

Анализ влияния циклического нагружения на осадку глинистого основания резервуара

Евгения Николаевна Акбулякова, Карина Алексеевна Казаринова,
Екатерина Давыдовна Телепова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Грунты в основании фундаментов резервуаров подвержены циклам нагружения и разгружения при наливе и опорожнении резервуара. Строительство таких сооружений зачастую ведется на участках, где залегают переувлажненные глинистые грунты. Цель исследования — изучить изменение вертикальных деформаций водонасыщенных глин под воздействием циклов «нагрузка – разгрузка». Это позволит выявить величины дополнительных осадок водонасыщенного глинистого основания при циклах нагружения и разгружения.

Материалы и методы. Выполнена серия лабораторных испытаний в одометре с циклами нагружения и разгружения с образцами глин мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции. Полученные при лабораторных испытаниях значения механических параметров исследуемых глин использованы в численных расчетах осадки основания вертикального стального резервуара в программном комплексе PLAXIS 2D.

Результаты. Изучено влияние консистенции глины на величину осадки при циклическом нагружении образцов в компрессионном приборе. Определено соотношение пластических и упругих деформаций для глин мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции. Дополнительная осадка глин мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции, вызванная циклическим нагружением и разгружением (в пределах первых 10 циклов), составила до 10 % от общей осадки грунта. По результатам численных экспериментов выявлено, что дополнительные осадки основания резервуара при 20 циклах нагружения и разгрузки составляли 2,4–4,1 % от общей осадки.

Выводы. Проведенные лабораторные и численные исследования показали, что циклы нагружения и разгружения водонасыщенных глин приводят к развитию дополнительных осадок. Величина дополнительной осадки зависит от количества циклов и консистенции глины. За все время эксплуатации резервуара число циклов налива и опорожнения может составлять более 2000, поэтому следует ожидать приращения дополнительных деформаций грунта в основании фундамента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: глина, упругие деформации, пластические деформации, одометр, PLAXIS 2D, стальной вертикальный резервуар, осадка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Акбулякова Е.Н., Казаринова К.А., Телепова Е.Д. Анализ влияния циклического нагружения на осадку глинистого основания резервуара // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1211–1220. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1211-1220

Автор, ответственный за переписку: Евгения Николаевна Акбулякова, aspirant123@mail.ru.

Analysis of the influence of cyclic loading on the settlement of clay base of tank

Evgeniya N. Akbulyakova, Karina A. Kazarinova, Ekaterina D. Telepova
Perm National Research Polytechnic University (PNRPU); Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The soils at the base of tank foundations are subject to loading and unloading cycles during tank filling and emptying. The construction of such constructions is often carried out in areas with overwatered clay soils. The purpose of the study is to investigate the change in vertical deformations of water-saturated clays under the influence of “loading – unloading” cycles. This will make it possible to identify the values of additional settlements of water-saturated clay subgrade under loading and unloading cycles.

Materials and methods. A series of laboratory tests was performed in an odometer with cycles of loading and unloading with specimens of firm, soft-firm and very soft clays. The values of mechanical parameters of the studied clays obtained during laboratory tests were used in numerical calculations of the settlement of the base of a vertical steel tank in the PLAXIS 2D software package.

Results. The influence of clay consistency on the value of settlement under cyclic loading of samples in a compression device was studied. The ratio of plastic and elastic deformations was determined for clays of firm, soft-firm and very soft consistency. Additional settlement of clays with firm, soft-firm and very soft consistency caused by cyclic loading and unload-

ing (within the first 10 cycles) amounted to 10 % of the total soil settlement. The results of numerical experiments showed that the additional settlement of the tank base at 20 cycles of loading and unloading amounted to 2.4–4.1 % of the total settlement.

Conclusions. Laboratory and numerical studies have shown that loading and unloading cycles of water-saturated clays lead to the development of additional settlement. The amount of additional settlement depends on the number of cycles and the consistency of the clay. During the whole period of the tank operation the number of filling and emptying cycles can be more than 2000, therefore, additional soil deformations in the foundation base should be expected.

KEYWORDS: clay, elastic deformations, plastic deformations, odometer, PLAXIS 2D, steel vertical tank, settlement

FOR CITATION: Akbulyakova E.N., Kazarinova K.A., Telepova E.D. Analysis of the influence of cyclic loading on the settlement of clay base of tank. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1211-1220. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1211-1220 (rus.).

Corresponding author: Evgeniya N. Akbulyakova, aspirant123@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные стальные цилиндрические резервуары, используемые для хранения нефти, относятся к сооружениям повышенного уровня ответственности. Аварии на таких инженерных конструкциях представляют серьезную угрозу для окружающей среды и жизни людей. Поэтому при возведении стальных цилиндрических вертикальных резервуаров предъявляются высокие требования к расчетам оснований их фундаментов [1, 2]. При проектировании таких резервуаров важным аспектом является выбор надежного и устойчивого основания, особенно в сложных инженерно-геологических условиях, где часто встречаются водонасыщенные глинистые грунты мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции [1].

Циклическое нагружение и разгружение при наливе и опорожнении резервуаров, а также утечки из резервуара вызывают изменение свойств грунтов основания [2–5]. Это может существенно повлиять на устойчивость и эксплуатационные характеристики данных сооружений [6–10]. Среди главных причин аварийных ситуаций с резервуарами авторы трудов [11–14] выделяют: нарушение технологии строительно-монтажных работ, грубые ошибки на стадии изысканий и проектирования, наличие дефектов в материалах и конструкциях, неравномерную осадку основания. В публикациях [12–14] отмечено, что развитие неравномерных осадок водонасыщенного глинистого основания служит наиболее частой причиной аварий вертикальных стальных резервуаров. Учитывая большой объем стальных резервуаров, а также хранение опасных жидкостей, необходимо исследовать поведение резервуаров в различных грунтовых условиях и с учетом их циклического нагружения и разгружения [15–20]. Использование современных методик и программных комплексов (ПК) для геотехнических расчетов позволяет более точно оценить долгосрочные последствия циклического нагружения, что способствует повышению безопасности и эффективности эксплуатации стальных цилиндрических вертикальных резервуаров [18–21]. Поэтому обеспечение безаварийной эксплуатации резервуаров в сложных инженерно-геологических

условиях — актуальная задача геотехники территорий.

Цель исследования — анализ влияния циклов «нагружение – разгружение» на осадку основания резервуара, представленного глинами трех консистенций: мягкопластичной, текучепластичной, текучей.

Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи:

1. Выполнены компрессионные испытания с циклами «нагружение – разгружение» для образцов глин трех консистенций: мягкопластичной, текучепластичной, текучей.
2. Полученные компрессионные кривые использованы для калибровки параметров численной модели Soft Soil для исследуемых глин мягкопластичной, текучепластичной, текучей консистенции.
3. Выполнены численные расчеты осадки резервуара для трех случаев глинистого основания (глина мягкопластичная, глина текучепластичная, глина текучая).
4. Проанализированы результаты лабораторных испытаний и численных расчетов, сформулированы выводы по работе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью лабораторного исследования была выбрана аллювиальная глина четвертичного возраста, отобранная на одной из строительных площадок в г. Перми. Для испытываемых образцов глины заданы значения влажности, соответствующие трем консистенциям — мягкопластичной, текучепластичной, текучей. Далее проведен комплекс лабораторных испытаний для установления физических и механических характеристик глины. Значения некоторых характеристик исследуемых глин представлены в табл. 1.

Для определения упругих и пластических свойств грунта выполнено три серии испытаний в компрессионном приборе для трех разных консистенций исследуемой глины: мягкопластичной, текучепластичной, текучей. В каждой серии испытания осуществлены с тремя образцами-близнецами. Компрессионные испытания включали 10 циклов «нагрузка – разгрузка» для каждого образца.

Табл. 1. Значения характеристик исследуемых грунтов

Table 1. Values of characteristics of the investigated soils

Параметр Parameter	Средние значения параметров для трех типов глин Average values of parameters for three types of clays		
	Мягкопластичная глина Firm clay	Текучепластичная глина Soft-firm clay	Текучая глина Very soft clay
Удельный вес, кН/м³ Specific weight, kN/m³	20,2	19,2	18,5
Модуль Юнга, МПа Young modulus, MPa	26,0	23,0	20,0
Удельное сцепление, кН/м² Cohesion intercept, kN/m²	43,0	38,5	34,5
Угол внутреннего трения, ° Angle of internal friction, °	14,5	13,0	11,0

Полученные при лабораторных испытаниях значения параметров физических и механических характеристик глин использованы для численных экспериментов в ПК PLAXIS 2D. В качестве объекта исследования выбран вертикальный стальной резервуар. Объем резервуара составляет 3 тыс. м³, внутренний диаметр — 18,98 м, высота — 12 м. Эксплуатационная нагрузка на дно резервуара равна 133 кПа. Под стенкой резервуара расположен монолитный кольцевой железобетонный фундамент. Под фундаментом резервуара находится подушка из щебня, ниже располагается глина. Расчет осадки основания резервуара выполнен для трех типов глин в основании фундамента: мягкопластичной, текучепластичной, текучей. На рис. 1 приведена расчетная схема основания резервуара в ПК PLAXIS 2D.

С целью проведения численных расчетов для исследуемых мягкопластичных, текучепластичных и текучих глин была использована модель Soft Soil, которая позволяет учитывать нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями. Среди недостатков данной модели можно отметить завышение области упругого поведения грунта и, как следствие, недостаточную точность при модели-

ровании циклического нагружения. Для повышения точности численных экспериментов авторы предварительно откалибровали параметры модели Soft Soil в модуле Soil Test с применением выполненных компрессионных испытаний. Калибровка производилась путем последовательного подбора значений коэффициента компрессии и коэффициента декомпрессии для максимального приближения модельной компрессионной кривой к опытной компрессионной кривой. Полученные значения коэффициента компрессии и коэффициента декомпрессии приведены в табл. 2.

Далее выполнены три серии численных экспериментов для моделирования работы трех типов основания резервуара: глины мягкопластичной, глины текучепластичной, глины текучей. Для численного моделирования работы основания фундамента при наливе и опорожнении резервуара в расчетах были заданы 20 циклов нагружения и разгружения основания. Полученные результаты дали возможность сформулировать выводы о влиянии консистенции глин и количества циклов нагружения на величину вертикальных деформаций основания резервуара.

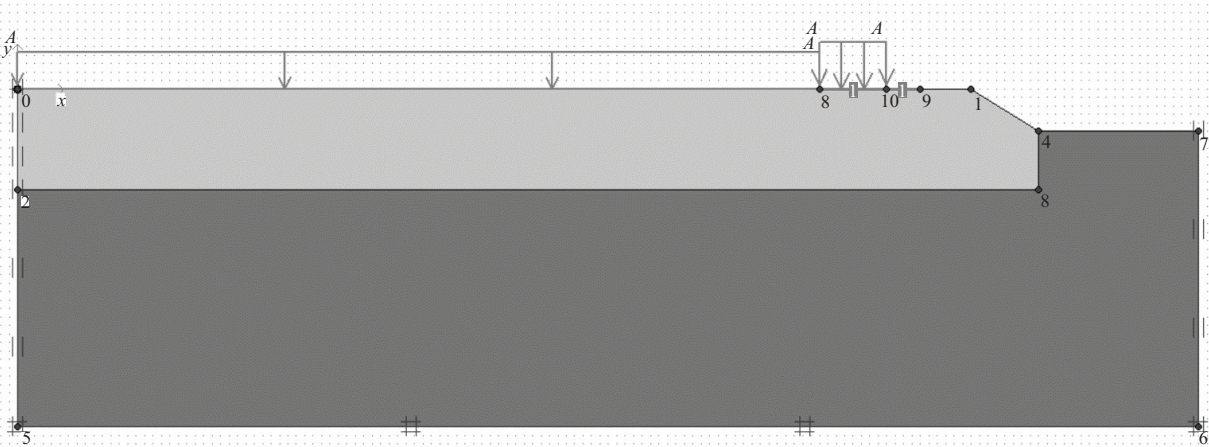


Рис. 1. Расчетная схема основания резервуара

Fig. 1. Calculation scheme of the tank base

Табл. 2. Значения коэффициентов компрессии и декомпрессии

Table 2. Values of compression and decompression ratio

Параметр Parameter	Тип грунта Soil type		
	Мягкопластичная глина Firm clay	Текучепластичная глина Soft-firm clay	Текучая глина Very soft clay
Коэффициент компрессии λ Compression ratio λ	0,031	0,060	0,089
Коэффициент декомпрессии k Decompression ratio k	0,009	0,015	0,015

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам компрессионных испытаний с циклическим нагружением и разгрузением образцов грунта получены вертикальные деформации для трех исследуемых консистенций глины (рис. 2).

Анализ компрессионных испытаний глин позволил сформулировать следующие выводы:

1. Доля пластических деформаций глины для первичного нагружения и разгрузки составляла 79–93 %. Максимальные значения пластических деформаций были зафиксированы для образцов текучей глины, минимальные — для глины мягкопластичной. Доля упругих деформаций при первичной нагрузке и разгрузке составляла 7–21 %. При последующих циклах нагружения и разгрузки доля пластических деформаций снижалась, начинали преобладать упругие деформации. После 7–9 циклов нагружения и разгрузки образцы исследуемых глин начинали деформироваться только упруго.

2. Дополнительные вертикальные деформации глины, вызванные циклическим нагружением и разгрузением (в пределах рассматриваемых 10 циклов), составляли до 10 % от общей деформации образца грунта и возрастали с увеличением количества циклов.

3. При увеличении показателя текучести значения модуля упругости уменьшались и увеличивалась относительная вертикальная деформация образцов глины. Коэффициент корреляции для зависимости между нагрузкой и вертикальной деформацией образца составил 0,98.

На основании выполненных компрессионных испытаний образцов глин в одометре для расчета вертикальной деформации S_{oed} авторами получена экспоненциальная зависимость, имеющая вид:

$$S_{oed} = 0,4348 \cdot e^{2,0974 \cdot IL}, \tag{1}$$

где IL — показатель текучести грунта, д. ед.

Величина достоверности аппроксимации для данного уравнения составила 0,99.

По результатам численных расчетов основания вертикального резервуара в PLAXIS 2D получены изолинии перемещений грунтового основания для трех случаев — глина мягкопластичная (рис. 3, *a*), глина текучепластичная (рис. 3, *b*) и глина текучая (рис. 3, *c*).

Анализ рис. 3 показал, что вертикальные перемещения под центральной частью резервуара и под крайними участками отличаются. Максимальные значения

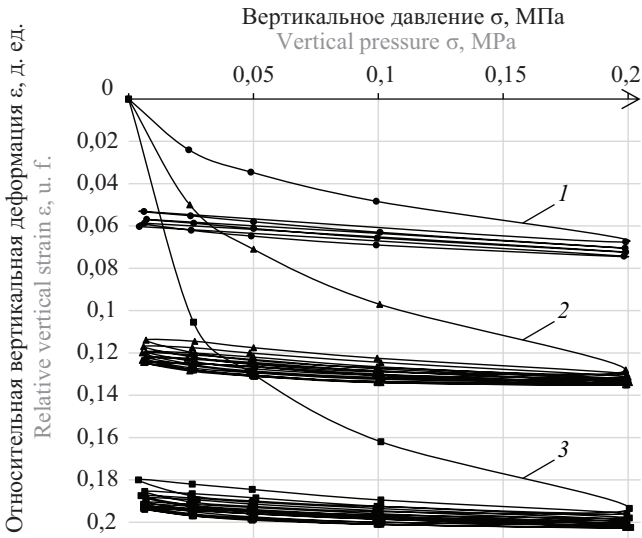


Рис. 2. Графики испытания глины методом компрессионного сжатия: 1 — мягкопластичная глина; 2 — текучепластичная глина; 3 — текучая глина

Fig. 2. Graphs of clay compression test: 1 — firm clay; 2 — soft-firm clay; 3 — very soft clay

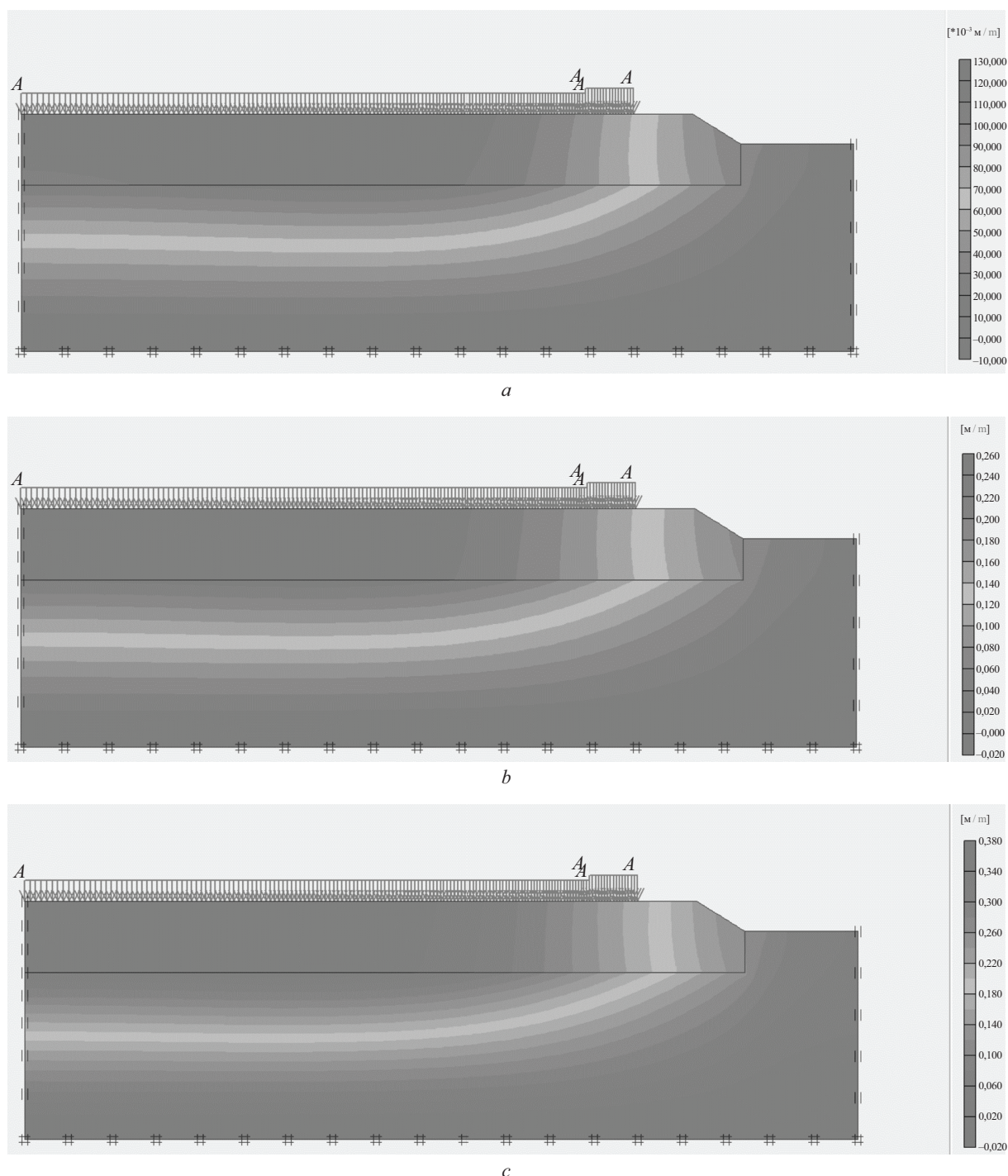


Рис. 3. Изолинии вертикальных перемещений: *a* — глина мягкопластичная; *b* — глина текучепластичная; *c* — глина текучая

Fig. 3. Isolines of vertical displacements: *a* — firm clay; *b* — soft-firm clay; *c* — very soft clay

осадки наблюдались под центральной частью дна резервуара и убывали к краевым зонам. Поэтому при наличии в основании фундамента резервуара мягкопластичных, текучепластичных и текучих глин может возникать разность осадок под центром резервуара и под его стенкой. Это будет являться причиной образования крена, смещения центра тяжести и неравномерного распределения нагрузки от давления хранимого продукта на фундамент, увеличения напря-

жений в стенке и в соединительных узлах, появления трещин в конструкциях.

Графики осадки для трех случаев основания резервуара — глина мягкопластичная, глина текучепластичная и глина текучая, полученные на основании численного моделирования циклов «нагружение — разгружение» резервуара, показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при первом цикле нагружения основания резервуара происходят основные

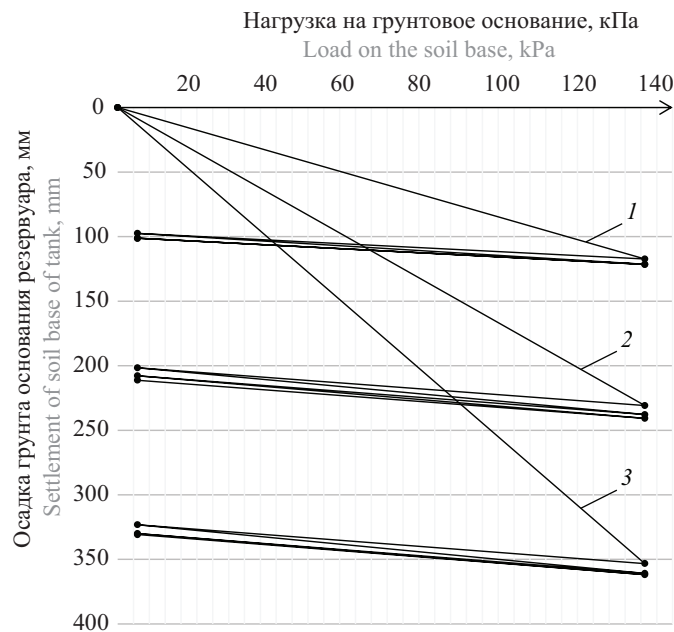


Рис. 4. Графики осадки основания резервуара при циклах «нагрузка – разгрузка»: 1 — мягкопластичная глина; 2 — текучепластичная глина; 3 — текучая глина

Fig. 4. Graphs of tank base settlement during loading – unloading cycles: 1 — firm clay; 2 — soft-firm clay; 3 — very soft clay

вертикальные деформации грунта, при последующих циклах «нагрузка – разгрузка» отмечается дополнительное приращение деформаций грунта. По результатам численных экспериментов получено, что на этапах разгрузки грунт в основании резервуара частично восстанавливает свои деформации, проявляя упругие свойства. Пластическая составляющая деформаций осадки основания резервуара для первичного нагружения и разгрузки составила 83–92 %, что хорошо согласуется с результатами лабораторных испытаний в компрессионном приборе.

По данным численных расчетов дополнительные осадки основания резервуара при 20 циклах нагружения и разгрузки составляли 2,4–4,1 % от общей осадки. Значения осадки возрастали с увеличением показателя текучести глины, коэффициент корреляции для данной зависимости — 0,98. После обработки результатов численных вычислений было получено выражение, аппроксимирующее зависимость осадки фундамента резервуара от показателя текучести глины:

$$S_{ss} = 31,654 \cdot e^{2,3056 \cdot IL}, \tag{2}$$

где IL — показатель текучести грунта, д. ед.

Величина достоверности аппроксимации уравнения (2) составила 0,99. Полученное уравнение позволяет выполнить предварительный расчет вертикальных деформаций основания фундамента, сложенного глинами со значением показателя текучести от 0,58 до 1,05, для резервуара объемом 3 тыс. м³ с учетом 20 циклов налива и опорожнения.

За все время эксплуатации резервуара число циклов налива и опорожнения может составлять более

2000, поэтому следует ожидать приращения дополнительных вертикальных деформаций грунта. Максимальные значения расчетных осадок основания, сложенного мягкопластичными глинами, не превышали допустимых значений по ВСП 34-01-03. Для случаев текучепластичной и текучей глины полученные значения осадки превысили допустимые значения по ВСП 34-01-03. Это означает, что при наличии таких глин в основании резервуара необходимо предусматривать дополнительные технические решения, например армирование основания геосинтетическими материалами, замену слабого грунта (при неглубоком его залегании), увеличение мощности грунтовой подушки, усиление грунтов основания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы.

Доля пластических деформаций для первичного нагружения и разгрузки в компрессионном приборе составляла 79–93 %. Значения деформаций возрастали при увеличении показателя текучести глины. При повторном нагружении и разгрузении глины в компрессионном приборе доля пластических деформаций снижалась, начинали преобладать упругие деформации. После 7–9 циклов нагружения образцы глины мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции начинали деформироваться только упруго. Дополнительные осадки глины, вызванные циклическим нагружением в компрессионном приборе (в пределах рассматриваемых 10 циклов), составляли до 10 % от общей осадки грунта.

Полученные результаты численных расчетов хорошо согласуются с результатами лабораторных испытаний глин. При моделировании первичного нагружения резервуара происходят основные вертикальные деформации грунта, при последующих циклах «нагрузка – разгрузка» отмечается дополнительное приращение деформаций грунта. Пластическая составляющая деформаций осадки основания резервуара для первичного нагружения и разгрузки составила 83–92 %. Также выявлено, что на этапах разгрузки грунт в основании резервуара частично восстанавливает свои деформации, проявляя упругие свойства. По данным численных расчетов при 20 циклах нагружения и разгрузки дополнительные осадки основания резервуара составляли 2,4–4,1 % от общей осадки.

Получено уравнение для предварительного прогноза максимальных вертикальных деформаций основания фундамента, сложенного глинами со значением показателя текучести от 0,58 до 1,05, для резервуара объемом 3 тыс. м³ с учетом 20 циклов налива и опорожнения.

Численные расчеты показали, что значения расчетных осадок основания, сложенного мягкопластичными глинами, не превышают допустимых значений по ВСП 34-01-03. Однако для случаев текучепластичной и текучей глины полученные значения осадки превысили допустимые значения по ВСП 34-01-03. Это означает, что при наличии таких глин в основании резервуара необходимо предусматривать дополнительные технические решения, например: армирование основания геосинтетическими материалами, замену слабого грунта (при неглубоком его залегании), увеличение мощности грунтовой подушки.

Практический интерес представляют дальнейшие исследования работы грунта с многократным нагружением и разгрузкой как в лабораторных, так и в полевых условиях. За все время эксплуатации вертикальных стальных резервуаров для нефтепродуктов число циклов налива и опорожнения может составлять более 2000, поэтому следует ожидать приращения дополнительных деформаций грунтов в основании их фундаментов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мангушев Р.А., Кириллов В.М. Анализ закономерностей развития осадок фундаментов стальных цилиндрических резервуаров на слабых грунтах // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3 (68). С. 84–89. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-84-89. EDN VJRQZT.
2. Мирсаяпов И.Т., Сабирзянов Д.Д. Несущая способность основания фундаментов при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагружениях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 153–163. EDN UOVUZO.
3. Kou H., Fang W., Zhou N., Huang J., Zhang X. Dynamic response of single-bucket foundation in clay under vertical variable amplitude cyclic loadings // Ocean Engineering. 2023. Vol. 273. P. 113973. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113973
4. Liu W., Tan J., Lv W., Chen Ch., Qu Sh. Characteristics and predictions of accumulative deformation of structured soft soil under long-term cyclic loading // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2025. Vol. 189. P. 109088. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109088
5. Zhang T., Li T., Feng Sh. Elastoplastic modelling for long-term cyclic stability of soft clays with consideration of structure damage // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 166. P. 107727. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107727
6. Schreinert G.G., Kern C., Lunkes Strieder H., Teixeira Brito L.A., Nunez W.P. Influence of number of load cycles on the resilient response of soils under

- repeated load triaxial tests // Transportation Geotechnics. 2025. Vol. 50. P. 101493. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101493
7. Xiao X., Guan X., Wu Q., Zhao D., Zhou R., Chen G. Energy-based method for the failure criterion and resistance evaluation of marine clay under cyclic loading // Engineering Geology. 2025. Vol. 344. P. 107833. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107833
8. Tafili M., Albared A., Prada-Sarmiento L.F., Wichtmann T. Loading rate influence on high-cyclic loading of clays // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 173. P. 108103. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108103
9. Zhang J., Zhang A., Li J., Fan H. Enhanced understanding on permanent deformation behaviour of subgrade compacted clay under long-term cyclic loading // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2024. Vol. 187. P. 108972. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108972
10. Wang H.L., Sun Y.H., Chen R.P., Peng Ch.Y., Khasanov A. Deformation characteristics and stability analysis of lean clay under cyclic loading // Transportation Geotechnics. 2024. Vol. 47. P. 101285. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101285
11. Васильев Г.Г., Сальников А.П. Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 106–108. EDN TJFVMX.
12. Shuxin Zh., Chun K., Penggang Zh., Jinheng L., Yingjie Sh., Gang W. et al. Failure analysis of local settlement induced Q345R bottom plate cracking of crude oil

storage tank // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Issue 11. P. e11952. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11952

13. Naseri H., Showkati H., Zirakian T. Experimental investigation of geometrical and physical behaviors of thin-walled steel tanks subjected to local support settlement // *Structures*. 2021. Vol. 34. Pp. 413–422. DOI: 10.1016/j.jistruc.2021.08.011

14. Семин А.С., Татьянаников Д.А. Устройство фундамента на искусственном основании для стального вертикального резервуара // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. № 3. С. 37–44. DOI: 10.15593/24111678/2021.03.05. EDN RJOAVI.

15. Gunerathne S., Seo H., Lawson D.W., Jayawickrama P.W. Analysis of edge-to-center settlement ratio for circular storage tank foundation on elastic soil // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 102. Pp. 136–147. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.05.008

16. Nassernia S., Showkati H. Experimental Investigation to local settlement of steel cylindrical tanks with constant and variable thickness // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 118. P. 104916. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104916

17. Naseri H., Zirakian T., Showkati H. Stability response assessment of steel thin-walled open-top tanks subjected to local support edge settlement // *World Jour-*

nal of Engineering. 2023. Vol. 22. Issue 1. Pp. 29–39. DOI: 10.1108/WJE-06-2023-0165

18. Кондратьева Л.Н., Бурцев Р.В., Горшков И.В. О применении моделей грунта Soft Soil и Hardening Soil Small-Strain в рамках задачи фильтрационной консолидации на различных этапах возведения и эксплуатации здания в условиях слабых грунтов // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 3 (92). С. 62–71. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-62-71. EDN EXGTGV.

19. Laham N., Kwa K., White D., Gourvenec S. A surrogate model to efficiently predict changing strength and stiffness of soft soils through whole-life episodic cyclic loading // *Computers and Geotechnics*. 2025. Vol. 177. P. 106895. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106895

20. Showkat R., Kumar Singh S., Sivakumar Babu G.L. Evaluation of dynamic properties of unsaturated soils under cyclic loading // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025. Vol. 190. P. 109196. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109196

21. Sun J., Li J., Luo L., Luo W., Lu W. Dynamic responses of sand-clay mixtures under long-term cyclic loading // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024. Vol. 178. P. 108500. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108500

Поступила в редакцию 28 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Евгения Николаевна Акбулякова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; SPIN-код: 6000-7675, Scopus: 56320563700, ResearcherID: E-3018-2018, ORCID: 0000-0002-7556-6573; aspirant123@mail.ru;

Карина Алексеевна Казаринова — магистрант; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; SPIN-код: 6949-4578; karl1nysik@mail.ru;

Екатерина Давыдовна Телепова — магистрант; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; SPIN-код: 3676-8762; telepovakat@gmail.com.

Вклад авторов:

Акбулякова Е.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Казаринова К.А. — проведение лабораторных исследований, обработка собранного материала, написание исходного текста.

Телепова Е.Д. — проведение численных исследований, обработка собранного материала, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mangushev R.A., Kirillov V.M. Analysis of regularities of foundation settlement development of steel cylindrical tanks on soft soils. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 3(68):84–89. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-84-89. EDN VJRQZT. (rus.).

2. Mirsayapov I.T., Sabirzyanov D.D. Bearing capacity of foundations base under combined, alternating, longterm static and cyclic loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 1(43):153–163. EDN UOVUZO. (rus.).

3. Kou H., Fang W., Zhou N., Huang J., Zhang X. Dynamic response of single-bucket foundation in clay under vertical variable amplitude cyclic loadings. *Ocean Engineering*. 2023; 273:113973. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113973
4. Liu W., Tan J., Lv W., Chen Ch., Qu Sh. Characteristics and predictions of accumulative deformation of structured soft soil under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025; 189:109088. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109088
5. Zhang T., Li T., Feng Sh. Elastoplastic modeling for long-term cyclic stability of soft clays with consideration of structure damage. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023; 166:107727. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107727
6. Schreinert G.G., Kern C., Lunkes Strieder H., Teixeira Brito L.A., Nunez W.P. Influence of number of load cycles on the resilient response of soils under repeated load triaxial tests. *Transportation Geotechnics*. 2025; 50:101493. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101493
7. Xiao X., Guan X., Wu Q., Zhao D., Zhou R., Chen G. Energy-based method for the failure criterion and resistance evaluation of marine clay under cyclic loading. *Engineering Geology*. 2025; 344:107833. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107833
8. Tafili M., Albared A., Prada-Sarmiento L.F., Wichtmann T. Loading rate influence on high-cyclic loading of clays. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023; 173:108103. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108103
9. Zhang J., Zhang A., Li J., Fan H. Enhanced understanding on permanent deformation behaviour of subgrade compacted clay under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024; 187:108972. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108972
10. Wang H.L., Sun Y.H., Chen R.P., Peng Ch.Y., Khasanov A. Deformation characteristics and stability analysis of lean clay under cyclic loading. *Transportation Geotechnics*. 2024; 47:101285. DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101285
11. Vasiliev G.G., Salnikov A.P. Analysis of causes of accident with vertical steel tanks. *Oil Industry*. 2015; 2:106-108. EDN TJFVMX. (rus.).
12. Shuxin Zh., Chun K., Penggang Zh., Jinheng L., Yingjie Sh., Gang W. et al. Failure analysis of local settlement induced Q345R bottom plate cracking of crude oil storage tank. *Heliyon*. 2022; 8(11):e11952. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11952
13. Naseri H., Showkati H., Zirakian T. Experimental investigation of geometrical and physical behaviors of thin-walled steel tanks subjected to local support settlement. *Structures*. 2021; 34:413-422. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.08.011
14. Semin A.S., Tatiannikov D.A. Arrangement of an artificial foundation for a vertical steel tank. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2021; 3:37-44. DOI: 10.15593/24111678/2021.03.05. EDN RJOAVI. (rus.)
15. Gunerathne S., Seo H., Lawson D.W., Jayawickrama P.W. Analysis of edge-to-center settlement ratio for circular storage tank foundation on elastic soil. *Computers and Geotechnics*. 2018; 102:136-147. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.05.008
16. Nassernia S., Showkati H. Experimental Investigation to local settlement of steel cylindrical tanks with constant and variable thickness. *Engineering Failure Analysis*. 2020; 118:104916. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104916
17. Naseri H., Zirakian T., Showkati H. Stability response assessment of steel thin-walled open-top tanks subjected to local support edge settlement. *World Journal of Engineering*. 2023; 22(1):29-39. DOI: 10.1108/WJE-06-2023-0165
18. Kondratieva L.N., Burtsev R.V., Gorshkov I.V. On the application of soft soil model and hardening soil small-strain model in the context of filtration consolidation problem at various stages of the construction and operation of buildings in soft soil conditions. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 3(92):62-71. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-3-62-71. EDN EXGTGV. (rus.).
19. Laham N., Kwa K., White D., Gourvenec S. A surrogate model to efficiently predict changing strength and stiffness of soft soils through whole-life episodic cyclic loading. *Computers and Geotechnics*. 2025; 177:106895. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106895
20. Showkat R., Kumar Singh S., Sivakumar Babu G.L. Evaluation of dynamic properties of unsaturated soils under cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025; 190:109196. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109196
21. Sun J., Li J., Luo L., Luo W., Lu W. Dynamic responses of sand-clay mixtures under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024; 178:108500. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108500

Received February 28, 2025.

Adopted in revised form on March 8, 2025.

Approved for publication on June 6, 2025.

B I O N O T E S : **Evgeniya N. Akbul'yakova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Operations and Geotechnical Engineering; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; SPIN-code: 6000-7675, Scopus: 56320563700, ResearcherID: E-3018-2018, ORCID: 0000-0002-7556-6573; aspirant123@mail.ru;

Karina A. Kazarinova — master student; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; SPIN-code: 6949-4578; kar1nysik@mail.ru;

Ekaterina D. Telepova — master student; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; SPIN- code: 3676-8762; telepovacat@gmail.com.

Contribution of the authors:

Evgeniya N. Akbulyakova — academic advising, scientific editing of the text.

Karina A. Kazarinova — conducting experimental research, processing the collected material, writing a source text.

Ekaterina D. Telepova — conducting numerical studies, processing the collected material, writing a source text.

The authors declare that there is no conflict of interest.