



УДК: 624.131.37

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.1

EDN: AHRJGY

Анализ испытаний слабых пылевато-глинистых грунтов в условиях простого сдвига

Р.А. Мангушев^{1,2}, Д.А. Паскачева^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии
архитектурно-строительных наук,
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Основной проблемой математического описания поведения пылевато-глинистых грунтов является многофакторность процессов, происходящих при деформировании грунта при сложном нагружении. Слабые грунты Санкт-Петербурга отличаются рядом ярко выраженных негативных свойств для строительства: высокая деформативность, низкая прочность, ползучесть и др., что осложняет проведение инженерных изыскания, построение математических моделей слабого грунта и геотехнический анализ в целом. Условия простого сдвига в недренированном режиме позволяют наиболее точно описывать поведение глинистых грунтов при откопке котлованов и устройстве насыпей. *Целью работы* является определение основных закономерностей поведения слабых пылевато-глинистых грунтов при нагружении в условиях простого сдвига. *Задачи исследования* заключаются в проведении испытаний слабых пылевато-глинистых грунтов ненарушенной структуры и грунтовых паст с дальнейшей интерпретацией результатов лабораторных исследований для описания поведения грунта.

Результаты. В работе представлены результаты испытаний слабых пылевато-глинистых грунтов ненарушенной структуры и грунтовых паст в приборе простого сдвига. Сравнение дренированных и недренированных испытаний показывает значительно меньшие значения сдвиговой прочности без дренирования относительно дренированных испытаний. Анализ траекторий эффективных напряжений показывает влияние процессов дилатансии и контракции на поведение грунта при сдвиге. Образцы ненарушенного грунта показывают более сложные траектории эффективных напряжений с начальным снижением эффективных напряжений, аналогично испытаниям грунтовой пасты, и дальнейшим ростом эффективных напряжений после достижения 5% сдвиговой деформации. Сопоставлены значения полученных прочностных параметров грунтовой пасты и ненарушенного грунта: образцы показывают идентичное значение эффективного угла внутреннего трения и различные значения сцепления.

Выводы. Результаты работы позволяют выделить основные процессы, происходящие при деформировании слабого глинистого грунта в условиях простого сдвига, а именно влияние дилатансии и контракции на траектории эффективных напряжений. Данные лабораторные исследования можно использовать для построения математической модели слабого глинистого грунта.

Ключевые слова: слабый пылевато-глинистый грунт, математическая модель грунта, прибор простого сдвига, дилатансия, контракция, сдвиговое нагружение, грунтовая паста, переуплотнение

Для цитирования: Мангушев Р.А., Паскачева Д.А. Анализ испытаний слабых пылевато-глинистых грунтов в условиях простого сдвига // Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 8-18, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.1, EDN: AHRJGY

Analysis of tests of soft silty clay soils under simple shear conditions

R.A. Mangushev^{1,2}, D.A. Paskacheva^{1,2}

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

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

Abstract. *Problem statement.* The primary challenge in the mathematical description of silty-clay soil behavior lies in the multifactorial nature of the processes occurring during soil deformation under complex loading conditions. Weak soils of Saint Petersburg are characterized by a few pronounced unfavorable properties for construction purposes, including high deformability, low strength, creep, and others, which complicates engineering site investigations, the development of mathematical models for weak soils, and geotechnical analysis in general. Undrained simple shear conditions allow for the most accurate representation of clay soil behavior during excavation works and embankment construction. *The aim of this study* is to identify fundamental regularities in the behavior of weak silty-clay soils under loading in simple shear conditions. *The objectives of the research* include conducting tests on weak silty-clay soils with intact structure and on soil pastes, followed by interpretation of laboratory test results to describe soil behavior. *Results.* The paper presents the results of laboratory tests on weak silty-clay soils with intact structure and soil pastes using a simple shear apparatus. The comparison of drained and undrained tests demonstrates significantly lower shear strength values under undrained conditions compared to drained tests. Analysis of effective stress paths reveals the influence of dilatancy and contraction processes on soil behavior during shearing. Intact soil specimens show more complex effective stress paths, with an initial decrease in effective stresses – like those observed in soil paste tests – followed by an increase in effective stresses after reaching approximately 5% shear strain. The obtained strength parameters of the soil paste, and intact soil are compared: the specimens show identical values of the effective internal friction angle and different values of cohesion. *Conclusions.* The results make it possible to identify the principal processes governing the deformation of weak clay soils under simple shear conditions, specifically the influence of dilatancy and contraction on effective stress paths. The presented laboratory data can be used for the development of mathematical models of weak clay soils.

Keywords: soft silty clay soil, mathematical model of soil, simple shear plant, dilatancy, contraction, shear loading, soil paste, overconsolidation

For citation: Mangushev R.A., Paskacheva D.A. Analysis of tests of weak silty clay soils under simple shear conditions // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 8-18, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.1, EDN: AHRJGY

1. Введение

Прогнозирование поведения напряженно-деформированного состояния массива грунта на всех этапах строительства – откопка котлована, устройство его ограждения и фундаментов, передача нагрузки от надземных конструкций на стадии строительства и эксплуатации, в настоящее время, невозможно без использования современных вычислительных комплексов. В этом случае напряженно-деформированное состояние (НДС) массива грунта описывается с помощью комплексных расчетных схем, учитывающих совместную работу системы «здание-основание». В большинстве случаев, такие расчетные схемы реализуются с использованием методов численного моделирования. При этом, для описания поведения материалов под нагрузкой в них используются математические модели.

Наиболее сложными в инженерных расчетах являются математические модели грунтов, представляющих собой дисперсную среду, свойства которой зависят от конкретного вида грунта.

На территории Санкт-Петербурга распространены водонасыщенные пылевато-глинистые грунты озерно-ледникового генезиса, формирующие значительную часть инженерно-геологического разреза города. Данным грунтам свойственны низкие прочностные характеристики, высокая деформативность, низкие коэффициенты фильтрации, ползучесть, анизотропия структуры, тиксотропия и прочее [1–3].

Как известно, выполняемые геотехнические прогнозы во много зависят от качества проведения инженерных изысканий, а именно от отбора и сохранности монолитов грунта, полноты и достоверности лабораторных испытаний.

Исследования влияния качества отбора образцов на результаты испытаний ведутся достаточно давно [4]. При анализе таких исследований можно выделить зависимость сцепления и независимость угла внутреннего трения грунта от нарушения структуры образца. Также механические параметры грунтов зависят от вида напряженно-деформированного состояния, реализуемого при испытании.

Исследования и математические выкладки на эту тему изложены в работе Ю. К. Зарецкого. Влияние траектории нагружения на механические параметры неоднозначно и зависит от вида и состояния грунтов. Можно говорить о том, что в математическую модель должен быть заложен механизм, позволяющий корректно описывать деформирования грунта при различных видах нагружения с минимальным набором механических параметров. Однако, с учетом феноменологического описания процессов деформирования грунтов универсальность математической модели не должна отменять проведение стандартных лабораторных испытаний при траекториях нагружения, приближенных к реальному НДС основания.

Универсальность математической модели обычно определяет степень ее использования. Также значительно влияет простота определения математических параметров и минимальный набор необходимых испытаний. Данным требованиям хорошо отвечает модель Hardening Soil Model [5]. Широкое распространение данной модели в практических геотехнических расчетах привело также к широкому применению трехосных испытаний в практике отечественных инженерных изысканий. Однако, разработка данной модели на основании результатов лабораторных испытаний песков ограничивает её применение для описания отдельного ряда феноменов, присущих слабым пылевато-глинистым грунтам. Также трехосное НДС не так часто встречается в основании, тем более в тех видах расчетов, где в отечественной практике используется только модель Hardening Soil (разработка котлованов).

Рассматривая модели пригодные для описания слабых глинистых грунтов при преимущественно сдвиговом деформировании, можно выделить модель Норвежского геотехнического института NGI-ADP. Учитывая, что по генезису грунты Скандинавии схожи с грунтами Санкт-Петербурга [6], механизмы данной модели должны больше подходить для описания процессов, происходящих при деформировании слабых глинистых грунтов. Применимость данной модели ограничивается только задачами с недренированными условиями основания без возможности рассеивания избыточных поровых давлений, не позволяя проводить дренированный анализ устойчивости и деформаций основания.

Исследования, связанные с описанием базовых упругих моделей грунта [7], с условием прочности Мора-Кулона [8], а также с объемным упрочнением весьма распространены, однако, данные модели недостаточны для описания поведения дисперсных грунтов в условиях сложного нагружения.

Современные зарубежные модели описания поведения глинистых и пылевато-глинистых грунтов учитывают сложные для описания процессы дилатансии и контракции [9–11], а также переуплотнения [12]. Проявление дилатансии и контракции для грунтов Санкт-Петербурга широко не исследованы, что не позволяет говорить о степени их влияния на деформирование данного вида грунтов.

В геотехническом проектировании значительная доля задач приходится на разработку котлованов и устройство насыпей. Для таких случаев целесообразно рассматривать условия плоской деформации. В задачах о разработке грунта в котлованах важную роль играет механизм реализации сдвиговой пластической деформации, что было представлено в исследовании авторов [13]. С учетом низких коэффициентов фильтрации

пылевато-глинистых грунтов, а также ограниченных сроков разработки котлованов во времени, условия массива грунта в данном случае можно относить к недренированным [14]. Для оценки деформации и устойчивости основания, сложенного водонасыщенными пылевато-глинистыми грунтами, рекомендуется рассматривать как дренированную, так и недренированную постановку задачи.

Математические модели пригодные для описания слабых пылевато-глинистых грунтов с учетом вышеперечисленных факторов существуют в весьма ограниченном количестве, и ни одна из них не включена в общедоступные отечественные программные комплексы, позволяющие выполнять численные геотехнические расчеты. Таким образом создание модели слабого пылевато-глинистого грунта является актуальной темой исследования.

Математическое описание деформирования грунта требует проведения серии лабораторных испытаний при различных траекториях нагружения. В данной работе рассматривается поведение слабых пылевато-глинистых грунтов в условиях простого сдвига, соответствующих условиям откопки котлованов и устройства насыпей. Эта задача наиболее точно реализуется в приборе простого сдвига (Direct Simple Shear - DSS) [15].

Целью настоящего исследования является определение основанных закономерностей поведения слабых пылевато-глинистых грунтов при нагружении в условиях простого сдвига.

В ходе исследования были поставлены следующие задачи:

1. выполнить серию испытаний образцов из ненарушенного монолита пылевато-глинистого грунта с площадки города Санкт-Петербург на приборе простого сдвига;
2. подготовить образцы пасты из пылевато-глинистого грунта с площадки города Санкт-Петербург;
3. выполнить серию испытаний образцов грунта из пылевато-глинистой пасты на приборе простого сдвига;
4. обработать результаты испытаний для определения прочностных характеристик ненарушенного грунта и грунтовой пасты;
5. выполнить качественный анализ закономерностей деформирования образцов ненарушенного грунта и грунтовой пасты при простом сдвиге.

2. Материалы и методы

Для качественного анализа поведения грунта были проведены испытания образцов из монолитов ненарушенного пылевато-глинистого грунта с площадки города Санкт-Петербург. По генезису данный грунт относится к четвертичным озерно-ледниковым отложениям плейстоцена (lg III) и по отечественной классификации является пылеватым ленточным суглинком. Физические характеристики грунта представлены в табл. 1.

С учетом анизотропии структуры озерно-ледниковых отложений, значительную часть которых представляют ленточные и неяснослоистые глины и суглинки математически описывать поведение таких грунтов на основании результатов только образцов ненарушенной структуры достаточно проблематично. Кроме того, это требует большого количества монолитов ненарушенной структуры одного вида грунта.

Для достоверно обоснованного для математического описания количества испытаний авторами были подготовлены образцы грунтовой пасты. Грунтовая паста выполнена из высушенных монолитов озерно-ледниковых отложений пылевато-глинистых грунтов Санкт-Петербурга. Это позволило сохранить постоянство гранулометрического и минералогического состава грунта.

Грунтовая паста готовилась путем смешивания порошка из сухого грунта и воды в заданных пропорциях, затем производилось уплотнение пасты в специально подготовленной изолированной от потерь влаги таре, что позволяло уменьшить неоднородность свойств грунтов по сравнению с подготовкой и уплотнением образцов в кольцах перед испытанием. Образцы вырезались стальными кольцами непосредственно из массива грунта внутри тары, затем производилось водонасыщение образцов в вакуумной камере.

Для последующего сопоставления результатов испытаний грунтовая паста готовилась в таких пропорциях, чтобы её физические характеристики были сопоставимы с физическими характеристиками образца ненарушенной структуры. Физические параметры полученной грунтовой пасты представлены в табл. 1. С учетом погрешности при измерениях физических характеристик образцы из грунтовой пасты можно называть образцами-близнецами реального грунта.

Таблица 1

Физические характеристики образцов грунта

Наименование	ρ , г/см ³	w , д.ед.	e , д.ед.	I_L , д.ед.	I_p , д.ед.
Грунтовая паста	2.02	0.262	0.69	0.90	0.11
Ненарушенный грунт	1.96	0.257	0.74	0.85	0.11

Испытания проводились в дренированном и недренированном режиме. Преимущества испытаний в приборе простого сдвига заключаются в следующем:

- К0-консолидация образцов;
- простота подготовки образцов;
- однородность НДС образца;
- реализация траекторий нагружения близких к реализуемым в основании при разработке котлованов, устройстве насыпей;
- возможность дренированного и недренированного режима испытания.

Общий вид прибора и образца после испытания грунта представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид прибора простого сдвига (DSS) и образца грунтовой пасты после испытания (иллюстрации авторов)

Fig.1. General view of the direct simple shear device (DSS) and the soil paste sample after testing (illustration by the authors)

У прибора есть очевидный недостаток (по сравнению с прибором трехосного сжатия), компенсирующий простоту испытаний. В ходе испытаний происходит фиксация только вертикальных и касательных напряжений, тогда как нормальные напряжения к вертикальной грани образца остаются неизвестными [16, 17]. Рассмотрим эти сложности на основе консолидированно-недренированного (КН) испытания. Для КН испытания справедливо выражение:

$$\varepsilon_V = 0 \rightarrow \Delta p = 0 \quad (1)$$

где ε_V - относительная объемная деформация, д.ед.;

Δp - изменение полных средних напряжений, кПа.

Изменение средних напряжений можно выразить через изменение декартовых напряжений:

$$\Delta p = \frac{\Delta \sigma_z + 2\Delta \sigma_x}{3} = 0 \quad (2)$$

Применяя закон эффективных напряжений К. Терцаги, получим:

$$\Delta p = \frac{\Delta \sigma'_z + 2\Delta \sigma'_x}{3} + \Delta u = 0 \quad (3)$$

где Δu - изменение порового давления, кПа;

$\Delta \sigma'_z$ - изменение эффективных вертикальных напряжений, кПа;

$\Delta \sigma'_x$ - изменение эффективных горизонтальных напряжений, кПа.

Из выражения (3) следует вывод, что нельзя однозначно утверждать, что в испытаниях на простой сдвиг изменение вертикального напряжения, которое непосредственно измеряется в ходе испытания, вызвано изменением порового давления. Исследование [18], в котором авторы при испытаниях на простой сдвиг дополнительно измеряли горизонтальные напряжения в образце, опровергает концепцию о том, что изменение вертикальных напряжений вызвано изменением порового давления. В противовес этому выдвинуто предположение об изменении эффективных горизонтальных напряжений пропорционально изменению вертикальных так, чтобы соблюдалось условие (1) и тогда справедливо, что:

$$\Delta p = \frac{\Delta \sigma'_z + 2\Delta \sigma'_x}{3} + \Delta u = \frac{\Delta \sigma'_z + 2\Delta \sigma'_x}{3} = \Delta p' = 0 \quad (4)$$

В данной работе авторы придерживаются классической концепции о том, что изменение вертикальных напряжений вызвано изменением порового давления, а изменение горизонтальных напряжений определяется из условия:

$$\Delta \sigma'_x = \Delta \sigma'_z K_0 \quad (5)$$

где K_0 - коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя, д.ед.

При этом измерение коэффициента бокового давления грунта не производилось в ходе испытания, поэтому он принят равным 1 в соответствии с рекомендациями нормативной документации на испытания грунтов в условиях простого сдвига¹.

Представление результатов производилось в инвариантах среднего напряжения p и девиатора напряжений q . Определение инвариантов для условий простого сдвига возможно с помощью следующих формул:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{\sigma_z^2 (1 - K_0)^2 + 4\tau_{xz}^2} \quad (6)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \sigma_z \frac{1 + K_0}{2} \quad (7)$$

где τ_{xz} - касательное напряжение, кПа;

σ_1, σ_3 - наибольшее и наименьшее главные напряжения, кПа.

Для определения прочностных характеристик использовался критерий прочности Кулона-Мора, подходящий для описания сдвиговой прочности дисперсных сред. Критерий прочности Кулона-Мора можно представить в следующем виде:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin(\varphi) + c \cdot \cos(\varphi) \quad (8)$$

где φ - эффективный угол внутреннего трения, град.;

c - эффективное удельное сцепление, кПа.

Определение параметров прочности производилось с использованием линейной регрессионной модели по точкам, соответствующим началу пластического течения образца грунта.

Определение модуля сдвига грунта на участке до 5% относительной сдвиговой деформации по результатам КД испытаний выполним по формуле:

¹ ГОСТ Р 71042–2023 «Грунты. Определение характеристик прочности методом простого сдвига»

$$G_5 = \frac{\tau_5}{0.05} \tag{9}$$

где τ_5 - значение прочности грунта на сдвиг при 5% относительной сдвиговой деформации, кПа.

3. Результаты и обсуждение

В ходе исследования проведены испытания 8 образцов грунта ненарушенной структуры и 8 образцов грунтовой пасты.

График проведенных испытаний в координатах «среднее напряжение – девиатор напряжений» для грунтовой пасты представлен на рис. 2, в координатах «относительная сдвиговая деформация – девиатор напряжений» - на рис. 3.

С учетом принятой концепции изменения горизонтальных напряжений траектории эффективных напряжений в КН испытаниях грунтовой пасты качественно совпадают с получаемыми другими исследователями траекториями для слабых грунтов [19].

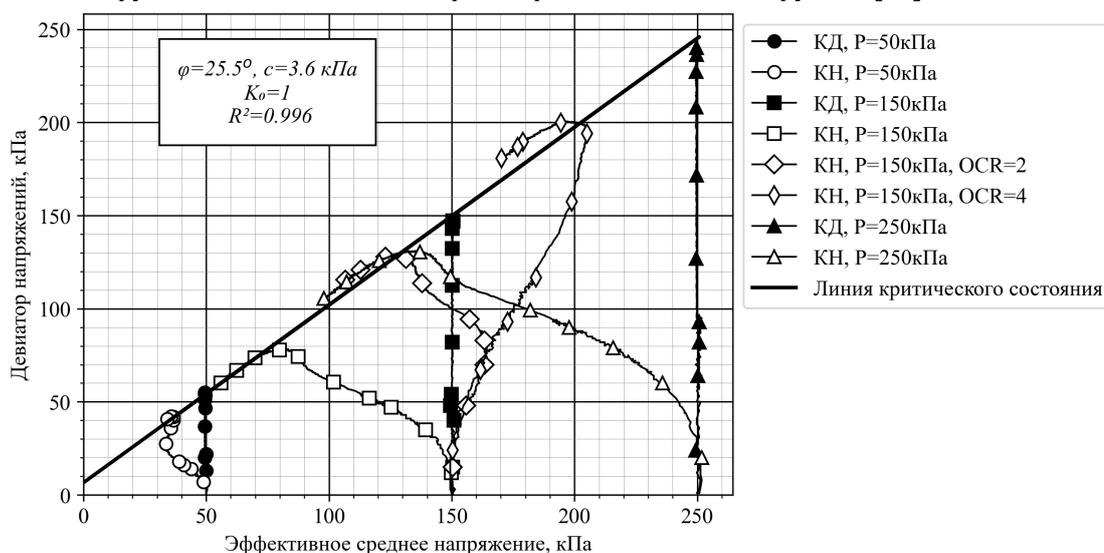


Рис. 2. Траектории эффективных напряжений образцов грунтовой пасты при испытании в условиях простого сдвига (иллюстрация авторов). Для графического представления на графиках применено векторное сглаживание

Fig.2.

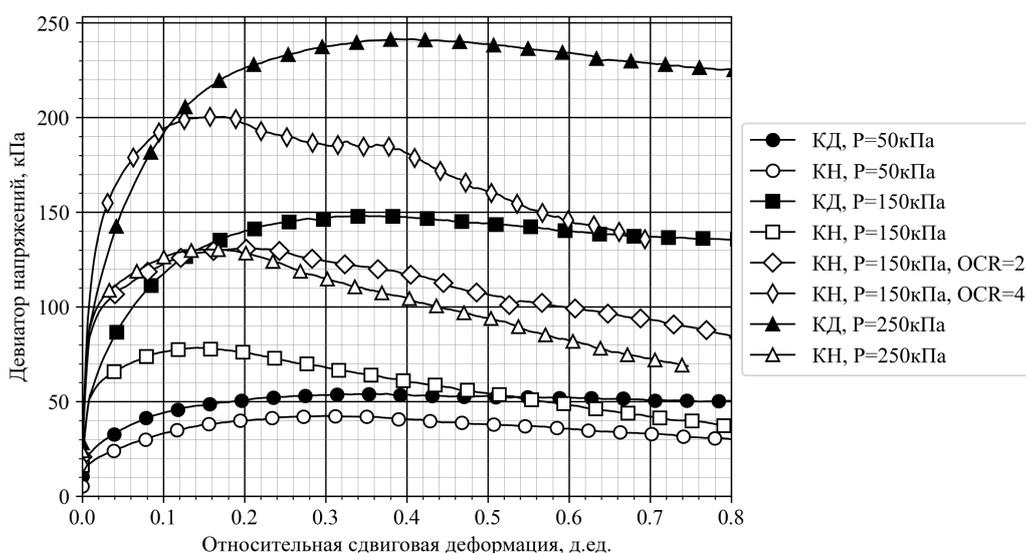


Рис. 3. Графики сдвигового деформирования грунтовых паст при приложении касательной нагрузки (иллюстрация авторов)

Fig.3. Graphs of shear deformation of soil pastes under application of tangential load (illustrations by the authors)

Отмечено, что сопротивление грунтовой пасты сдвигу, получаемое из недренированных испытаний значительно меньше сопротивления сдвигу в дренированных условиях, что справедливо для слабых нормальноуплотненных пылевато-глинистых грунтов. В переуплотненных образцах грунтовой пасты сопротивление сдвигу или незначительно ниже (для степени переуплотнения $OCR = 2$), или превышает (для степени переуплотнения $OCR = 4$) сопротивление сдвигу в дренированных условиях при равных давлениях консолидации.

Отклонение траектории эффективных напряжений в недренированных испытаниях вправо (с уменьшением избыточного порового давления) обычно называют дилатансией, влево (с увеличением избыточного порового давления) – контракцией.

Проведенные испытания грунтовой пасты показывают высокие значения эффективного угла внутреннего трения и низкие значения удельного сцепления. Если придерживаться выбранной концепции развития горизонтальных напряжений, то можно говорить о преимущественно контракционном поведении нормально уплотненной грунтовой пасты.

График проведенных испытаний в координатах «среднее напряжение – девиатор напряжений» для ненарушенного грунта представлен на рис. 4, в координатах «относительная сдвиговая деформация – девиатор напряжений» - на рис. 5.

При испытаниях грунта ненарушенной структуры наблюдается другой характер развития траектории эффективных напряжений. После этапа контракции, соответствующего относительно малым деформациям сдвига до 5% следует отклонение траектории эффективных напряжений вправо, сопровождающееся уменьшением избыточных поровых давлений.

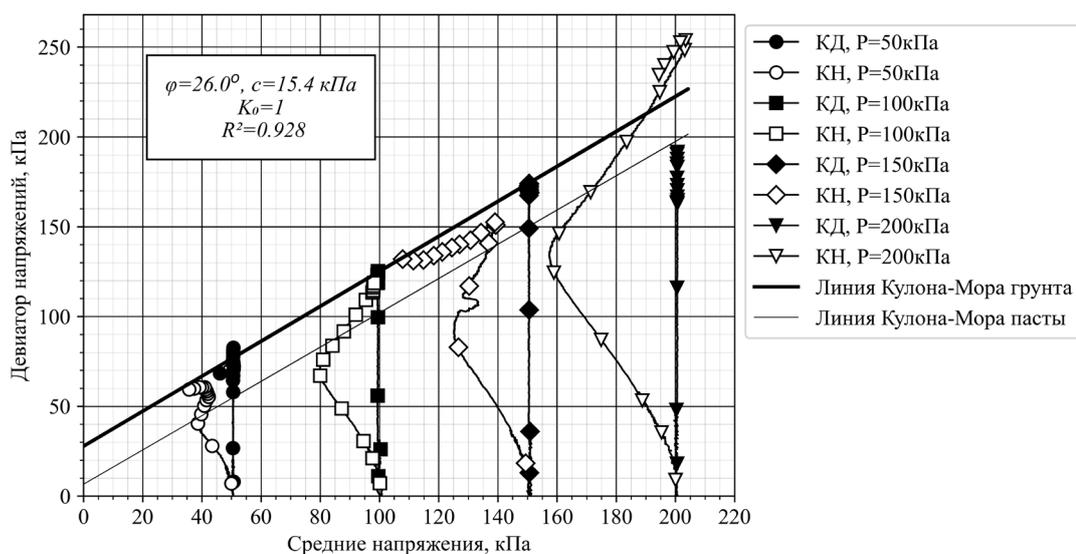


Рис. 4. Траектории эффективных напряжений образцов из монолита ненарушенной структуры с площадки города Санкт-Петербург (иллюстрация авторов). Для графического представления на графиках применено векторное сглаживание

Fig.4. Effective stress paths of samples from a monolith of undisturbed structure from the site of the city of St. Petersburg (illustrations by the authors). Vector anti-aliasing is used for graphical representation in the charts.

Для сопоставления результатов испытаний грунтовых паст с испытаниями образцов ненарушенной структуры на траекториях эффективных напряжений образцов ненарушенной структуры отображена линия прочности Кулона-Мора грунтовой пасты (см. рис.4). Можно предположить, что отклонение траектории эффективных напряжений вправо после достижения деформации сдвига в 5% сопровождается дилатансией грунта, переходящей затем в пластическое течение. Однако, данное явление требует дополнительных исследований.

Результаты сравнения значений угла внутреннего трения и сцепления ненарушенного грунта и грунтовой пасты соответствует ранее получаемым результатам

испытаний других исследователей [4]. Очевидно, что различия в величине сцепления связаны с природой формирования структурных связей между частицами грунта, требующей значительного времени. Угол внутреннего трения в основном зависит от природной влажности и коэффициента пористости грунта, что соответствует концепции критического состояния.

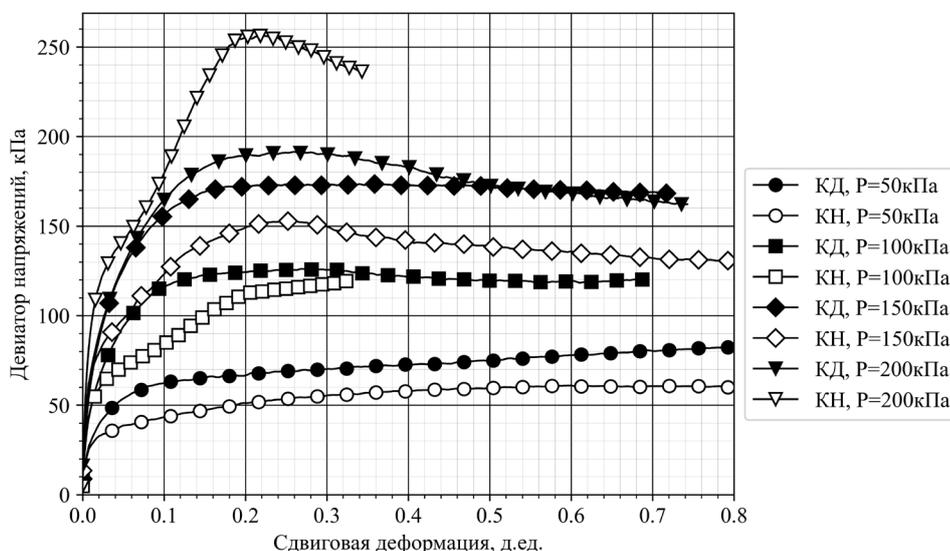


Рис. 5. Графики сдвигового деформирования грунта ненарушенной структуры при приложении касательной нагрузки (иллюстрации авторов)
 Fig.5. Graphs of shear deformation of soil of undisturbed structure under application of tangential load (illustrations by authors)

Для количественного сравнения деформирования грунтовой пасты с ненарушенным грунтом сведем механические параметры грунтов в табл. 2. Модуль сдвига интерпретируем на основании упрощенной степенной зависимости для сравнения результатов испытаний:

$$G^{5\%} = G_{ref}^{5\%} \cdot \left(\frac{\sigma'_z}{p_{ref}}\right)^m \tag{10}$$

Таблица 2

Механические параметры испытанных грунтов

Образец	φ' , °	c' , кПа	$G_{ref}^{5\%}$, кПа	p_{ref} , кПа	m , д.ед.
Грунтовая паста	25.5	3.6	1341	50	0.94
Ненарушенный грунт	25.5	17.7	2422	50	0.59

4. Заключение

По представленной выполненной работе могут быть сформулированы следующие выводы:

1. прибор простого сдвига (DSS), отличающийся простотой в использовании и хорошей повторяемостью результатов испытаний, позволяет широко использовать его в практических задачах инженерных изысканий;
2. проведенные испытания подтверждают, что недrenированная прочность слабых пылевато-глинистых грунтов значительно меньше дренированной прочности, поэтому в недrenированных условиях особенно важно учитывать процессы дилатансии и контракции при сдвиге;
3. различия в процессе деформирования грунтовых паст и ненарушенных грунтов могут быть обусловлены как структурными связями, образующимися в течение длительного времени, так и переуплотнением. Данный вопрос требует дальнейшего исследования;
4. большая жесткость грунта ненарушенной структуры по сравнению с грунтовой пастой может быть вызвана временем его формирования и наличием структурных связей.

Благодарности

Авторы выражают благодарность НИИСФ РААСН за грантовую поддержку данного исследования. Работа выполнена при поддержке компании ЗАО «ЛентИСИЗ», предоставившей монолиты ненарушенных грунтов для лабораторных испытаний и обеспечившей свободный доступ к прибору динамического простого сдвига.

Список литературы/ References

1. Mangushev R., Osokin A. The experience of the underground construction for the complex of buildings on a soft soil in the center of St. Petersburg // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020. Vol. 16. Iss. 3. P. 47–53. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-3-47-53.
2. Zhussupbekov A., Ulitsky V.M., Diakonov I.P., Nicolaeva M.V. Obtaining the physical and mechanical characteristics of limnoglacial deposits in St. Petersburg for constructing a soil mathematical model // *Civil Engineers Bulletin*. 2023. Vol. 20. Iss. 2. P. 44–55. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-44-55.
3. Мирсаяпов И.Т., Айсин Н.Н. Исследования деформаций глинистых грунтов при режимном длительном трехосном сжатии с учетом начальных дефектов // *Известия КГАСУ*. 2021. Т. 58. № 4. С. 5–14. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_5
Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Investigation of deformations of clay soils under regime of prolonged triaxial compression considering initial defects // *Izvestiya KSUAE (News of the Kazan State University of Architecture and Engineering)*. 2021. Vol. 58. No. 4. P. 5–14. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_5.
4. Skempton A.W., Sowa V.A. The Behavior of Saturated Clays During Sampling and Testing // *Géotechnique*. 1963. Vol. 13. Iss. 4. P. 269–290. DOI: 10.1680/geot.1963.13.4.269.
5. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The hardening soil model: Formulation and verification // *The Hardening Soil Model*. 2019. P. 281–296.
6. Васенин В.А. Оценка закономерностей изменения физических свойств глинистых отложений на территории Санкт-Петербурга и их связь с механизмами переуплотнения // *Геотехника*. 2018. Т. X. № 3.
Vasenin V.A. Assessment of patterns of changes in the physical properties of clay deposits on the territory of St. Petersburg and their connection with the mechanisms of overconsolidation // *Geotechnics*. 2018. Vol. X. Iss. 3.
7. Polunin V.M., Kolyukayev I.S., Gorkina M.R. Analytical and numerical methods for determining the stress-strain state of a soil massif for solving a planar problem. CRC Press, 2023. DOI: 10.1201/9781003299127-304.
8. Полуниин В.М., Коллюкаев И.С., Кораблев Д.С., Паскачева Д.А. Реализация идеальной упругопластической модели грунта в деформационной постановке // *Геотехника*. 2023. Т. XV. № 3. С. 26–42. DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-3-26-42.
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. Vol. XV. Iss. 3. P. 26–42. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2023-15-3-26-42>.
9. Szypcio Z., Dołżyk-Szypcio K. Stress–dilatancy behaviour of remoulded Fujinomori clay // *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2023. Vol. 45. Iss. s1. P. 247–252. DOI: 10.2478/sgem-2023-0010.
10. Gao Q.-F., Hattab M., Jrad M., Fleureau J.-M., Hicher P.-Y. Microstructural organization of remoulded clays in relation with dilatancy/contractancy phenomena // *Acta Geotechnica*. 2020. Vol. 15. DOI: 10.1007/s11440-019-00876-w.
11. Razavi S.K., Yniesta S. Stress Ratio–Controlled Hardening Rule in the NorSand Framework // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2025. Vol. 151. Iss. 12.
12. Wan Z., Song C., Xue S., Xie L. Elastoplastic Constitutive Model Describing Dilatancy Behavior of Overconsolidated Clay // *International Journal of Geomechanics*. 2021. Vol. 21. Iss. 3. P. 04021008. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001947.

13. 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. № 1. С. 59–70. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.6.
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 // Construction: Science and Education. 2025. Vol. 15. Iss. 1. P. 59–70. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2025.1.6>.
14. Diakonov I.P., Bashmakov I.B., Zavodchikova M.B., Cheremhina A.P. Reverse analysis of geotechnical monitoring results for the estimation of the diaphragm walls stress-strain // Smart Geotechnics for Smart Societies. 2023. DOI: 10.1201/9781003299127-143.
15. Ter-Martirosyan A., Manukyan A., Ermoshina L. Experience of determining the parameters of the elastoviscoplastic soil model // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 02051. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302051.
16. Bernhardt-Barry M.L., Biscontin G., O’Sullivan C. Analysis of the stress distribution in a laminar direct simple shear device and implications for test data interpretation // Granular Matter. 2021. Vol. 23. Iss. 3. P. 55. DOI: 10.1007/s10035-021-01118-1.
17. Klar A., Roed M., Rocchi I., Paegle I. Evaluation of Horizontal Stresses in Soil during Direct Simple Shear by High-Resolution Distributed Fiber Optic Sensing // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 17. P. 3684. DOI: 10.3390/s19173684.
18. Ghafghazi M., Talesnick M., Givi F.A. The full state of stress in monotonic simple shear tests on sand // Géotechnique. 2024. Vol. 74. Iss. 5. P. 499–510. DOI: 10.1680/jgeot.21.00210.
19. Airey D.W., Wood D.M. An evaluation of direct simple shear tests on clay // Géotechnique. 1987. Vol. 37. Iss. 1. P. 25–35. DOI: 10.1680/geot.1987.37.1.25.

Информация об авторах

Мангушев Рашид Абдулович, доктор технических наук, член-корр. РААСН, профессор, Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; главный научный сотрудник Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики Российской Академии Архитектурно-Строительных Наук, г. Москва, Российская Федерация.

Email: ramangushev@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1077-0562

Паскачева Дарья Алексеевна, аспирант, Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; инженер Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики Российской Академии Архитектурно-Строительных Наук, г. Москва, Российская Федерация.

Email: dashap17012000@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6235-8604

Information about the authors

Rashid A. Mangushev, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg; Chief Scientific Officer, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

Email: ramangushev@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1077-0562

Daria A. Paskacheva, postgraduate student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg; engineer, Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

Email: dashap17012000@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6235-8604

Дата поступления: 02.05.2025

Дата принятия: 24.12.2025