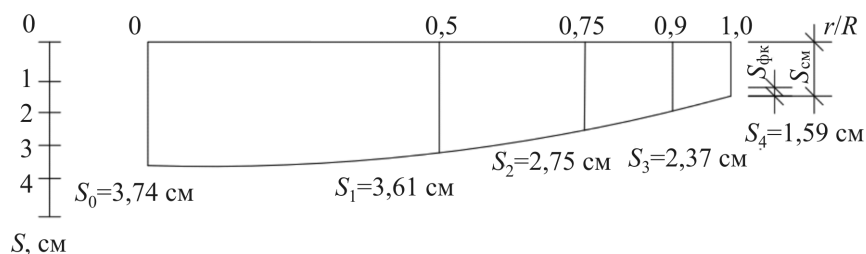


Рис. 5. Профиль осадки резервуара в диаметральном направлении (для армогрунтовой подушки)

Для расчета в программном комплексе Plaxis 2D выполнена расчетная схема половины основания резервуара, так как данное сооружение является конструкцией симметричной (рис. 6). Численное моделирование осуществлялось в условиях осесимметричной задачи с применением упругопластической модели Мора – Кулона.

По результату расчета в программе Plaxis 2D максимальная деформация основания под центром резервуара $S_0 = 3,16$ см (рис. 7). Максимальная деформация основания под стенкой $S_{ст} = 2,60$ см.

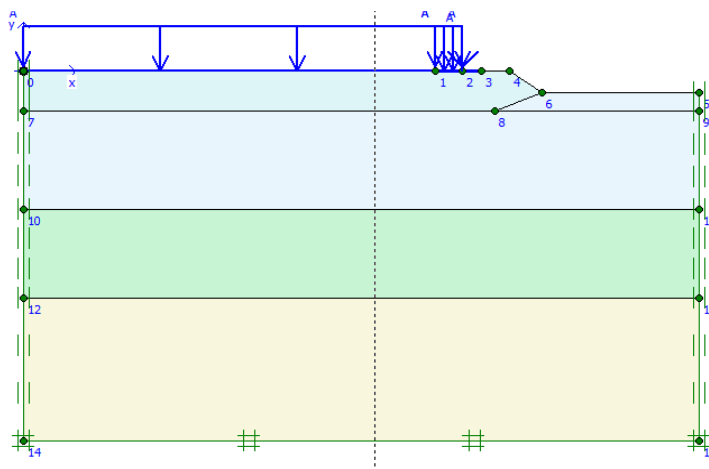


Рис. 6. Расчетная схема основания резервуара

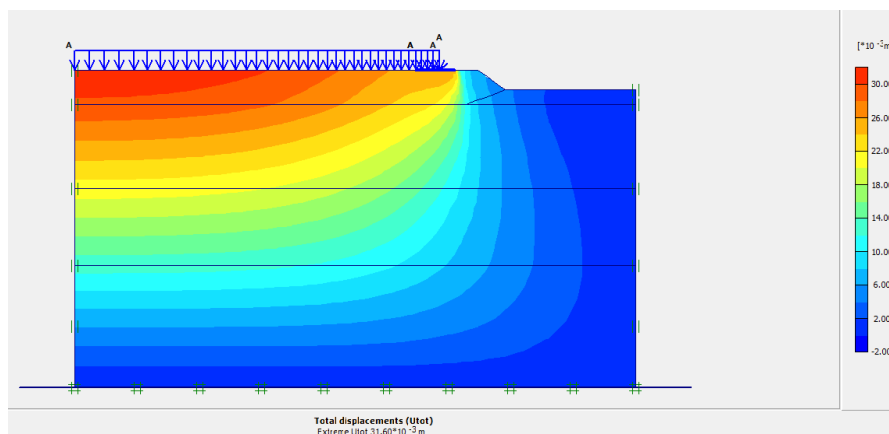


Рис. 7. Изолинии вертикальных перемещений в грунтовом основании

Результаты расчетов по нормативной литературе и в программном комплексе Plaxis 2D для обоих вариантов основания сведены в табл. 4.

Таблица 4

Сводная таблица результатов осадки основания для грунтовой и армогрунтовой подушки

Параметр	Деформации центра резервуара, см		Деформации стенки резервуара, см	
	грунтовая подушка ($h=1,8$ м)	армогрунтовая подушка ($h=0,9$ м)	грунтовая подушка ($h=1,8$ м)	армогрунтовая подушка ($h=0,9$ м)
Расчет по СП	3,89	3,74	1,74	1,59
ПК Plaxis 2D	3,28	3,16	3,0	2,6

Выполнив локально сметный расчет на земляные работы и устройство кольцевого фундамента для двух вариантов, можно сделать вывод, что применение армогрунтовой подушки в качестве основания будет экономически выгоднее (табл. 5).

Таблица 5

Результаты сравнения стоимости

Параметр	Грунтовая подушка	Армогрунтовая подушка
Сметная стоимость строительства, тыс. руб.	1283,664	996,198
Трудозатраты, чел.-ч	817,47	331,12

На основании полученных данных можно сделать следующие **выводы**:

1. Значение расчетных осадок не превышают предельных значений. Предельное значение осадки $S_{ii} = 150$ мм при эксплуатации согласно ВСП 34-01-03.
2. По СП 43.13330.2012 разность осадок центральной части днища и стенки не превышают значения $0,003 \cdot R = 2,85$.
3. Устройство георешетки позволяет уменьшить толщину грунтовой подушки в 2 раза.
4. Деформации основания армогрунтовой подушки снижаются на 1–3 % относительно проектного решения.
5. Предложенное техническое решение позволяет сократить затраты на устройство фундаментов на 287,466 тыс. руб.

Список литературы

1. Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 336 с.
2. Грученкова А.А., Кузовников Е.В., Шарков А.Е. Обоснование технологических решений при проектировании защиты основания и фундамента резервуара от воды при работе системы аварийного орошения // *Technical sciences*. – 2016. – № 5. – С. 454–458.
3. Способ устройства основания фундамента резервуара: пат. Рос. Федерация / Шадунц К.Ш. – № 2008150313/03; заявл. 18.12.2008; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13. – 6 с.
4. Основание цилиндрического резервуара. пат. Рос. Федерация / Ещенко О.Ю., Волик Д.В. – № 2010119896/03; заявл. 18.05.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. – 5 с.
5. Волчков А.Р. Фундаменты вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2014. – № 4. – С. 52–56.
6. Фундамент для цилиндрического резервуара. пат. Рос. Федерация / Шадунц К.Ш., Ещенко О.Ю., Яровенко А.С. – № 2001117949/03; заявл. 28.06.2001; опубл. 27.04.2003. – 4 с.
7. Фундамент резервуара на слабом основании. пат. Рос. Федерация / Ещенко О.Ю. – № 2010119894/03; заявл. 18.05.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 5 с.
8. Основание цилиндрического резервуара. пат. Рос. Федерация / Ещенко О.Ю., Волик Д.В. – № 2010119896/03; заявл. 18.05.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. – 5 с.
9. Армированная песчаная подушка с криволинейной подошвой. пат. Рос. Федерация / Бай В.Ф., Набоков А.В., Воронцов В.В., Краев А.Н., Краев А.Н. – № 2012143532/03; заявл. 11.10.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11. – 5 с.
10. Анализ влияния различных типов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта / А.Н. Богомолов, А.Б. Пономарев, А.В. Мащенко, А.С. Кузнецова // *Интернетвестник ВолГАСУ*. Серия: Политематическая. – 2014. – Вып. 4 (35). – С. 1–9.
11. Ачаликов И.Ю. Усиление слабых глинистых грунтов промежуточным грунтоармированным слоем // *Проектирование и строительство*. – Курск, 2019. – С. 59–62.
12. Путивский С.А. Применение геосинтетических материалов в нефтегазовой отрасли // *Экспозиция. Нефть. Газ*. – 2010. – Вып. 3 (9). – 58 с.
13. Татьянаников Д.А. Совершенствование конструкции песчаной подушки, армированной горизонтальными геосинтетическими элементами, и ее расчет на слабом основании: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 149 с.
14. Фундамент для вертикального стального резервуара: пат. Рос. Федерация / Тянь В.К., Якупов Р.Р., Околот А.А., Терегулов М.Р., Землеруб Л.Д. – № 2015108102/03; заявл. 06.03.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27. – 6 с.
15. Tatiannikov D.A, Ponomaryov A.B. Forecast bearing capacity of soil cushions with variable reinforcement spacing // *Proceedings of the Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. – Saint Petersburg, 2019. – P. 378–383.

References

1. Konovalov P.A., Mangushev R.A., Sotnikov S.N. Fundamenty stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovaniia [Foundations of steel tanks and deformations of their bases]. Moscow, Nauchnoe izdanie Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2009, 336 p.
2. Gruchenkova A.A., Kuzovnikov E.V., Sharkov A.E. Obosnovanie tekhnologicheskikh reshenii pri proektirovanii zashchity osnovaniia i fundamenta rezervuara ot vody pri rabote sistemy avariinogo orosheniia [Justification of technological solutions in the design of protection of the base and foundation of the tank from water during the emergency irrigation system]. *Technical sciences*, 2016, no 5, pp. 454–458.
3. Shadunts K. Sh. Sposob ustroistva osnovaniia fundamenta rezervuara [The way the foundation of the foundation of the tank]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no. 2388870 (2010).
4. Eshchenko O. Iu. Volik D.V. Osnovanie tsilindricheskogo rezervuara [The base of the cylindrical tank]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no. 2437988 (2011).

5. Volchkov A.R. Fundamenty vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov dlia nefi i nefteproduktov [Foundations of vertical steel tanks for oil and petroleum products]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*, 2014, no 4, pp. 52–56.
6. Shadunts K.Sh., Eshchenko O.Iu., Iarovenko A.S. Fundament dlia tsilindricheskogo rezervuara [Foundation for a cylindrical tank]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no 2001117949/03 (2003).
7. Eshchenko O.Iu. Fundament rezervuara na slabom osnovanii [Tank foundation on a weak foundation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no 2010119894/03 (2012).
8. Eshchenko O.Iu. Volik D.V. Osnovanie tsilindricheskogo rezervuara [Base of the cylindrical tank]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no 2010119896/03 (2011).
9. Bai V.F., Nabokov A.V., Vorontsov V.V., Kraev A.N., Kraev A.N. Armirovannaia peschanaia podushka s krivolineinoi podoshvoi [Reinforced sand cushion with curved sole]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no 2012143532/03 (2014).
10. Bogomolov A.N. Analiz vliianiia razlichnykh tipov armirovaniia na deformatsionnye kharakteristiki glinistogo grunta [Analysis of the influence of various types of reinforcement on the deformation characteristics of clay soil]. *Internet-vestnik VolGASU*, 2014, no 4 (35), pp. 1–9.
11. Achalikov I.Iu. Usilenie slabyykh glinistykh gruntov promezhutochnym grunto-armirovannym sloem [Reinforcement of weak clay soils with an intermediate soil-reinforced layer]. *Proektirovanie i stroitel'stvo*, Kursk, 2019, pp. 59–62.
12. Putivskii S.A. Primenenie geosinteticheskikh materialov v neftegazovoi otrosli [Application of geosynthetics in the oil and gas industry]. *Ekspozitsiia nefi' gaz*, 2010, no. 3 (9), pp. 58.
13. Tat'iannikov D.A. Sovershenstvovanie konstruksii peschanoi podushki, armirovannoi gorizonta'nymi geosinteticheskimi elementami, i ee raschet na slabom osnovanii [Improvement of the design of a sand cushion reinforced with horizontal geosynthetic elements and its calculation on a weak foundation]. Ph.D. thesis. Perm', 2019, 149 p.
14. Tian V.K., Iakupov R.R., Okolot A.A., Teregulov M.R., Zemlerub L.D. Fundament dlia vertikal'nogo stal'nogo rezervuara [Foundation for vertical steel tank]. Patent Rossiiskaia Federatsiia, no. 2599109 (2016).
15. Tatiannikov D.A., Ponomaryov A.B. Forecast bearing capacity of soil cushions with variable reinforcement spacing // Proceedings of the Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. – Saint Petersburg, 2019, pp. 378–383.

Получено 26.04.2021

Об авторах

Семи́н Алекса́ндр Серге́евич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника», строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет ((Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Sasha-tn97@mail.ru).

Татья́нников Дани́л Андре́евич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника», строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет ((Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: danco777@mail.ru).

About the authors

Alexander S. Semin (Perm, Russian Federation) – undergraduate student, Department of «Building production and geotechnics», Civil Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: Sasha-tn97@mail.ru).

Daniil A. Tatyannikov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. Associate Professor, Department of Construction Production and Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Perm National Research Polytechnic University 29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: danco777@mail.ru).