

УДК 624.131.43

© А. Ж. Жусупбеков, д-р техн. наук, профессор  
(Евразийский национальный университет  
им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан)

*E-mail: astana-geostroi@mail.ru*

© В. М. Улицкий, д-р техн. наук, профессор  
(Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I,  
Санкт-Петербург, Россия)

*E-mail: npk-cgt@yandex.ru*

© И. П. Дьяконов, канд. техн. наук, доцент

© М. В. Николаева, магистрант

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

*E-mail: idjkanv@yandex.ru, maria.niv.mn@gmail.com*

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-44-55

© A. Zh. Zhussupbekov, Dr. Sci. Tech., Professor  
(L. N. Gumilyov Eurasian National University,  
Astana, Kazakhstan)

*E-mail: astana-geostroi@mail.ru*

© V. M. Ulitsky, Dr. Sci. Tech., Professor  
(St. Petersburg State University  
of Railways of Emperor Alexander I,  
Saint Petersburg, Russia)

*E-mail: npk-cgt@yandex.ru*

© I. P. Dyakonov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© M. V. Nikolaeva, undergraduate

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, Russia)

*E-mail: idjkanv@yandex.ru, maria.niv.mn@gmail.com*

## ПОЛУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИМНОГЛЯЦИАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУНТА

### OBTAINING THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF LIMNOGLACIAL DEPOSITS IN ST. PETERSBURG FOR CONSTRUCTING A SOIL MATHEMATICAL MODEL

Рассмотрены проблемы использования существующих математических моделей (Mohr-Coulomb, HardeningSoil, SoftSoil) для расчетов оснований, сложенных слабыми грунтами озерно-ледникового комплекса lg III. Кроме того, в геотехнических расчетах сложилась практика формирования локальных моделей грунтов для особенностей того или иного региона. Подробное изучение физико-механических свойств грунтов является необходимым аспектом для валидации моделей в программных комплексах. В связи с этим авторы провели исследование слабого глинистого водонасыщенного грунта Санкт-Петербурга для регламентирования программы его лабораторных испытаний и значений для математических моделей в региональных геотехнических программных комплексах.

*Ключевые слова:* поведение слабых грунтов, слабые грунты, текучие грунты, lg III, озерно-ледниковые отложения, модель грунта, лабораторные испытания, образцы-близнецы, компрессионные испытания, испытания на одноплоскостной срез, трехосные испытания.

The article considers the problems of using existing mathematical models (Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Soft Soil) for calculating bases of soft soils of the lacustrine-glacial complex lg III. In addition, in geotechnical calculations there has developed the practice of forming local soil models taking into account the features of a particular region. A detailed study of the physical and mechanical properties of soils is a necessary aspect for the validation of models in software systems. In this regard, the authors have carried out a study of the weak clayey water-saturated soil of St. Petersburg to regulate the program of its laboratory tests and values for mathematical models in the regional geotechnical software systems.

*Keywords:* behavior of weak soils, weak soils, fluid soils, lg III, lacustrine-glacial deposits, soil model, laboratory tests, twin samples, compression tests, single-plane shear tests, triaxial tests.

**Введение**

Санкт-Петербург является одним из самых быстроразвивающихся городов России, однако строительство здесь осложнено окружающей застройкой и особенностями геологии. При анализе типичных для центральной части Санкт-Петербурга геологических условий можно выделить основную проблему — толщу слабых глинистых водонасыщенных грунтов. В ее состав входят грунты различных генезисов: озерных, морских, а также озерно-ледниковые отложения. Эти грунты появились в результате геологической деятельности ледника, который растаял около 10 тыс. лет назад. Огромное количество обломочного материала долгое время вымывалось в приледниковые озера и откладывалось в неровности рельефа. В толще четвертичных грунтов прослойка слабых озерно-ледниковых грунтов распространена повсеместно, однако ее мощность в районах Васильевского острова и русла реки Невы составляет более 10 м [1].

Большинство получаемых образцов слабых водонасыщенных глинистых грунтов оцениваются как образцы плохого качества [2], поэтому результаты их лабораторных испытаний значительно разнятся с фактическими характеристиками в массиве. Эти грунты находятся в нестабилизированном состоянии, которое часто сопровождается

тиксотропией. Также для слабых петербургских грунтов свойственны реологические процессы. Длительные осадки, которые получают здания, вызваны ползучестью скелета грунта, релаксацией напряжений и пр. [3–5]. Так, наблюдая за осадками зданий, В. А. Васенин [6] установил, что за последние 60–80 лет некоторые здания осели на более чем 150 см.

При работе со слабыми водонасыщенными грунтами существует ряд проблем: невозможность качественного отбора образцов грунта, отсутствие общепринятой методики моделирования поведения данного грунта.

В современной практике для решения различных геотехнических задач в слабых грунтах проектировщиками применяются такие нелинейные модели, как *Mohr-Coulomb*, *Hardening Soil* и *Soft Soil* [7, 8]. В табл. 1 приведены входные параметры для каждой из этих моделей [9].

Модель *Mohr-Coulomb* (MC) является нелинейной моделью поведения грунта. Несмотря на простоту входных данных, существенным недостатком модели является игнорирование нелинейности объемного сжатия образца при описании пластических сдвиговых деформаций. Все деформации внутри предельной поверхности являются упругими и обратимыми [10].

Таблица 1

**Входные параметры моделей**

Модель	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Hardening Soil</i>	<i>Soft Soil</i>
Прочностные характеристики	$c'_{ref}, \varphi'$	$c'_{ref}, \varphi'$ и $\psi$	$c'_{ref}, \varphi'$ и $\psi$
Деформационные характеристики	$E', \nu'$	$E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref}$ $E_{ur}^{ref}, \nu_{ur}$	$\lambda^*, \kappa^*, \nu'_{ur}$
Альтернативные параметры	$E_{oed}, G$	$c_e, c_s, e_{init}$	$c_e, c_s, e_{init}$
Особые параметры модели	$c_u, E'_{inc}, c'_{inc}, \gamma_{ref}$	$m, p_{ref}, K_{nc}^0$ $c'_{inc}, \gamma_{ref}, R_f$	$K_{nc}^0, M$
Метод недренированного поведения	A, B, C	A, B	A



В МС поведение грунта при разгрузке идентично с нагружением, отчего при расчете котлованов возникает неправдоподобный выпор дна котлована [11], который в слабых грунтах проявляется сильнее. Также МС имеет тенденцию сильно завышать прочностные характеристики, что для слабых водонасыщенных грунтов является критичным [12].

Характерной чертой модели *Hardening Soil* (HS) является принятая гиперболическая зависимость между вертикальной относительной деформацией  $e_1$  и девиатором напряжений  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  при первичном трехосном нагружении. Однако закладываемый в нее математический аппарат не может достаточно точно построить компрессионную кривую, что является крайне важным для слабых сильносжимаемых грунтов [13].

Модель *Soft Soil* (SS) была разработана специально для моделирования поведения слабых грунтов. Она использует объемные деформации в области упругой работы — шатре [14].

Большинство параметров определяется с помощью компрессионных испытаний, благодаря чему достаточно точно можно описать деформируемость сильно сжимаемых грунтов. Однако, как и во всех моделях семейства *Cam Clay*, в ней имеются аномалии поведения. При рассмотрении трехосных испытаний в *Soil Test* образец сперва сжимается, а затем расширяется, что не может произойти в реальных условиях. Моделируя компрессионные испытания при малых нагрузках, предсказывается уменьшение горизонтальных нагрузок, а при разгрузке возникает предельное состояние в образце. Также объемное и сдвиговое деформирование связаны между собой, из-за чего возникают сложности в моделировании поведения грунта [11]. Проектируя подземные сооружения, SS при разгрузке недооценивает сдвиговые деформации, из-за чего не учитывается прочность грунта.

Сходимость математических моделей грунта с фактическими результатами натурных испытаний не может быть получена для всех наиболее часто используемых математических моделей при решении геотехнических задач. Поэтому крайне важно разработать математическую модель, которая будет демонстрировать сходимость НДС как в приборе, например, трехосного сжатия образца грунта, так и в общей расчетной схеме с учетом откопки котлована и строительства здания для региональных слабых грунтов.

### Методы

К слабым грунтам Санкт-Петербурга принято относить ленточные глины, а также водонасыщенные супеси и пылеватые суглинки [15]. В данной работе будет рассматриваться один вид лимногляциальных отложений — пылеватые неяснослоистые суглинки текучей консистенции. Эти грунты являются нелитифицированными отложениями, появившимися во время таяния ледника. Гранулометрический состав однородный, крупные включения отсутствуют вовсе (рис. 1). Структура у грунта не является слоистой. Более 60 % от общего числа частиц составляет пылеватая фракция [16], в связи с чем данный грунт удобен для создания образцов-близнецов для многократных испытаний. Образцы в этой работе авторами создавались по методике приложения В ГОСТ 30416–2020, а также с применением опыта А. Ю. Мирного [17].

Для исследуемых грунтов основными свойствами являются влажность, плотность и гранулометрический состав. Исходя из проведенных В. М. Фурсой [16] исследований образцов глинистых грунтов I Балтийского ледникового озера, можно определить диапазон значений этих параметров (табл. 2).

Для описания поведения грунта под нагрузкой были проведены наиболее распространенные лабораторные испытания: компрессионное сжатие, одноплоскостной срез и трехосные испытания (табл. 3).

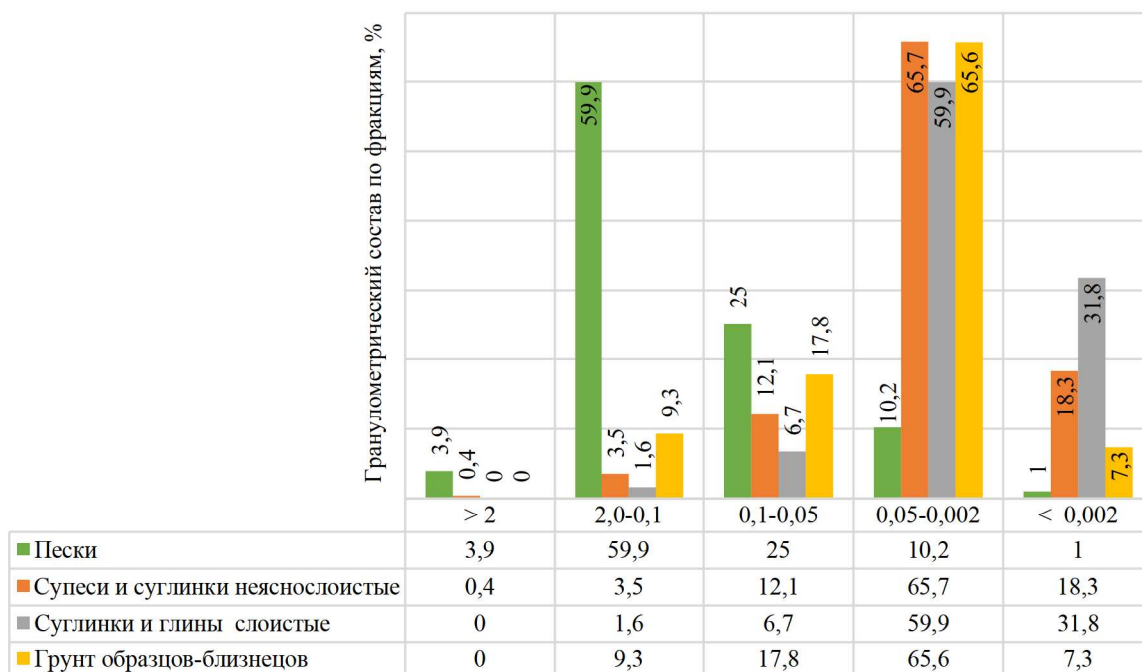


Рис. 1. Полученные распределения гранулометрического состава грунтов первого Балтийского озера комплекса Ig III и грунта образцов-близнецов

Таблица 2

**Характеристики грунтов и образцов-близнецов**

Параметры	Влажность $w$ , %	Влажность на границе текучести $w_L$ , %	Влажность на границе раскатывания $w_p$ , %	Плотность частиц $\rho_p$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Предел пластичности $I_p$	Предел текучести $I_L$	Коэффициент пористости $e$	Степень водонасыщения $S_r$
Диапазон значений для исследуемых грунтов	28–44	26–42	16–28	2,70–2,75	1,80–1,92	10–14	1,4–0,14	0,8–1,15	Более 0,96
Значения для грунта образцов-близнецов	31	28	17	2,70	1,89	11	1,27	0,833	0,982

В целях определения прочностных параметров при недренированном поведении рассматриваются КД (консолидированно-дренированные), КН (консолидированно-недренированные) и НН (неконсолидированно-недренированные) испытания (табл. 4).

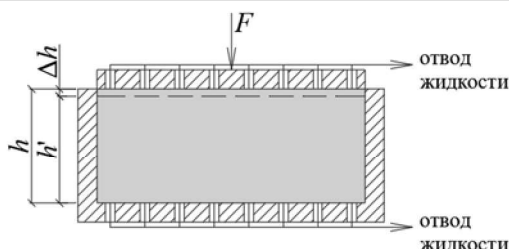
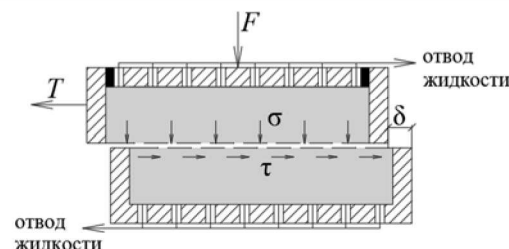
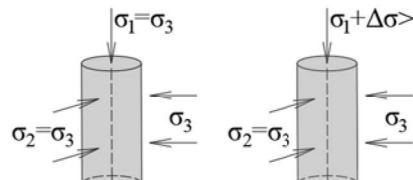
**Полученные результаты и обсуждение**

Были проведены компрессионные испытания с целью определения сжимаемости грунтов (рис. 2).

По результатам испытания была построена компрессионная кривая зависимости относительной вертикальной деформации от нагрузки (рис. 3). Сжатие образца происходило с уменьшением коэффициента пористости в среднем по шести испытаниям на 53,98 % и влажности на 30 %. По результатам испытания грунт классифицируется как очень сильно деформируемый в диапазоне нагрузок 0–250 кПа и сильно деформируемый в диапазоне от 250 кПа.



## Схемы лабораторных испытаний

Наименование испытания	Схема испытания	Нормативные документы	Получаемые параметры
Компрессионное сжатие		ГОСТ 12248.4–2020	$E_{oed}$ , $E_{oed}^k$ , $m_0$
Одноплоскостной срез		ГОСТ 12248.1–2020	$\varphi'$ , $c'$
Трехосные испытания		ГОСТ 12248.3–2020	$E_0$ , $E_{50}$ , $E_{ur}$ , $E$ , $G$ , $K$ , $\nu$ , $\varphi'$ , $c'$ , $\varphi$ , $c$ , $c_u$

Испытания одноплоскостного среза проводились по консолидированно-дренированной (КД) (рис. 4, а) и неконсолидированной (быстрой) схемам. Для проведения быстрого среза был восстановлен лабораторный прибор простого одноплоскостного среза ВСВ-25М. Недостающие части созданы заново в токарных мастерских. Датчики прошли тарировку. Общий вид собранного прибора представлен на рис. 4, б.

По результатам выполненной серии испытаний были получены характерные зависимости исследуемого грунта. В том числе, по результатам КД-испытаний угол внутреннего трения  $\varphi'$  равен  $7^\circ$ , а удельное сцепление  $c'$  составляет 3 кПа (рис. 5).

При сопоставлении результатов КД-среза и «быстрого среза» очевидно, что они различаются, однако в целом для слабых грунтов соизмеримы (рис. 6). Тем не менее опреде-

ленные при «быстром срезе» параметры не рекомендуется использовать в расчетах [18].

В данной работе были выполнены трехосные испытания по схеме КН в кинематическом (при 100 кПа) и статическом (при 200 кПа) режимах (рис. 7). График испытания в кинематическом режиме более нагляден и позволяет лучше проследить деформирование образца (рис. 8). С целью получения прочностных параметров строятся круги Мора (рис. 9).

Также проводились НН-испытания на пневматическом стабилометре (рис. 10, а). Для предотвращения возможности отжатия воды посредством дренажей и искажения результатов перед проведением испытаний система дренажей была наполнена водой. Для уменьшения изначального давления на слабые грунты в стабилометре была предложена система, альтернативная металличе-

Схемы проведения трехосных испытаний

	КД	КН	НН
Схема проведения испытания (стадии реконсолидации и девиаторного нагружения)			
Консолидация	Есть	Есть	Отсутствует
Дренаживание	Есть	Присутствует только на стадии реконсолидации	Отсутствует
Получаемые параметры	$\varphi', c', E, E_{50}, E_{ur}, \nu, K, G$	$\varphi', c', \varphi, c$	$c_u$
Применимость	Все виды дисперсных грунтов	Все виды водонасыщенных грунтов. Быстрое нагружение, динамические нагрузки свыше 0,1 Гц	Водонасыщенные глинистые грунты
Особенности	Используется для определения деформационных свойств	Измеряются прочностные параметры в полных и эффективных напряжениях	Особенно чувствительно к качеству образцов и скорости нагружения

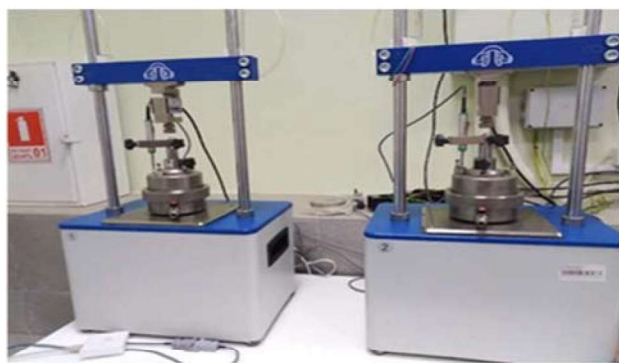


Рис. 2. Проведение компрессионных испытаний

кой, — на 3D-принтере был напечатан облегченный штамп из полимерного пластика с коэффициентом заполнения 0,35. Данная конструкция позволила снизить массу почти на 40 % (рис. 10, б).

На рис. 11 представлены круги Мора, полученные при НН-испытаниях. По результатам испытаний данный грунт классифицируется как грунт очень низкой прочности. Результаты проведенных НН-испытаний используются для уточнения полевых испы-

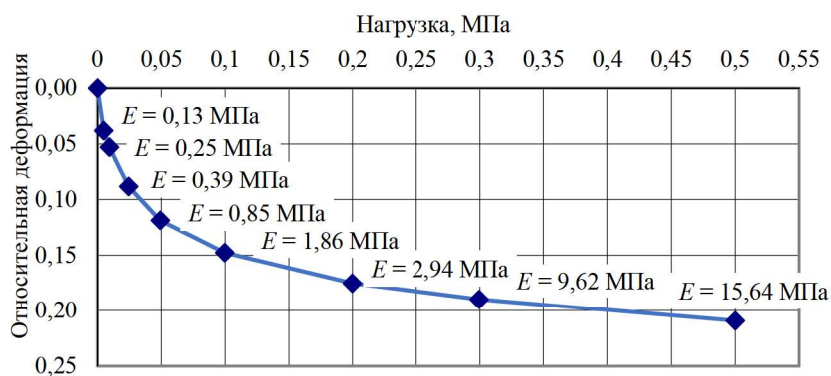


Рис. 3. Компрессионная кривая

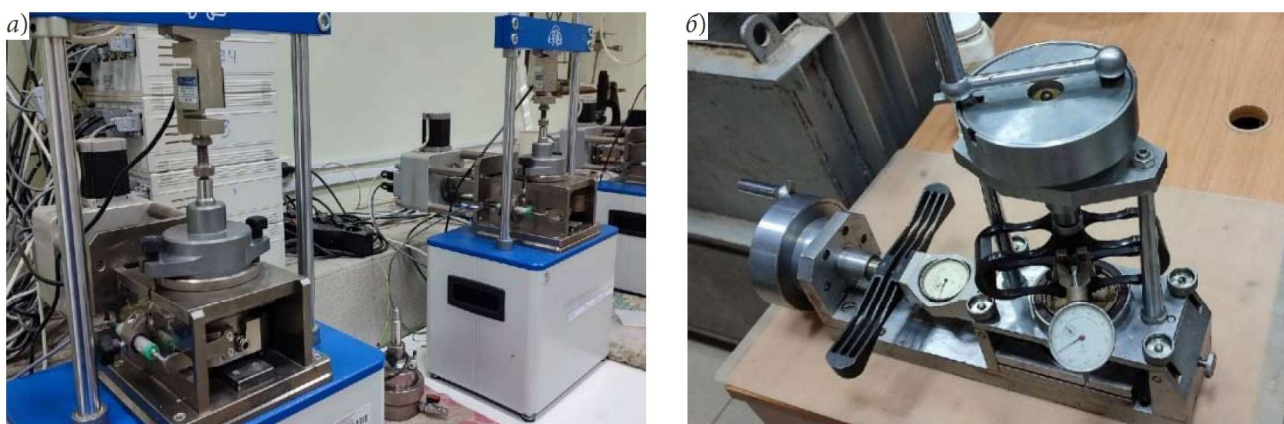


Рис. 4. Проведение испытаний одноплоскостного среза: а — схема КД; б — «быстрый срез»

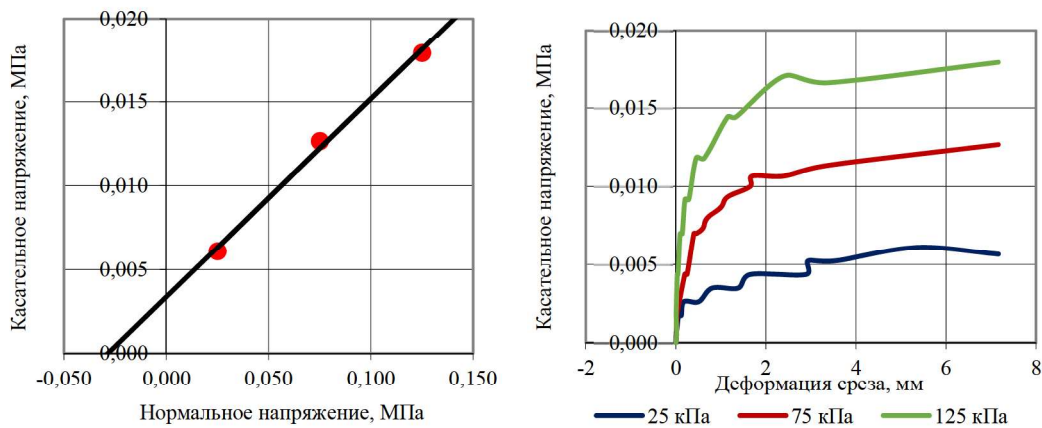


Рис. 5. Графики зависимостей  $\tau = f(\sigma)$  и  $\tau = f(\gamma)$

таний, а также дополнительно к результатам КН.

В настоящее время для моделирования грунтов необходимо использовать различные входные параметры, зависящие

от используемой модели. В программном комплексе *Plaxis* расчеты происходят в эффективных напряжениях, следовательно, необходимо закладывать эффективные прочностные параметры. Для этого лабо-



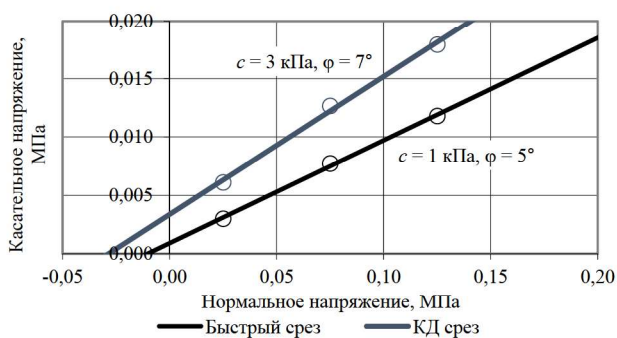


Рис. 6. Сравнение результатов лабораторных испытаний на срез

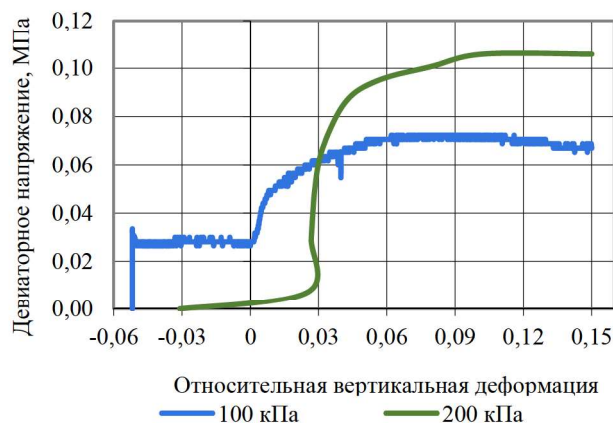


Рис. 8. Графики зависимости вертикальной деформации от девиатора

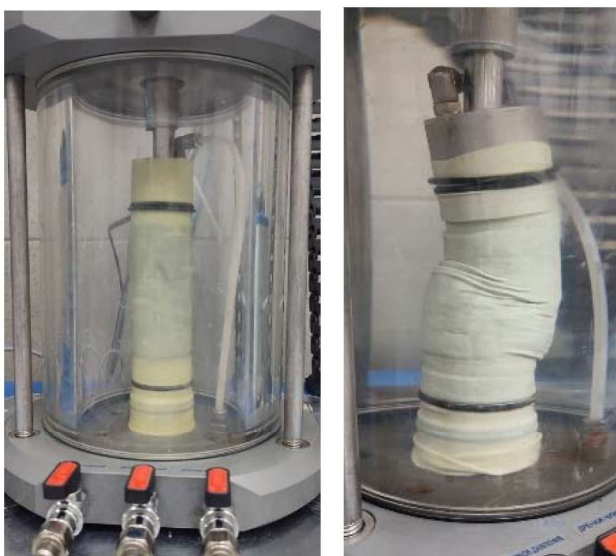


Рис. 7. Проведение КН-испытаний

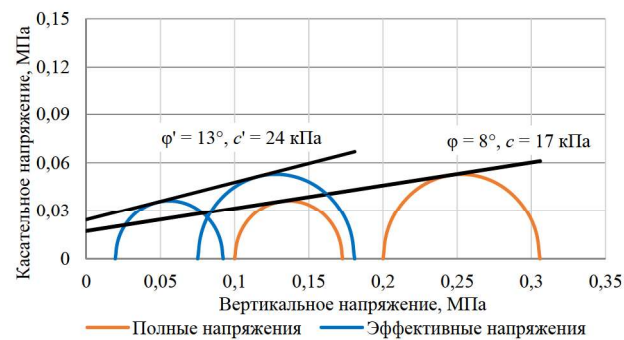


Рис. 9. Круги Мора для КН-испытания

раторные испытания должны проводиться с измерением порового давления либо в условиях его рассеивания. При испытаниях моделируются различные виды работы грунта в массиве, поэтому для изучения его поведения целесообразно проведение полного комплекса лабораторных испытаний. Компрессионные испытания необходимо проводить с разгрузкой, так как таким образом можно получить большинство требуемых для модели SS параметров. Прочностные характеристики лучше определять в стабилометре, так как параллельно можно получить необходимые значения для особых параметров моделей. При этом рекомендуется вы-

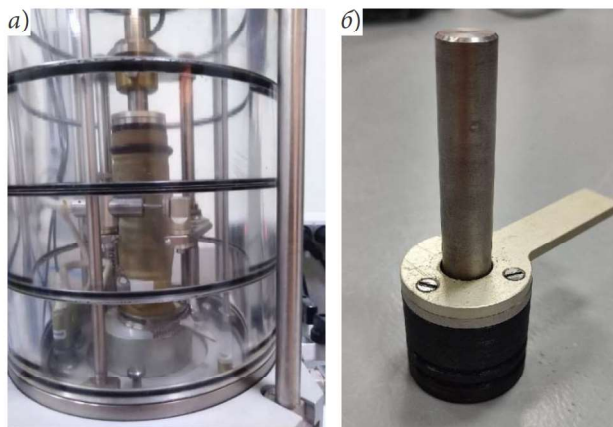


Рис. 10. Проведение НН-испытаний: а — пневматический стабилометр; б — облегченный полимерный штамп

полнять трехосные испытания как по КН-, так и по НН-схеме [19]. Для определения параметров модели HS также необходимо провести КД-испытание с целью получения



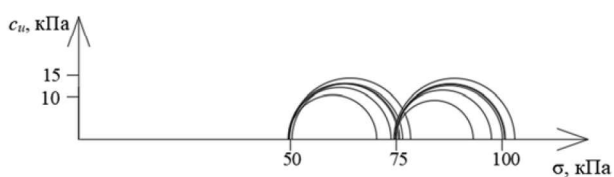


Рис. 11. Полученные результаты (круги Мора) для слабого грунта по схеме НН-испытаний

деформационных характеристик. Однако также рекомендуется выполнять испытания на КД одноплоскостной срез, так как он моделирует один из расчетных случаев работы грунта [20].

Помимо классических механических характеристик грунта, для точных расчетов необходимы дополнительные параметры, например, коэффициент порового давления, коэффициент бокового давления и пр. Кроме того, фильтрационные испытания, испытания для определения вторичной консолидации также выступают важной частью для будущих исследований.

Нормативные документы СП 22.13330.2016 и ТСН 50-302–2004 рекомендуют использовать определенные значения прочностных и деформационных параметров для предварительных расчетов. В табл. 5 приводится сравнение экспериментальных и нормативных значений.

Значения из регионального ТСН 50-302–2004 определялись с помощью номограмм приложения Е. Его существенным недостатком является неоднозначность трактовки данных параметров. Так, в корреля-

ции от физических характеристик грунта определяются механические, однако не дается их конкретизация. Например, по лабораторным испытаниям можно определить различные модули деформации, угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от типа испытания, режимов нагружения и прочих факторов. Однако в нормативных документах приводится лишь одно значение без указания способа его определения. Федеральный СП 22.13330.2016 не устанавливает параметры для нормативных значений глинистых нелессовых грунтов с показателем текучести более 0,75. Для предварительных расчетов согласно СП механические характеристики текучих грунтов необходимо получать из лабораторных испытаний.

#### Выводы

1. По результатам анализа исследований, посвященных обзору математических моделей грунта, можно сформулировать вывод, что при сопоставлении работы НДС грунта в лабораторных приборах с численным анализом имеет место ряд расхождений, так называемых аномалий. Данные аномалии чаще всего происходят, по мнению отечественных исследователей, в результате ограниченности и ряда «вшитых» упрощений в математическую модель. Это связано с тем, что та или иная модель сформулирована для конкретного вида грунта и конкретного характера работы этого грунта под нагрузкой. Таким образом, представляется целесообразным формирование региональных математиче-

Таблица 5

Полученные параметры грунта в сравнении с нормативными

Механические параметры	Полученные в ходе испытания образцов-близнецов				СП 22.13330.2016	ТСН 50-302–2004
	КД-срез	«Быстрый срез»	КН, трехосное испытание	НН, трехосное испытание		
$\varphi, ^\circ$	7	5	8 ( $\varphi' = 13^\circ$ )	$c_u = 12,3$ кПа	–	15,3
$c, \text{кПа}$	3	1	17 ( $c' = 24$ кПа)		–	10
$E_{\text{оед}}, \text{МПа}$	2,94 (при 200 кПа)				–	6,3



ских моделей грунта с учетом потребностей строительного рынка. Например, в рамках расчетной схемы глубокого котлована при наличии окружающей застройки.

2. Слабые водонасыщенные грунты во многом являются причиной больших деформаций зданий существующей застройки в Северо-Западном регионе России. Поэтому для развития подземного пространства Санкт-Петербурга чрезвычайно важно понимать сущность, физическую природу и характер работы под нагрузкой грунтов озерно-ледникового генезиса ( $I_g III$ ). Развитие лабораторной базы приводит к тому, что механические характеристики в разных приборах существенным образом различаются (более чем на 100 %), в связи с чем авторами предлагается качественный подход к изучению строительных свойств грунта, а именно, не только анализ самих характеристик, но в большей степени анализ зависимостей деформаций грунта от нагрузки — механическая модель. Получение этих зависимостей невозможно без многократных повторяемых лабораторных испытаний.

Таким образом, первым шагом к формированию физической, а затем и математической модели является разработка и создание образцов-близнецов лимногляциальных слабых суглинков.

3. В работе была реализована методика создания образцов-близнецов и установлены физические свойства исследуемого грунта. Выполненные лабораторные испытания позволили сделать выводы о приемлемых режимах испытаний слабых глинистых грунтов. Так, была предложена модернизированная конструкция штампа пневматического стабилметра. Далее на многократных испытаниях в грунтовой лаборатории будет сформирован банк данных усредненных функций «напряжение — деформация» для всех возможных схем нагружения рассматриваемого грунта. Подобные многократные испытания позволят сформулировать

и определить уже математическую модель исследуемого грунта.

### Библиографический список

1. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства / под ред. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2017. 168 с.
2. Васенин В. А. Статистическая оценка параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов глинистых отложений при инженерно-геологических изысканиях на территории Санкт-Петербурга и окрестностей // Инженерная геология. 2018. Т. 13. № 6. С. 48–65.
3. Тер-Мартirosян А. З., Сидоров В. В., Ермошина Л. Ю. Определение и верификация параметров модели слабого грунта с учетом ползучести // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, № 6 (117). С. 697–708.
4. Осипов В. И., Карпенко Ф. С., Кальберген Р. Г., Кутергин В. Н., Румянцева Н. А. Реологические свойства глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 6. С. 41–51.
5. Безволев С. Г. Первичная и вторичная консолидация грунтов. Реологические модели и практика расчетов // Геотехника. 2011. № 1. С. 21–47.
6. Васенин В. А., Шашкин А. Г. Вековые осадки зданий Санкт-Петербурга. СПб.: Изд-во института «Геореконструкция», 2022. 448 с.
7. Ван Импе В., Верастеги Флорес В. Д. Проектирование, строительство и мониторинг насыпей на шельфе в условиях слабых грунтов / пер. с англ.; под ред. В. М. Улицкого, А. Б. Фадеева, М. Б. Лисюка. СПб.: НПО «Геореконструкция-Фундамент-проект», 2007. 168 с.
8. Мацеля В. И., Сеелев И. Н., Леконцев А. В., Хафизов Р. Р., Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В., Яковлев П. В. Сравнительный анализ параметров конечно-элементных моделей грунтов, полученных численными методами // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. 2017. № 1 (63). С. 23–31.
9. Строчкова Л. А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехн. Ун-та. 2008. Т. 313. № 1. С. 69–74.
10. Brinkgreve R. B. J., Engin E., Swolfs W. M. Plaxis 2D manual. Rotterdam: Balkema, 2017. 816 p.
11. Шашкин А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 2. С. 1–32.



12. Мирный А. Ю., Тер-Мартirosян А. З. Область применения современных механических моделей грунтов // Геотехника. 2017. № 1. С. 20–26.

13. 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. № 2 (85). С. 85–93.

14. Кондратьева Л. Н., Бурцев Р. В., Горшков И. В. О применении моделей грунта Soft Soil и Hardening Soil Small-Strain в рамках задачи фильтрационной консолидации на различных этапах возведения и эксплуатации здания в условиях слабых грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 62–71.

15. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Усманов Р. А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах / под ред. Р. А. Мангушева. СПб.: Лань, 2021. 460 с.

16. Фурса В. М. Строительные свойства грунтов района Ленинграда. Л.: Стройиздат, 1975. 142 с.

17. Мирный А. Ю. Трехосные испытания грунтов: теория и практика. М.: ООО «Геомаркетинг», 2015. 144 с.

18. Федоренко Е. В. Геотехническое обеспечение строительства насыпей на слабых основаниях // Материалы XVI Общероссийской науч.-практ. конф. «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». Москва, 1–3 декабря 2021 г. М.: Геомаркетинг, 2021. С. 507–514.

19. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248–2010. 2-е изд., доп. и испр. Пенза: Прондо, 2014. 812 с.

20. Захаров М. С., Мангушев Р. А. Инженерно-геологические и инженерно-геотехнические изыскания в строительстве / под ред. Р. А. Мангушева. М.; СПб.: АСВ, 2014. 176 с.

## References

1. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlement of buildings and structures in the zone of influence of underground construction]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2017, 168 p.

2. Vasenin V. A. *Statisticheskaya otsenka parametrov narusheniya prirodnoy struktury laboratornykh obraztsov glinistykh otlozheniy pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh na territorii Sankt-Peterburga i okrestnostey* [Statistical assessment of the disturbance parameters of the natural structure of clay sediments' laboratory samples during engineering-geological surveys in St. Petersburg

and the suburbs]. *Inzhenernaya geologiya – Engineering Geology*, 2018, vol. 13, no. 6, pp. 48–65.

3. Ter-Martirosyan A. Z., Sidorov V. V., Ermoshina L. Yu. *Opreделение i verifikatsiya parametrov modeli slabogo grunta s uchetom polzuchesti* [Determination and verification of the weak soil model parameters, with creep taken into account]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2018, vol. 13, no. 6 (117), pp. 697–708.

4. Osipov V. I., Karpenko F. S., Kal'bergenov R. G., Kutergin V. N., Rumyantseva N. A. *Reologicheskie svoystva glinistykh gruntov* [Rheological properties of clay soils]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya – Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2017, no. 6, pp. 41–51.

5. Bezvolev S. G. *Pervichnaya i vtorichnaya konsolidatsiya gruntov. Reologicheskie modeli i praktika raschetov* [Primary and secondary consolidation of soils. Rheological models and practice of calculations]. *Geotekhnika – Geoengineering*, 2011, no. 1, pp. 21–47.

6. Vasenin V. A., Shashkin A. G. *Vekovye osadki zdaniy Sankt-Peterburga* [Age-old settlement of buildings of St. Petersburg]. St. Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2022, 448 p.

7. Van Impe V., Verastegi Flores V. D. *Proektirovanie, stroitel'stvo i monitoring nasypey na shel'fe v usloviyakh slabyykh gruntov* [Design, construction and monitoring of embankments on the shelf in conditions of weak soils]. Transl. from English. Ed. by Ulitskiy V. M., Fadeev A. B., Lisyuk M. B. St. Petersburg, NPO Georekonstruktsiya-Fundament-proekt Publ., 2007, 168 p.

8. Matselya V. I., et al. *Sravnitel'nyy analiz parametrov konechno-elementnykh modeley gruntov, poluchennykh chislennymi metodami* [Comparative analysis of parameters of finite-element models of soils obtained by numerical methods]. *Vestnik Astrakhanskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Astrakhan State Technical University*, 2017, no. 1 (63), pp. 23–31.

9. Strokova L. A. *Opreделение parametrov dlya chislennogo modelirovaniya povedeniya gruntov* [Determination of parameters for numerical modeling of soil behavior]. *Izvestiya Tomskogo Politekhn. Un-ta – Proceedings of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vo. 313, no. 1, pp. 69–74.

10. Brinkgreve R. B. J., Engin E., Swolfs W. M. *Plaxis 2D manual*. Rotterdam, Balkema, 2017, 816 p.

11. Shashkin A. G. *Vyazko-uprugo-plasticheskaya model' povedeniya glinistogo grunta* [Visco-elastic-plastic model of clayey soil behavior]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Urban development and geotechnical construction*, 2011, no. 2, pp. 1–32.

12. Mirniy A. Yu., Ter-Martirosyan A. Z. *Oblasti primeneniya sovremennykh mekhanicheskikh modeley gruntov* [Areas of application of modern mechanical

models of soils]. *Geotekhnika – Geoengineering*, 2017, no. 1, pp. 20–26.

13. Mangushev R. A., Penkov D. V. *Sravnienie rezultatov chislennykh raschetov s ispol'zovaniem sovremennykh modeley grunta (Hardening Soil, Hardening Soil Small i Generalized Hardening Soil) s rezultatami monitoringa* [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]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 85–93.

14. Kondratieva L. N., Burtsev R. V., Gorshkov I. V. *O primenenii modeley grunta Soft Soil i Hardening Soil Small-Strain v ramkakh zadachi fil'tratsionnoy konsolidatsii na razlichnykh etapakh vozvedeniya i ekspluatatsii zdaniya v usloviyakh slabykh gruntov* [On the application of Soft Soil model and Hardening Soil Small Strain model in the context of filtration consolidation problem at various stages of the construction and operation of buildings in soft soil conditions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 3 (92), pp. 62–71.

15. Mangushev R. A., Osokin A. I., Usmanov R. A. *Ustroystvo i rekonstruktsiya osnovaniy i fundamentov na slabykh i strukturno-neustoychivyykh gruntakh* [Design and reconstruction of bases and foundations on weak and structurally unstable soils]. Ed. by Mangushev R. A. St. Petersburg, Lan Publ., 2021, 460 p.

16. Fursa V. M. *Stroitel'nye svoystva gruntov rayona Leningrada* [Building properties of soils in Leningrad region]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1975, 142 p.

17. Mirniy A. Yu. *Trekhosnye ispytaniya gruntov: teoriya i praktika* [Triaxial tests of soils: theory and practice]. Moscow, Geomarketing Publ., 2015, 144 p.

18. Fedorenko E. V. *Geotekhnicheskoe obespechenie stroitel'stva nasypey na slabykh osnovaniyakh* [Geotechnical support for the construction of embankments on weak foundations]. *Trudy XVI Obshcherossiyskoy nauch.-prakt. konf. «Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii»*, Moskva, 1–3 dekabrya 2021 g. [Proceedings of the XVI All-Russian scientific and practical conference “Prospects of development of engineering surveys in construction in the Russian Federation”, Moscow, December 1–3, 2021]. Moscow, Geomarketing Publ., 2021, pp. 507–514.

19. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov s kommentariyami k GOST 12248–2010* [Methods for determination of mechanical properties of soils with comments to GOST 12248–2010]. 2-nd ed., revised. Penza, Prondo Publ., 2014, 812 p.

20. Zakharov M. S., Mangushev R. A. *Inzhenerno-geologicheskie i inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya v stroitel'stve* [Engineering-geological and engineering-geotechnical surveys in construction]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2014, 176 p.