



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 1, 2021

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.04

УДК 624.152.634.3

### ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ПОСЛЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВИБРИРОВАНИЯ

**В.М. Полунин, А.П. Черемхина**

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

#### О СТАТЬЕ

Получена 18.11.2020

Принята 20.01.2021

Опубликована: 21.04.2021

#### Ключевые слова:

испытания на одноплоскостной срез, разжижение грунтов, разупрочнение грунтов, статическое зондирование, колебания грунта, основания и фундаменты, вибропогружение шпунтовых свай, виброизвлечение шпунтовых свай, шпунтовая свая.

#### АННОТАЦИЯ

Применение технологии высокочастотного вибропогружения или виброизвлечения шпунтовых свай в условиях слабых, структурно-неустойчивых грунтов неизбежно приводит к изменению структуры грунта. Особенно это актуально, когда в зону влияния попадают здания исторической застройки. Зачастую основанием для таких зданий являются водонасыщенные пески, постилающиеся текучими и текучепластичными глинистыми грунтами. В процессе внешнего динамического воздействия происходит расструктурирование грунта основания, вследствие чего их прочностные и деформационные характеристики существенно снижаются. При этом результатом вибрационных воздействий на дисперсный водонасыщенный образец может являться как уплотнение для песчаного грунта, так и разуплотнение глинистых грунтов. Эти изменения приводят к развитию дополнительных деформаций зданий и сооружений окружающей застройки. Поэтому вопрос оценки границ применимости вибрационных технологии в тех или иных условиях является актуальным. Объектом исследования являются изменения свойств глинистых грунтов различной консистенции после воздействия вибрации. Приведены результаты лабораторных исследований по определению параметров прочности дисперсных грунтов после высокочастотного вибрирования. Проанализированы результаты полевых испытаний грунтов методом статического зондирования «до», «после» вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай. Выполнено сравнение результатов полевых и лабораторных исследований с целью выявления закономерностей изменения прочностных характеристик слабых грунтов под воздействием вибрационных нагрузок. Показана тенденция к снижению параметров прочности дисперсных грунтов. В настоящее время в связи с недостаточным количеством лабораторных и натурных исследований по изучению влияния высокочастотного вибрирования на изменение параметров прочности слабых водонасыщенных глинистых грунтов не удается выявить четкой зависимости изменения параметров от времени и частоты вибрирования.

© ПНИПУ

© Полунин Вячеслав Михайлович – аспирант, e-mail: n1ce2u@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7863-9654

Черемхина Анастасия Петровна – кандидат технических наук, e-mail: cheremkhina\_1@mail.ru. ORCID: 0000-0003-2649-2819

Viacheslav M. Polunin – Postgraduate Student, e-mail: n1ce2u@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7863-9654

Anastasia P. Cheremkhina – Ph.D. in Technical Sciences, e-mail: cheremkhina\_1@mail.ru. ORCID: 0000-0003-2649-2819

## CHANGE IN STRENGTH PARAMETERS OF DISPERSED SOILS AFTER HIGH-FREQUENCY VIBRATION

V.M. Polunin, A.P. Cheremhina

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

---

### ARTICLE INFO

Received: 18.11.2020

Accepted: 20.01.2021

Published: 21.04.2021

#### Keywords:

shear test, liquefaction, soil softening, CPT tests, ground vibrations, ground foundation, sheet pile driving, sheet pile extraction, sheet pile.

### ABSTRACT

The use of the technology of high-frequency sheet piles driving or extraction in conditions of weak, structurally unstable soils inevitably leads to a change in the structure of the soil. This is especially true for buildings which fall into the zone of influence. Often, foundation for historical buildings is water-saturated sands, spread by fluid and fluid-plastic clay soils. In the process of external dynamic action, the soil foundation is being destructing, so their strength and deformation parameters are reduced. In this case, the result of vibration effects on a dispersed water-saturated sample can be both compaction for sandy soil and decompaction of clay soils. These changes lead to additional deformations of buildings and structures of the surrounding area. Therefore, the issue of assessing the limits of applicability of vibration technology in certain conditions is relevant. The object of the study is the changes in the properties of clay soils of various consistencies after exposure to vibration. The results of laboratory studies to determine the strength parameters of dispersed soils after high-frequency vibration are presented. The results of field measurements by CPT "before", "after" vibration immersion and vibration extraction of sheet piles are considered. Comparison of the results of field and laboratory studies is carried out to identify patterns of change in the strength characteristics of weak soils under the influence of vibration loads. A tendency towards a decrease in the strength parameters of dispersed soils is shown. Currently, due to the insufficient number of laboratory and field studies to study the effect of high-frequency vibration on the change in the strength parameters of weak water-saturated clay soils, it is not possible to identify a clear dependence of the change in parameters on the time and frequency of vibration.

© PNRPU

---

## Введение

Главным принципом развития инфраструктуры современного мегаполиса является освоение подземного пространства. Создание дополнительной, экономически эффективной площади, при этом без сокращения наземного пространства, позволяет сформировать благоприятную городскую среду. Устройство таких подземных объемов возможно за счет применения современных решений по ограждениям котлованов. Наиболее распространенным решением по ограждающей конструкции является металлический шпунт. Основными технологиями погружения шпунтовых свай являются метод статического вдавливания и высокочастотное погружение [1]. Метод статического вдавливания не оказывает динамического воздействия, но вызывает большие дополнительные напряжения в массиве грунта, что приводит к дополнительным деформациям окружающей застройки [2]. Безрезонансное, высокочастотное вибропогружение, как и виброизвлечение, шпунтовых свай не вызывает существенных дополнительных напряжений, однако может приводить к расструктуриванию грунта околосвайного пространства. Опыт использования таких типов ограждений котлованов в условиях плотной городской застройки показывает, что динамическое воздействие оказывает влияние на структуру окружающего массива грунта и может приводить к дополнительным деформациям.

Геологический разрез Санкт-Петербурга достаточно разнообразен, верхняя часть мощностью до 30 м представлена переслаиванием озерных, озерно-ледниковых и морских отложений [3].

В целом вся верхняя часть геологического разреза, за редким исключением, может рассматриваться как неустойчивая, обладающая высокой и неравномерной сжимаемостью толща, зачастую обладающая еще и тиксотропными свойствами, т.е. способностью разжижаться при воздействии динамических и вибрационных нагрузок, а в дальнейшем способная к частичному восстановлению своей прочности в состоянии покоя. Этим свойством обладают глинистые отложения озерно-ледниковой толщи, представляющие собой чередование пылеватых, глинистых и реже песчаных слоев, характеризуются повышенной влажностью, низкой плотностью и высокой деформируемостью [4]. Данные относительно слабые грунты подстилаются более прочными моренными отложениями.

## Методика экспериментов

Первостепенное значение для строительства различных зданий и сооружений имеет изучение верхней надморенной толщи, являющейся основанием для подавляющего большинства зданий на естественном основании. При устройстве коробчатых монолитных фундаментов, являющихся основным типом фундамента на естественном основании, необходимо устройство открытых котлованов глубиной до 4 м. В зависимости от грунтовых условий и глубины залегания подземных вод котлован отрывается под углом естественного откоса или под защитой шпунтового ограждения, погруженного забивкой, вибрацией или статическим вдавливанием [3].

В связи с тем, что большая часть территории Санкт-Петербурга сложена слабыми водонасыщенными грунтами различной консистенции, способными переходить в псевдосостояние при внешних воздействиях различного характера, в том числе и при вибрационных, изучение изменения прочностных параметров при этом переходе является актуальным.

Дополнительные деформации зданий окружающей застройки происходят за счет изменения структуры грунта. Актуальной задачей является качественная и количественная оценка изменения характеристик грунтов основания при высокочастотном динамическом воздействии.

Вопросами поведения грунта под внешней динамической нагрузкой занимались множество авторов [5–7]. Водонасыщенные пески рыхлой и средней плотности можно отнести к структурно-неустойчивым под вибрационным воздействием, поскольку у них наблюдается явление разжижения [8]. Определить этот факт лабораторным путем возможно с помощью динамических трехосных испытаний [9]. Также представляет интерес получение пониженного модуля деформация грунта в процессе вибрирования  $E_{red}$ , МПа [10].

Также в работе [11] при оценке динамической неустойчивости песчаных грунтов различной плотности сложения, окатанности частиц были получены зависимости сопротивления грунта сдвигу  $\tau$ , кПа, от ускорения  $a$ ,  $\text{м/с}^2$  (рис. 1). Авторы проводили испытания образцов грунта на динамическом сдвиговом приборе, в ходе которых были получены количественные параметры снижения прочности песчаного грунта при действии динамической нагрузки. Величину ускорения, где сдвиговая прочность образца снижалась, называют критическим ускорением  $a_{крит}$ ,  $\text{м/с}^2$ . Также автором было определено, что величина критического ускорения возрастает с величиной вертикального давления, т.е. она будет изменяться по глубине.

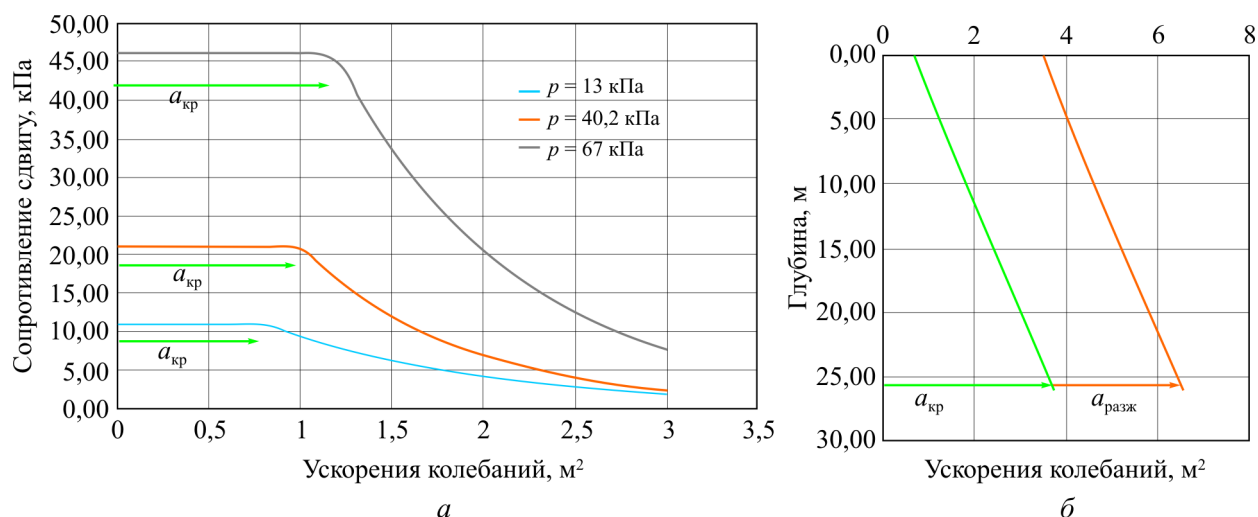


Рис. 1. Зависимость сопротивления водонасыщенного песчаного грунта сдвигу от величины ускорений,  $\text{m/s}^2$  [11]

Fig. 1. Dependence of the resistance of water-saturated sandy soil to shear on the magnitude of accelerations,  $\text{m/s}^2$

По полевым испытаниям грунтов, например методом статического зондирования, можно отследить изменение структуры и НДС массива грунта. Испытания включали: полевой эксперимент по отслеживанию уровня колебаний грунта [12–14], статическое зондирование грунтов околосвайного пространства «до», «после», отслеживание изменения порового давления и пр. [15, 16]. Полученные авторами данные позволяют сопоставить уровень динамического воздействия и изменение физико-механических характеристик грунтов. Сопротивление зондированию по острию  $q_c$  снизилось на 10–25 % на расстоянии до 4 м от сваи, при ее погружении. При извлечении зафиксировано более выраженное снижение параметра  $q_c$ : с 10 до 55 %. Важно отметить, что сопротивление погружению в большей степени снизилось в верхней толще грунтов, на глубине от 0–6,5 м. На отметках от 6,5–15 м ярко выраженных изменений не выявлено.

Авторами данной статьи были проанализированы два объекта, где выполнялось статическое зондирование грунтов «до» и «после» вибропогружения и виброизвлечения свай. Результаты приведены на рис. 2, 3.

На объекте 1 выполнялось статическое зондирование грунтов основания на расстоянии 4 м от вибропогружения опытных свай. В процессе погружения также измерялись ускорения грунта на его дневной поверхности. Длина погружаемого шпунта составила 15 м, профиль – VL 606 А; погружение выполнялось вибропогружателем РТС 24. Максимально зафиксированные среднеквадратичные величины ускорения на расстоянии 4 м составили  $0,376 \text{ m/s}^2$ . Результаты приведены на рис. 3. На правом рисунке показано, на сколько изменилось в процентном соотношении сопротивление погружению зонда «до» к его значениям «после» погружения свай. За положительные значения по оси  $x$  принято снижение параметра, за отрицательные – его увеличение. Стоит отметить, что явное снижение сопротивления зонда отмечалось на глубине от 1,5 до 6 м, и оно составило от 30 до 70 % от первоначального. На глубине от 6 до 15 м прослеживается тенденция к повышению сопротивления зонда, что может быть связано с уплотнением грунтов.

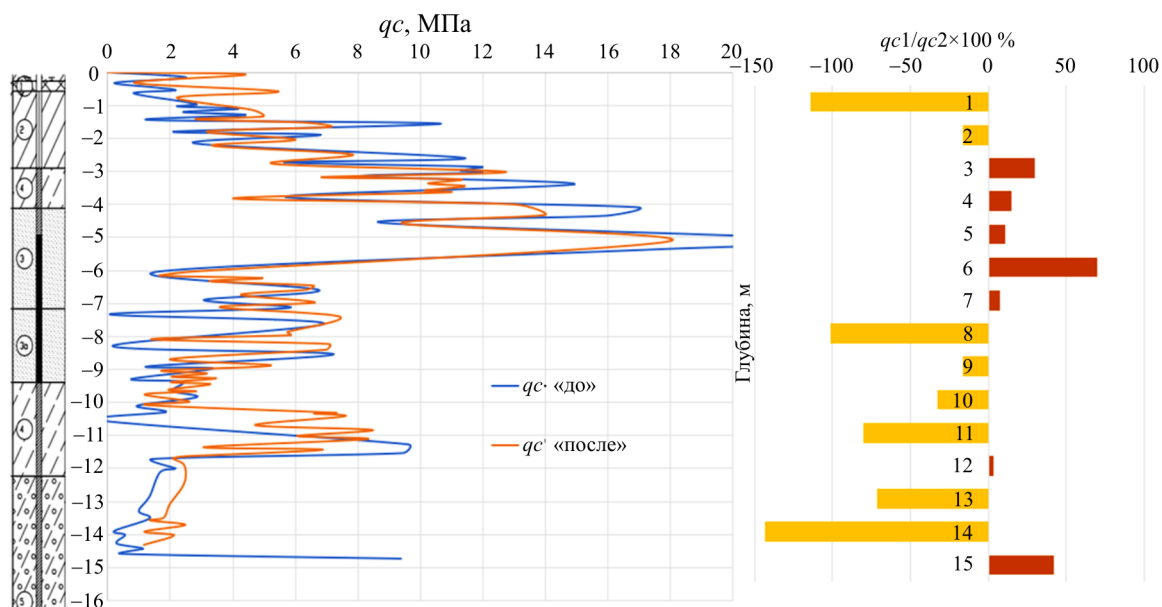


Рис. 2. Сопоставление графиков сопротивления погружению зонда «до» вибропогружения свай и «после» на объекте 1. Справа – диаграмма снижения сопротивления погружению зонда в процентах (положительные значения соответствует уменьшению сопротивления)  
 Fig. 2. Comparison of the graphs of the resistance to immersion of the probe «before» vibratory driving of piles and «after» at object 1. On the right is a diagram of a decrease in the resistance to immersion of the probe in percent (positive values correspond to a decrease in resistance)

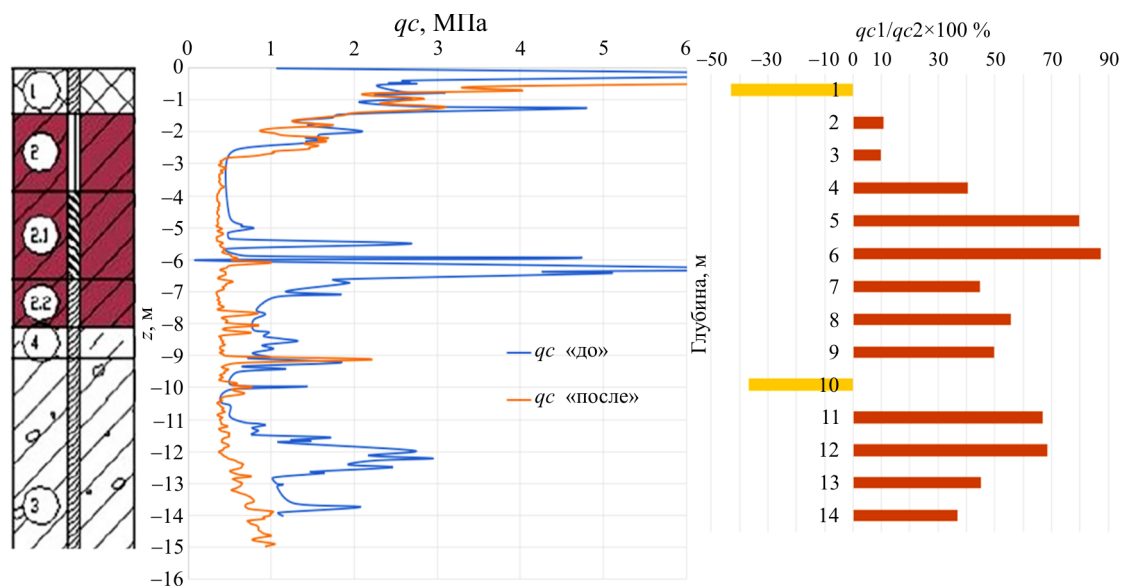


Рис. 3. Сопоставление графиков сопротивления погружению зонда «до» виброизвлечения свай и «после» на объекте 2. Справа – диаграмма снижения сопротивления погружению зонда в процентах (положительные значения соответствует уменьшению сопротивления)  
 Fig. 3. Comparison of graphs of resistance to immersion of the probe «before» vibration extraction of piles and «after» at object 2. On the right is a diagram of a decrease in the resistance to immersion of the probe in percent (positive values correspond to a decrease in resistance)

На объекте 2 выполнялось виброизвлечение шпунтовых свай. Статическое зондирование производилось на расстоянии 1 м от места извлечения свай. Максимальные зафиксированные среднеквадратичные значения ускорений грунта составили  $0,25 \text{ м/с}^2$ . Грунты в верхней толще

имели текучепластичную и текучую консистенцию. Снижение параметра сопротивления погружению зонду составило 15–85 % и присутствует по всей глубине зондирования.

Авторами были выполнены лабораторные исследования изменения свойств грунта после динамического воздействия. Оценивалось изменение сопротивления сдвигу глинистых грунтов. Данные испытания позволяют оценить, как динамическая нагрузка влияет на структуру грунта [17, 18].

Испытания были проведены в приборе одноплоскостного среза по схеме «НН», при которой прочность пород определяется без предварительного уплотнения с сохранением постоянных значений плотности и влажности, что достигается значительной скоростью деформирования (быстрый сдвиг). В слабопроницаемых, полностью водонасыщенных суглинистых породах при испытаниях по данной схеме прочность (сопротивление сдвигу) соответствует сцеплению связности. В отличие от испытания по схеме «НН», испытание по схеме «КД» называется медленным сдвигом, при котором к образцу грунта прикладывают сдвигающее усилие только после предварительного уплотнения под заданным нормальным напряжением. При данной схеме скорость сдвигающего усилия должна обеспечить отсутствие в поровой воде избыточного давления, которое будет приводить к снижению параметров прочности дисперсных грунтов. Таким образом, при данной схеме испытаний грунты имеют наибольшую прочность.

Использование той или иной схемы позволяет смоделировать поведение пород в массиве с учетом тех нагрузок, которые они воспринимают в натуре. Очевидно, что показатели прочности – сцепление и угол внутреннего трения – для одного и того же образца грунта могут отличаться в зависимости от использованной схемы испытаний.

Для испытаний были применены образцы супеси пылеватой и суглинка. Образцы супеси имели ненарушенную структуру, для испытаний суглинка была специально приготовлена паста – путем тщательного перемешивания до создания однородной массы.

Образцы имели пластичную и текучепластичную консистенцию соответственно, их плотность составляла 1,78–1,83 г/см<sup>3</sup>, влажность 25–37 %. Всего испытано три образца.

Было испытано по два образца-близнеца для ступеней нормального (вертикального) нагружения, соответственно 50/150 кПа, 100/150 кПа – для пластичной супеси и 50/100 кПа – для текучепластичного суглинка.

Один из образцов предварительно подвергался динамическому воздействию на вибростоліке в течение 5 мин при частоте более 50 Гц, а второй исследовался без предварительного воздействия (рис. 4).



Рис. 4. Вибрирование образцов глинистого грунта перед испытанием одноплоскостным срезом

Fig. 4. Vibration of clay soil samples before testing with a single-plane shear

Амплитудно-частотное воздействие вибростоллика на образцы грунта схоже с влиянием вибропогружения или виброизвлечения шпунтовых свай на грунт околосвайного пространства.

## Результаты и обсуждение

Полученные графики сопротивления сдвигу до и после вибрационного воздействия супеси пластичной приведены на рис. 5, 6.

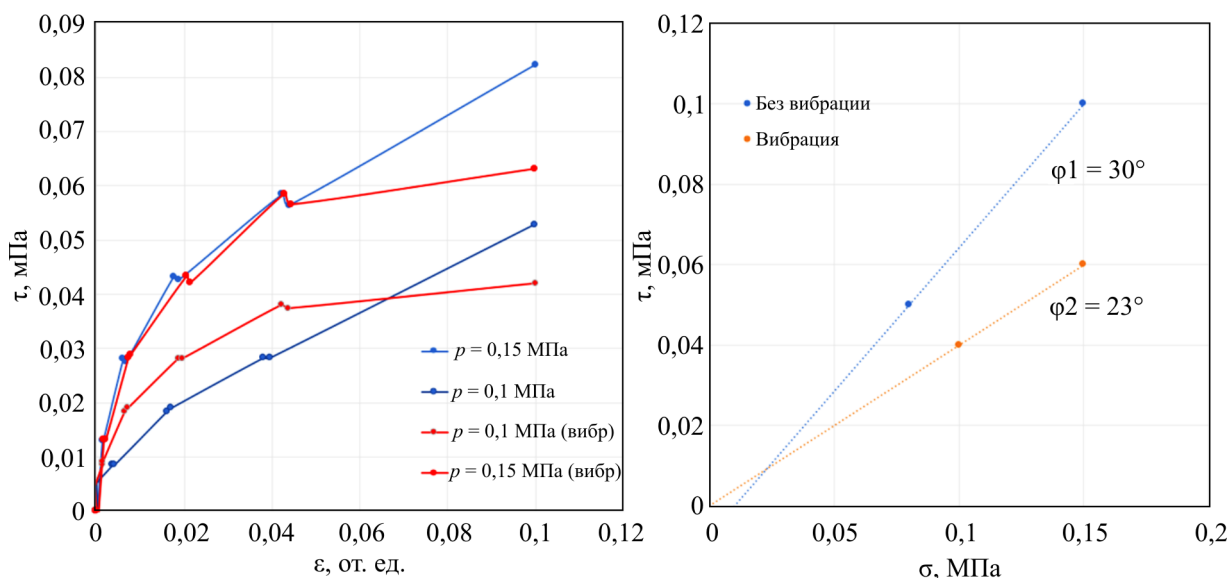


Рис. 5. Результаты испытания супеси пластичной на одноплоскостной срез: синий цвет – без предварительной вибрации; красный цвет – после вибрирования

Fig. 5. Test results of plastic sandy loam on a single-plane section.  
 Blue color – without preliminary vibration; red color – after vibration

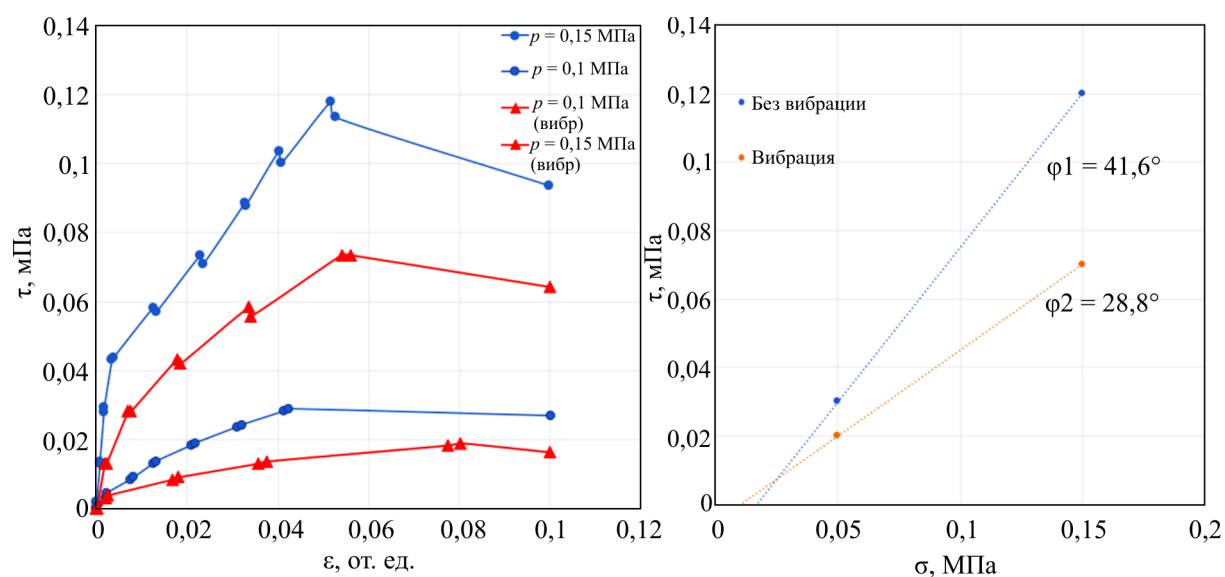


Рис. 6. Результаты испытания супеси пластичной на одноплоскостной срез: синий цвет – без предварительной вибрации; красный цвет – после вибрирования

Fig. 6. Results of testing plastic sandy loam on a single-plane shear.  
 In blue – without preliminary vibration; red color – after vibrating

Стоит отметить, что после вибрационного воздействия срез образцов произошел при меньшей нагрузке, что свидетельствует о снижении прочности образцов. Исходный угол внутреннего трения составлял  $30,2^\circ$ , после динамического воздействия он составил  $23^\circ$ . Снижение угла внутреннего трения составило 24 %.

Во втором испытании снижение прочности образца имеет более явный характер. Сдвиговая нагрузка снизилась примерно на 50 % для обеих величин нормального давления. Угол внутреннего трения уменьшился с  $41,6^\circ$  до  $28,8^\circ$ .

На рис. 7 приведены результаты сдвиговых испытаний суглинка текучепластичного.

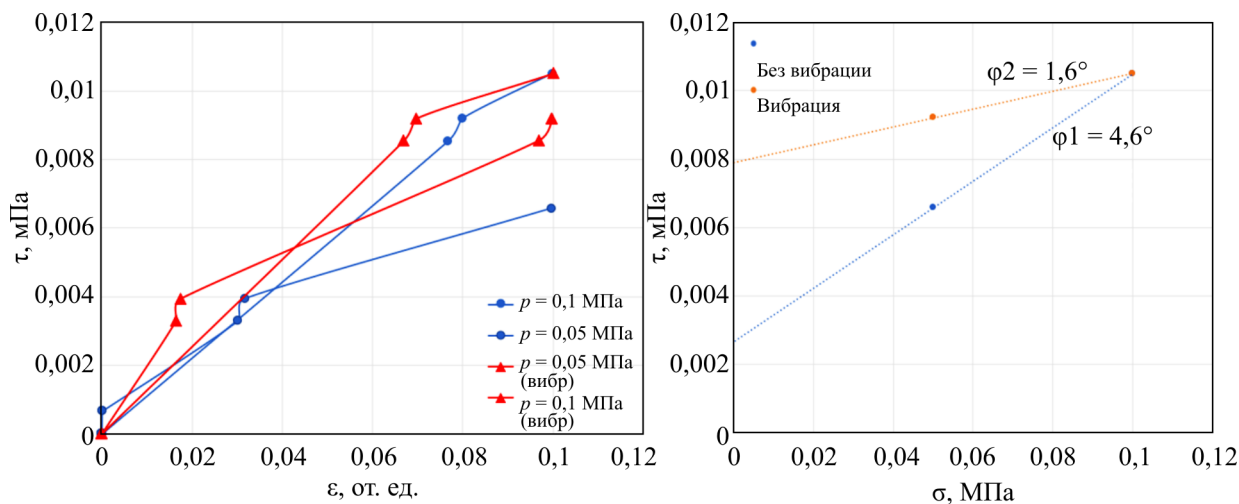


Рис. 7. Результаты испытания суглинка текучепластичного на одноплоскостной срез: синий цвет – без предварительной вибрации; красный цвет – после вибрирования

Fig. 7. Test results of flow-plastic loam on a single-plane shear.  
 In blue – without preliminary vibration; red color – after vibrating

По результатам испытания текучепластичного суглинка на одноплоскостной срез стоит отметить незначительное увеличение предельной сдвиговой нагрузки при нормальном давлении 0,05 МПа, характер работы образца под нагрузкой остался неизменным. Однако параметр угла внутреннего трения снизился на 66 %.

Таким образом, выполненные методом одноплоскостного среза экспериментальные исследования по определению параметров прочности дисперсных грунтов после высокочастотного вибрирования показали тенденцию к снижению угла внутреннего трения в среднем на 30 % у пластичной супеси и на 66 % – у текучепластичного суглинка. Величина же сцепления, зависящая от консистенции пород, остается неизменной после высокочастотного вибрирования.

По результатам данных исследований прослеживается четкая тенденция к снижению показателей прочностных свойств супесчаных и суглинистых грунтов, что совпадает с результатами исследований, выполненных ранее; так, например испытания, проведенные в НИУ МГСУ на лессовидных суглинках, показали, что при вибрационных воздействиях у образцов грунта наблюдалось уменьшение прочностных характеристик на 8–17 % [19].

Данные по изменению параметров прочности для песчаных грунтов, в свою очередь, являются более противоречивыми. Так, исследования НИУ МГСУ показали увеличение прочностных характеристик в среднем на 15–23 % после динамического воздействия, испытания, проводимые в КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, установили увеличение всего на 2–3 %, а исследования В.А. Ершова вовсе показали, что при воздействии вибрации разной интен-



сивности сопротивление сдвигу песчаных грунтов не меняется до тех пор, пока ускорения колебаний не достигнут некоторого критического значения, при дальнейшем их увеличении наблюдается постепенное снижение сопротивления песка сдвигу [20].

## **Выводы**

1. В настоящее время в связи с недостаточным количеством лабораторных и натурных исследований по изучению влияния высокочастотного вибрирования на изменение параметров прочности слабых водонасыщенных глинистых грунтов не удается выявить четкой зависимости изменения параметров от времени и частоты вибрирования.

2. При полевых испытаниях грунтов методом статического зондирования «до», «после» на расстоянии 4 м от места вибропогружения шпунтовых свай сопротивление погружению зонда снизилось на 30–70 % на глубине 1,5–6 м от дневной поверхности. С увеличением глубины с 6 до 15 м наблюдалось возрастание величины сопротивления погружению зонда, видимо, связанное с разной величиной критических ускорений, которые по мнению авторов [11], увеличиваются прямо пропорционально величине нормального давления, т.е. с глубиной.

3. При виброизвлечении шпунтовых свай на расстоянии 1 м было зафиксировано снижение сопротивления погружению зонда на 15–85 % по всей глубине шпунтовой сваи (0–15 м). Полученные данные можно описать процессом разуплотнения грунта околоосвайного пространства при извлечении сваи.

4. Лабораторные исследования дисперсных грунтов также показали тенденцию к снижению параметра угла внутреннего трения: для пластичной супеси – на 30 %, для текуче-пластичного суглинка – порядка 66 %. Удельное сцепление в опытах с супесью было отрицательным и незначительно увеличилось в текучепластичном суглинке.

## **Библиографический список**

1. Верстов В.В., Гайдо А.Н., Иванов Я.В. Технологий устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий: учеб. пособие / под ред. В.В. Верстова. – СПб.: Лань, 2014. – 236 с.
2. Гурский А.В. Учет влияния вдавливания шпунта на дополнительную осадку соседних зданий: дис. ... канд. наук. – СПб., 2016. – 133 с.
3. Опыт сооружения подземных паркингов в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга / Р.А. Мангушев, Е.Б. Лашкова, В.Ю. Смоленков, М.А. Зайцев // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5 (52). – С. 91–100.
4. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербургаисточников вибрационных воздействий / Р.Э. Дашко, О.Ю. Александрова, П.В. Котюков, А.В. Шидловская // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 13. – С. 24–71.
5. Баркан Д.Д. Виброметод в строительстве. – М.: Госстройиздат, 1959. – 1–11 с.
6. Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. – Prentice Hall, 1996. – P. 529–539.
7. Chopra, Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake engineering. – Second Edi. Prentice Hall / Chopra// АК, 1995.
8. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 101–108.
9. Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Сидоров В.В. Лабораторные испытания грунтов в Московском государственном строительном университете (МГСУ-МИСИ) // Инженерные изыскания. – 2013. – № 8. – С. 60–65.

10. Капустин В.В., Озмидов О.Р., Озмидов И.О. Методы исследования динамических полей напряжений и динамической устойчивости грунтовых массивов // *Инженерные изыскания*. – 2014. – № 1. – С. 48–53.

11. Ершов В.А. Динамические свойства песчаных грунтов и их учет в оценке устойчивости земляных сооружений: дис. ... д-ра. техн. наук. – Л., 1970. – 180 с.

12. Deckner F., Viking K., Hintze S. Wave Patterns in the Ground: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2017. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039

13. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving / F. Deckner, K. Viking, C. Guillemet, S. Hintze // *Geotechnical Testing Journal*. – 2015. – Vol. 38, Iss. 6. – P. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275

14. Deckner F., Viking K., Hintze S. Aspects of ground vibrations due to pile and sheet pile driving // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2015. – Vol. 20, Iss. 19. – P. 11161–11176.

15. Meijers P., Tol A.F. The Raamsdonksveer sheet pile test, measured surface settlements during vibratory sheet piling // *Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng. – Madrid, 2007*. – P. 603–609.

16. Mapping liquefaction based on CPT data for induced seismicity in Groningen / M. Korff, P. Meijers, A. Wiersma, F. Kloosterman // *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. – 2015. – P. 3418–3425.

17. Denies N., Holeyman A. Shear strength degradation of vibrated dry sand // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2017. – Vol. 95. – P. 106–117. DOI: 10.1007/s10706-017-0285-x

18. Effects of OCR on monotonic and cyclic behavior of reconstituted Shanghai silty clay / J. Qian, S. Li, J. Zhang, J. Jiang, Q. Wang // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – No. (118). – P. 111–119. DOI: 10.1016/j.soildyn2018.12.010

19. Чунюк Д.Ю., Козьмодемьянский В.Г., Коптева О.В. Инженерные изыскания для проектирования фундаментов сооружений вблизи источников вибрационных воздействий // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2017. – № 10. – С. 54–58.

20. Шепель Н.Н. Закономерности формирования геотехнической системы «сооружение – лессовый массив» в зоне действия динамических нагрузок: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09. – Днепропетровск, 2016. – 194 с.

## References

1. Verstov V.V., Gaydo A.N., Ivanov YA.V. Tekhnologiy ustroystva ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki i akvatorii: Uchebnoye posobiye. [Technologies for the construction of fencing for foundation pits in urban development and water areas: Textbook]. Lan, Saint Petersburg, 2014. – pp. 236

2. Gurskiy A.V., Uchet vliyaniya vdavlivaniya shpunta na dopolnitel'nyu osadku soseidnikh zdaniy. [Consideration of the effect of indentation of the sheet pile on the additional draft of neighboring buildings]. Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2016, 133 p.

3. Mangushev R. A., Lashkova E. B., Smolenkov V. YU., Zaytsev M. A., Opyt sooruzheniya podzemnykh parkingov v usloviyakh slabykh gruntov Sankt-Peterburga. [Experience in the construction of underground parking in soft soils of St. Petersburg]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2015, no. 5(52), pp. 91-100.

4. Dashko R. E., Aleksandrova O. YU., Kotyukov P. V., Shidlovskaya A. V., Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh usloviy Sankt-Peterburga, istochnikov vibratsionnykh vozdeystviy.

[Features of engineering and geological conditions of Saint Petersburg, sources of vibration effects]. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitelstvo*, 2011, no. 13, pp. 24-71.

5. Barkan D.D. *Vibrometod v stroitel'stve*. [Vibration method in construction] Moscow, Gosstroyizdat, 1959, pp. 1-11.

6. S. L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, 1996, pp. 529-539.

7. Chopra, *Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Second Edi. Prentice Hall / Chopra// AK, 1995.

8. Voznesenskiy Ye.A. *Zemletryaseniya i dinamika gruntov*. [Earthquakes and soil dynamics]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 1998, no.2, pp. 101-108

9. Ter-Martirosyan A. Z., Mirnyy A. YU., Sidorov V. V. *Laboratornyye ispytaniya gruntov v Moskovskom gosudarstvennom stroitel'nom universitete (MGSU-MISI)*. [Laboratory soil testing at Moscow State University of Civil Engineering]. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2013, no. 8, pp. 60-65.

10. Kapustin V. V., Ozmidov O. R., Ozmidov I. O. *Metody issledovaniya dinamicheskikh poley napryazheniy i dinamicheskoy ustoychivosti gruntovykh massivov*. [Research methods of dynamic stress fields and dynamic stability of soil massifs]. «*Inzhenernyye izyskaniya*», 2014, no. 1, pp. 48-53.

11. Yershov, V.A. *Dinamicheskiye svoystva peschanykh gruntov i ikh uchet v otsenke ustoychivosti zemlyanykh sooruzheniy*. [Dynamic properties of sandy soils and their consideration in assessing the stability of earth structures]. Doctor's degree dissertation, Leningrad, 1970, p. 180.

12. Deckner, F., Viking, K. & Hintze, S. *Wave Patterns in the Ground: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, Vol. 35, pp. 2863-2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039

13. Deckner, F., Viking, K., Guillemet, C., Hintze, S. *Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving*. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, Vol. 38, pp. 893-905. DOI: 10.1520/GTJ20140275

14. Deckner, F., Viking, K., Hintze, S. *Aspects of ground vibrations due to pile and sheet pile driving*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, Vol. 20, pp. 11161-11176.

15. Meijers, P., Tol, A.F., *The Raamsdonksveer sheet pile test, measured surface settlements during vibratory sheet piling*. *Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng, Madrid, 2007*, pp. 603-609.

16. Korff, M., Meijers, P., Wiersma, A., Kloosterman, F., *Mapping liquefaction based on CPT data for induced seismicity in Groningen*. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 2015, pp. 3418-3425.

17. Denies, N., Holeyman, A., *Shear strength degradation of vibrated dry sand*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, Vol. 95, pp. 106-117. DOI: 10.1007/s10706-017-0285-x

18. Qian J., Li S., Zhang J., Jiang J., Wang Q. *Effects of OCR on monotonic and cyclic behavior of reconstituted Shanghai silty clay* // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. No. (118). Pp. 111-119. DOI:10.1016/j.soildyn2018.12.010.

19. Chunyuk D. Yu., Kozmodemianskiy V. G., Kopteva O. V. *Inzhenernyye izyskaniya dlya proyektirovaniya fundamentov sooruzheniy vblizi istochnikov vibratsionnykh vozdeystviy*. [Engineering surveys for the design of foundations of structures near sources of vibration]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*, 2017, no. 10, pp. 54-58.

20. Shepel N. N. *Zakonomernosti formirovaniya geotekhnicheskoy sistemy "sooruzheniye – lessovyy massiv" v zone deystviya dinamicheskikh nagruzok*. [Regularities of the formation of the geotechnical system "structure – loess massif" in the area of action of dynamic loads]. Ph. D. thesis: 05.15.09. Dnepropetrovsk, 2016, p. 194.