



Расчет конструкции свайного фундамента резервуара с учетом карстовой опасности

П. В. Чепур^{1*}, А. В. Дмитриев¹, А. А. Колядко², А. А. Тарасенко¹

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

²Филиал Тюменского индустриального университета в г. Сургуте, Сургут, Российская Федерация

*chepur_p_v@mail.ru

Аннотация. В статье изучены вопросы расчетного обоснования проектных решений в части выполнения требований механической безопасности вертикального стального резервуара, проектируемого к возведению на территории, опасной в карстово-суффозионном отношении. Объект исследования — система «основание — фундамент — резервуар», напряженно-деформированное состояние которой рассматривается при локальном формировании карстовой воронки. Расчеты выполнены методом конечных элементов в программных комплексах SCAD и ЛИРА-СОФТ для двух вариантов расположения карстового провала. Методика исследования основана на моделировании напряженно-деформированного состояния объекта с учетом инженерно-геологических условий площадки строительства и сравнительном анализе результатов, полученных в независимых расчетных средах. Установлено, что параметры напряженно-деформированного состояния не превышают предельных значений, что подтверждает выполнение условий несущей и деформационной способности. Расхождения между результатами расчетов в альтернативных программных комплексах составляют до 3,27 % по деформациям и до 13,6 % по усилиям, что не изменяет реального механизма работы конструкции. Предложены критерии допустимых расхождений результатов и обоснована необходимость применения как минимум двух альтернативных программных комплексов при расчетном обосновании конструктивных решений для объектов повышенного уровня ответственности.

Ключевые слова: резервуар, напряженно-деформированное состояние, свайный фундамент, карстовая опасность, SCAD, ЛИРА-СОФТ

Для цитирования: Чепур П. В., Дмитриев А. В., Колядко А. А., Тарасенко А. А. Расчет конструкции свайного фундамента резервуара с учетом карстовой опасности. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2026;30(1):98–112. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-98-112> EDN: VSCBSB

Calculation of the tank pile foundation structure, considering karst hazards

Petr V. Chepur^{1*}, Andrei V. Dmitriev¹, Alesya A. Kolyadko², Alexander A. Tarasenko¹

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

²Branch of IUT in Surgut, Surgut, Russian Federation

*chepur_p_v@mail.ru

Abstract. The article examines issues of design justification for engineering solutions related to mechanical safety requirements for a vertical steel tank planned for construction in an area with karst and suffusion hazards. The object of the study is the "base-foundation-tank" system, whose stress-strain state the authors analyzes under local formation of a karst sinkhole. The article per-

formed finite element calculations using SCAD and LIRA-SOFT software for two potential locations of the karst collapse. The study methodology relies on numerical modelling of the stress-strain state of the object, considering the engineering and geological conditions at the construction site, as well as on comparative analysis of results obtained in independent calculation environments. The study found that the stress-strain parameters remain within allowable limits, confirming compliance with bearing capacity and deformation requirements. Differences in results from the alternative software packages vary by up to 3.27% for deformations and up to 13.6% for internal forces. However, these discrepancies do not significantly affect the actual structural behavior. The article proposes criteria for acceptable discrepancies and advocates for the use of at least two independent software packages when justifying designs for structures with a high level of responsibility.

Keywords: tank, stress-strain state, pile foundation, karst hazard, SCAD, LIRA-SOFT

For citation: Chepur P. V., Dmitriev A. V., Kolyadko A. A., Tarasenko A. A. Calculation of the tank pile foundation structure, considering karst hazards. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(1):98–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-98-112>

Введение

В соответствии с требованиями Федерального закона № 384-ФЗ¹ конструктивные решения, представленные в проектной документации сооружения, подлежат обоснованию в части выполнения требований механической безопасности объекта [1, 2]. Такое обоснование выполняется посредством расчетов, подтверждающих, что на этапах строительства и эксплуатации объекта его строительные конструкции, элементы основания и фундаменты не достигнут предельного состояния по прочности и устойчивости при заданных сочетаниях одновременного действия проектных нагрузок и воздействий^{2,3} [3–6].

Для объектов повышенного уровня ответственности, к числу которых относятся крупногабаритные вертикальные стальные резервуары для хранения нефти⁴ [7–10], в инженерной практике и в рамках научно-технического сопровождения проектных работ принято проводить независимую проверку обоснования посредством выполнения подтверждающих расчетов в двух альтернативных программных комплексах [11]. Этот подход обеспечивает верификацию получаемых результатов и повышает надежность обоснования итоговых проектных решений [12–14].

Востребованность такого подхода существенно возрастает при строительстве объектов в условиях карстовой опасности [15–17], характеризующейся высокой вероятностью развития локальных просадок, формированием провалов и резким изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) сооружения. В таких условиях использование традиционных расчетных схем, не учитывающих возможность локальной потери несущей способности основания, может приводить к недооценке действующих усилий и деформаций в элементах фундамента и надземных конструкциях.

В связи с этим при проектировании и расчетном обосновании фундаментов РВС требуется выполнять моделирование неблагоприятных сценариев развития карстовых явлений и анализ их влияния на работу систе-

¹ Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» 23 декабря 2009 года. URL: <https://clck.ru/3RFdjK> (дата обращения 07.10.2025)

² СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». <https://clck.ru/3RFdoj> (дата обращения 07.10.2025)

³ СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия». URL: <https://clck.ru/3RFdwh>

⁴ ГОСТ 31385-2023 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия». URL: <https://clck.ru/3RFe4A> (дата обращения 08.10.2025)

мы «основание — фундамент — сооружение» [18–20]. Ключевым фактором обеспечения эксплуатационной надежности объекта в указанных условиях является разработка адекватной расчетной модели [21, 22], позволяющей достоверно оценить влияние карстовых деформаций грунта на НДС сооружения. В таких случаях выполнение расчетов в альтернативных программных комплексах приобретает особую практическую значимость, так как дает возможность оценить надежность получаемых результатов и подтвердить обоснованность принятых конструктивных решений. Сложность инженерно-геологических условий [23, 24] и повышенные требования к уровню обоснованности проектных решений также делают необходимым применение независимых расчетных методик. В статье рассматривается пример реализации такого подхода при выполнении проверочного расчета вертикального стального резервуара с понтоном (РВСП), планируемого к возведению в зоне возможного карстового провала.

Объект, методы исследования и результаты

Объект исследования — вертикальный стальной резервуар с понтоном объемом 20 000 м³, имеющий внутренний диаметр 45,6 м и высоту 12 м, проектируемый к сооружению на свайном фундаменте (рис. 1).

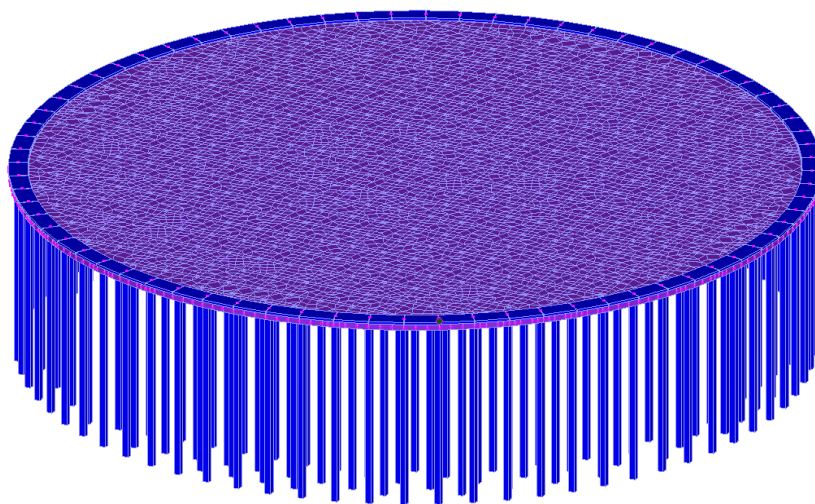


Рис. 1. Общий вид свайного фундамента РВСП-20000
Fig. 1. General view of the pile foundation VSTP-20000

Свайный фундамент состоит из бетонного опорного кольца шириной 1 м и высотой 0,15 м, имеющего наружный 46,4 м и внутренний диаметр 44,4 м, а также из армированной бетонной плиты диаметром 46,62 м и высотой 0,4 м, обеспечивающей равномерное распределение нагрузок на

свайное поле⁵. Свайное поле состоит из 461 сваи квадратного сечения 35x35 см и высотой 12 м, расположенных с шагом 2 м.

По результатам инженерно-геологических изысканий на территории предполагаемого строительства резервуара выявлено развитие опасных карстово-суффозионных процессов, которые могут негативно повлиять на возведение и дальнейшую эксплуатацию объекта⁶ [25, 26]. Территория строительства резервуара относится к участкам опасной и потенциально опасной категорий в карстово-суффозионном отношении⁷ [27].

Расчетное обоснование конструктивных решений выполнено в сертифицированных программных комплексах SCAD и ЛИРА-СОФТ, реализующих метод конечных элементов и широко применяемых в инженерной практике для анализа НДС строительных конструкций и оснований [28]. Расчетные схемы, принятые в указанных программных комплексах, идентичны, что обеспечивает корректную сопоставимость получаемых результатов.

При разработке численных моделей грунтовое основание было смоделировано расчетными грунтовыми элементами (РГЭ) [29–31], соответствующими данным инженерно-геологических изысканий:

- РГЭ 1 — насыпной грунт мощностью 8 м с модулем деформации 29,4 МПа;
- РГЭ 2 — глина легкая полутвердая с примесью органического вещества мощностью 7,8 м с модулем деформации 24 МПа;
- РГЭ 3 — глина легкая твердая, слабонабухающая, известковистая, неразмокающая мощностью 14 м с модулем деформации 32,6 МПа;
- РГЭ 4 — мергель глинистый, ненабухающий, известковый, быстроразмокаемый мощностью 4 м с модулем деформации 26,3 МПа.

Сбор и классификация нагрузок, использованных в расчетах, выполнены в соответствии с СП 20.13330.2016 и представлены в таблице 1, коэффициент надежности по ответственности сооружения $\gamma_n = 1,1$.

Учет ветрового воздействия не производился, так как суммарный эффект ветровой нагрузки приводит к снижению вертикальных усилий, передаваемых на основание, вследствие преобладающего разгружающего действия ветрового отсоса на крышу резервуара по сравнению с опрокидывающим моментом от ветрового давления на стенку.

Расчеты выполнены для двух случаев расположения карстовой воронки — по краю и в центральной части ростверка. На основании опыта наблюдений за развитием карстовых провалов на территории, планируемой для строительства РВСП, и с учетом сложившейся инженерной практики назначения расчетных параметров [32] диаметр карстовой воронки в расчетных моделях принят равным 3,2 м.

⁵ СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты». URL: <https://clck.ru/3RFeGJ> (дата обращения 22.10.2025)

⁶ СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения». URL: <https://clck.ru/3RFeQP> (дата обращения 22.10.2025)

⁷ СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». URL: <https://clck.ru/3RFeVA> (дата обращения 22.10.2025)

По завершении расчетов в программных комплексах SCAD и ЛИРА-СОФТ были получены эпюры перемещений (рис. 2, 4) и внутренних усилий (рис. 3, 5), возникающих в сваях, на основании которых проведен анализ НДС фундамента.

Таблица 1. Нагрузки, учитываемые в расчетной схеме
Table 1. Loads taken into account in the calculation scheme

Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка, МН	Коэффициент надежности γ_n	Коэффициенты сочетаний ψ	
			основное сочетание	особое сочетание (карсты)
Постоянная нагрузка				
Собственный вес конструкций рост-верка	17,6	1,1	1	0,9
Вес засыпки под днищем	2,97	1,3	1	0,9
Собственный вес резервуара	4,24	1,05	1	0,9
Вес теплоизоляции	3,27	1,3	1	0,9
Вес материалопроводов	0,07	1,1	1	0,9
Временная длительная нагрузка				
Вес заполнителя при эксплуатации	149,15	1,1	1	0,8
Вес заполнителя при испытании	168,58	1	1	0,8
Вес от площадок обслуживания	0,19	1,2	1	0,8
Вес от другого оборудования	0,02	1,1	1	0,8
Кратковременная нагрузка				
Снеговая на 1 м ²	0,032	1,1	1	0,5

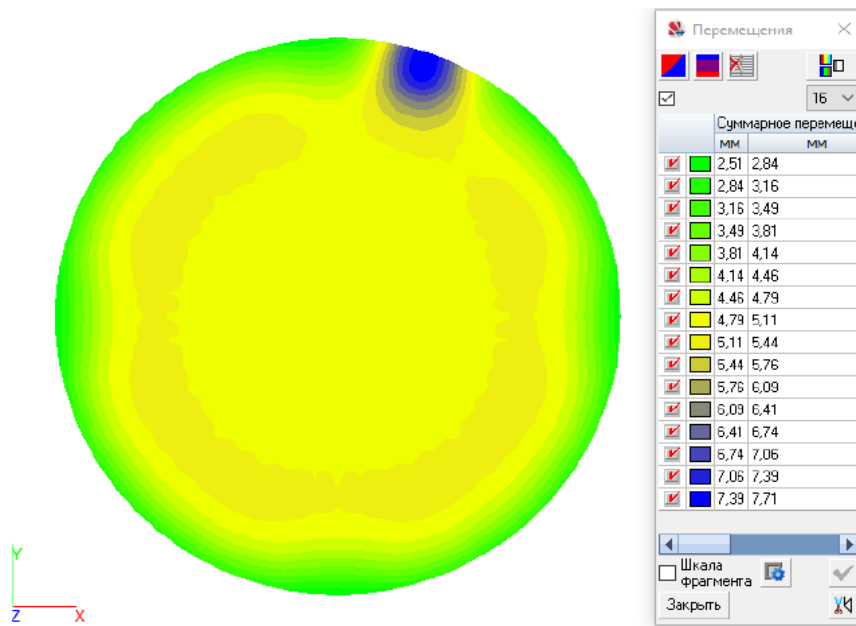


Рис. 2. Эюра перемещений фундамента при карстовом провале по краю ростверка (ПК SCAD)
Fig. 2. Foundation displacement diagram for a karst sinkhole along the edge of the pile cap (SCAD PC)

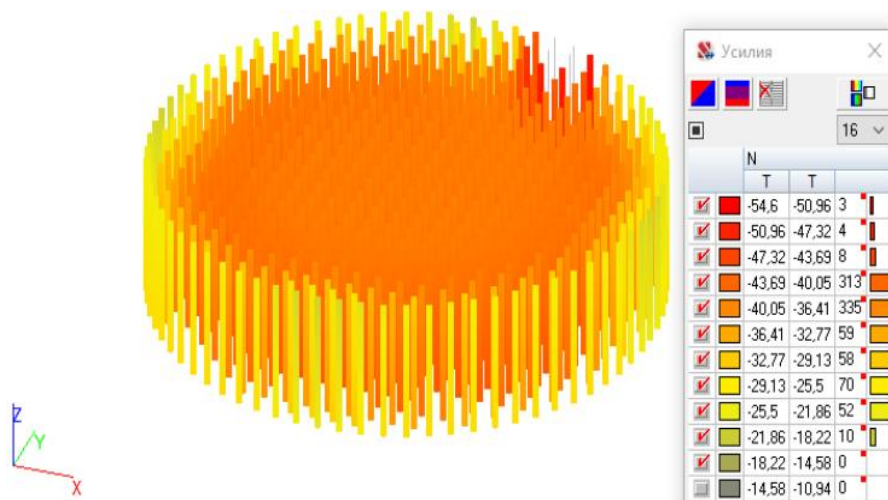


Рис. 3. Эюра усилий, возникающих в сваях, при карстовом провале по краю ростверка (ПК SCAD)
Fig. 3. Diagram of forces arising in piles during karst failure along the edge of the pile cap (SCAD PC)

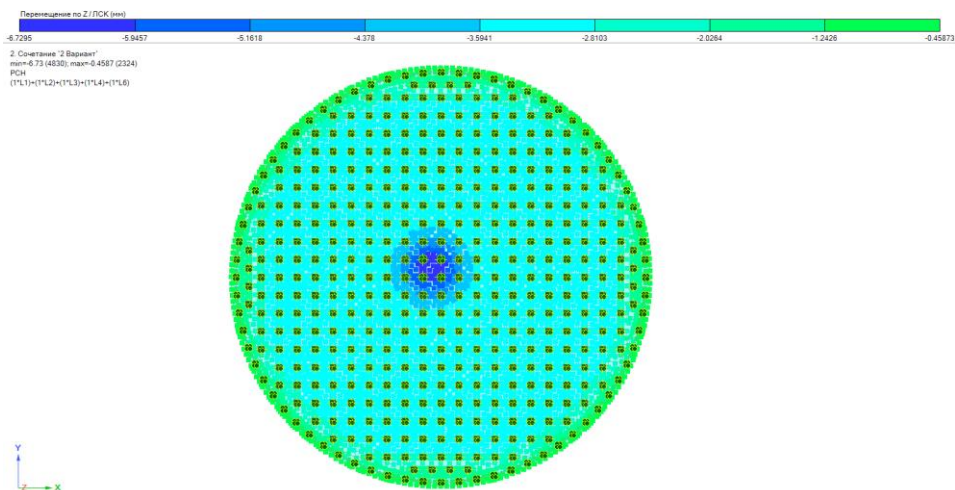


Рис. 4. Эпюра перемещений фундамента при карстовом провале по центру ростверка (ПК ЛИРА-СОФТ)

Fig. 4. Foundation displacement diagram for karst sinkhole in the center of the pile cap (LIRA-SOFT PC)

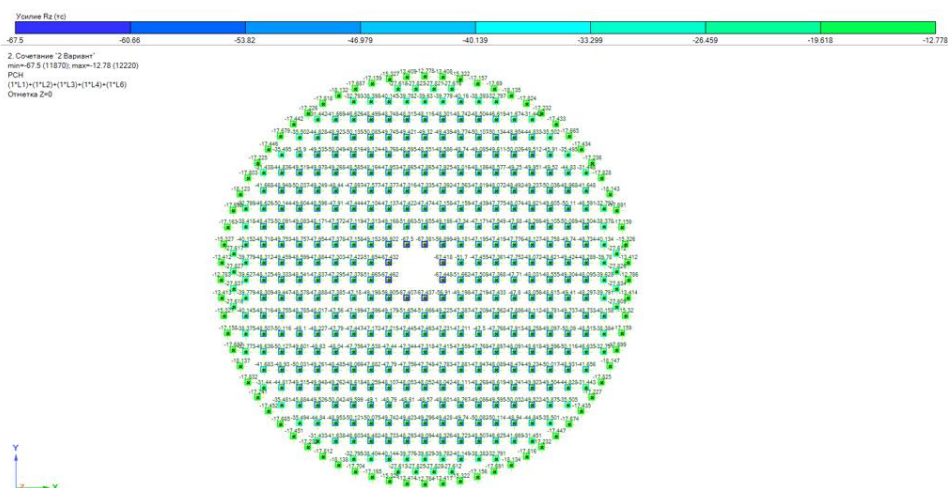


Рис. 5. Эпюра усилий, возникающих в сваях, при карстовом провале по центру ростверка (ПК ЛИРА-СОФТ)

Fig. 5. Diagram of forces arising in piles during karst failure in the center of the pile cap (LIRA-SOFT PC)

Результаты расчетов показали, что при расположении провала по краю ростверка максимальные перемещения составляют 7,71 мм (SCAD) и 4,44 мм (ЛИРА-СОФТ), а максимальные усилия в сваях — 0,54 МН и 0,59 МН соответственно. При центральном расположении карстового провала отмечается рост расчетных параметров. Так, максимальные перемещения увеличиваются до 8,79 мм (SCAD) и 6,73 мм (ЛИРА-СОФТ), а мак-

симальные усилия в сваях — до 0,56 МН и 0,66 МН соответственно. Полученные значения сопоставлены с предельными, регламентируемыми СП 22.13330.2016, согласно которым максимально допустимая осадка свайного фундамента составляет 100 мм, а максимально допустимая нагрузка на одну сваю — 0,75 МН. Так как расчетные значения не превышают предельно допустимые, свайный фундамент резервуара сохраняет достаточную несущую и деформационную способность при моделируемых вариантах локального разрушения грунтового основания.

Анализ результатов, полученных в программных комплексах SCAD и ЛИРА-СОФТ, показал, что модели демонстрируют согласованный характер изменения НДС свайного фундамента РВСП. Несмотря на идентичность расчетных схем, отмечаются расхождения величин перемещений до 3,27 %, а усилий в сваях — до 13,6 %, что свидетельствует о частичной чувствительности результатов к используемому программному обеспечению и реализованным в нем алгоритмам численного анализа.

Так как в отечественной нормативно-технической базе отсутствуют регламентированные значения допустимых расхождений при сравнении результатов расчетов, выполненных в независимых программных комплексах, их целесообразно определить на основании требований действующих нормативных документов и опыта научно-технического сопровождения проектов. В статье предлагается принять следующие пороговые значения: для деформационных параметров (осадок и перемещений) — 10 %, для силовых факторов (усилий в элементах) — 15 %. Эти значения обоснованы следующими положениями:

- согласно СП 22.13330.2016 допускается применение расчетных моделей с различной степенью детализации и дискретизации, вызывающей вариативность результатов в пределах инженерной точности;
- в соответствии с ФЗ № 384 расчетные методы должны обеспечивать подтверждение выполнения требований механической безопасности с учетом допускаемых погрешностей используемых расчетных моделей;
- для метода конечных элементов значение 10 % соответствует типовой погрешности аппроксимации расчетной модели, обусловленной различиями в моделях грунтовой среды, контактных условиях «свая-грунт» и выбранных параметрах дискретизации;
- усилия в элементах конструкций характеризуются повышенной чувствительностью к особенностям моделирования, включая реализацию контактных задач и выбор жесткостных характеристик, вследствие чего целесообразно принятие повышенного порогового значения 15 % для силовых характеристик;

- расхождения в пределах указанных значений не приводят к изменению качественной картины НДС и, следовательно, не влияют на итоговую инженерную оценку работоспособности конструкции.

Таким образом, выявленные расхождения не оказывают существенного влияния на выводы о безопасности и надежности проектных решений. Полученные расхождения подтверждают целесообразность применения независимых расчетных программ для повышения надежности расчетного обоснования проектных решений в условиях карстовой опасности. Проведение расчетов как минимум в двух альтернативных программных комплексах следует рассматривать не только как инструмент верификации, но и как обязательную меру повышения надежности расчетного обоснования проектных решений для сооружений повышенного уровня ответственности.

Выводы

Численное моделирование работы свайного фундамента РВСП-20000 в условиях локального формирования карстовой воронки показало, что параметры НДС конструкции не превышают предельных значений, что свидетельствует о выполнении требований по несущей и деформационной способности.

Результаты расчетов, выполненные в программных комплексах SCAD и ЛИРА-СОФТ, подтверждают адекватность расчетных моделей и обладают достаточной точностью. Из сравнительного анализа следует, что полученные результаты согласуются между собой, а различия незначительны и не влияют на выводы о соответствии конструктивных решений требованиям механической безопасности.

Использование не менее двух альтернативных программных комплексов при выполнении расчетов позволяет повысить надежность расчетного обоснования проектных решений и учесть методическую неопределенность вычислительных алгоритмов. Полученные результаты подтверждают целесообразность и необходимость проведения независимых расчетных проверок как элемента обеспечения механической безопасности технически сложных и ответственных сооружений, в особенности при проектировании объектов, размещаемых в зонах геотехнических рисков.

Вклад авторов

Чепур П. В.: концептуализация; написание статьи; научное редактирование текста; ответы на замечания.

Дмитриев А. В.: разработка численных моделей; научное редактирование текста.

Колядко А. А.: концептуализация; написание статьи; научное редактирование текста; ответы на замечания.

Тарасенко А. А.: написание статьи; научное редактирование текста; ответы на замечания.

Author contributions

Petr V. Chepur: conceptualization; writing; scientific editing; responses to comments.

Andrei V. Dmitriev: development of numerical model; scientific editing.

Alesya A. Kolyadko: conceptualization; writing; scientific editing; responses to comments.

Alexander A. Tarasenko: writing; scientific editing; responses to comments.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Список источников

1. Горбань Н. Н., Иванец В. К., Васильев Г. Г., Леонович И. А. Перспективы параметрического нормирования механической безопасности зданий и сооружений в нефтегазовом комплексе. *Нефтяное хозяйство*. 2024;(9):137–143. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-9-137-143>
2. Горбань Н. Н., Васильев Г. Г., Леонович И. А. Задачи формирования параметрической системы обеспечения комплексной безопасности резервуарных парков морских терминалов. *Нефтяное хозяйство*. 2024;(1):90–97. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-1-90-97>
3. Баязитов М. И., Бердин В. К., Кузеев И. Р., Тляшева Р. Р. Оценка напряженно-деформированного состояния вертикальных резервуаров с нефтепродуктами с учетом внештатных ситуаций. *Нефтегазовое дело*. 2022;(4):21–45. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2022-4-21-45>
4. Сердаров И. И., Хайрудинова С. С. Моделирование и анализ НДС стального цилиндрического резервуара под воздействием рабочих нагрузок. *Студенческий вестник*. 2019;(23-5):70–75.
5. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А. *Исследование закономерностей развития неравномерных осадок резервуаров численными методами*. Новосибирск: Наука; 2017. 172 с.
6. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А. Оценка технического состояния резервуаров с недопустимыми геометрическими несовершенствами формы стенки. *Нефтяное хозяйство*. 2017;(6):118–121. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-118-121>
7. Карпунин В. Г. Прочность и долговечность вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов при неравномерной осадке фундамента. *Оригинальные исследования*. 2022;(12-9):127–138.
8. Рейзмунт Е. М., Доронин С. В. Моделирование сценариев повреждения резервуара при осадке основания. *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures*. 2018;(4):23–33. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2018.4.023-033>
9. Чепур П. В., Тарасенко А. А. Особенности деформирования крупногабаритных резервуаров со стационарной крышей при неосесимметричном воздействии ветровой нагрузки. *Фундаментальные исследования*. 2015;(12-1):97–102.
10. Tarasenko A. A., Kononov P. A., Zekhniev F. F., Chepur P. V., Tarasenko D. A. Effects of nonuniform settlement of the outer bottom perimeter of a large tank on its stress-strain state. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017;(53-6):405–411. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9420-1>

11. Гарькин И. Н., Гарькина И. А. *Техническая экспертиза зданий и сооружений*. Москва: Перо; 2021. 128 с.
12. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А. Определение действующих напряжений в полотнищах днищ резервуаров отечественных типоразмеров при локальных просадках оснований. *Фундаментальные исследования*. 2015; (2-8): 1665–1670.
13. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Determining deformations of the central part of a vertical steel tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones. In: *AIP Conference Proceedings*. 2016;(1772-1):060011. <https://doi.org/10.1063/1.4964591>
14. Нуриев М. И., Порываев И. А., Авренюк А. Н., Сабиров Р. А., Потешкин П. В. Исследование влияния хлопунгов на напряженно-деформированное состояние конструкций резервуаров. *Нефтегазовое дело*. 2022;(2-20):94–101. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-2-94-101>
15. Колесов И. Д. Проектирование в условиях карста. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2025;(1-51):33–38.
16. Вознесенский Е. А. Распространение и прогноз развития опасных геологических процессов на территории России. *Вестник Российской академии наук*. 2024; (94-8):749–759. <https://doi.org/10.31857/S0869587324080061>
17. Дробинина Е. В., Катаев В. Н. Изучение изменчивости физико-механических свойств перекрывающих отложений в карстологическом прогнозе. *Ученые записки крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2021;(7-2):316–330.
18. Сорокина М. Н., Землеруб Л. Е., Терегулов М. Р. Монолитный сегментно-сферический фундамент для крупногабаритных РВС, оснащенный системой определения и предотвращения просадки грунта. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2024;(3-4):56–60. <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2024-3-4-56-60>
19. Семин А. С., Татьянников Д. А. Анализ методов устройства фундаментов на слабых основаниях для стальных вертикальных резервуаров. *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2020;(2):391–398.
20. Полищук А. И., Шмидт О. А. Развитие метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2021;(5):2–7.
21. Тарасенко А. А., Чепур П. В. Особенности совместной работы кольцевого фундамента и грунтового основания при наличии зон неоднородности. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016;(4):9–3.
22. Кардапольцев А. В., Каравайченко М. Г. Численное моделирование ребристо-кольцевой купольной крыши вертикального резервуара для хранения СПГ. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2021;(1):24–29. <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2021-1-24-29>
23. Урманова А. Р., Султанмагомедов Т. С., Байкова Л. Р., Давлетбаева А. Р. Анализ напряженно-деформированного состояния резервуара при развитии осадок вследствие оттаивания мерзлого грунта. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2025;(11-336):44–54. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/11/4898>

24. Давлетбаева А. Р., Султанмагомедов Т. С. Моделирование деформаций свайных фундаментов шаровых резервуаров при сезонном оттаивании вечной мерзлоты. *Материалы XIX Международной научно-практической конференции, приуроченной к 95-летию со дня рождения профессора В. Ф. Новоселова и к 15-летию со дня образования ООО "НИИ Транснефть"*, 2024. С. 233–235.
25. Шейнин В. И. К проблеме обнаружения и определения размеров подземных карстовых полостей. *Инженерные изыскания*. 2022;(3-16):34–44.
26. Кислицын Д. И., Боковая П. М., Жильцов И. С. Метод раннего обнаружения карстового провала под строительным объектом. *Приволжский научный журнал*. 2023;(2-66):81–87.
27. Китаева М. А., Дробинина Е. В. Опыт проведения карстологического районирования территории проектирования линейного сооружения. *Спелеология и спелеология*. 2023;(2):21–25.
28. Мущанов В. Ф., Цепляев М. Н., Зубенко А. В. Варианты конечно-элементного моделирования элементов вертикальных цилиндрических резервуаров. *Журнал теоретической и прикладной механики*. 2020;(2-71):37–48.
29. Мосолов Г. В., Солдатов М. В., Димов И. Л. Применение численной модели грунта с двойным упрочнением и учетом малых деформаций для расчета осадок резервуаров. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2024;(1-14):8–20. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-8-20>
30. Котов П. И., Роман Л. Т., Царапов М. Н. Влияние условий оттаивания и уплотнения на деформационные характеристики оттаивающих грунтов. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2017;(4-1):58–63. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-1-58-63>
31. Сюй С., Дай Ц. Х., Чэнь Л. Ц., Сюй С. Т. Нелинейная упругопластическая модель грунта, ее численная реализация и использование. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2022;(3):5.
32. Кислицын Д. И., Хромых В. Е. Численные эксперименты по методу раннего определения местоположения и диаметра карстового провала в основании строительного объекта по имеющимся малым вертикальным перемещениям на однородном грунте. *Приволжский научный журнал*. 2023;(4-68):50–56.

References

1. Gorban N. N., Ivanetc V. K., Vasilev G. G., Leonovich I. A. Prospects for parametric standardization of mechanical safety of oil and gas facilities. *Oil industry*. 2024;(9):137–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-9-137-143>
2. Gorban N. N., Vasi'ev G. G., Leonovich I. A. Tasks of forming a parametric system for ensuring the integrated safety of tank farms of marine terminal. *Oil industry*. 2024;(1):90–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-1-90-97>
3. Bayazitov M. I., Berdin V. K., Kuzeev I. R., Tlyasheva R. R. Assessment of the stress-strain state of vertical tanks with petroleum products, taking into account emergency situations. *Neftegazovoe delo*. 2022;(4):21–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ogbus-2022-4-21-45>
4. Serdarov I. I., Khajrudinova S. S. Modeling and analysis of SSS of a steel cylindrical tank under the influence of workloads. *Studencheskij vestnik*. 2019;(23-5):70–75. (In Russ.).

5. Tarasenko A. A., Chepur P. V., Gruchenkova A. A. *Investigation of the patterns of development of uneven tank sediments by numerical methods*. Novosibirsk: Nauka; 2017. (In Russ.).
6. Tarasenko A. A., Chepur P. V., Gruchenkova A. A. Evaluation of technical condition of tanks with geometrical imperfections form wall. *Oil industry*. 2017;(6):118–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-118-121>
7. Karpunin V. G. Strength and durability of vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products with uneven foundation sedimentation. *Original research*. 2022;(12-9):127–138. (In Russ.).
8. Reizmunt E. M., Doronin S. V. Modeling of tank damage scenarios caused by foundation subsidence. *Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures*. 2018;(4):23–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2018.4.023-033>
9. Chepur P. V., Tarasenko A. A. Features of fixed roof tanks deformation effect in axisymmetric wind load. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015;(12-1):97–102. (In Russ.).
10. Tarasenko A. A., Konovalov P. A., Zekhniev F. F., Chepur P. V., Tarasenko D. A. Effects of nonuniform settlement of the outer bottom perimeter of a large tank on its stress-strain state. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017;(53-6):405–411. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9420-1>
11. Gar'kin I. N., Gar'kina I. A. *Technical expertise of buildings and structures*. Moscow: Pero; 2021. (In Russ.).
12. Tarasenko A. A., Chepur P. V., Gruchenkova A. A. Determination of the operating stresses in the panels of the bottoms of tanks of domestic standard sizes with local subsidence of the bases. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015;(2-8):1665–1670. (In Russ.).
13. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Determining deformations of the central part of a vertical steel tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones. In *AIP Conference Proceedings*. 2016;(1772-1):060011. <https://doi.org/10.1063/1.4964591>
14. Nuriev M. I., Poryvaev I. A., Avrenyuk A. N., Sabirov R. A., Poteshkin P. V. Investigation of the effect of claps on the stress-strain state of tank structures. *Petroleum engineering*. 2022;(2-20):94–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-2-94-101>
15. Kolesov I. D. Design in karst conditions. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2025;(1-51):33–38. (In Russ.).
16. Voznesensky E. A. Geological hazards on the territory of Russia: their distribution and development prediction. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2024;(8):749–759. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869587324080061>
17. Drobinina E. V., Kataev V. N. The study of the variability of the physico-mechanical properties of overlapping deposits in the karstological forecast. *Uchenye zapiski krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2021;(7-2):316–330. (In Russ.).
18. Sorokina M. N., Zemlerub L. E., Teregulov M. R. Monolithic segmented spherical foundation for large tanks RVS, equipped with a system for detecting and preventing subsidence of soil. *Transport and storage of oil products and hydrocarbons*. 2024;(3-4):56–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2024-3-4-56-60>

19. Semin A. S., Tat'yannikov D. A. Analysis of methods of building foundations on weak foundations for vertical steel tanks. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2020;(2):391–398. (In Russ.).
20. Polishchuk A. I., Shmidt O. A. Method for calculating the settlement of circular pile foundations of a reservoir. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021;(58-5):347–352. (In Russ.).
21. Tarasenko A. A., Chepur P. V. Aspects of the joint operation of a ring foundation and a soil bed with zones of inhomogeneity present. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016;(53-4):238–243. (In Russ.).
22. Kardapoltsev A. V., Karavaychenko M. G. Numerical simulation of a ribbed-ring dome roof of a vertical LNG storage tank. *Transport and storage of oil products and hydrocarbons*. 2021;(1):24–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2021-1-24-29>
23. Urmanova A. R., Sultanmagomedov T. S., Baykova L. R., Davletbayeva A. R. Analysis of a reservoir stress-strain state when setting at frozen soil thawing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025;(11-336):44–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/11/4898>
24. Davletbaeva A. R., Sultanmagomedov T. S. Modeling of deformations of pile foundations of spherical tanks during seasonal thawing of permafrost. *Materialy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, priurochennoj k 95-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.F. Novoselova i k 15-letiyu so dnya obrazovaniya OOO "NII Transneft"*. 2024;233–235. (In Russ.).
25. Shejnin V. I. To the problem of detecting and determining the size of underground karst cavities. *Inzhenernye izyskaniya*. 2022;(3-16):34–44. (In Russ.).
26. Kislitsyn D. I., Bokovaya P. M., Zhil'tsov I. S. Method for early detection of a sink under a construction site. *Privolzhsky scientific journal*. 2023;(2-66): 81–87. (In Russ.).
27. Kitaeva M. A., Drobinina E. V. Experience in karstological zoning of linear structure design area. *Speleology and speleology*. 2023;(2):21–25. (In Russ.).
28. Mushchanov V. F., Tseplyaev M. N., Zubenko A.V. Finite element modeling options for vertical cylindrical tank. *Journal of theoretical and applied mechanics*. 2020;(2-71):37–48. (In Russ.).
29. Mosolov G. V., Soldatov M. V., Dimov I. L. Application of a numerical soil model with double hardening and taking into account small deformations for calculating tank sediments. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*. 2024;(1-14):8–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2024-14-1-8-20>
30. Kotov P. I., Roman L. T., Tsarapov M. N. Impact of compaction and thaw conditions on deformation characteristics of thawing soils. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2017;(4-1):58–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2017-1-58-63>
31. Xu S., Daj C. Kh., Chen L. J., Xu S. T. Nonlinear elastic-perfectly plastic model of soil and its numerical implementation and application. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022;(3):5. (In Russ.).
32. Kislitsyn D. I., Khromykh V. E. Numerical experiments on the method of early determination of the location and diameter of a karst sinkhole at the base of a construction site based on existing small vertical displacements on homogeneous soil. *Privolzhsky scientific journal*. 2023;(4-68):50–56. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

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

Дмитриев Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, dmitrievav@tyuiu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3832-5321>

Колядко Аlesia Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела, Филиал ТИУ в г. Сургуте, г. Сургут, alesya2010-11@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5376-5221>

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

Petr V. Chepur, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, chepur_p_v@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6722-459X>

Andrei V. Dmitriev, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, dmitrievav@tyuiu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3832-5321>

Alesya A. Kolyadko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Industry, Branch of Industrial University of Tyumen in Surgut, alesya2010-11@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5376-5221>

Alexander A. Tarasenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, Tyumen, a.a.tarasenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3903-0632>

Поступила в редакцию / Received 01.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 15.01.2025

Принята к публикации / Accepted 16.01.2025