

Бояринцев А.В., Самохина А.Д. Экспериментальное изучение изменения шероховатости поверхности материала подземной конструкции при ее погружении в грунт // *Construction and Geotechnics*. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 75–91. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.06

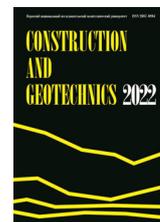
Boyarintsev A.V., Samohina A.D. Experimental investigation of surface roughness changes of an underground structure's material during its driving into the ground. *Construction and Geotechnics*. 2023. Vol. 14. No. 2. Pp. 75-91. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.06



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 2, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.06

УДК 624.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПОДЗЕМНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЕЕ ПОГРУЖЕНИИ В ГРУНТ

А.В. Бояринцев¹, А.Д. Самохина²

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Центр экспертизы и проектирования строительных конструкций, Санкт-Петербург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 28 ноября 2022
Одобрена: 25 января 2023
Принята к публикации:
03 июля 2023

Ключевые слова:

сваи, шпунтовые сваи, погружение свай, трение грунта, шероховатость, несущая способность свай.

АННОТАЦИЯ

Механическое взаимодействие дисперсных грунтов и поверхности подземных конструкций является основополагающим в формировании их несущей способности. Техническая и экономическая эффективность свай, гибких и массивных подпорных конструкций, во многом зависит от силы трения, которая возникает на контакте их материала с грунтом. Одним из основных факторов, оказывающих существенное влияние на силы трения, является шероховатость поверхности материала.

Процесс монтажа некоторых подземных конструкций, например забивка свай или вибропогружение шпунта, сопровождается длительным соприкосновением материала с дисперсными грунтами: некоторые элементы конструкции могут скользить по грунту десятки метров. И вполне вероятным может быть изменение свойства поверхности материала подземной конструкции в течение данного процесса. Несмотря на значительный объем трибологических исследований, схема выполнения таких опытов не отражает в полной мере процесс погружения свай в грунтовый массив и, соответственно, не представляется возможным с их помощью оценить изменение свойств поверхности материалов подземных конструкций при их погружении в грунт с достаточной точностью.

В настоящем исследовании было выполнено моделирование погружения подземной конструкции из трех различных материалов – стали, стеклопластика и фторопласта – в мелкий песок средней крупности. В процессе движения материалов по песку осуществлялось наблюдение за их шероховатостью. Установлено, что с увеличением глубины погружения шероховатость каждого из материалов становится меньше. А на величину данного изменения, оказывают влияние такие свойства материалов, как плотность материала, его прочность на срез и твердость.

© ПНИПУ

© Бояринцев Андрей Владимирович – старший преподаватель, e-mail: andrey_boyarintsev@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9384-9297.

Самохина Анастасия Дмитриевна – инженер, e-mail: sn27072001@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6819-9365.

Andrey V. Boyarintsev – Senior Lecturer, e-mail: andrey_boyarintsev@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9384-9297.

Anastasiya D. Samohina – Designer, e-mail: sn27072001@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6819-9365.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS CHANGES OF AN UNDERGROUND STRUCTURE'S MATERIAL DURING ITS DRIVING INTO THE GROUND

A.V. Boyarintsev¹, A.D. Samohina²

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russian Federation

²Center of Expertise and Design of Building Structures, Saint-Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 28 November 2022
Approved: 25 January 2023
Accepted for publication:
03 July 2023

Keywords:

piles, sheet piles, pile driving, soil
friction, roughness/

ABSTRACT

The mechanical interaction between dispersed soils and the surface of underground structures is fundamental in generating their load-bearing capacity. The technical and economic efficiency of piles and supporting structures depends on the friction forces that appear on the contact of their material with the soil. One of the main factors which has a significant influence on friction forces is the roughness of the material surface.

Installation of underground structures, such as pile driving or vibro-driven sheet piling, is accompanied by long periods of material contact with dispersed soils: some structural segments can slip on the soil for tens of metres. As a result, it is likely that the surface properties of the underground structure material will change during this process. Although there is a considerable amount of tribological research, the methodology of such experiments does not fully represent the pile driving process in the soil mass. This means that it is not possible to accurately estimate the change in the surface properties of underground structure materials as they are driven into the soil using the results of these studies.

The present paper describes a simulation of an underground structure made of three different materials: steel, fibreglass and fluoroplastic; in fine medium sand. The roughness of the materials was monitored while they were moving in the sand. It was found that with increasing diving depth the roughness of each material becomes less. And the value of this change is influenced by such material properties as material density, shear strength and hardness.

© PNRPU

Введение

Механическое взаимодействие дисперсных грунтов и поверхности подземных конструкций является основополагающим в формировании их несущей способности. Техническая и экономическая эффективность свай, гибких и массивных подпорных конструкций во многом зависит от сил трения и сцепления, которые возникают на контакте их материала с грунтом [1, 2]. Данной теме посвящен ряд исследований во всем мире [3–5]. Следует отметить работы [6, 7], в которых описывается различный характер разрушения контактной зоны грунта и материала: по границе раздела в случае с гладкими материалами и по грунту в случае с шероховатыми материалами. Отмечается, что переход от одного типа разрушения к другому осуществляется при некотором значении шероховатости поверхности материала [8–10]. Вводится понятие нормальной шероховатости: отношения высоты неровностей поверхности материала к крупности частиц грунта [11, 12]. Экспериментально установлены значения нормальной шероховатости, при которой выполняется изменение типа разрушения при контакте двух материалов. При изучении трения грунта по различным видам гладких материалов установлено, что силы трения увеличиваются с ростом шероховатости. Таким образом, становится очевидным, что шероховатость поверхности материала подземных конструкций играет важную роль на эффективность их совместной работы с окружающим грунтовым массивом.

Процесс монтажа некоторых подземных конструкций, например забивка свай или вибропогружение шпунта, сопровождается длительным соприкосновением материала с дисперсными грунтами: некоторые элементы конструкции могут скользить по грунту де-

сятки метров. При этом с увеличением глубины погружения будут увеличиваться усилия сопротивления грунта движению конструкции. И можно предположить, что свойства поверхности материала подземной конструкции могут изменяться в течение данного процесса. Таким образом, возможны ситуации, при которых, ввиду изменения шероховатости поверхности материала при погружении подземной конструкции, будет изменяться ее несущая способность в данных грунтах. Наиболее актуальным становится данный вопрос в свете того, что последние годы на строительных площадках все чаще начинают применяться полимеры: ПВХ шпунты [13–15], композитные сваи [16–18], сваи из переработанного пластика. Данные материалы отличаются от традиционных бетона и стали меньшей прочностью, жесткостью и плотностью, вследствие чего изменение их шероховатости может происходить с большей интенсивностью.

Существует ряд трибологических исследований различных типов полимерных композитов, выполнена оценка износостойкости композитов различного состава [19–21]. Установлено влияние величины придавливающей нагрузки при испытаниях на износостойкость [22], состава композитных материалов [23] и др. Несмотря на значительный объем полученных данных, выполненные исследования не отражают в полной мере процесс погружения сваи в грунтовый массив и, соответственно, не представляется возможным по ним оценить с достаточной точностью изменение свойств поверхности материалов подземных конструкций при их погружении в грунт.

В рамках вышесказанного актуальным становится изучение изменчивости шероховатости поверхности материала подземной конструкции при ее погружении в грунтовый массив. Для достижения поставленной цели были намечены следующие задачи:

1. Разработка методики проведения эксперимента и создание для этого специальной установки.
2. Проведение лабораторного моделирования погружения свай трех разных материалов в грунт с одновременным контролем изменения шероховатости.
3. Оценка зависимости изменения шероховатости материала от различных его свойств.

Методика эксперимента

Свойства испытываемых материалов

В исследовании были приняты образцы в виде круглых пластин из стеклопластика, фторопласта и стали (рис. 1, а). Диаметр пластин был равен 72 мм. Перед непосредственным испытанием для образцов определялись параметры начальной шероховатости, их плотность, твердость, а также прочность материалов на срез.

Для измерения шероховатости поверхности был использован профилометр с функцией профилографа «СЕЙТРОНИК ПШ8-19(С.С)» производства ООО «Завод СЕЙТРОН-МАШ» в соответствии с ГОСТ 19300-86. Устройство прибора достаточно простое: как и в любом измерительном устройстве, у профилометра есть объект измерения (поверхность плашки), измерительный источник сигналов (генератор сигналов), блок обработки сигналов и блок вывода результатов измерений (рис. 1, б). В качестве генератора сигналов используется тонко заточенная игла, которая перемещается вдоль поверхности, перпендикулярно ее плоскости, при этом на шероховатой поверхности неизбежно возникают колебания иглы. Измерения проводились с шагом, равным 1 м погружения.

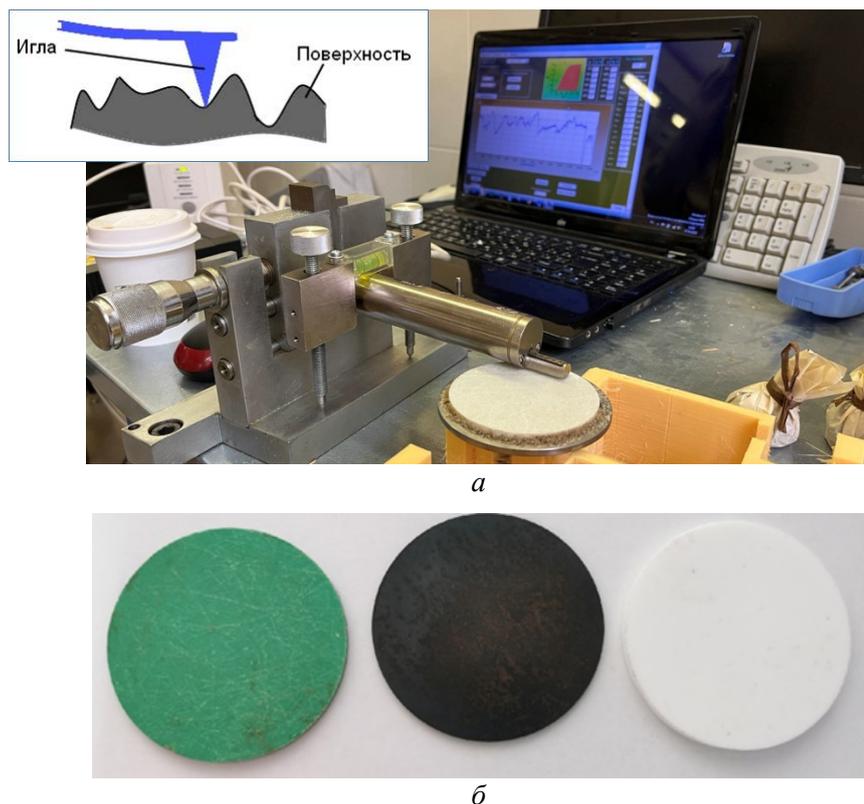


Рис. 1. Измерение шероховатости (а) образцов испытываемых материалов (б)
Fig. 1. Measurement of roughness (a) of samples of tested materials (b)

Определение прочности материалов на срез проводилось в межкафедральной механической лаборатории СПбГАСУ № 40. Образец в форме круглой пластинки 1 на специальной установке продавливался цилиндрическим пуансоном с плоским торцом 2 через матрицу с круглым отверстием 3; кольцо 4 ограничивает боковое перемещение образца и устанавливает его в положение, симметричное относительно отверстия (рис. 2).

Толщины образцов и диаметр пуассона были известны. Найдены значения прочности по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot h}, \quad (1)$$

P – наибольшая нагрузка при срезе (см. рис. 7); d – диаметр пуассона; h – толщина образца.

Далее определялась твердость и плотность для образцов испытываемых материалов. Твердость определялась с помощью динамического твердомера ТКМ-359С [10]. В нем встроена система обработки измерений, которая выдавала максимальные, минимальные и средние значения.

Также, зная вес, толщину и размеры образцов, определяем плотность по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2)$$

Полученные значения свойств материалов занесены в табл. 1.

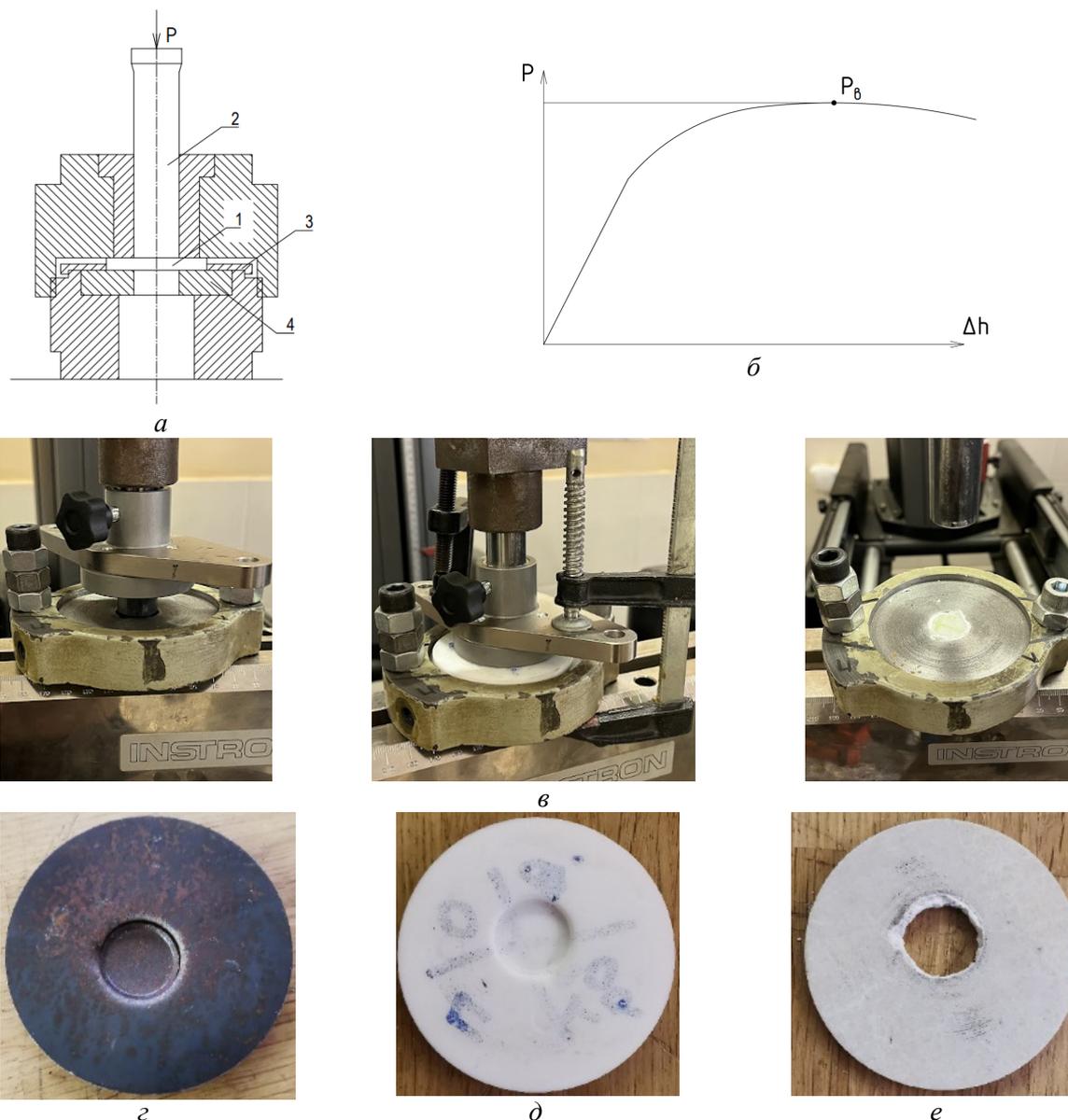


Рис. 2. Определение прочности испытуемых материалов на срез: *a* – схема выполнения испытаний; *б* – график, полученный по результатам испытаний; *в* – фотографии процесса испытания; *г* – образец стальной пластины после испытаний; *д* – образец фторопласта после испытаний, *е* – образец стеклопластика после испытаний; *1* – образец, *2* – пуансон, *3* – матрица, *4* – кольцо
 Fig. 2. Determination of the strength of the tested materials on the cut: *a* – test execution scheme, *б* – the curve obtained from the test results, *в* – photos of the test process, *г* – steel plate sample after testing, *д* – sample of fluoroplast after testing, *е* – fiberglass sample after testing; *1* – sample, *2* – punch, *3* – matrix, *4* – ring

Таблица 1

Свойства исследуемых материалов

Table 1

Properties of the materials under study

Материал	Твердость (НВ), МПа	Плотность (ρ), г/см ³	Прочность на срез (τ_{cp}), МПа
Стеклопластик	2920,4	1,79	9,47
Фторопласт	3263,4	2,20	2,08
Сталь	3292,8	7,58	39,34

Свойства грунта

В рамках эксперимента выполнялось моделирование погружения испытуемых материалов в один тип грунта. В качестве испытуемого грунта был использован песок средней крупности. Перед испытанием в центре испытаний грунтов СПбГАСУ определялись следующие свойства грунта: влажность, удельный вес, коэффициент пористости и угол внутреннего трения. Физико-механические характеристики грунта были определены согласно ГОСТ 5180-2015. Гранулометрический состав был определен по ГОСТ 12536-2014. Значения свойств песка средней крупности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства испытуемого грунта

Table 2

Properties of the used soil

Наименование	$W, \%$	$\gamma, \text{кН/м}^3$	$\gamma_s, \text{кН/м}^3$	$e, \text{доли ед.}$	$\varphi, \text{град}$
Песок средней крупности	11,0	18,0	26	0,6	39

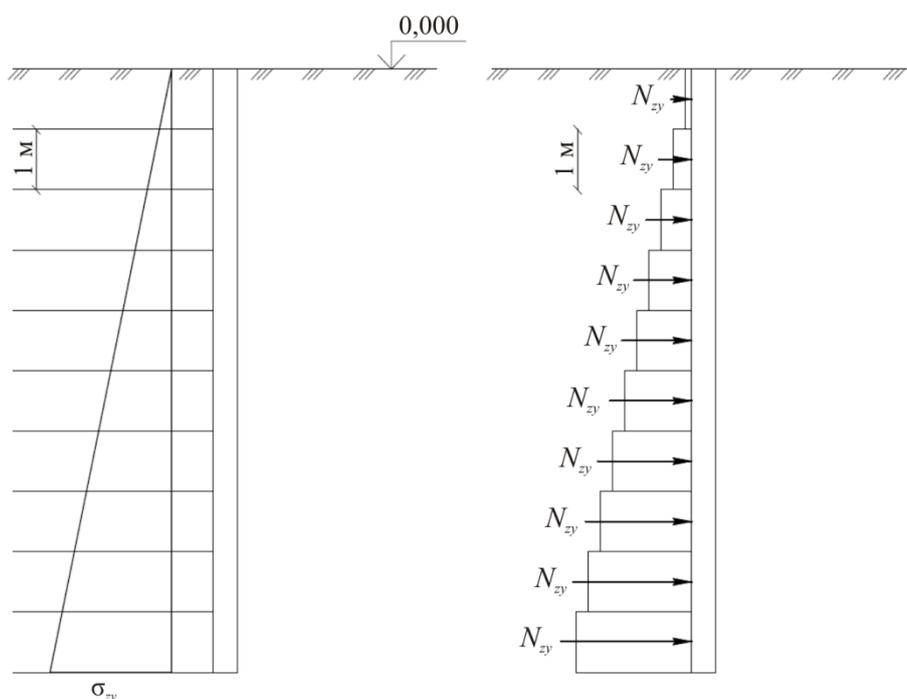


Рис. 3. Эпюра напряжений от собственного веса грунта и эквивалентные силы бокового давления грунта на погружаемую сваю
 Fig. 3. Plot of stresses from the soil's own weight and equivalent forces of lateral soil pressure on the driven pile

Схема эксперимента

Методика экспериментального изучения влияния погружения подземной конструкции в грунт на изменение шероховатости ее наружной поверхности основана на знаниях о напряжениях в грунте. Как известно, напряжения от собственного веса грунта увеличиваются с глубиной, при этом увеличивается не только вертикальная составляющая давления, но и горизонтальная. Следовательно, чем глубже вдавливаются сваи, тем большее давление на

ее боковую поверхность оказывает грунт (рис. 3). При проведении опытов моделировалось погружение сваи длиной, равной 10 м. Для расчетов бокового давления толща грунта была разбита на элементарные слои толщиной 1 м. Чтобы нагрузка грунта была постоянной характеристикой, а не переменной, значения эпюры напряжения на 1 м были заменены средним значением, с трапецевидной эпюры напряжений в элементарном слое на эквивалентную прямоугольную форму. Общая нагрузка осталась такой же (рис. 4).

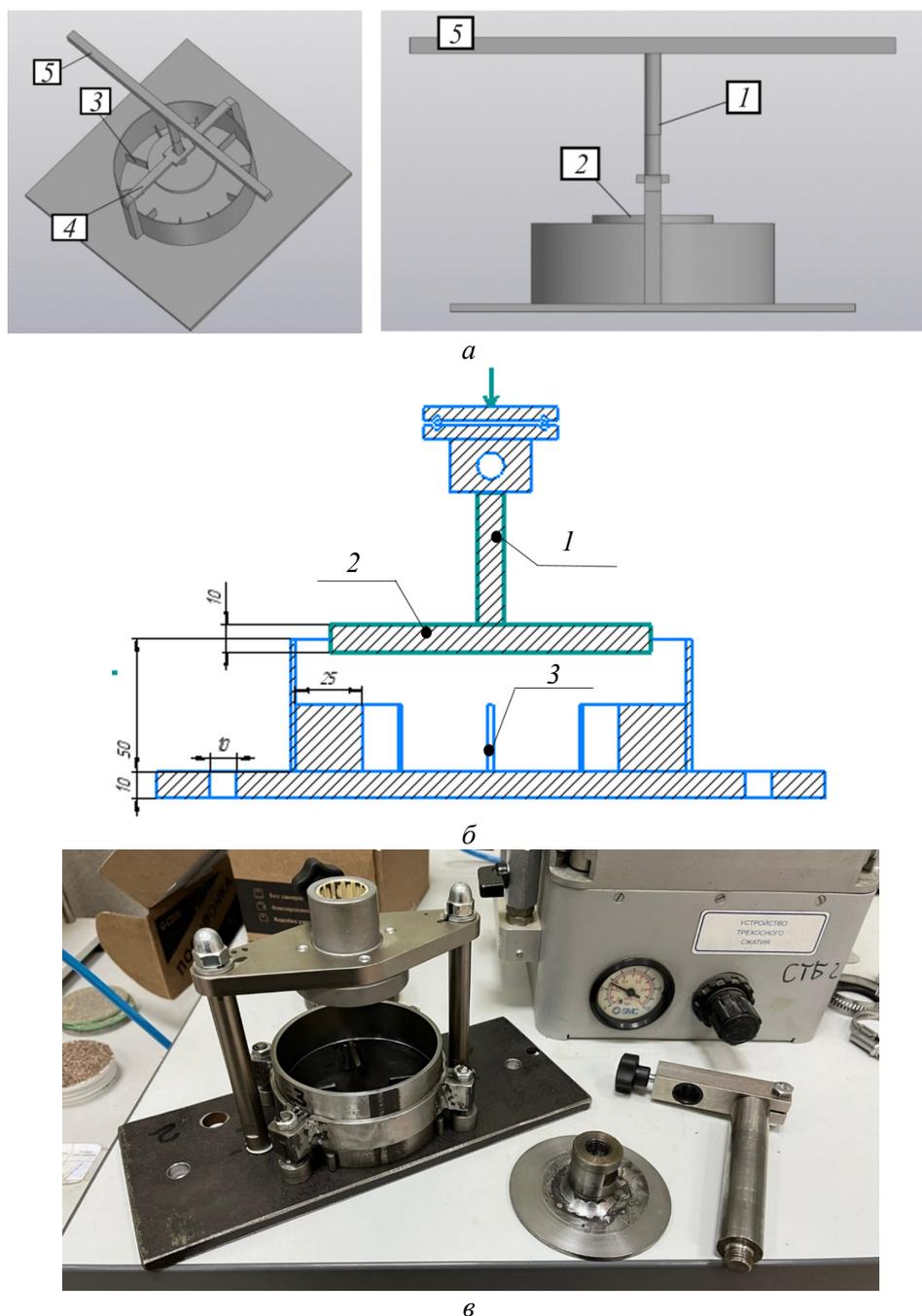


Рис. 4. Созданная экспериментальная установка для реализации исследования:
а – трехмерная модель; *б* – сборочный чертеж; *в* – изготовленная установка; *1* – шток,
2 – испытуемый материал, *3* – вертикальные ребра, *4* – кондуктор, *5* – рукоять

Fig. 4. The experimental apparatus created to realise the study: *a* – three-dimensional model, *б* – assembly drawing, *в* – manufactured apparatus; *1* – rod, *2* – test material, *3* – vertical ribs, *4* – conductor, *5* – handle

Боковое давление было вычислено по формулам (3) и (4). Полученные значения занесены в табл. 3.

$$\sigma_y = \zeta \cdot \sigma_{zg}, \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad (4)$$

где σ_y – горизонтальная составляющая вертикального напряжения, кН; σ_{zg} – напряжения от собственного веса грунта, кН; ζ – коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя; ν – коэффициент Пуассона грунта.

Таблица 3

Значения прикладываемых нагрузок

Table 3

Values of applied loads

Глубина, м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Нагрузка, Н	15,7	47,11	78,5	109,9	141,3	172,7	204,1	235,5	266,9	298,4

Экспериментальная установка

В предварительных опытах был использован прибор одноплоскостного среза производства компании НППО «Геотек», на котором моделировалось погружение сваи в грунт, обеспечивая нужное перемещение испытуемого материала под заданной нагрузкой. За один раз прибор мог сдвинуть образец материала по грунту не более чем на 10 мм, следовательно, чтобы сдвинуть плашку на 1 м, необходимо было повторить один и тот же опыт 100 раз. Учитывая, что время одного сдвига, с учетом затрат на возвращение пластины в исходное положение и приложение/снятие вертикальной нагрузки составляет 5,5 мин, то для сдвига плашки на 1 м понадобилось использовать прибор в течение 9 ч, что свидетельствует о низкой эффективности данной схемы эксперимента.

По данной причине было решено создать устройство, которое могло бы моделировать погружение сваи в грунт более эффективно и значительно ускорить процесс экспериментальных работ (см. рис. 4). Для достижения данного результата было создано устройство, которое позволяет обеспечивать вращательные движения с одновременным приложением вертикальной нагрузки. Приложением вертикальной нагрузки из табл. 3 к вращаемому штоку 1, на конце которого располагается пластина испытуемого материала 2, моделировалась глубина погружения сваи в грунте, а вращением штока и пластины вокруг своей оси моделировалось движение сваи по грунту на заданной глубине. Для предотвращения проскальзывания грунта в приборе выполнялись вертикальные ребра 3. Вертикальность положения штока обеспечивалась в установке специальным кондуктором 4, в котором была расположена антифрикционная прокладка. Вертикальное усилие прикладывалось высокоточным прессом с электронной фиксацией нагрузок. Вращательные движения выполнялись вручную при помощи специальной рукояти 5. Экспериментальная установка была изготовлена в токарных мастерских СПбГАСУ. Трехмерная модель, сборочные чертежи и фотография изготовленной установки представлены на рис. 5.



Рис. 5. Проведение испытаний
Fig. 5. Conducting tests

Необходимое количество вращений пластины n (в оборотах) для продвижения контрольной точки исследуемого материала по грунту можно определить по формуле

$$n = \frac{100 \text{ см}}{\pi \cdot d} = \frac{100 \text{ см}}{3,14 \cdot 6 \text{ см}} = 5,3, \quad (5)$$

где d – диаметр, описываемый контрольной точкой при вращении пластины. Контрольная точка расположена на расстоянии 3 см от центра. Выбор данной точки обусловлен удобством выполнения измерений и минимизацией количества вращений.

Таким образом, для моделирования погружения одного метра сваи в грунт достаточно выполнить 5,3 оборота, что существенно экономит время проведения эксперимента и способствует возникновению возможности для более детального исследования, например, большее количество материалов.

Ход эксперимента

При выполнении эксперимента изготовленная установка располагалась в прессе, где создавалось необходимое вертикальное давление (см. табл. 3). С помощью рукояти при заданном значении вертикальной нагрузки осуществлялось вращение в 5,3 оборота, равное 1 м погружения. Частицы грунта соприкасались с плашками, которые были прикреплены к пластине установки. После прохождения каждого метра снималась вертикальная нагрузка, вынималась пластина испытываемого материала, измерялась шероховатость ее поверхности в контрольной точке, расположенной на удалении 3 см от центра пластины. Измерение выполнялось не менее 10 раз для обеспечения статистической значимости получаемых данных. После чего пластина снова устанавливалась в экспериментальную установку, к которой прессом прикладывалась вертикальная сила следующей ступени и снова выполнялось вращение пластины. Данная последовательность выполнялась 10 раз, с увеличением приложенной нагрузки. Результаты шероховатостей на каждом метре заносили в журнал эксперимента и анализировали. На рис. 6 представлен процесс выполнения эксперимента.

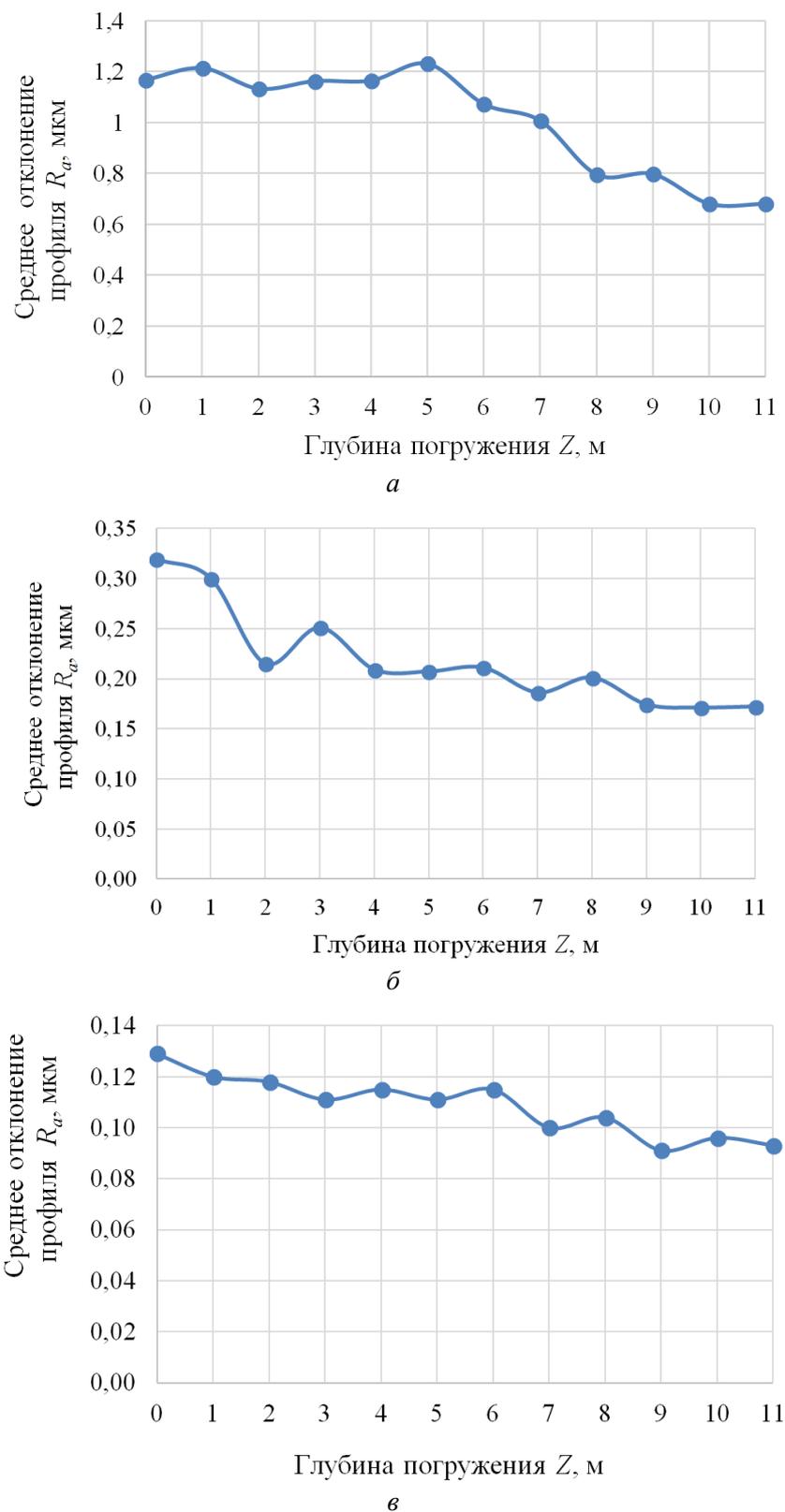


Рис. 6. Графики результатов для испытуемых материалов:

a – стеклопластик; $б$ – фторопласт; $в$ – сталь

Fig. 6. The curves of results for the tested materials:

a – fiberglass, $б$ – fluoroplast, $в$ – steel

Результаты эксперимента

Результаты измерения шероховатости поверхности испытуемых материалов в процессе моделирования их погружения в грунт на 11 м представлены на рис. 7.

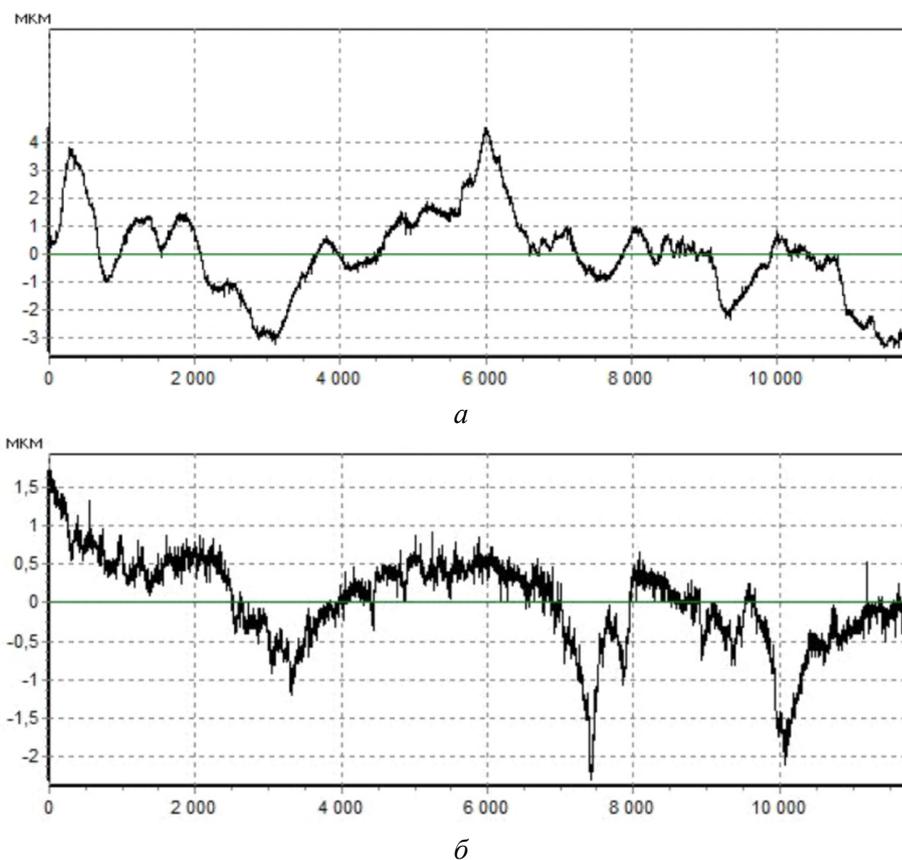


Рис. 7. Профилограммы поверхности испытанного образца стеклопластика:

a – до испытаний; *б* – после

Fig. 7. The profilograms of the surface of the tested fiberglass sample:

a – before the tests, *б* – after

Анализ результатов показывает, что шероховатость всех испытуемых материалов уменьшается в процессе их погружения в грунтовой массив. При этом степень изменения для разных материалов различна. Сопоставление изменения шероховатости испытуемых материалов до и после испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Изменение шероховатости испытанных образцов

Table 4

Change in the roughness of the tested samples

Материал	Шероховатость R_a^{cp} , мкм		Изменение шероховатости, %
	до испытаний	после испытаний	
Стеклопластик	1,167	0,68	42
Фторопласт	0,319	0,192	39
Сталь	0,129	0,093	28

Сопоставление профилограмм испытуемых материалов до и после их движения по грунту показало изменение формы профиля. Если до испытания неровности имели острую, пикообразную форму (рис. 7, а), то после испытания – округлую.

Обсуждение результатов

Отмеченное снижение шероховатости испытанных материалов может быть объяснено срезом выступающих микронеровностей поверхности материала, что подтверждается изменением формы профиля после движения образца по грунту.

Для оценки природы данного процесса изучалось влияние различных свойств материалов на процентное снижение шероховатости испытанных материалов. Для этого строились графики зависимости, выводились уравнения регрессии и оценивался их коэффициент детерминации (рис. 8).

Результаты показывают, что на изменение неровностей поверхности в процессе погружения материала в грунт оказывают влияние плотность материала и его прочность на срез: чем материал более плотный и прочный, тем меньше изменяется его шероховатость. Влияние твердости не удалось оценить в полной мере, поскольку не существует единой методики ее определения для материалов различной природы, которыми являются сталь и стеклопластик.

Таким образом, в процессе погружения сваи, или гибкой подпорной конструкции, например шпунтовой сваи, шероховатость ее поверхности будет уменьшаться. Следовательно, на основе исследований [4, 5, 11] можно заключить, что при снижении шероховатости будет уменьшаться угол трения грунта на контакте с поверхностью подземной конструкции δ . Данный вывод имеет практическое значение, поскольку при снижении угла контактного трения δ , согласно EN 1997-7, будет снижаться несущая способность свай по боковой поверхности, а, согласно теории Кулона для несвязного грунта [24], снижение угла трения грунта будет способствовать увеличению активного и снижению пассивного давлений грунта на подпорную стену.

При этом в работе не исследовалось влияние различных грунтов на изменение шероховатости, что имеет большое практическое значение. Работа в данном направлении будет продолжена авторами.

Выводы

В рамках представленного исследования было выполнено экспериментальное изучение изменения шероховатости наружной поверхности подземных конструкций при их погружении в грунт. В лабораторных условиях моделировалось погружение трех видов материалов в мелкий песок на глубину до 11 м. В процессе погружения выполнялось наблюдение за изменением их шероховатости. Дополнительно были определены прочность на срез, плотность и твердость испытуемых материалов.

На основе реализованного эксперимента можно сделать следующие выводы:

– установлено, что с погружением подземной конструкции в грунтовый массив происходит уменьшение шероховатости ее поверхности. При этом изменение шероховатости у разных материалов имеет различное значение, например, шероховатость стали изменилась на 28 %, а стеклопластика на 42 %;

– сопоставление профилограмм одного и того же материала до и после его погружения в грунт свидетельствует о срезке выступающих неровностей при их движении вдоль грунта, что проявляется в приобретении профилем более окатанных форм;

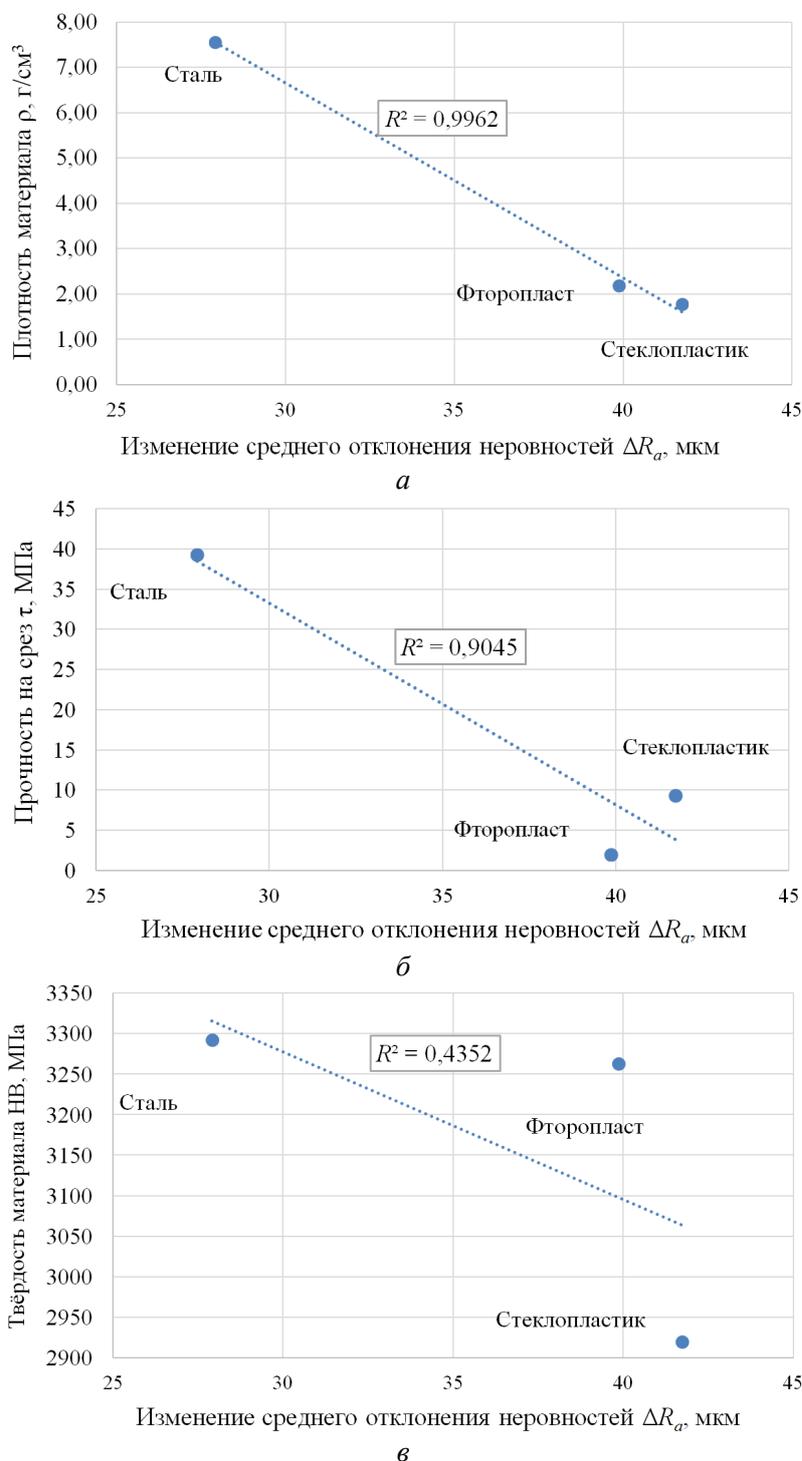


Рис. 8. Графики зависимостей изменения среднего отклонения профиля материалов после проведения испытания: *а* – от плотности материала ρ , кг/см³; *б* – прочности на срез τ_{cp} , МПа, *в* – твердости материала HB, МПа
 Fig. 8. The curves of the dependences of the change in the average deviation of the profile of materials after the test: *а* – from material density ρ , kg/cm³, *б* – shear strength τ_{cp} , МПа, *в* – hardness of the material HB, МПа

– причиной отмеченного различия изменения шероховатости являются свойства материала. Наибольшее влияние на изменение шероховатости оказывает плотность материала, в меньшей степени – прочность на срез. Влияние твердости не удалось оценить в полной мере, поскольку не существует единой методики ее определения для материалов различной природы, которыми являются сталь и стеклопластик. Таким образом, чем плотнее и прочнее материал, тем меньше будет изменяться его шероховатость при погружении в грунт;

– следует отметить характер изменения шероховатости испытуемых материалов в процессе погружения в грунт. Образцы стеклопластика и стали сохраняли исходное значение шероховатости и близкое к ним значение до глубины 5 и 6 м соответственно. Далее, с увеличением глубины, высота неровностей поверхности становилась меньше, тогда как шероховатость образца фторопласта начала изменяться с первых метров испытания. Данный факт может быть объяснен наименьшей прочностью фторопласта на срез среди всех испытанных материалов;

– снижение шероховатости подземных конструкций при погружении в грунт будет способствовать снижению угла трения грунта на контакте с материалом, что, в свою очередь, скажется на снижении несущей способности свай по боковой поверхности, увеличению активного и снижению пассивного давлений грунта на подпорные стены.

Представленное исследование ограничивается экспериментами только с одним типом грунта. Для расширения границ применимости полученных результатов подобные исследования могут быть выполнены для дисперсных типов грунта, а также дополнительных видов материалов подземных конструкций. Работа в данном направлении будет продолжена авторами.

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта № 47С22 на выполнение научно-исследовательских работ СПбГАСУ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Габибов Ф.Г. Разработка инновационных конструкций свайных фундаментов на просадочных грунтах // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 34–43. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.03
2. Расчет несущей способности свай-оболочки большой длины / С.А. Матвеев, Е.А. Мартынов, Н.Н. Литвинов, Г.А. Крыжановский // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 25–36. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.03
3. Uesugi M., Kishida H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel // Soils Found. – 1986. – № 26. – P. 139–149.
4. Maghsoodi S., Cuisinier O., Masroufi F. Effect of temperature on the cyclic behavior of clay-structure interface // J. Geotech. Geoenviron. Eng. – 2020. – № 146. – P. 04020103.
5. A review of sand-clay mixture and soil-structure interface direct shear test / K. Yin [et al.] // Geotechnics. – 2021. – № 1. – P. 260–306.
6. Martínez A., Frost J.D. The influence of surface roughness form on the strength of sand-structure interfaces // Géotechnique Letters. – 2017. – № 7. – P. 1–8. DOI: 10.1680/jgele.16.00169
7. Martinez A., Frost J.D., Hebel G.L. Experimental study of shear zones formed at sands/steel interfaces in axial and torsional axisymmetric tests // Geotechnical Testing Journal. – 2015. – Vol. 38, no. 4. DOI: 10.1520/GTJ20140266

8. Uesugi M., Kishida H., Tsubakihara Y. Friction between sand and steel under repeated loading // *Soils Found.* – 1989. – № 29. – P. 127–137.
9. Tsubakihara Y., Kishida H., Nishiyama T. Friction between cohesive soils and steel // *Soils Found.* – 1993. – № 33. – P. 145–156.
10. Tsubakihara Y., Kishida H. Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses // *Soils Found.* – 1993. – № 33. – P. 1–13.
11. Hu L., Pu J. Testing and modeling of soil-structure interface // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* – 2004. – № 130. – P. 851–860.
12. Maghsoodi S., Cuisinier O., Masroufi F. Effect of temperature on the cyclic behavior of clay-structure interface // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* – 2020. – № 146. – P. 04020103.
13. Сравнение методов устройства противofильтрационных завес / Д.В. Максимов, Ю.Н. Грязнов, Е.С. Михалдыкин, Н.А. Улыбышев // *Гидротехника.* – 2022. – № 2(67). – С. 58–60. DOI: 10.55326/22278400_2_58
14. Максимов Д.В., Грязнов Ю.Н., Михалдыкин Е.С. Композитные полимерные шпунтовые профили в гидротехническом строительстве // *Гидротехника.* – 2021. – № 3(64). – С. 80–81.
15. Дорофеева А.В., Кунц А.Л. Погружение полимерного шпунта вибрационным методом // *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин).* – 2020. – Т. 23. № 1(75). – С. 11–18.
16. Boyarintsev A.V., Lanko S.V. Experimental estimate of instantaneous adfreeze strength of glass-fiber reinforced plastic in frozen soil // *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction.* – Eds R.A. Mangushev [et al.] – Taylor & Francis Group, London, 2019. – Vol. 2. – P. 49–53.
17. Boyarintsev A.V. Polymer and composite piles. International and russian experience // *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* – 2020. – Vol. 57, no. 5. – P. 415–421. DOI: 10.1007/s11204-020-09686-9
18. Zyka K., Mohajerani A. Composite piles: A review // *Construction and building materials.* – 2016. – № 107. – P. 394–410.
19. Особенности структурно-фазового состояния и поверхностных свойств композиционных материалов на основе полиактида и гидросипатита / В.А. Сюсюкина, Е. Шаповалова, Н.М. Коротченко, И.А. Курзина // *Журнал прикладной химии.* – 2017. – №1. – С. 114–120.
20. Дьяченко А.Г., Савостина Т.П., Саед Б.И. Влияние объема древесных опилок на механические свойства композитного материала // *Вестник Донского государственного технического университета.* – 2018. – №3. – С. 300–305.
21. Аникина М.Д., Азоян А.И. Сравнительная оценка износостойкости композитов с наполнителями по результатам ресурсных испытаний // *Транспорт: наука, образование, производство.* – 2019. – С. 256–259.
22. Козырев Ю.П., Седакова Е.Б. Определение характеристик износостойкости полимерных материалов на примере полиамида ПА-6 и композита Ф4К15М5 // *Вопросы материаловедения.* – 2009. – № 1(57). – С. 210–214.
23. Сравнительная характеристика износостойкости современных полимерных композитов / С.А. Николаенко, Е.В. Печенегина, А.И. Зубарев [и др.] // *Клиническая стоматология.* – 2017. – № 3(83). – С. 4–9.
24. Основания, фундаменты и подземные сооружения: справочник проектировщика / под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.

References

1. Gabibov F.G. Development of innovative pile foundation designs on subsidence soils. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 34-43. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.03.
2. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N., Kryzhanovsky G.A. The long shell pile bearing capacity calculation. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 25-36. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.03
3. Uesugi, M.; Kishida, H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. *Soils Found.*, 1986, no. 26, pp. 139–149.
4. Maghsoodi S., Cuisinier O., Masroufi F. Effect of temperature on the cyclic behavior of clay-structure interface. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2020, no. 146, p. 04020103.
5. Yin K. [et al]. A review of sand-clay mixture and soil-structure interface direct shear test. *Geotechnics*, no. 1, 2021, pp. 260-306.
6. Martinez A., Frost J.D. The influence of surface roughness form on the strength of sand-structure interfaces. *Géotechnique Letters*, 2017, no. 7, pp. 1–8, DOI: 10.1680/jgele.16.00169.
7. Martinez A., Frost J.D., Hebler G.L. Experimental study of shear zones formed at sands/steel interfaces in axial and torsional axisymmetric tests. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, vol. 38, no. 4. DOI: 10.1520/GTJ20140266.
8. Uesugi M., Kishida H., Tsubakihara Y. Friction between sand and steel under repeated loading. *Soils Found.*, 1989, no. 29, pp. 127–137.
9. Tsubakihara, Y.; Kishida, H.; Nishiyama, T. Friction between cohesive soils and steel. *Soils Found.*, 1993, no. 33, pp. 145–156.
10. Tsubakihara Y., Kishida H. Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses. *Soils Found.*, 1993, no. 33, pp. 1–13.
11. Hu L., Pu J. Testing and modeling of soil-structure interface. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2004, no. 130, pp. 851–860.
12. Maghsoodi S., Cuisinier O., Masroufi F. Effect of temperature on the cyclic behavior of clay-structure interface. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2020, no. 146, p. 04020103.
13. Maksimov D.V., Gryaznov YU.N., Mihaldykin E.S., Ulybyshev N.A. Sravnenie metodov ustrojstva protivofil'tracionnyh zaves [Comparison of impervious blanketing methods]. *Gidrotekhnika*, 2022, no. 2(67), pp. 58-60. DOI 10.55326/22278400_2_58. DOI: 10.55326/22278400_2_58
14. Maksimov D.V., Gryaznov YU.N., Mihaldykin E.S. Kompozitnye polimernye shpuntovye profili v gidrotekhnicheskom stroitel'stve [Composite sheet piling systems in civil engineering field]. *Gidrotekhnika*, 2021, no. 3(64), pp. 80-81.
15. Dorofeeva A.V., Kunc A.L. Pogruzhenie polimernogo shpunta vibracionnym metodom [Vibro driving of polymer sheet pile]. *Trudy Novosibirskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta (Sibstrin)*, 2020, vol. 23, no. 1(75), pp. 11-18.
16. Boyarintsev A.V., Lanko S.V. Experimental estimate of instantaneous adfreeze strength of glass-fiber reinforced plastic in frozen soil. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction*. Eds. R.A. Mangushev [et al.]. Taylor & Francis Group, London, 2019, vol. 2, pp. 49-53.
17. Boyarintsev A.V. Polymer and composite piles. International and russian experience. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 57, iss. 5, pp. 415-421 DOI: 10.1007/s11204-020-09686-9
18. Zyka K., Mohajerani A. Composite piles: A review. *Construction and building materials* 107 (2016) 394-410

19. Syusyukina V.A., Shapovalova E., Korotchenko N.M., Kurzina I.A. Osobnosti strukturno-fazovogo sostoyaniya i poverhnostnyh svoystv kompozitsionnyh materialov na osnove poliaktida i gidrosipatita [Peculiarities of structural-phase state and surface properties of composite materials based on polyactide and hydrosipatite]. *ZHurnal prikladnoj himii*, 2017, no. 1, pp. 114-120.

20. D'yachenko A.G., Savostina T.P., Saed B.I. Vliyanie ob'ema drevesnyh opilok na mekhanicheskie svoystva kompozitnogo materiala [Influence of sawdust volume on the mechanical properties of the composite material]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 3, pp. 300-305.

21. Anikina M.D., Azoyan A.I. Sravnitel'naya ocenka iznosostojkosti kompozitov s napolnitelyami po rezul'tatam resursnyh ispytaniy [Comparative assessment of wear resistance of composites with fillers based on the results of endurance tests]. *Transport: nauka, ob-razovanie, proizvodstvo*, 2019, pp. 256-259.

22. Kozyrev YU.P., Sedakova E.B. Opredelenie karakteristik iznosostojkosti polimernyh materialov na primere poliamida PA-6 i kompozita F4K15M5 [Determination of wear resistance characteristics of polymeric materials using PA-6 polyamide and F4K15M5 composite as examples]. *Voprosy materialovedeniya*, 2009, no. 1(57), pp. 210-214.

23. Nikolaenko S.A., Pechenegina E.V., Zubarev A.I. [et al.]. Sravnitel'naya karakteristika iznosostojkosti sovremennyh polimernyh kompozitov [Comparative characterisation of the wear resistance of modern polymer composites]. *Klinicheskaya stomatologiya*, 2017, no. 3(83), pp. 4-9.

24. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya: spravochnik proektirovshchika [Bases, foundations and underground structures: Designer's handbook]. Eds. red. E.A. Sorochan, YU.G. Trofimenkov. Moscow, Strojizdat, 1985, 480 p.