

# К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ СЖИМАЕМОЙ ТОЛЩИ

## ON THE DETERMINATION OF ACTIVE ZONE THICKNESS

О. А. ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук

В. В. БАХМИСОВ

*При строительстве высотных зданий, возникает необходимость определять глубину сжимаемой толщи до 100 м и более. Существующие способы определения глубины сжимаемой толщи основаны на решении задачи для однородного изотропного нормально уплотненного массива грунта. В данной статье рассмотрено влияние неоднородности, анизотропии, прочности и переуплотнения грунта на определение глубины сжимаемой толщи, а также высоты капиллярного поднятия и наличия капиллярно подвешенной воды.*

### Ключевые слова:

*Анизотропия, высота капиллярного поднятия, глубина сжимаемой толщи, капиллярно-подвешенная вода, массив грунта, неоднородность, распределение напряжений, переуплотненный грунт, OCR*

*When erection high-rise buildings, it becomes necessary to determine the depth of the compressible strata by 100 m or more. The existing methods for determining the depth of the compressible layer are based on the solution of the problem for a homogeneous, isotropic soil massif. In this article, the influence of heterogeneity, anisotropy, and strength, as well as preconsolidation pressure, capillary rise height and capillary-suspended water on the determination of the depth of compressible thickness is considered.*

### Key words:

*Capillary rise height, capillary-suspended water, depth of compressible thickness, preconsolidation pressure, soil anisotropy, soil orthotropic, stress distribution, OCR*

### Введение

Глубина сжимаемой толщи имеет важное значение при назначении объемов инженерно-геологических изысканий и выполнении расчетов как численным, так и аналитическим методами. Основным способом определения глубины сжимаемой толщи  $H_c$  в соответствии с СП 22.13330 Основания и фундаменты зданий и сооружений [1] является ограничение ее путем сопоставления дополнительных напряжений в скелете

грунта, возникающих в результате приложения нагрузки  $\sigma_{zp}$  с существующими эффективными напряжениями в массиве грунта  $\sigma_{zg}$  в соответствии с условием

$$\sigma_{zp} = k \sigma_{zg}. \quad (1)$$

Коэффициент  $k$  принимается, в основном, равным 0,5. Исключение составляют слабые грунты (при  $E = 7$  МПа), для которых  $k = 0,2$ .

Основная идея, заложенная в этом способе, заключается в том, что ниже данной глубины значения деформации настолько малы, что можно их не учитывать.

Вместе с тем в некоторых случаях возникает парадоксальная ситуация, когда по расчету требуется увеличивать глубину сжимаемой толщи, а осадка при этом уменьшается. Это возникает в связи с тем, что на осадку оказывает влияние, кроме  $H_c$ , модуль деформации грунта, зависящий от напряженного состояния. Это особенно явно проявляется при строительстве на анизотропных, неоднородных, переуплотненных прочных грунтах (см. примеры, рассмотренные далее). Такие грунты характерны для основания высотных зданий,  $H_c$  которых может достигать 100 м и более.

При такой большой глубине в некоторых случаях в основании также встречается несколько водоносных горизонтов с водой, находящейся в зоне капиллярной каймы, и капиллярно-подвешенной водой, которые создают дополнительные (к напряжениям от собственного веса грунта) напряжения в скелете грунта.

В статье приводится оценка указанных особенностей грунтов на величину сжимаемой толщи.

### 1. Определение дополнительных существующих эффективных напряжений в массиве грунта от воды, находящейся в зоне капиллярной каймы, и капиллярно-подвешенной воды

В общем случае в каждой точке массива грунта существующие эффективные напряжения определяются напряжениями от собственного веса грунта  $\sigma'_{zgi}$ ; давлением в поровой воде  $u_{zi}$ ; дополнительными напряжениями в скелете грунта от воды, находящейся в зоне капиллярной каймы  $\sigma_{zki}$ , и капиллярно-подвешенной воды  $\sigma_{zkpi}$ :

$$\sigma'_{zgi} = \sigma_{zgi} - u_{zi} + \sigma_{zki} + \sigma_{zkpi}. \quad (2)$$

Оценим влияние каждого из этих факторов.

**Капиллярно-подвешенная** — это дополнительная вода в ограниченной зоне, которая находится в грунте выше уровня подпертых вод (УПВ). Она увеличивает вес грунта в этой зоне, следовательно, повышает и эффективные напряжения, совпадающие с полными.

Дополнительные напряжения в скелете грунта от воды, находящейся в зоне **капиллярной каймы**  $\sigma_{zki}$ , могут быть определены по формуле

$$\sigma_{zki} = h_c \gamma_w e \Delta G \quad (3)$$

где  $h_c$  — высота капиллярного поднятия;

$e$  и  $\Delta G$  — соответственно коэффициент пористости и разность в степенях влажности грунта, находящегося в зоне капиллярной каймы, и грунта, расположенного выше капиллярной каймы.

В грунтах высота капиллярного поднятия  $h_c$  зависит от их минерального и химического составов, структурно-текстурных особенностей, состава и свойств поровой жидкости. Влияние химико-минерального состава проявляется через угол смачивания, который зависит от смачиваемости минерала жидкостью. У гидрофильных минералов  $\theta \rightarrow 0$ , у гидрофобных  $\theta \rightarrow 90^\circ$ . Гидрофильные плёнки на поверхности частиц увеличивают величину капиллярного поднятия, гидрофобные снижают её.

Величина **высоты капиллярного поднятия**  $h_c$  определяется зависимостью

$$h_c = 2\sigma\cos\theta/r\rho_w g = P_{\text{кан}}/\rho_w g, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;

$\theta$  – угол смачивания;

$r$  – радиус капилляра;

$\rho_w$  – плотность воды;

$g$  – ускорение свободного падения.

В табл. 1 и 2 представлена высота капиллярного поднятия соответственно для грунтов, имеющих разные текстурно-структурные особенности [2], а также результаты расчета  $\sigma_{zk}$ , выполненного по формуле (4) с учетом  $\Delta G = 0,5$ .

Таблица 1

**Высота капиллярного поднятия в однородных несвязных грунтах  
(по А. Агтенбергу)**

Грунт	Размер частиц, слагающих грунт, мм	$e$	Высота капиллярного поднятия, см	$\sigma_{zk}$ , кПа
Гравий мелкий	5-2	0,5	2,5	0,06
Песок:				
грубозернистый	2-1	0,5	6,5	0,16
крупнозернистый	1-0,5	0,5	13,1	0,33
среднезернистый	0,5-0,2	0,55	26,1	0,65
мелкозернистый	0,2-0,1	0,6	42,8	1,29
тонкозернистый	0,1-0,05	0,6	105,5	3,15

Таблица 2

**Высота капиллярного поднятия суглинков и глин (по Ф.П. Саваренскому)**

Грунт	Высота капиллярного поднятия, см	$e$	Число дней	$\sigma_{zk}$ , кПа
Суглинок	160,6	0,65	85	5,2
Суглинок лёгкий	196,0	0,65	207	6,3
Глина	90,7	0,85	25	3,9
То же	99,5	0,85	25	4,3
«	125,0	0,85	114	5,3
«	153,5	0,85	207	6,5

В Терминологическом словаре-справочнике по инженерной геологии [2] приводятся данные о том, что в глинах высота капиллярного поднятия достигает 8 м и даже больше, в суглинках – 4 м, в супесях – 1,5 м, в песках мелкозернистых – 1 м, в среднезернистых – 0,4 м. Приведенные данные для глин представляются несколько завышенными. Вероятно, они вычислены по формуле (4). Более реальные значения для них соответствуют данным, приведенным в справочнике по водопонижению [3], и равны 5м. В этом случае  $\sigma_{zk}$  может достигать для глин 20 кПа, суглинков – 13к Па, супесей 5 кПа. За счёт разности капиллярного давления в разных точках слоя грунта капиллярная влага может перемещаться в любом направлении, образуя, в частности, зону **капиллярно-подвешенной воды**. Толщина такой зоны равна разности высот капиллярного поднятия в контактирующих грунтах разной дисперсности. Наиболее часто зона капиллярно-подвешенной влаги образуется в зоне аэрации над уровнем грунтовых вод. Такая вода учитывается в расчете в составе удельного веса грунта  $u_i$ .

## 2. Влияния механической анизотропии, неоднородности, переуплотнения, а также прочности грунта на напряжения в скелете грунта, возникающие в результате приложения нагрузки $\sigma_z$

### Механическая анизотропия грунта

В силу своего генезиса осадочным породам присуща механическая анизотропия, вызванная накоплением осадка в разные периоды времени года. Разница в механических характеристиках грунта во взаимно перпендикулярных направлениях (в вертикальном и горизонтальном) может достигать 2 раз и более. Наличие тонких прослоек из более прочного грунта создаёт некоторое армирование, что перераспределяет напряжения в грунте и тем самым снижает (в случае горизонтальной слоистости) глубину сжимаемой толщи и общую величину осадки фундамента, повышает его несущую способность.

Наличие анизотропии сказывается на распределении усилий в основании фундаментов. Если коэффициент анизотропии грунта  $n_a < 1$ , происходит рассеивание напряжений по глубине, а следовательно, и уменьшение глубины сжимаемой толщи и осадки фундамента. При  $n_a > 1$ , наоборот, происходит концентрация напряжений по вертикальной оси, увеличение глубины сжимаемой толщи и осадки фундамента.

Для учёта механической анизотропии грунта в формулу Буссинеска вводится коэффициент концентрации  $\Psi$  (модель Иванова – Гриффитса – Фрелиха) [4-6]:

$$\sigma_z = \frac{\Psi N \cos^{\Psi} Q}{2\pi R^2} \quad (5)$$

Значения коэффициента концентрации  $\Psi$  в зависимости от коэффициента анизотропии  $n_a$  представлены на рис. 1. При  $n_a = 1$  значение  $\Psi = 3$  (для однородных и изотропных упругих сред). При этом  $\sigma_z$  совпадает с решением Буссинеска.

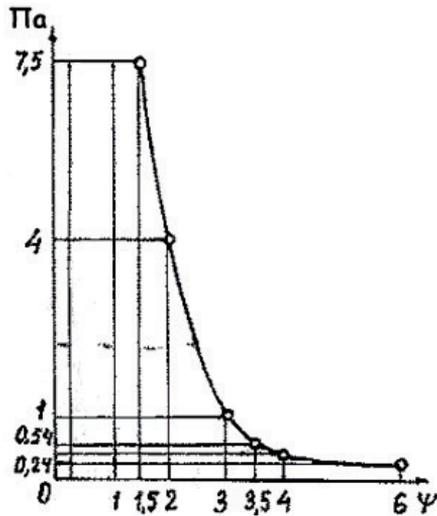


Рис. 1. Зависимость коэффициента концентрации  $\Psi$  от коэффициента анизотропии  $n_a$

При коэффициенте анизотропии  $n_a = 3$  (среднее значение для описанных выше воскресенских и вендских глин) значение  $\Psi = 2,5$ , вертикальные напряжения уменьшаются на 17% и, соответственно, уменьшается глубина сжимаемой толщи и осадка фундамента.

Указанный эффект происходит в результате перераспределения напряжений на большую площадь, вследствие чего уменьшаются вертикальные напряжения и возрастают горизонтальные.

### Неоднородность грунта

Для учета **неоднородности грунта** в формуле (5) значение  $\Psi$  будет меняться в зависимости от изменения модуля деформации  $E$  по глубине от 1,5 до 6 [5]. Для модуля деформации, равномерно возрастающего с глубиной, что согласуется с физическим смыслом ( $E$  линейно зависит от изменения горизонтальных напряжений, которые, в свою очередь, линейно возрастают с глубиной) и результатами экспериментальных исследований, в частности, при исследовании вендских глин при строительстве башни Лахта – Центра [7], в формуле (5)  $\Psi = 4$  [6]. Это приведет к увеличению вертикальных напряжений на 30% и, соответственно, глубины сжимаемой толщи.

### Начальное напряженное состояние

К эффекту увеличения вертикальных напряжений приводит и учет **начального напряженного состояния** переуплотненных грунтов. На рис. 2 приведен пример расчета глубины сжимаемой толщи, выполненного по формуле (1) при  $k = 0,5$  на основании численного расчета при разных значениях коэффициента переуплотнения грунта  $OCR$  и разных давлениях фундамента на массив грунта. Грунт основания –

полутвердый суглинок. Анализ результатов расчета показал, что основное увеличение глубины сжимаемой толщи происходит при изменении OCR с 1 до 5 и составляет около 20%.

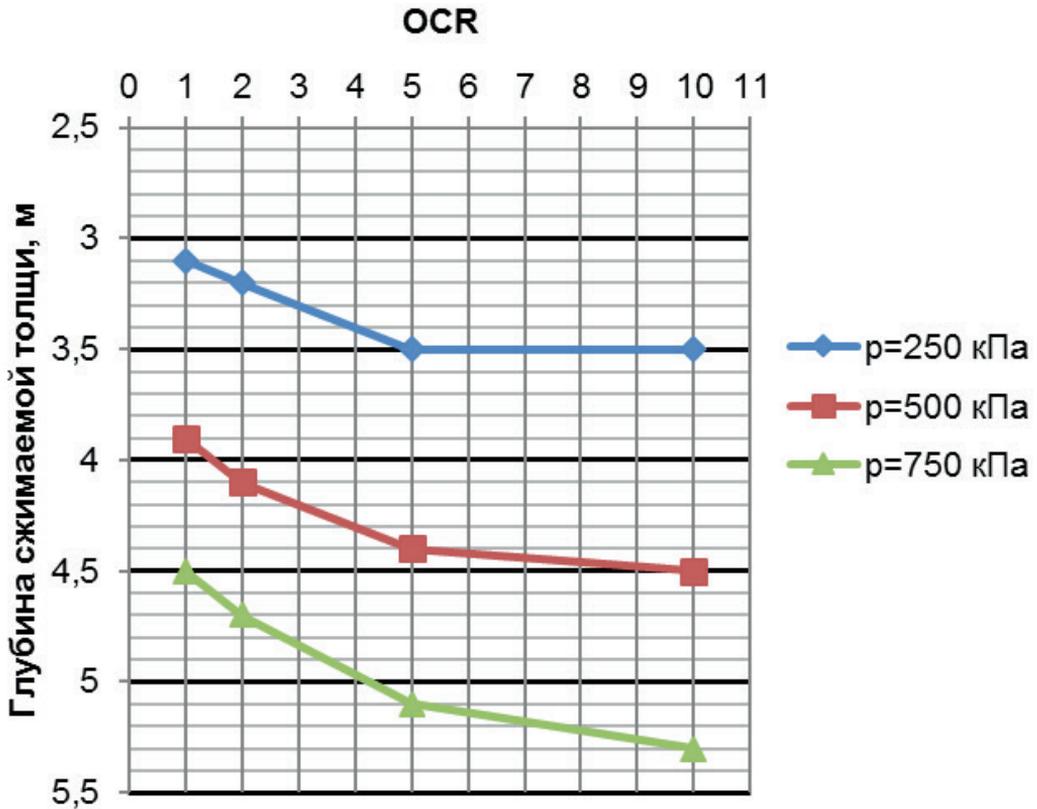


Рис. 2. Зависимость глубины сжимаемой толщи от OCR при разной нагрузке на фундамент

Здесь следует отметить, что наряду с увеличением вертикальных напряжений возрастают и горизонтальные, а имея в виду тот факт, что на модуль деформации существенное влияние оказывают горизонтальные напряжения, при расчете осадки фундамента необходимо учитывать оба эти фактора: изменение глубины сжимаемой толщи и изменение модуля деформации. В рассмотренном выше примере осадки фундамента при увеличении OCR, несмотря на увеличение глубины сжимаемой толщи, уменьшились.

Другим примером строительства на переуплотненных грунтах является Башня «Лахта – Центр» [7]. На рис. 3 представлена зависимость вертикальных перемещений грунта, рассчитанных при разных значениях коэффициента переуплотнения (OCR) вендских глин.

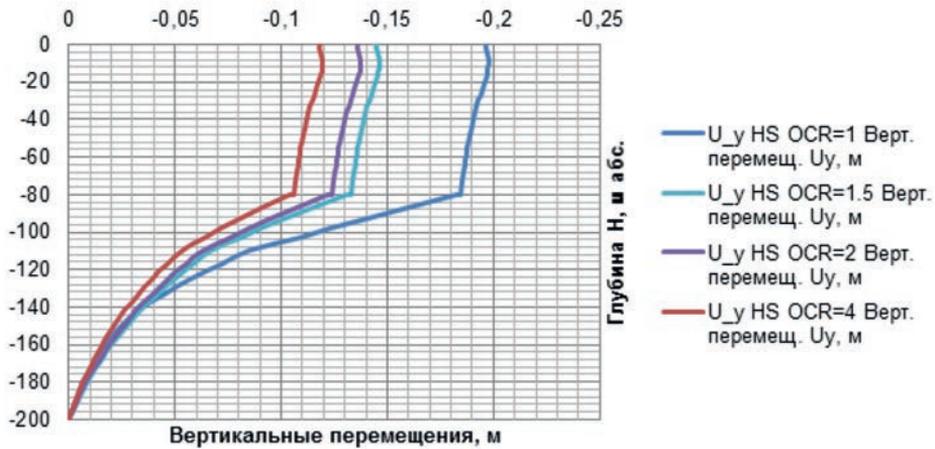


Рис. 3. Вертикальные перемещения массива грунта при разных значениях OCR

Нетрудно заметить, что при увеличении OCR осадка грунта уменьшается (рис. 3 и 4). Наибольшее уменьшение наблюдается при изменении OCR с 1 до 1,5, где осадка уменьшилась с 20 до 15 см (на 25%). Дальнейшее увеличение OCR с 1,5 до 4 привело к уменьшению осадки с 15 до 12 см (15%).

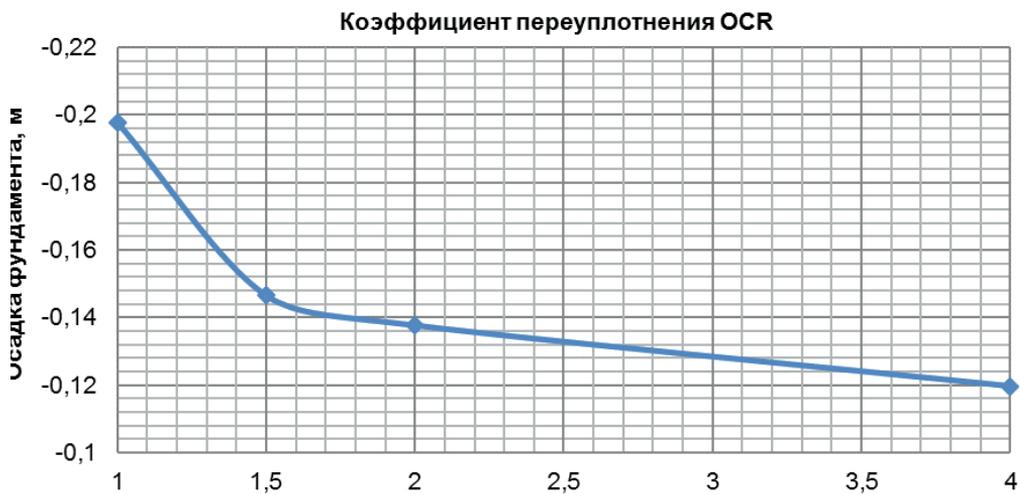


Рис. 4. Зависимость осадки фундамента от коэффициента переуплотнения грунта

Здесь уместно отметить, что в настоящее время у геотехников в России, в том числе и НИИОСП, нет единого мнения о достоверности значений параметров переуплотнения, полученных в результате лабораторных исследований, и о правомерности методики учета их в расчетах оснований. Проектировщик должен самостоятельно принимать решение о необходимости их учета при расчетах и их влияния на напряженное состояние массива грунта и глубину сжимаемой толщи.

### Прочность грунта

Формула (5), являющаяся разновидностью задачи Буссинеска, основана на теории упругости. Отсутствие смешанной задачи решения теории упругости и предельного равновесия может привести к недостаточно хорошему описанию действительного напряженного состояния основания при нагрузках, близких к предельным, так как для разных по **прочности грунтов**, решая задачу по теории упругости, мы получим одинаковое напряженное.

Это наглядно демонстрирует упрощенный способ определения напряжений в массиве грунта, описанный В.А. Флориным [8]. Указанный способ разработан инженером, А. Шейдингом. Согласно этому способу принимается, что напряжения распространяются в массиве грунта под углом  $\alpha$  к вертикали от края фундамента наружу по аналогии с продавливанием бетона. Угол  $\alpha$  зависит от прочностных характеристик грунта. Так, для плотных глин малой влажности он составляет  $45 - 60^\circ$ , для илов слабых глинистых грунтов  $- 30^\circ$ . Чем больше угол  $\alpha$ , тем больше нижняя сторона пирамиды продавливания, т.е. напряжения распространяются на большую площадь и тем самым снижаются вертикальные напряжения. Другими словами, увеличение прочности грунтов приводит к снижению напряжений по высоте массива грунта и, как следствие, к снижению глубины сжимаемой толщи.

### Заключение

Проведенный в статье анализ показывает важность учета при определении  $H_c$  неоднородности, анизотропии, прочности и коэффициента переуплотнения грунта. При этом в некоторых случаях возникает парадокс: при увеличении глубины сжимаемой толщи осадка уменьшается по сравнению с расчетом без учета рассмотренных факторов. Он заключается в критерии определения  $H_c$ . В данном случае более важным, особенно при проектировании фундаментов высотных зданий, является возможность перейти на критерий ограничения  $H_c$  не по напряжениям, а по значению деформации, которой можно пренебречь. Значение предельной деформации должно зависеть от категории ответственности здания и от чувствительности его к общим и связанными с ними неравномерными осадкам.

Представляет интерес также переход при численном расчете на модель упрочняющегося грунта при малых деформациях HS small (hardening soil small stress), в которой применяется дополнительная гиперболическая зависимость между напряжениями и деформациями при малых относительных деформациях, разработанная T. Benzha под руководством P. Vermeera [9] и позволяющая не выполнять искусственное ограничение  $H_c$ . Вместе с тем здесь следует отметить, что методика и способы определения параметров данной модели грунта требуют дополнительных исследований [10, 11].

В статье сделана попытка оценить влияние некоторых факторов на глубину сжимаемой толщи. В ней отнюдь не предлагается заменить существующие нормативные документы. Цель ее — обратить внимание проектировщиков на эти факторы. В дальнейшем при выполнении расчетов и проектировании проектировщик должен

самостоятельно принимать решение о необходимости учета того или иного фактора и выбрать способ такого учета при необходимости.

### Выводы

1. В результате учета неоднородности грунта в виде изменяющегося модуля общей деформации по глубине значения вертикальных напряжений, а следовательно, и глубина сжимающей толщи могут быть увеличены до 30%.

2. Учет анизотропии грунта снижает величину сжимаемой толщи, так, при коэффициенте анизотропии  $n_a = 3$  – на 17%, при  $n_a = 4$  – на 30%.

3. При строительстве на переуплотненных грунтах происходит увеличение глубины сжимаемой толщи. В рассмотренном примере при строительстве на переуплотненных тугопластичных суглинках с  $OCR = 5$  происходит увеличение глубины сжимаемой толщи на 20%. При этом за счет возрастания горизонтальных напряжений происходит снижение осадки фундамента.

### Библиографический список

1. СП 22.13330.2011 Основания и фундаменты зданий и сооружений.
2. Пашкин Е. М., Каган А. А., Кривоногова Н. Ф. Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии. – М.: Издательство «КДУ», 2011.
3. Емельянов А.В. и др. Водопонижение в строительстве. — М.: Стройиздат, 1971.
4. Кушнер С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений. — Запорожье.: Издательско-полиграфич. объединение «Запорожье», 2008.
5. Гольштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. — М.: Транспорт, 1981.
6. Фрелих О.К. Распределение давления в грунте. — М.: Из-во Наркомхоза РСФСР, 1938.
7. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. — М.: Издательство АСВ, 2016.
8. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Том 1. — Л.: Гос. изд-во по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1959.
9. Benz T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences. Ph.D. thesis. — Stuttgart: Universitat Stuttgart, 2007.
10. Вознесенский Е.А., Никитин М.С., Сенцова Е.А. Методические вопросы определения параметров моделей, учитывающих повышение жесткости грунтов при малых деформациях // Геотехника. 2016. — №2. — С. 4-16.
11. Шулятьев О.А., Мозгачёва О.А., Поспехов В.С. Освоение подземного пространства городов: Научное издание. — М.: Издательство АСВ, 2017.

## Авторы:

Олег Александрович ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук, заместитель директора НИИОСП им. Н. М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Oleg SHULYATYEV, Ph.D. in Engineering, Deputy director of NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: niiosp35@yandex.ru

Виктор Васильевич БАХМИСОВ, инженер НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Viktor BAKHMISOV, Engineer of NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: bahmisov7@live.com