

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.131.54

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-143-149

Оригинальная статья / Original Paper

Накопление необратимой деформации грунтов как результат повторных нагрузок

К.Г. Кондрашин, Р.А. Петров, Н.А. Рактович

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является установление закономерности накопления необратимых деформаций грунтов от повторных нагружений. **Метод.** При нагружении грунтов равновесие между внешними и внутренними силами устанавливается постепенно в течение более или менее продолжительного времени. Поэтому при однократном приложении циклической нагрузки такое равновесие может быть достигнуто лишь за относительно большое время. **Результат.** Предложен приближенный метод расчета величины деформации, развившейся в результате действия циклической нагрузки. Определены случаи, когда надо учитывать вязкую составляющую деформации и когда последней можно пренебречь. Установлено, что при определении деформации грунтов, развившейся за однократное приложение таких циклических нагрузок, которые характерны для процесса их уплотнения машинами, во всех случаях, кроме укатки их катками на пневматических шинах, вязкую составляющую деформации можно не учитывать. **Вывод.** В относительно небольшое время действия нагрузки состояние равновесия может быть достигнуто лишь в процессе деформирования грунтов повторными нагружениями. С увеличением числа повторностей нагружения грунт постепенно упрочняется, а деформация снижается. Это происходит как за счет необратимой, так и обратимой частей деформации. Следовательно, модуль деформации грунта от цикла к циклу увеличивается.

Ключевые слова: нагрузка, необратимая деформация, напряжение, грунты, строительство

Для цитирования: К.Г. Кондрашин, Р.А. Петров, Н.А. Рактович. Накопление необратимой деформации грунтов как результат повторных нагрузок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2):143-149. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-143-149

Accumulation of irreversible deformation of soils as a result of repeated loading

K.G. Kondrashin, S.R. Kosobokova, R.A. Petrov, N.A. Raktovich

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,
18 Tatishcheva Str., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to establish the patterns of accumulation of irreversible soil deformations from repeated loading. **Method.** When loading soils, the balance between external and internal forces is established gradually over a more or less long time. Therefore, with a single application of a cyclic load, such an equilibrium can be achieved only in a relatively long time. **Result.** An approximate method is proposed for calculating the magnitude of the deformation developed as a result of the action of a cyclic load. The cases are determined when it is necessary to take into account the viscous component of deformation and when the latter can be neglected. It has been established that when determining the deformation of soils that has developed during a single application of such cyclic loads that are characteristic of the process of their compaction by machines, in all cases, except for rolling them with rollers on pneumatic tires, the viscous component of deformation can be ignored. **Conclusion.** In a relatively short time of the load, the state of equilibrium can

be achieved only in the process of soil deformation by repeated loading. With an increase in the number of loading repetitions, the soil gradually hardens, and the deformation decreases. This occurs both due to the irreversible and reversible parts of the deformation. Consequently, the soil deformation modulus increases from cycle to cycle.

Keywords: load, irreversible deformation, stress, soils, construction

For citation: K.G. Kondrashin, S.R. Kosobokova, R.A. Petrov, N.A. Raktovich. Accumulation of irreversible deformation of soils as a result of repeated loading. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(2):143-149. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-143-149

Введение. Характер изменения деформаций грунтов при повторных нагружениях отображает их пластично-вязкие свойства [1-2]. В тех случаях, когда материалы не обладают вязкими свойствами, вся соответствующая данной нагрузке необратимая деформация развивается сразу, т. е. за однократное приложение нагрузки. В процессе первого нагружения материал приобретает соответствующее нагрузке упрочнение. От повторных нагружений наблюдается только обратимая часть деформации. В идеально вязких телах необратимая деформация при повторных нагрузках не меняется. Грунты занимают промежуточное положение. При этом, чем большее количество глинистых частиц они содержат, тем выше их вязкость и тем, следовательно, в меньшей степени затухает от цикла к циклу необратимая деформация.

Постановка задачи. Представляют интерес закономерности накопления необратимых деформаций грунтов от повторных нагружений. Эти закономерности могут быть использованы как при расчете требуемого числа проходов уплотняющих машин, так и при определении той суммарной величины осадки земляного полотна, которая может произойти в результате движения транспорта. В процессе повторных нагружений происходит снижение как необратимой, так и обратимой части деформации. При этом необратимая деформация снижается более интенсивно.

Методы исследования. Если к грунтам посредством штампа прикладывать повторные нагрузки одной и той же величины и с одной и той же скоростью изменения этого напряжения, то в полулогарифмических координатах зависимость накопленной деформации от числа повторностей приложения нагрузки может быть отображена прямой линией. Поэтому можно сказать, что накопление деформаций при повторных нагружениях качественно сходно с их накоплением в процессе ползучести. Поэтому образовавшаяся через n циклов приложения нагрузки необратимая деформация ε_n может быть рассчитана как [3-6]:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1(Kl_g n + 1) \quad (1)$$

где ε_1 – необратимая деформация, развившаяся за время первого нагружения; K – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Этой формулой можно пользоваться лишь при $n > 1$. Такая закономерность сохраняется до n , равного 20-30 циклам. При большем числе повторностей, подобно тому, как это было и при ползучести, закономерность может несколько изменяться. При уплотнении грунтов число повторностей приложения нагрузки обычно не превышает названного предела, поэтому при решении ряда задач, связанных с уплотнением, можно базироваться на логарифмической зависимости.

Многочисленные опыты позволили установить, что коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации зависит от вида и состояния грунта и не зависит от величины напряжения, если последнее не превосходит предела прочности, а также от скорости изменения напряженного состояния [7-8].

Независимость этого коэффициента от перечисленных выше факторов обнаруживает весьма интересное свойство грунтов, которое в сильной степени облегчает практические расчеты. Оно заключается в том, что при деформировании грунтов повторными циклическими нагрузками процессы накопления необратимой деформации по повторностям нагружения при различных напряжениях или скоростях изменения напряженного состояния подобны. Таким

образом, деформация, полученная от первого нагружения, определяет собой всю накопленную при повторных нагрузках деформацию. Это свойство может быть выражено в виде

$$\frac{\sum_1^n \varepsilon}{\sum_1^n E'} = \frac{\varepsilon_1}{E'_1}, \quad (2)$$

где ε_1 и E'_1 — относящиеся к разным параметрам нагружения необратимые деформации первых циклов; $\sum_1^n \varepsilon$ и $\sum_1^n E'$ — соответствующие этим параметрам накопленные необратимые деформации за n повторностей приложения нагрузки.

Опыты показали, что в зависимости, от вида грунта коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации может изменяться в 3-4 раза, а в зависимости от влажности и плотности грунта — в 2-2,5 раза. Оказалось, что одни и те же грунты разной плотности, но имеющие один и тот же модуль деформации, характеризуются одинаковыми коэффициентами интенсивности накопления необратимой деформации. Наоборот, грунты одной и той же плотности, но имеющие разные значения модулей деформации, отличаются и коэффициентами. Поэтому поведение грунтов при повторных нагружениях определяется величинами их модулей деформации. Такая закономерность соблюдается лишь при грунтах одинаковой влажности.

Коэффициент интенсивности накопления пластической деформации для песка непрерывно возрастает по мере увеличения модуля, т. е. с его уплотнением. Для связного грунта зависимость этого коэффициента от модуля деформации характеризуется кривой, имеющей максимум. Возрастание этого коэффициента свидетельствует о повышении вязких свойств грунтов.

Вязкие свойства связного грунта, как это и следовало ожидать, оказались значительно выше, чем грунта несвязного. В среднем можно считать, что коэффициент интенсивности накопления пластической деформации тяжелого пылеватого суглинка в два раза больше, чем песка. По мере уплотнения происходит сближение грунтовых частиц и их агрегатов, число контактов между ними при этом увеличивается, что и повышает вязкие свойства грунтов и, следовательно, ведет к увеличению коэффициента интенсивности накопления пластической деформации. Этим и объясняется возрастание этого коэффициента по мере увеличения модуля деформации. Снижение его у связных грунтов при модулях деформации последних свыше 200 кг/см² может быть объяснено тем, что здесь, благодаря весьма большой плотности, грунт все более становится «монолитным» и по своим свойствам начинает приближаться к «твердым» телам, т. е. к таким материалам, где деформация развивается не только на гранях отдельных зерен и частиц, но и за счет изменения формы и размеров самих частиц. Состояние равновесия в таких материалах достигается скорее.

Следует заметить, что здесь под вязкими свойствами понимаются такие свойства тел, которые обуславливают снижение скорости развития деформации. Поэтому, когда говорится о снижении вязких свойств в связи, например, с повышением плотности связных грунтов, то из этого вовсе не следует, что понижается также и коэффициент вязкости. Последний, определяет сопротивление тела деформированию и потому в данном случае он будет не понижаться, а повышаться.

Частота приложения нагрузок отражается на величине накопленной необратимой деформации только в тех случаях, когда продолжительность пауз между нагружениями меньше времени, которое требуется для полного восстановления обратимой части деформации. При этом по мере увеличения частоты накопление деформации несколько снижается. Снижение протекает вследствие того, что при недостаточной продолжительности пауз процесс обратного упругого последствия еще не успевает заканчиваться и при повторных нагружениях, во-первых, возникают как бы «встречные движения» отдельных грунтовых агрегатов, а во-вторых, отдельные грунтовые частицы и агрегаты в меньшей степени находят новые «пути» для взаимоперемещений во время последующего нагружения. Вполне естественно, что частота приложения нагрузок может иметь значение при деформировании грунтов, обладающих тиксотропными свойствами. Здесь по мере роста частота может приближаться к собственной частоте колебаний грунта. При этом наступает явление своеобразного резонанса, при котором происходит обильное выделение свободной воды, сопровождающееся снижением связи между частицами

грунта и их агрегатами. В результате сопротивление грунта внешней нагрузке снижается и вследствие этого эффективность действия последней повышается.

Это явление в настоящее время исследовано еще недостаточно. Надо заметить, что те частоты, при которых происходит это явление, обычно весьма высоки (100—200 гц) и потому их трудно достигнуть. Гораздо чаще в практике уплотнения грунтов наблюдаются случаи, когда обладающий определенной массой поверхностный вибратор входит в резонанс не только с грунтом уплотняемого слоя, но и с основанием этого слоя. В результате такая система начинает колебаться с повышенными амплитудами, что повышает эффективность возмущающей силы.

При повторных приложениях циклической нагрузки происходит упрочнение грунта. Однако упрочнение полностью сохраняется лишь при тех или же меньших напряжениях и скоростях изменения напряженного состояния, при которых совершались повторные нагружения. Если повысить напряжение или же понизить скорость изменения напряженного состояния, то необратимая деформация снова возрастет, т. е. упрочнение частично будет утрачено.

В процессе проведенных опытов было установлено, что если на предварительно упрочненный грунт действовать повторной циклической нагрузкой, меняя через определенное количество циклов величины напряжений, но так, чтобы они все время были ниже того напряжения, при котором производили предварительное упрочнение, то соответствующие этим измененным напряжениям деформации будут всегда происходить с некоторым запаздыванием. Так, если напряжение понижается, то новая, соответственно пониженная величина деформации устанавливается лишь постепенно за несколько циклов, совершенных уже при новом, меньшем значении напряжения. То же происходит и от повышения напряжения. Грунт как бы «помнит» тот процесс, который совершался до этого изменения. В связи с тем, что накопление необратимой деформации от повторных нагружений качественно сходно с накоплением ее в процессе ползучести, то для расчета величины этой деформации в обоих случаях может служить один и тот же метод. Экспериментальным путем установлено, что при одном и том же времени действия нагрузки необратимая деформация от повторных нагружений, общее число которых равно или менее 20, в среднем в 1,4 раза больше, чем при ползучести.

Это можно объяснить тем, что при повторных нагружениях в периоды разгрузок происходят обратные движения грунтовых частиц и их агрегатов, что уменьшает их «взаимозаклинивание» и тем самым в период нового нагружения создаются условия для образования дополнительной деформации. От увеличения числа циклов разница между деформациями при ползучести и повторных нагружениях снижается.

Для расчета величины накопленной относительной необратимой деформации от повторных циклических нагружений, которые совершаются при одном и том же напряжении, может служить выражение:

$$\varepsilon_n = 1,4\sigma \left[\frac{1}{\Pi} + \frac{1}{\eta_{0x}} \ln(1 + xt_{Э0}) \right] \quad (3)$$

которое отличается от выведенной выше для расчета величины накопленной при ползучести деформации тем, что в нее введен определенный опытным путем поправочный коэффициент 1,4. За время $t_{Э0}$ следует принимать общее эквивалентное время действия нагрузки за n циклов.

В практике часто наблюдаются случаи, когда в процессе повторных нагружений грунтов напряжения не остаются постоянными, а непрерывно от цикла к циклу повышаются. При проезде автомобилей и уплотнении грунтов катками такое положение имеет место ввиду все уменьшающейся глубины колеи. Эта же картина наблюдается и при уплотнении грунтов трамбованием. Причиной такого повышения является непрерывное упрочнение грунтов, благодаря которому время удара снижается, а напряжение соответственно увеличивается. Общую относительную необратимую деформацию, накопленную за n приложений нагрузки, совершающихся с переменным, все увеличивающимся напряжением, можно рассматривать как сумму двух составляющих:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (4)$$

где ε_1 – относительная необратимая деформация, накопленная за n циклов нагружения в предположении, что повторности совершаются при среднем напряжении $0,5(\sigma_1 + \sigma_n)$;

ε_2 – относительная необратимая деформация, развившаяся за счет разницы между максимальным σ и этим средним напряжением. Величину ε_2 можно рассчитать, используя выражение (III):

$$\varepsilon_1 = 0,7(\sigma_1 + \sigma_n) \left[\frac{1}{\Pi} + \frac{1}{\eta_0 x} \ln(1 + xt_{Э0}) \right] \quad (5)$$

Значение ε_2 определяется так:

$$\varepsilon_2 = \left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_n}{2} \right) \frac{1}{\Pi} = \frac{\sigma_n - \sigma_1}{2\Pi} \quad (6)$$

Тогда общая деформация находится по формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n - \sigma_1}{2\Pi} + 0,7(\sigma_1 + \sigma_n) \left[\frac{1}{\Pi} + \frac{1}{\eta_0 x} \ln(1 + xt_{Э0}) \right] \quad (7)$$

Если внизу деформируемого слоя грунта расположено более жесткое основание, что, например, наблюдается при уплотнении грунта, где таким основанием служит ранее уплотненный слой, то выбирать значения модуля необратимой деформации «П» должны с учетом этого обстоятельства. Величина «П» будет тем больше приближаться к значению, соответствующему более жесткому основанию, чем тоньше будет слой деформируемого грунта.

Значения модулей деформаций E_3 , а также модулей необратимых деформаций Π_3 , найденные с учетом влияния более жесткого основания, можно назвать эквивалентными модулями. Эквивалентные модули по своей абсолютной величине занимают промежуточное положение между значениями модулей, соответствующих верхним более рыхлым слоям грунта и уплотненным, а потому и более жестким основаниям этих слоев.

Накопленную необратимую деформацию можно определить также на основе опытной зависимости (I), а общую накопленную деформацию можно рассматривать как сумму трех составляющих, из которых первая отображает ее величину, развившуюся от первого нагружения, вторая учитывает то ее значение, которое получается за счет разности напряжений последнего и первого циклов, а третья составляющая учитывает величину деформации, развившуюся за счет повторности приложения нагрузки.

В результате такого подхода для расчета накопленной относительной необратимой деформации может быть получена следующая формула [9]:

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_1}{\Pi_3} [\beta + 0,5K(1 + \beta) \lg n] \quad (8)$$

где σ_1 – напряжение при первом цикле нагружения; Π_3 – эквивалентный модуль необратимой деформации; β – коэффициент увеличения напряжений; $\beta = \frac{\sigma_n}{\sigma_1}$; σ_n – напряжение при последнем цикле нагружения; n – число повторности приложения нагрузки; K – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Формула может служить для расчетов, связанных с деформированием связных грунтов при напряжении σ_n , меньшем предела прочности.

Обсуждение результатов. В случае неупрочненных грунтов, т. е. подвергающихся деформированию в первый раз, накопление деформаций при ползучести происходит только за счет ее необратимой части. Обратимая часть деформации развивается в процессе приложения нагрузки и в дальнейшем понижается. Даже при больших скоростях изменения напряженного состояния, близких к тем, которые встречаются при ударных нагрузках, отставание в изменении величины обратимой части деформации по сравнению с изменениями напряжения практически отсутствует. В связи с этим при нагружении грунта циклическими нагрузками величина обратимой деформации не зависит от скорости изменения напряженного состояния [10-12]. В случае упрочненных грунтов, т. е. уже подвергавшихся ранее нагружению, обратимая часть деформации развивается с пониженными скоростями. В связи с этим накопление деформации при ползучести здесь может явиться следствием роста не только необратимой, но и об-

ратимой части деформации. По мере упрочнения грунта скорость течения обратимой деформации снижается.

Сильно упрочненные грунты при деформировании нагрузками, напряжения от которых не превосходят определенных пределов, не обнаруживают деформаций и по своим свойствам приближаются к абсолютно твердым телам.

Выведенные формулы могут служить для расчета величин деформаций в процессе ползучести связных грунтов, и опытным путем определены значения расчетных параметров. Относительное снижение напряжений в процессе релаксации не зависит от их начальных величин. Интенсивность снижения напряжений повышается по мере роста влажности грунтов и содержания в них глинистых частиц и понижается с повышением плотности грунтов. Поведение грунтов в процессе релаксации напряжений в сильной степени отличается от поведения идеального максвелловского тела. Поэтому для оценки процесса релаксации напряжений предложена иная, отличная от времени релаксации константа. В результате сопоставления процессов ползучести и релаксации с достаточными на то основаниями можно полагать, что релаксация напряжений есть следствие перехода обратимой деформации в пластические сдвиги.

Классический вид диаграмм циклической нагрузки в координатах «напряжение – деформация», а также величина необратимой части деформации находятся в зависимости от скорости изменения напряженного состояния. С увеличением скорости возрастает происходящая вначале нагружения задержка в развитии деформации, в большей степени проявляется явление последействия и снижается необратимая часть деформации. Влияние скорости снижается по мере ее роста и в том диапазоне скоростей, которые обычно бывают при работе машин для уплотнения грунтов и проезде автомобилей. Этим явлением практически можно пренебречь. Найдено, что развивающиеся в результате циклических нагрузок деформации (при тех их параметрах, которые обычно встречаются в процессе уплотнения) у связных грунтов находятся в линейной зависимости от напряжений.

Вывод. Предложен приближенный метод расчета величины деформации, развившейся в результате действия циклической нагрузки. Определены случаи, когда надо учитывать вязкую составляющую деформации и когда последней можно пренебречь. В частности, найдено, что при определении деформации грунтов, развившейся за однократное приложение таких циклических нагрузок, которые характерны для процесса их уплотнения машинами, во всех случаях, кроме укатки их катками на пневматических шинах, вязкую составляющую деформации можно не учитывать.

Накопление необратимой деформации при повторных циклических нагрузках качественно сходно с накоплением ее в процессе ползучести. В связи с этим для определения накопленной в процессе повторных нагрузок необратимой деформации можно пользоваться теми же методами, что и при расчете деформации, развившейся в процессе ползучести. Интенсивность накопления необратимой деформации при повторных приложениях нагрузки не зависит ни от напряжения, ни от скорости изменения напряженного состояния. Поэтому накопленная деформация определяется в основном той величиной необратимой деформации, которая развивается в результате первого нагружения грунта.

Выведены формулы, по которым можно рассчитать величины накопленной необратимой деформации при повторных нагружениях, совершающихся, как при постоянном, так и переменном напряжениях.

Библиографический список:

1. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Саинов М.П. Анализ состояния грунтовой плотины колымской ГЭС // Вестник МГСУ. 2009. №2. С. 111-118.
2. Солодов В.В., Матуа В.П. Исследование влияния степени уплотнения грунта земляного полотна на накопление остаточных деформаций в элементах дорожных конструкций // Автомобильные дороги. 2014. - № 8. - С. 70-77.
3. Болдырев Г.Г., Барвашов В.А., Кошкина Н.В. Происхождение и состав грунтов. Физические и механические свойства грунтов // Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева). М.: АСВ, 2014. С. 31-68

4. Строчкова Л.А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластических моделей // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 367. С. 190-194.
5. Васильчук Ю.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Королев В.А., Трофимов В. Т. Грунтоведение. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.
6. Хафизов Р.М. Анализ методов определения деформационных характеристик связных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2015. — № 6. — С. 37—40.
7. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.
8. Алексеев А. В., Иовлев Г.А. Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 75-87. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.
9. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening-Soil Model: Formulation and verification. - Rotterdam, 1999.
10. Саенков А.С., Елизаров С.А., Малышев М.В. Развитие областей предельного состояния грунта в основании квадратного штампа/ Основания, фундаменты и механика грунтов. -1991. -№ 2. -С. 15-17.
11. Миронов В.А., Софьин О.Е. Модель предельного течения дилатирующих грунтов при сложном напряженном состоянии/ Будаунштва. Строительство. Construction. -Мн.: БНТУ, -2003. -№ 1 - 2. -С. 71-75.
12. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева Экспериментальные исследования динамических деформационных свойств грунтов и др., 1989. Т. 216. С. 242-254.

References:

1. Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Sainov M.P. Analysis of the state of the soil dam of the Kolyma hydroelectric power station. *Vestnik MGSU*. 2009; 2: 111-118. (In Russ)
2. Solodov V.V., Matua V.P. Study of the influence of the degree of soil compaction of the subgrade on the accumulation of residual deformations in the elements of road structures. *Highways*. 2014; 8: 70-77. (In Russ)
3. Boldyrev G.G., Barvashov V.A., Koshkina N.V. Origin and composition of soils. Physical and mechanical properties of soils. Handbook of geotechnics. Foundations, foundations and underground structures ed. V.A. Ilyichev, R.A. Mangushev). M.: ASV, 2014; 31-68 (In Russ)
4. Stroikova L.A. Determination of soil deformability parameters for elastic-plastic models. *Bulletin of the Tomsk State University*. 2013; 367: 190-194. (In Russ)
5. Vasilchuk Yu.A., Voznesensky E.A., Golodkovskaya G.A., Zianguirov R.S., Korolev V.A., Trofimov V.T. - M.: Publishing house of Moscow State University, 2005: 1024. (In Russ)
6. Khafizov R.M. Analysis of methods for determining the deformation characteristics of cohesive soils. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 2015; 6: 37-40. (In Russ)
7. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis limit or design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952; 10(2): 157-165.
8. Alekseev A.V., Iovlev G.A. Adaptation of the model of hardening soil (hardening soil) for the engineering-geological conditions of St. Petersburg. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019; 4: 75-87. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87. (In Russ)
9. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening-Soil Model: Formulation and verification. Rotterdam, 1999.
10. Saenkov A.S., Elizarov S.A., Malyshev M.V. Development of soil limit state areas at the base of a square stamp. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 1991; 2:15-17. (In Russ)
11. Mironov V.A., Sofin O.E. Model of the limiting flow of dilating soils in a complex stress state. *Budaunshstva. Construction. Construction*. Minsk: BNTU, 2003;1(2): 71-75.
12. Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva Experimental studies of dynamic deformation properties of soils et al., 1989; 216.: 242-254. (In Russ)

Сведения об авторах:

Кирилл Геннадьевич Кондрашин, ассистент кафедры «Геодезия, кадастровый учёт»; младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона; аспирант; astrakhan_kirill@mail.ru ORCID 0000-0001-7708-0043

Роман Андреевич Петров, младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона; аспирант; tottenham@bk.ru

Надежда Алексеевна Рактович, младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории приоритетных исследований региона; доцент кафедры «Дизайна и реставрации»; Член союза дизайнеров РФ; аспирант; n.raktovich92@yandex.ru

Information about authors:

Kirill G. Kondrashin, Assistant of the department "Geodesy, cadastral registration"; junior researcher at the Research Laboratory for Priority Research in the Region; graduate student; astrakhan_kirill@mail.ru

Roman A.Petrov, Junior Researcher, Research Laboratory for Priority Studies of the Region; graduate student; tottenham@bk.ru

Nadezhda A. Raktovich, Junior Researcher, Research Laboratory for Priority Research in the Region; Assoc. Prof. of the Department of Design and Restoration; Member of the Union of Designers of the Russian Federation; graduate student; n.raktovich92@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 07.04.2022.

Одобрена после рецензирования / Reved 11.05.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 11.05.2022.