

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.131.7

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.6

Влияние механизма упрочнения на результаты расчета ограждений котлована в условиях Санкт-Петербурга

Рашид Абдуллович Мангушев^{1,2}, Иван Павлович Дьяконов^{1,2},
Иван Борисович Башмаков^{1,2}, Дарья Алексеевна Паскачева¹,
Павел Александрович Кравченко³

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия;

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры
и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование посвящено вопросам моделирования и расчета процесса разработки котлованов в условиях г. Санкт-Петербурга, где распространены слабые глинистые грунты различного генезиса. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена необходимостью повышения точности и надежности расчетов грунтовых оснований в условиях плотной городской застройки. Особенно важно учитывать специфические свойства слабых глинистых грунтов, такие как их недренированное поведение и преимущественно сдвиговое деформирование. Акцентируется внимание на механизме сдвигового упрочнения — критически важном для предсказания пластических деформаций глинистых грунтов в допредельной стадии нагружения.

Материалы и методы. Представлены ключевые положения ранее предложенной авторами нелинейной математической модели, описывающей поведение слабых глинистых отложений на основании механизма сдвигового упрочнения. Недренированное поведение описывается на базе модифицированной теории мгновенной прочности Ю.К. Соловьева с учетом образования избыточных поровых давлений при девиаторном нагружении в условиях плоского напряженно-деформированного состояния. Модель была численно реализована в разрабатываемом авторами специализированном программном комплексе, реализующем метод конечных элементов на основе метода перемещений.

Результаты. Проведен численный расчет разработки котлована под защитой консольного шпунтового ограждения в условиях плотной городской застройки в Центральном районе Санкт-Петербурга. Приведено подробное сравнение результатов численных расчетов с данными геотехнического мониторинга, включающего измерения деформаций шпунтового ограждения котлована и фундаментов окружающей застройки.

Выводы. Сделаны выводы о прогностических возможностях моделей с механизмом сдвигового упрочнения для расчетов котлованов в условиях слабых глинистых грунтов. Даны рекомендации о дальнейшем развитии предложенной модели, включая улучшения в учете эффекта разгрузки основания и изменения параметров жесткости при деформировании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов, нелинейная модель грунта, сдвиговое упрочнение, недренированное поведение, котлован, слабые грунты

Благодарности. Авторы выражают благодарность НИИСФ РААСН за поддержку данного исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Башмаков И.Б., Паскачева Д.А., Кравченко П.А. Влияние механизма упрочнения на результаты расчета ограждений котлована в условиях Санкт-Петербурга // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.6

Автор, ответственный за переписку: Дарья Алексеевна Паскачева, dashap17012000@yandex.ru.

The influence of the hardening mechanism on the results of the calculation of pit fences in the conditions of St. Petersburg

Rashid A. Mangushev^{1,2}, Ivan P. Diakonov^{1,2}, Ivan B. Bashmakov^{1,2},
Daria A. Paskacheva¹, Pavel A. Kravchenko³

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation;

² Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences;
Moscow, Russian Federation;

³ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (SPTU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The study is devoted to the issues of modelling and calculating the process of excavation in the conditions of the city of St. Petersburg, where weak clay soils of various genesis are widespread. The relevance of the topic under consideration is due to the need to improve the accuracy and reliability of calculations of soil foundations in conditions of dense urban development. It is especially important to take into account the specific properties of weak clay soils, such as their undrained behaviour and, mainly, shear deformation. The paper focuses on the mechanism of shear hardening, which is critically important for predicting plastic deformations of clay soils in the pre-limit loading stage.

Materials and methods. The main provisions of the nonlinear mathematical model previously proposed by the authors describing the behaviour of weak clay deposits based on the shear hardening mechanism are presented. The untrained behaviour is described on the basis of the modified theory of instantaneous strength by Yu.K. Solovyov, taking into account the formation of excessive pore pressures under deviatoric loading in a plane stress-strain state. The model was numerically implemented in a specialized software package developed by the authors that implements the finite element method based on the displacement method.

Results. As part of the study, a numerical calculation was carried out for the development of a pit protected by a cantilever tongue-and-groove fence in conditions of dense urban development in the Central District of St. Petersburg. The paper also provides a detailed comparison of the results of numerical calculations with data from geotechnical monitoring, including measurements of deformations of the tongue-and-groove fencing of the excavation and foundations of the surrounding buildings.

Conclusions. Based on this study, conclusions are drawn about the predictive capabilities of models with a shear hardening mechanism for pit calculations in conditions of weak clay soils. Recommendations are given on the further development of the proposed model, including improvements in taking into account the effect of unloading the base and changes in stiffness parameters during deformation.

KEYWORDS: finite element method, nonlinear soil model, shear hardening, undrained behaviour, excavation, soft soils

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences for the support of this study.

FOR CITATION: Mangushev R.A., Diakonov I.P., Bashmakov I.B., Paskacheva D.A., Kravchenko P.A. The influence of the hardening mechanism on the results of the calculation of pit fences in the conditions of St. Petersburg. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.6

Corresponding author: Daria A. Paskacheva, dashap17012000@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие геотехники в Санкт-Петербурге обусловлено особенностями инженерно-геологического строения основания города наряду с высокими темпами строительства. Ее значимость в решении задач городского развития во многом объясняется плотной застройкой городского центра и сложными грунтовыми условиями. Так, в пределах активной зоны основания фундаментов зданий залегают слабые водонасыщенные тиксотропные глинистые грунты, характеризующиеся низкими фильтрационными и деформационными свойствами. При этом остаются мало изученными специфические характеристики этих грунтов: коэффициенты ползучести, угол дилатансии, степень переуплотнения, коэффициент бокового давления и другие параметры. Все перечисленные характеристики влияют на запас несущей способности основания, закладываемый при проектировании. Тем не менее из-за ограниченной точности геотехнических расчетов конкретное значение коэффициента запаса при проектировании остается недостаточно определенным.

Для оценки несущей способности грунтового массива, а также деформаций окружающей застройки зачастую недостаточно строгих или аналитических решений. Мощным инструментом в данном случае выступает численный метод конечных элементов (МКЭ),

позволяющий выполнить расчеты сложных надземных конструкций с учетом разнообразных инженерно-геологических условий. Впервые развитием МКЭ в геотехнике в России занимался А.Б. Фадеев [1].

Метод конечных элементов дает возможность применять для расчетов сложные модели грунта. Однако это вызывает трудности в определении параметров для этих моделей и понимании механизмов их работы.

Наиболее простые линейно-упругие и идеально упругопластические модели ограничены в применении и подходят скорее для предварительных расчетов. Реализация таких моделей представлена во многих программных комплексах (ПК) [2–4].

Нелинейные модели грунта являются распространенными в практической деятельности. Наиболее хорошо зарекомендовала себя модель Hardening Soil, в которой реализованы механизмы сдвигового и объемного упрочнения и зависимости жесткости от уровня напряжений [5–8]. В современных условиях использование этой модели сопряжено с трудностями разного характера: 1) оригинальная модель грунта реализована только в ПК Plaxis; 2) модель была создана на основе многочисленных испытаний песчаных грунтов (поэтому ее применение для глинистых грунтов необходимо подтверждать соответствующими изысканиями); 3) модель требует

Также для описания механической работы глинистых грунтов существует семейство моделей Bounding Surface [16, 17], однако не отмечено его практического применения и определения параметров моделей для условий Санкт-Петербурга. Следует отметить вязкоупругопластическую модель, специально разработанную для слабых глинистых грунтов Санкт-Петербурга [18]. Модель имеет широкий опыт практического использования, но реализована только в одном ПК FEM-Models.

Для достижения поставленной цели проведен ряд численных расчетов, которые впоследствии сопоставлены с результатами геотехнического мониторинга. В ходе исследования использовались методы математического моделирования, адаптированные к инженерно-геологическим условиям исследуемого региона. Полученные данные позволили выявить ключевые параметры, оказывающие наибольшее влияние на точность прогнозирования напряженно-деформированного состояния (НДС) котлована, а также оценить степень согласованности теоретических расчетов с фактическими наблюдениями.

Снижение прочности при лабораторных испытаниях слабых глинистых грунтов зачастую не соответствует значениям, получаемым при использовании идеально упругопластической модели грунта. В современных нелинейных моделях теоретическое описание зависимости траектории напряжений от модели грунта при численном моделировании определяется или изолинией нулевых объемных пла-

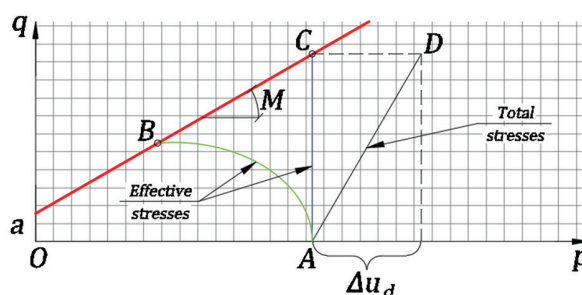


Fig. 1. Stress trajectories: *OA* — trajectory at the stage of comprehensive compression; *AD* — trajectory at full stresses at the stage of deviator loading; *AC* — theoretical trajectory of effective stresses for an ideally elastic plastic body; *AB* — trajectory obtained from experimental data for normally compacted soils

стических деформаций (шатровой поверхностью текучести), или напрямую заданным значением сопротивления недренированному сдвигу. Второй способ не подразумевает дальнейшую возможность расчета консолидации грунта.

Реализация нелинейной модели со сдвиговым упрочнением

Недренированное поведение в модели грунта реализуем с помощью введения критерия прочности Мизеса с предельным касательным напряжением, равным сопротивлению недренированному сдвигу:

$$q_f = 2 \cdot C_u, \quad (1)$$

где q_f — предельный девиатор напряжений; C_u — сопротивление недренированному сдвигу.

Снижение эффективного среднего напряжения при сдвиге можно описать с помощью введенного А. Skempton параметра A_f . В предыдущей статье авторов представлен метод оценки сопротивления недренированному сдвигу в условиях плоской деформации для слабых глинистых грунтов, основанный на теории мгновенной прочности Ю.К. Соловьева [19]. Приведем вариант формулы для случая мгновенного нагружения грунтового массива, где параметр Скемптона для плоского НДС $\beta = 1$:

$$C_u = \frac{\sigma'_0(1 - (\alpha - 1)\frac{1 - K_0}{1 + K_0})\sin(\varphi') + c' \cos(\varphi')}{1 + (\alpha - 1)\sin(\varphi')}, \quad (2)$$

где σ'_0 — природные средние эффективные напряжения в грунте; K_0 — коэффициент бокового давления грунта.

Для описания зависимости напряжение — деформация при девиаторном нагружении в данном исследовании используется выражение, предложенное R.L. Kondner [20]. Стоит отметить, что аналогичное выражение ранее было предложено А.И. Боткиным [21].

Вместо наибольшей главной осевой деформации ε_1 в качестве переменной рассмотрим параметр сдвиговой деформации γ_s :

$$\gamma_s = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}, \quad (3)$$

где ε_3 — наименьшая главная относительная деформация.

Тогда зависимость между напряжениями и деформациями можно представить в виде:

$$q = \frac{\gamma_s}{a - b \cdot \gamma_s}, \quad (4)$$

где a — величина, обратная касательному модулю; b — величина, обратная асимптотическому девиатору напряжений.

Пластическую составляющую деформации γ_s^p найдем как разницу между общей деформацией и упругой составляющей:

$$\gamma_s^p = \gamma_s - \gamma_s^e, \quad (5)$$

где γ_s^e — упругая составляющая деформации.

Из обобщенного закона Р. Гука определим γ_s^e :

$$\gamma_s^e = \frac{1 + \nu}{2E} q, \quad (6)$$

где ν — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости.

Тогда, подставляя выражение (6) в (5), получим:

$$\gamma_s^p = \frac{q \cdot a}{1 - q \cdot b} - \frac{1 + \nu}{E} q. \quad (7)$$

Определим величину a как величину, обратную модулю упругости и не зависящую от напряжений:

$$a = \frac{1 + \nu}{2 \cdot E}. \quad (8)$$

Величина b рассчитывается как:

$$b = \frac{1}{q_{ult}} = \frac{1}{\frac{g_f}{R_f}} = \frac{R_f}{q_f}, \quad (9)$$

где q_{ult} — асимптотическая величина девиатора напряжений; q_f — предельная величина девиатора напряжений; R_f — коэффициент разрушения.

Заменим отношение девиатора напряжений к девиатору напряжений при разрушении:

$$\frac{q}{q_f} = \frac{C_u^{mob}}{C_u}, \quad (10)$$

где C_u^{mob} — мобилизованное сопротивление недренированному сдвигу.

Подставим выражения (8), (9) и (10) в (7) и определим значение γ_s^p :

$$\gamma_s^p = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \frac{q}{\frac{C_u}{C_u^{mob}} \cdot R_f - 1}. \quad (11)$$

В качестве предела текучести примем критерий Треска для описания прочности через сопротивление недренированному сдвигу:

$$f = q - 2 \cdot C_u^{mob}. \quad (12)$$

Тогда C_u^{mob} является параметром упрочнения. Закон пластического течения при сдвиговом упрочнении аналогично модели Hardening Soil принимаем неассоциированным. В качестве пластического потенциала примем закон Кулона — Мора с углом дилатансии $\psi = 0$:

$$g = q + (\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot c \cdot \cos(\varphi)) \cdot \sin(\psi) = q. \quad (13)$$

Данных выражений достаточно для реализации модели грунта в численной постановке.

Алгоритм нелинейного решения

Для решения упругопластической задачи используем алгоритм пошагового нагружения с методом начальных напряжений. Этот алгоритм ранее описывался в работах В.Н. Парамонова [22] и А.Б. Фадеева [1].

Для описания работы модели используем упругопластическую матрицу жесткости, зависящую от достигнутого на шаге расчета уровня напряжений.

Табл. 1. Физико-механические характеристики грунтов
Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils

№ п/п	Наименование	Геологический индекс	ρ , г/см ³	e , д. ед.	w , д. ед.	I_p	I_L	φ , град.	c , кПа	E , кПа	$E_{ур}$, кПа
2	Пески пылеватые средней плотности неоднородные	m, l IV	2,66	0,706	0,257	Водонасыщенные		40	11	39,5	90,2
6	Суглинки легкие пылеватые текучие, тиксотропные, с примесью органических веществ	m, l IV	2,72	0,798	0,289	0,092	1,10	32	38	9,9	41,0
8	Суглинки тяжелые пылеватые текучие, ленточные, тиксотропные	lg III	2,75	1,198	0,431	0,170	1,12	31	37	8,0	32,1
9	Суглинки тяжелые пылеватые текучепластичные, неяснослоистые, тиксотропные	lg III	2,72	0,898	0,326	0,53	0,80	36	43	11,9	46,7
10	Супеси пылеватые пластичные с гравием и галькой	g III	2,68	0,406	0,149	0,123	0,62	38	26	18,8	59,9
11	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные с гравием и галькой	g III	2,71	0,532	0,193	0,045	0,30	34	49	22,9	80,7
15	Суглинки легкие пылеватые мягкопластичные, слоистые, тиксотропные	lg II	2,72	0,779	0,282	0,109	0,59	33	44	18,1	65,2
16	Суглинки легкие пылеватые полутвердые с гравием и галькой	g II	2,72	0,559	0,198	0,107	0,10	31	69	22,9	103,4
18	Глины легкие пылеватые твердые, слоистые	Vkt 2	2,74	0,467	0,162	0,145	-0,40	24	125	29,2	128,7

Примечание: ρ — плотность грунта; e — коэффициент пористости; w — природная влажность; I_p — число пластичности; I_L — показатель текучести; φ — эффективный угол внутреннего трения; c — эффективное сцепление; E — модуль общей деформации; $E_{ур}$ — модуль разгрузки.

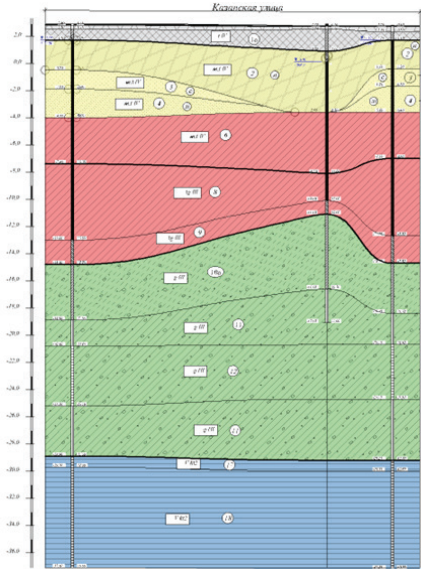


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез площадки строительства
Fig. 2. Engineering and geological section of the construction site

Это позволит ускорить сходимость итерационного процесса и уменьшить время решения.

Описание объекта мониторинга

В качестве объекта мониторинга для исследования эффективности механизма сдвигового упрочнения используем котлован под защитой консольного шпунтового ограждения в Адмиралтейском районе г. Санкт-Петербурга. Территория располагается на Казанском острове, который окружен р. Мойкой, каналом Грибоедова и Крюковым каналом. До глубины 40 м геологическое строение представлено классическими для Санкт-Петербурга техногенными (t IV) образованиями; морскими и озерными отложениями (m, l IV), верхнечетвертичными озерно-ледниковыми (lg III) и ледниковыми (g III) отложениями; среднечетвертичными озерно-ледниковыми (lg II) и ледниковыми (g II) отложениями, вендскими отложениями котлинского горизонта (Vkt 2).

Слабые грунты представлены верхнечетвертичными озерно-ледниковыми (lg III) и среднечетвертичными озерно-ледниковыми отложениями. Верхнечетвертичные озерно-ледниковые (lg III) отложения представле-



Рис. 3. Фотография объекта строительства

Fig. 3. Photo of the construction site

ны: суглинками тяжелыми пылеватými текучими, ленточными, тиксотропными (ИГЭ 8); суглинками легкими пылеватými текучепластичными, неяснослоистыми, тиксотропными (ИГЭ 9). Среднечетвертичные озерно-ледниковые (lg II) отложения представлены суглинками легкими пылеватými мягкопластичными, слоистыми, тиксотропными (ИГЭ 15).

Приведены инженерно-геологический разрез площадки строительства (рис. 2) и физико-механические характеристики наиболее характерных грунтов (табл. 1).

Рассматриваемый котлован прямоугольный в плане, размерами 57×33 м, с частичным раскреплением в угловых зонах. В расчетном сечении центральную нераскрепленную зону будем рассматривать как консольную. Глубина котлована составляет 4,5 м. Ограждение выполнено из шпунта AZ-18 длиной 19 м.

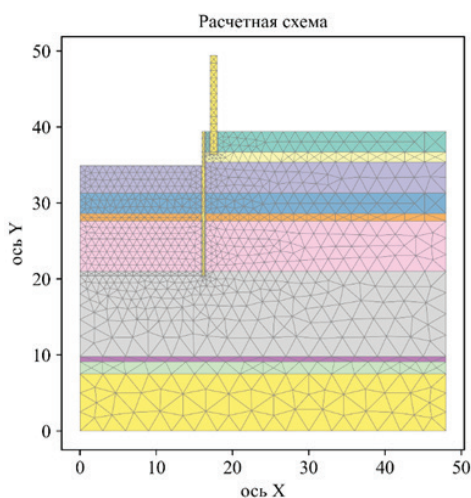


Рис. 4. Общий вид расчетной схемы

Fig. 4. General view of the calculation scheme

Ближайшим объектом окружающей застройки является сохраняемая кирпичная стена, расположенная на расстоянии менее 1 м в свету от шпунтового ограждения.

Геотехнический мониторинг на площадке строительства включал наблюдение за горизонтальными перемещениями ограждающей конструкции с помощью тахеометрической съемки и наблюдения за осадками окружающей застройки с помощью геометрического нивелирования.

Общий вид площадки строительства представлен на рис. 3.

Описание расчетной схемы

Расчетная схема выполнена с использованием ПК GMesh [23] с открытым исходным кодом. С целью моделирования используются шестиузловые треугольные конечные элементы. Расчеты осуществлялись в разработанном авторами ПК, работающем на основе МКЭ. Для проведения сравнения в расчете применялась представленная выше разработанная модель грунта с механизмом сдвигового упрочнения и идеально упругопластическая модель грунта с критерием прочности Мора – Кулона.

Общий вид расчетной схемы на этапе откопки котлована представлен на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим результаты численного моделирования в сопоставлении с результатами геотехнического мониторинга.

Использованы две модели грунтов: модель с механизмом сдвигового упрочнения и идеально упругопластическая модель с критерием прочности Мора – Кулона. Результаты численного расчета котлована на этапе откопки представлены на рис. 5–9.

Анализ данных показывает, что в идеально упругопластической модели с использованием кри-

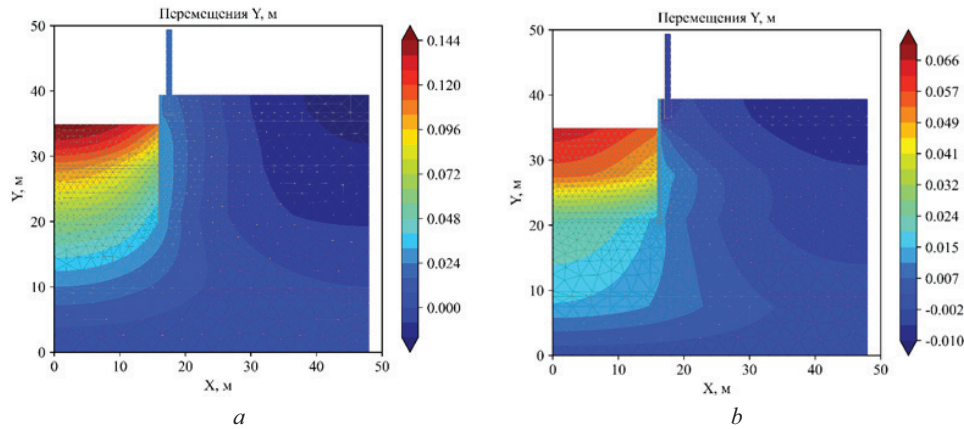


Рис. 5. Изополя вертикальных перемещений расчетной схемы: *a* — в модели Мора – Кулона; *b* — в разработанной модели

Fig. 5. Isofields of vertical displacements of the calculation scheme: *a* — in the Mohr – Coulomb model; *b* — in the developed model

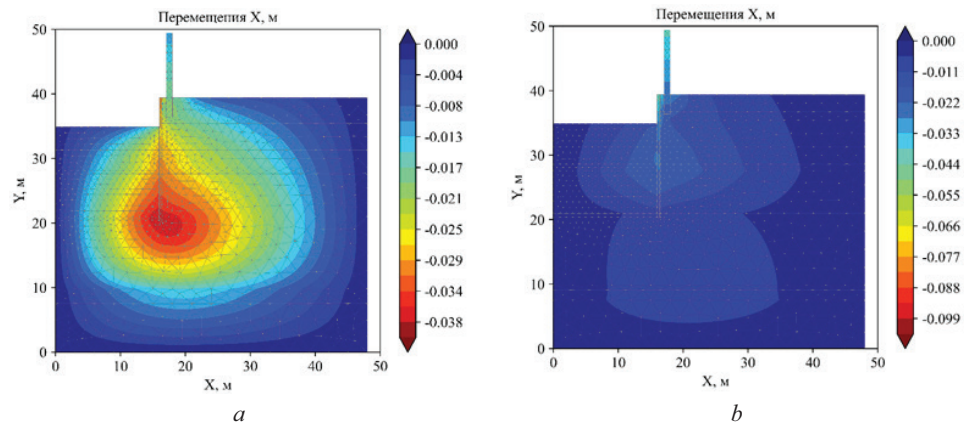


Рис. 6. Изополя горизонтальных перемещений расчетной схемы: *a* — в модели Мора – Кулона; *b* — в разработанной модели

Fig. 6. Isofields of horizontal displacements of the calculation scheme: *a* — in the Mohr – Coulomb model; *b* — in the developed model

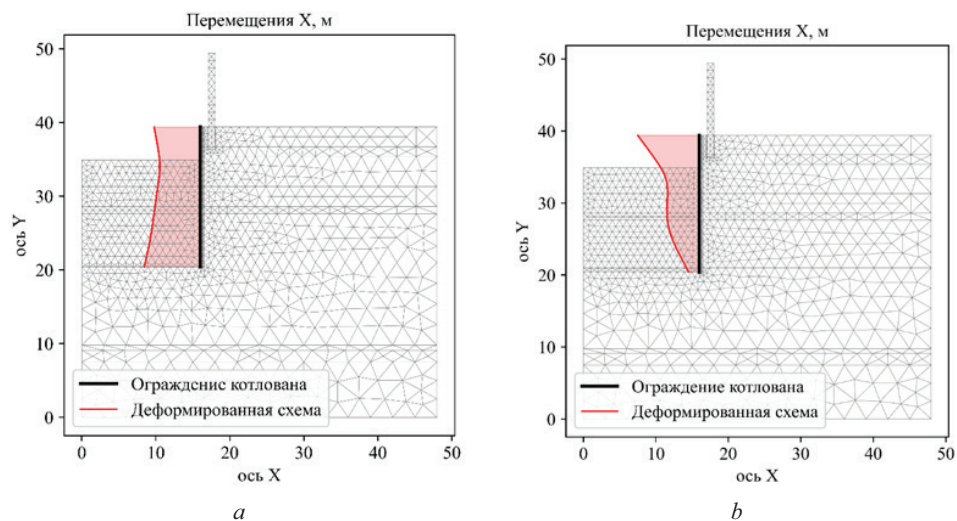


Рис. 7. Эпюры горизонтальных перемещений шпунтового ограждения: *a* — в модели Мора – Кулона; *b* — в разработанной модели

Fig. 7. Diagrams of horizontal movements of the tongue-and-groove fence: *a* — in the Mohr – Coulomb model; *b* — in the developed model

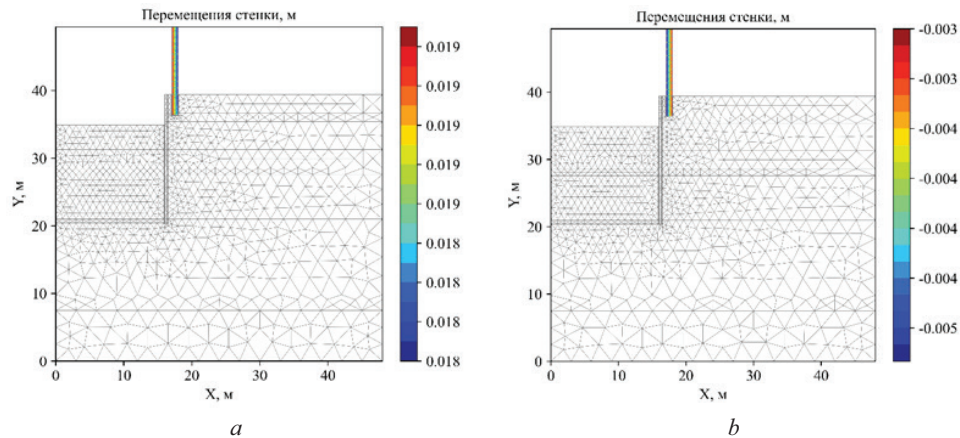


Рис. 8. Изополя вертикальных перемещений кирпичной стенки: *a* — в модели Мора – Кулона; *b* — в разработанной модели

Fig. 8. Isofields of vertical movements of a brick wall: *a* — in the Mohr – Coulomb model; *b* — in the developed model

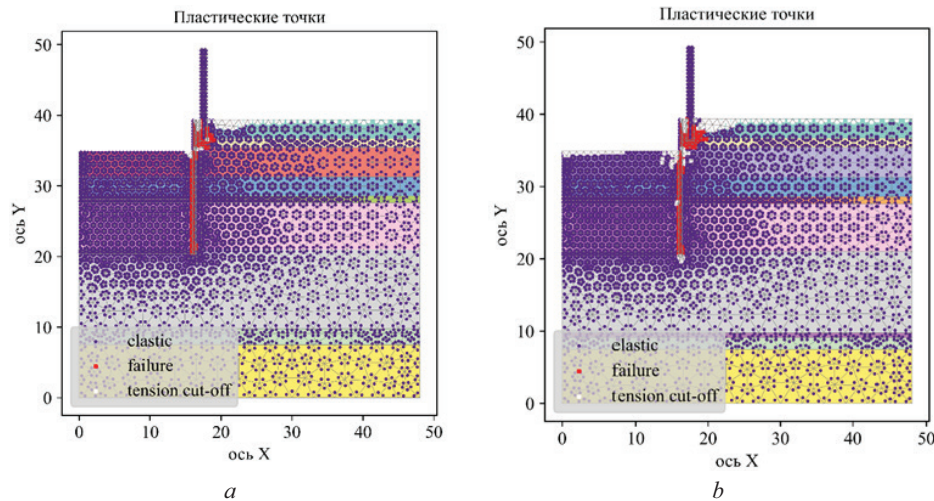


Рис. 9. Распределение пластических точек в расчетной схеме: *a* — в модели Мора – Кулона; *b* — в разработанной модели

Fig. 9. Distribution of plastic points in the calculation scheme: *a* — in the Mohr – Coulomb model; *b* — in the developed model

терия прочности Кулона – Мора характер деформаций ограждения значительно отличается от наблюдаемого на практике. В реальных условиях консольные ограждения котлованов деформируются с незначительным поступательным смещением и прогибом, причем максимальные перемещения отмечаются в верхней части ограждения. В отличие от этого, модель Мора – Кулона, согласно расчетам, может

демонстрировать поступательное смещение всего ограждения в сторону котлована без значительного прогиба. Кроме того, возможно наблюдение подъема ограждения и прилегающего грунтового массива из-за значительной разгрузки дна котлована, что также противоречит реальной картине.

В противоположность этому результаты расчетов, выполненных с использованием модели со сдвиговым

Табл. 2. Сравнение результатов численного расчета с результатами геотехнического мониторинга

Table 2. Comparison of numerical calculation results with geotechnical monitoring results

Контролируемый параметр	Модель Мора – Кулона	Разработанная модель	Результаты мониторинга
Вертикальные перемещения фундамента, мм	+19,0	–5,0	–7,3
Горизонтальные перемещения верха шпунтового ограждения, мм	–30,0	–42,0	–60,0

упрочнением, хотя и демонстрируют количественные расхождения, что обусловлено относительной простотой самой модели, качественно совпадают с результатами натурных наблюдений.

Количественное сравнение результатов расчетов и данных геотехнического мониторинга представлено в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В заключении представлены основные выводы:

- качественный анализ результатов численных расчетов показывает значительные расхождения деформируемой схемы ограждения котлован в модели Мора – Кулона с наблюдаемой на практике. Количественные значения деформаций верха ограждения в численном расчете занижены относительно результатов мониторинга на 50 %;

- характер деформаций ограждения в расчетах в модели со сдвиговым упрочнением соотносится с наблюдениями и опытом проектирования в условиях Санкт-Петербурга. Недооценка деформаций верха ограждения котлована составляет порядка 30 % относительно результатов мониторинга;

- подъем окружающей застройки, наблюдаемый в модели Мора – Кулона, вызванный значительной нагрузкой дна котлована, ни количественно, ни качественно не соответствует результатам реальных наблюдений;

- деформации окружающей застройки, фиксируемые при расчетах в разработанной модели, носят соотносящийся с реальными наблюдениями характер и недооценивают осадки на 30 % относительно результатов мониторинга.

Полученные результаты подтверждают ключевую роль сдвиговых деформаций при проектировании и расчете котлованов в условиях слабых глинистых грунтов. Для корректного вычисления пластических сдвиговых деформаций целесообразно использовать механизм сдвигового упрочнения в модели грунта.

Для повышения точности прогнозирования деформационных характеристик в дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть несколько аспектов: 1) следует учитывать зависимость жесткости грунта от уровня напряжений; 2) важно внимание к процессам объемного упрочнения. Эти аспекты требуется детально анализировать и учитывать в математических моделях.

Неотъемлемой частью последующих исследований является проведение серии лабораторных испытаний слабых глинистых грунтов, выполненных в различных условиях нагружения. Данные испытания позволят детально изучить поведение грунтов. Предварительные исследования в этом направлении были представлены в работе [24].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.

2. *Коллюкаев И.С.* Численное решение задачи о напряженно-деформированном состоянии склона в упругой и упругопластической постановке // Серия «Строительство» : сб. ст. магистрантов и аспирантов. 2023. Т. 1. № 6. С. 439–451.

3. *Полунин В.М., Коллюкаев И.С., Кораблев Д.С., Паскачева Д.А.* Реализация идеальной упругопластической модели грунта в деформационной постановке // Геотехника. 2023. Т. 15. № 3. С. 26–42. DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-3-26-42

4. *Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А.* Основы совместные расчетов зданий и оснований. СПб. : Институт «Геореконструкция», 2014. 328 с.

5. *Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G.* The hardening soil model: Formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. 1999. 16 p.

6. *Мангушев Р.А., Пеньков Д.В.* Сравнение результатов численных расчетов с использованием современных моделей грунта (Hardening Soil, Hardening Soil Small и Generalized Hardening Soil) с результатами мониторинга // Вестник гражданских инженеров. 2021. Т. 85. № 2. С. 85–93. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-85-93

7. *Mussa A., Salah M., Salah L.M.* Practical use of advanced constitutive laws in finite element analysis of underground structures // Scientific Papers — Journal of Civil Engineering. 2022. Т. 17. № 1. С. 1–14. DOI: 10.2478/sspjce-2022-0015

8. *Шарафутдинов Р.Ф.* Нормативное обеспечение определения параметров моделей нелинейного механического поведения грунтов с упрочнением // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14. № 1. С. 33–52. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.03

9. *Roscoe K., Schofield A., Wroth C.* On the Yielding of Soils // Geotechnique. 1958. Vol. 8. Issue 1. Pp. 22–53. DOI: 10.1680/geot.1958.8.1.22

10. *Burland J.B.* The yielding and dilation of clay // Geotechnique. 1965. Vol. 15. Issue 2. Pp. 211–214. DOI: 10.1680/geot.1965.15.2.211

11. *Mangushev R., Bashmakov I., Paskacheva D., Kvashuk A.* Mathematical modelling of undrained behaviour of soils // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. Vol. 19. Issue 1. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-1-97-111

12. *Grimstad G., Andresen L., Jostad H.P.* NGI-ADP: Anisotropic shear strength model for clay // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2012. Vol. 36. Issue 4. Pp. 483–497. DOI: 10.1002/nag.1016

13. Langford J., Karlsrud K., Bengtsson E., Hof C., Oscarsson R. Comparison between predicted and measured performance of a deep excavation in soft clay in Gothenburg, Sweden // *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2021. DOI: 10.1201/9780429321559-11
14. Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Y., Anzhelo G.O. Viscosity of Clayey Soils: Experimental Studies // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 14. P. 5974. DOI: 10.3390/app14145974
15. Ter-Martirosyan A.Z., Manukyan A., Ermoshina L.Y. Experience of determining the parameters of the elastoviscoplastic soil model // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 263. Issue 16. P. 02051. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302051
16. Nieto-Leal A., Kaliakin V.N. Additional Insight into Generalized Bounding Surface Model for Saturated Cohesive Soils // *International Journal of Geomechanics*. 2021. Vol. 21. Issue 6. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002012
17. Kaliakin V.N., Anantanasakul P. Behaviour and modelling of silt-clay transition soils // *Smart Geotechnics for Smart Societies*. CRC Press, 2023. Pp. 253–268. DOI: 10.1201/9781003299127-22
18. Шапкин А.Г. Вязко-упругопластическая модель поведения глинистого грунта // *Развитие городов и геотехническое строительство*. 2011. Т. 2. С. 1–32.
19. Соловьев Ю.И., Караулов А.М., Ваганов П.С. Теория мгновенной прочности и ее применение в расчетах устойчивости консолидирующихся массивов грунта // *Проектирование и исследование оснований гидротехнических сооружений : мат. конф. и совещаний по гидротехнике*. Л. : Энергия, 1980. С. 104–105.
20. Kondner R.L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1963. Vol. 89. Issue 1. Pp. 115–143. DOI: 10.1016/0022-4898(64)90153-3
21. Боткин А.И. О прочности сыпучих и хрупких материалов // *Известия НИИ гидротехники*. 1940. Т. 26. С. 205–236.
22. Парамонов В.Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники. СПб. : Георекострукция, 2012.
23. Geuzaine C., Remacle J.F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities // *International journal for numerical methods in engineering*. 2009. Vol. 79. Issue 11. Pp. 1309–1331.
24. Жусупбеков А.Ж., Улицкий В.М., Дьяконов И.П., Николаева М.В. Получение физико-механических характеристик лимногляциальных отложений Санкт-Петербурга для математической модели грунта // *Вестник гражданских инженеров*. 2023. № 2 (97). С. 44–55. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-44-55

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Рашид Абдуллович Мангушев — доктор технических наук, профессор, кафедра геотехники, член-корр. РААСН; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; главный научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; ramangushev@yandex.ru;

Иван Павлович Дьяконов — кандидат технических наук, доцент, кафедра геотехники; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; старший научный сотрудник; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; idjkanv@yandex.ru;

Иван Борисович Башмаков — ассистент, младший научный сотрудник, аспирант, кафедра геотехники; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; ведущий инженер; Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 214; 179bib@gmail.com;

Дарья Алексеевна Паскачева — ассистент, аспирант, кафедра геотехники; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; dashap17012000@yandex.ru;

Павел Александрович Кравченко — кандидат технических наук, доцент, кафедра оснований и фундаментов; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; dr.p.krav@yandex.ru.

Вклад авторов:

Мангушев Р.А. — научное руководство, научное редактирование текста.

Дьяконов И.П. — концепция исследования, развитие методологии, доработка текста.

Башмаков И.Б. — разработка основных математических выкладок математической и численной модели грунта, разработка основного алгоритма решателя специализированного программного комплекса на основе метода конечных элементов, корректировка выводов.

Паскачева Д.А. — разработка программного кода специализированного программного комплекса на основе метода конечных элементов, доработка основных алгоритмов решателя, доработка основных математических выкладок математической модели грунта, калибровка результатов лабораторных испытаний, подготовка расчетных схем, написание исходного текста и выводов.

Кравченко П.А. — обработка результатов геотехнического мониторинга, оформление информации об объекте мониторинга и грунтовых условиях площадки строительства.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fadeev A.B. *The finite element method in geomechanics*. Moscow, Nedra, 1987; 221. (rus.).
2. Koljukaev I.S. Numerical solution of the problem of the stress-strain state of a slope in an elastic and elastoplastic formulation. *Series "Construction": collection of articles by master's and postgraduate students*. 2023; 1(6):439-451. (rus.).
3. Polunin V.M., Kolyukayev I.S., Korablev D.S., Paskacheva D.A. Implementation of an ideal elastoplastic soil model in the deformation domain. *Geotechnics*. 2023; 15(3):26-42. DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-3-26-42 (rus.).
4. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. *The basics of joint calculations of buildings and foundations*. St. Petersburg, Institute of "Georeconstruction", 2014; 328. (rus.).
5. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. 1999; 16.
6. Mangushev R.A., Penkov D.V. Comparison of the results of numerical calculations using modern soil models (Hardening Soil, Hardening Soil Small and Generalized Hardening Soil) with the geotechnical monitoring results. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 85(2):85-93. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-85-93 (rus.).
7. Mussa A., Salah M., Salah L.M. Practical use of advanced constitutive laws in finite element analysis of underground structures. *Scientific Papers — Journal of Civil Engineering*. 2022; 17(1):1-14. DOI: 10.2478/sspjce-2022-0015
8. Sharafutdinov R.F. Regulatory provisions for determining parameters of nonlinear mechanical behaviour in hardening soil models. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(1):29-42. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.03 (rus.).
9. Roscoe K., Schofield A., Wroth C. *On the Yielding of Soils*. *Geotechnique*. 1958; 8(1):22-53. DOI: 10.1680/geot.1958.8.1.22
10. Burland J.B. *The yielding and dilation of clay*. *Geotechnique*. 1965; 15(2):211-214. DOI: 10.1680/geot.1965.15.2.211
11. Mangushev R., Bashmakov I., Paskacheva D., Kvashuk A. Mathematical modelling of undrained behaviour of soils. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023; 19(1). DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-1-97-111
12. Grimstad G., Andresen L., Jostad H.P. NGI-ADP. Anisotropic shear strength model for clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2012; 36(4):483-497. DOI: 10.1002/nag.1016
13. Langford J., Karlsrud K., Bengtsson E., Hof C., Oscarsson R. Comparison between predicted and measured performance of a deep excavation in soft clay in Gothenburg, Sweden. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2021. DOI: 10.1201/9780429321559-11
14. Ter-Martirosyan A.Z., Ermoshina L.Y., Anzhelo G.O. Viscosity of Clayey Soils: Experimental Studies. *Applied Sciences*. 2024; 14(14):5974. DOI: 10.3390/app14145974
15. Ter-Martirosyan A.Z., Manukyan A., Ermoshina L.Y. Experience of determining the parameters of the elastoviscoplastic soil model. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263(16):02051. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302051
16. Nieto-Leal A., Kaliakin V.N. Additional Insight into Generalized Bounding Surface Model for Saturated Cohesive Soils. *International Journal of Geomechanics*. 2021; 21(6). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002012
17. Kaliakin V.N., Anantanasakul P. Behaviour and modelling of silt-clay transition soils. *Smart Geotechnics for Smart Societies*. CRC Press, 2023; 253-268. DOI: 10.1201/9781003299127-22
18. Shashkin A.G. Viscoelastic-plastic model of clay soil behaviour. *Urban Development and Geotechnical Construction*. 2011; 2:1-32. (rus.).
19. Solovyov Yu.I., Karaulov A.M., Vaganov P.S. The theory of instantaneous strength and its application in calculations of stability of consolidating soil masses. *Design and research of the foundations of hydraulic structures: materials of the conference and the meeting on hydraulic engineering*. Leningrad, Energy, 1980; 104-105. (rus.).
20. Kondner R.L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1963; 89(1):115-143. DOI:10.1016/0022-4898(64)90153-3

21. Botkin A.I. The strength of loose and brittle materials. *News of the Research Institute of Hydraulic Engineering*. 1940; 26:205-236. (rus.).
22. Paramonov V.N. *The finite element method for solving nonlinear geotechnical problems*. St. Petersburg, Geo-reconstruction, 2012. (rus.).
23. Geuzaine C., Remacle J.F. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2009; 79(11):1309-1331.
24. Zhusupbekov A.Zh., Ulitsky V.M., Diakonov I.P., Nikolaeva M.V. Obtaining physical and mechanical characteristics of limnoglacial deposits of St. Petersburg for a mathematical model of the soil. *Bulletin of Civil Engineers*. 2023; 97(2):44-55. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-44-55. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S: **Rashid A. Mangushev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Geotechnics, Corresponding Member of the RAASN; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; Chief Researcher; **Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; ramangushev@yandex.ru;

Ivan P. Diakonov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Geotechnics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; Senior Researcher, **Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences**; 21, Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; idjkanv@yandex.ru;

Ivan B. Bashmakov — assistant, junior researcher, postgraduate student, Department of Geotechnics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; leading engineer; **Scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; 179bib@gmail.com;

Daria A. Paskacheva — assistant, postgraduate student, Department of Geotechnics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; dashaP17012000@yandex.ru;

Pavel A. Kravchenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Foundations and Foundations; **Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (SPTU)**; 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russian Federation; dr.p.krav@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Rashid A. Mangushev — scientific guidance, scientific text editing.

Ivan P. Diakonov — the concept of research, development of methodology, revision of the text.

Ivan B. Bashmakov — development of basic mathematical calculations of the mathematical and numerical soil model, development of the basic algorithm of the solver of a specialized software package based on the finite element method, correction of conclusions.

Daria A. Paskacheva — development of the programme code of a specialized software package based on the finite element method, refinement of the basic algorithms of the solver, refinement of the basic mathematical calculations of the mathematical model of the soil, calibration of laboratory test results, preparation of calculation schemes, writing the source text and conclusions.

Pavel A. Kravchenko — processing the results of geotechnical monitoring, registration of information about the monitoring object and ground conditions of the construction site.

The authors declare that there is no conflict of interest.