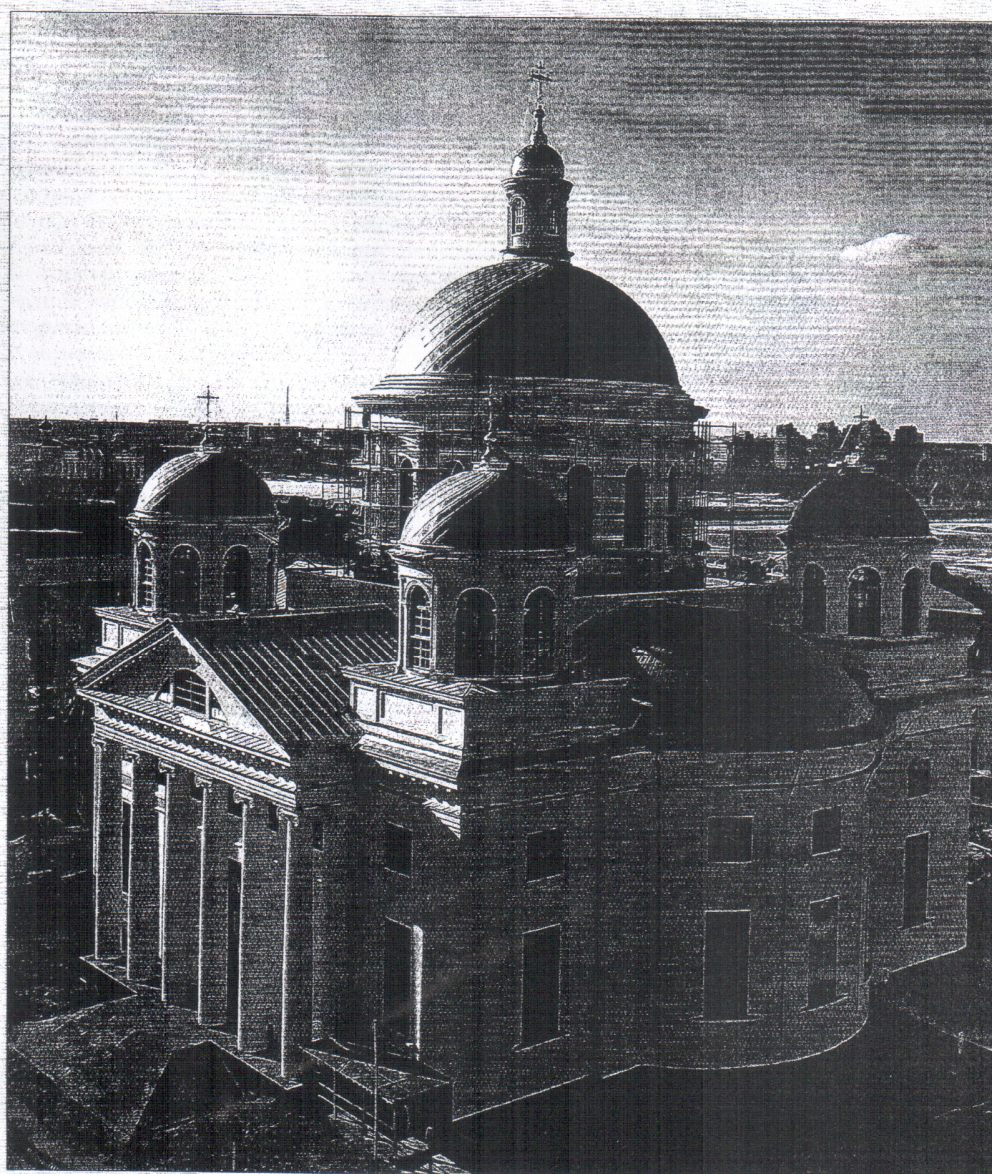


**ИТС** ПРОМЫШЛЕННОЕ  
И ГРАЖДАНСКОЕ  
СТРОИТЕЛЬСТВО

**6/2019**



ЛАУРЕАТ II ВСЕРОССИЙСКОГО ФЕСТИВАЛЯ  
«АРХИТЕКТУРНОЕ НАСЛЕДИЕ-2019»  
ВОССОЗДАНИЕ СОБОРА КАЗАНСКОЙ ИКОНЫ БОЖИЕЙ МАТЕРИ  
(г. КАЗАНЬ)

## Сравнение результатов полевых и лабораторных исследований характеристик деформируемости глинистых грунтов

**Марк Юрьевич АБЕЛЕВ**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор, e-mail: AbelevMYU@mgsu.ru

**Игорь Вячеславович АВЕРИН**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: i.averin@mail.ru

**Ольга Васильевна КОПТЕВА**<sup>1</sup>, аспирантка, e-mail: KoptevaOV@mgsu.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

<sup>2</sup> ООО «Инженерная Геология», 121351 Москва, ул. Ярцевская, 16

**Аннотация.** Определение характеристик деформируемости слабых водонасыщенных грунтов является сложным процессом, что обусловлено трудностью сохранения природной структуры отбираемого образца грунта для исследований в лабораторных условиях. Согласно последним работам, в природном залегании наблюдается постоянное поровое давление, которое необходимо учитывать при определении характеристик деформируемости и прочности глинистых грунтов. В течение многих лет было установлено, что определенные в лабораторных условиях характеристики сжимаемости грунтов резко отличаются от показателей, полученных в полевых условиях. Предлагается использовать характеристику сжимаемости и прочности грунтов, полученную в недорогих лабораторных исследованиях, вместо определения этих характеристик в дорогостоящих полевых условиях. Приводятся результаты сопоставления многочисленных лабораторных и полевых исследований свойств слабых водонасыщенных грунтов основания различных районов России. На основе полученных данных рекомендуется при исследовании характеристик деформируемости слабых водонасыщенных глинистых грунтов применять только лабораторные методы и не проводить дополнительные полевые штамповые испытания, кроме случаев строительства уникальных сооружений.

**Ключевые слова:** водонасыщенные глинистые грунты, деформируемость, лабораторные методы, полевые методы определения характеристик деформируемости.

### COMPARISON OF FIELD AND LABORATORY STUDIES RESULTS OF THE CLAY SOILS DEFORMABILITY CHARACTERISTICS

**Mark Yu. ABELEV**<sup>1</sup>, e-mail: AbelevMYU@mgsu.ru

**Igor V. AVERIN**<sup>2</sup>, e-mail: i.averin@mail.ru

**Olga V. KOPTEVA**<sup>1</sup>, e-mail: KoptevaOV@mgsu.ru

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

<sup>2</sup> Engineering Geology, ul. Yartsevskaya, 16, Moscow 121351, Russian Federation

**Abstract.** Determination of the deformability characteristics of weak water-saturated soils is a complex process. Firstly, it is difficult to preserve the natural structure of the soil sample taken for the study in the laboratory. Secondly, according to the latest studies, in natural occurrence there is a constant pore pressure, which must be taken into account when determining the characteristics of deformability and strength of clay soils. During many years it was established that the compressibility characteristic of soils obtained under laboratory conditions differs sharply from the result of characterization in field conditions. It is proposed to use the characteristics of compressibility and strength of soils obtained in the course of low-cost laboratory studies, compared with the definition of these characteristics in expensive field conditions. The results of the comparison of numerous laboratory and field studies of the properties of weak water-saturated soils of the base of various regions of Russia are presented. On the basis of the data obtained, when studying the characteristics of deformability of weak water-saturated clay soils, it is recommended to use only laboratory methods and not to conduct additional field plate load tests, except in the case of construction of unique structures.

**Key words:** saturated clay soils, deformability, laboratory methods, field methods for determining the characteristics of deformability.

Современные методы расчета фундаментных конструкций по предельному состоянию предполагают определение осадок фундаментов сооружений с ис-

пользованием теории упругости линейно деформируемых тел, для чего необходимо установить значение модуля общей деформации грунта.

Существующие методы определения этой величины основаны на результатах лабораторных (компрессионных) исследований. Однако сопоставление фактич-

Осадок построенных сооружений с расчетными характеристиками, определенными по результатам компрессионных опытов, показывает наглядное отличие между теоретическими и фактическими значениями осадок.

Проведенные по фактическим осадкам сооружений расчеты позволили установить, что если использовать метод, содержащийся в нормативных документах, то необходимо принимать значение модуля деформации в несколько раз большее, чем по результатам лабораторных (компрессионных) опытов. Эта закономерность была установлена для различных видов грунтов, залегающих в основании сооружений [1–3].

Аналогичные результаты были получены во многих экспериментах, проведенных в НИИ оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова в 1950-х–1970-х гг. [4]. К сожалению, установить количественную связь между характеристиками деформируемости грунта, определенными в лабораторных условиях и при испытании штампами для различных оснований сооружений, не удалось.

Начиная с 1961 г. и по настоящее время многочисленные исследования этой проблемы проводилось в различных лабораториях под руководством М. Ю. Абелева, П. А. Коновалова, В. Ф. Разеренова [4, 5]. Несмотря на значительное количество штамповых испытаний (штампы площадью от 3000 до 10 000 см<sup>2</sup>) и лабораторных испытаний образцов из этих же грунтовых оснований четкой зависимости между значениями модуля общей деформации грунта, полученными в полевых и в лабораторных условиях, не было установлено даже для одинаковых диапазонов изменения вертикального давления

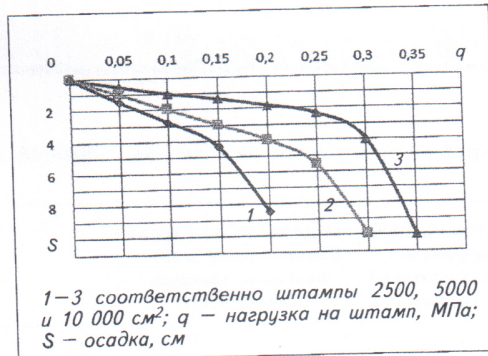


Рис. 1. Графики зависимости «нагрузки – осадка» по результатам полевых испытаний статическими нагрузками илов оз. Сиваш

на грунт. Аналогичные результаты (по данным С. Г. Кушнера, А. С. Строганова) были получены в Дальневосточном ТИСИЗ, Свердловском ТИСИЗ, Ярославском ТИСИЗ, в Фундаментпроекте, в МИСИ им. В. В. Куйбышева и т. д.

В исследованиях последних лет была сделана попытка выявить закономерность между значениями модуля деформации, полученными в полевых и в лабораторных условиях и близкими по характеристикам сжимаемости грунтов.

Первая группа исследований проводилась для грунтов, которые условно были выделены в группу «слабые водонасыщенные глинистые грунты» с модулем общей деформации менее

0,5 МПа, вертикальным давлением 0,05–5 МПа, степенью водонасыщения больше 0,8. К этой группе относятся грунты разного генезиса, в том числе с содержанием органических веществ более 3%. Исследования выполняли на образцах грунтов, отобранных из оснований фундаментов строящихся сооружений в Калининграде, Санкт-Петербурге, Волжском, Новокузнецке, Сухуми, Москве, Архангельске, Риге и других городах. Кроме того, в данной группе грунтов

исследовали и водонасыщенные лёссовые грунты Ростова-на-Дону и Северо-Кавказских республик. Всего было обработано более 40 результатов исследований слабых водонасыщенных глинистых грунтов в основании штампов площадью 3000, 5000 и 10 000 см<sup>2</sup>.

Все штампы (металлические и железобетонные) по критерию М. И. Горбунова-Посадова [2] имели жесткую конструкцию. Контрольные лабораторные исследования образцов слабых грунтов, отобранных из оснований экспериментальных площадок, выполняли в основном в компрессионных приборах конструкции Гидропроекта с площадью кольца 40 и 60 см<sup>2</sup>.

По данным исследования сла-

1. Значения модуля деформации и коэффициента бокового расширения водонасыщенных глинистых грунтов

Вид испытаний, грунт	Модуль общей деформации при вертикальном давлении, МПа			Коэффициент бокового расширения при вертикальном давлении, МПа		
	0,2–0,5	0,5–0,1	0,5–1,5	0,25–0,5	0,5–1	1–2,5
Компрессионные, ил (Архангельск)	17,7	36,3	61,5	0,06	0,23	0,42
В стабилометре, ил (оз. Сиваш)	15,2	31,2	51,3	0,04	0,17	0,4
Полевые, штампами площадью 10 000 см <sup>2</sup> , водонасыщенный лёсс (г. Запорожье)	27,1	43,2	70,4	0,11	0,31	0,46

2. Характеристики слабых водонасыщенных глинистых грунтов после уплотнения на экспериментальных площадках

Показатель	Торф слаборазложившийся, уплотненный, водонасыщенный (Ярославль)	Ил глинистый, уплотненный до глины мягкопластичной консистенции (Москва)	Суглинок текуче-пластичной консистенции (Сочи)	Супесь текучей консистенции (Калининград)
Плотность, г/см <sup>3</sup> :				
частиц грунта $\rho_s$	1,89	2,53	2,7	2,67
грунта $\rho$	1,12	1,37	1,93	2,03
сухого грунта, $\rho_d$	0,34	0,64	1,5	1,67
Влажность, %:				
$W$ ,	262,1	114,5	28,8	21,8
на границе текучести $W_L$	—	128	30,9	20,9
на границе раскатывания $W_P$	—	81,9	19,4	15,4
Число пластичности $I_P$ , %	-	46,1	11,5	5,5
Показатель текучести $I_L$ , доли ед.	-	0,71	0,82	1,15
Коэффициент пористости $e$ , доли ед.	5,32	2,97	0,8	0,6
Пористость $n$ , доли ед.	0,82	0,75	0,44	0,38
Степень влажности $S_r$ , доли ед.	—	0,97	0,97	0,97
Содержание органических веществ, %	3,7	2	—	—

бых водонасыщенных глинистых грунтов было установлено, что модуль общей деформации для этой группы грунтов не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от напряженного состояния, скорости нагружения, величины ступеней приложенного вертикального давления. Так, значения модуля деформации образцов ила в Архангельске [1], в зависимости от методики исследования грунтов штампами площадью 5000 см<sup>2</sup>, составили от 1,43 до 5,7 МПа. В процессе нагружения образцов показатели непостоянны ни в компрессионных опытах, ни при испытании грунтов штампами. Сравнить переменные значения характеристик деформируемости для различных напряженных состояний неправомерно. Следует учитывать, что грунты в основании штампов различной площади имеют разное напряженное состояние, что было установлено по данным измерения мездозами и датчиками порового давления в полевых условиях.

При проведении исследований в г. Архангельске, Запорожье и на оз. Сиваш водонасыщенные глинистые грунты мягкопластичной консистенции испытывали одинаковыми штампами площадью 5000 см<sup>2</sup> (табл. 1, рис. 1). Один штамп нагружали малыми степенями по 0,01 МПа, другой — по 0,05 МПа. В результате было установлено, что при интервалах давления 0,1–0,2 МПа значения модуля деформации по различным схемам нагружения изменялись в 1,6–1,9 раза.

Сложной проблемой при определении характеристик деформируемости слабых грунтов основания на глубинах более 30 м является отбор образцов с ненарушенной структурой для дальнейшего лабораторного исследования. В большинстве организаций, которые осуществляют инженерно-геологические изыскания, отсутствуют грунтоносы современных конструкций, позволяющие отобрать образцы слабых водонасыщенных глинистых и песчаных грунтов с нена-

рушенной природной структурой. К таким инструментам относятся вакуумные конструкции, тонкостенные грунтоносы с закрывающимся дном, грунтоносы, у которых нижняя часть отбираемого цилиндрического образца замораживается с использованием жидкого гелия и т. п.

Именно разрушение природной структуры образца, отбираемого с глубины грунтового основания, часто служит причиной неверного определения характеристик свойств грунтов в лабораторных условиях.

Начиная с 1961 г. проводились многочисленные испытания по определению деформативных свойств грунтов методом статического зондирования. В 1970-х–1990-х гг. под руководством Ю. Г. Трофименкова были выполнены исследования и обобщены результаты по изучению возможности применения метода статического зондирования для определения количественных характеристик свойств грунтов [6]. Полученные при использовании

статического зондирования показатели сравнивали с характеристиками свойств грунтов, определенных в лабораторных и полевых условиях. К сожалению, зависимости между результатами статического зондирования и другими физико-механическими свойствами грунтов не удалось установить.

В этой связи была сделана попытка выявить зависимость между результатами статического зондирования, значениями деформируемости и прочности грунтов с близкими характеристиками деформируемости для слабых водонасыщенных грунтов, песчаных грунтов, глинистых грунтов пластичной консистенции, лёссовых просадочных замоченных грунтов.

Наиболее оптимальные результаты были получены для песчаных грунтов. В действующих нормативных документах РФ приводятся формулы по определению приближенных значений характеристик деформируемости и прочности по испытаниям грунтовых песчаных оснований сооружений методом статического зондирования.

В настоящее время определение характеристик деформируемости грунтов в основании сооружений на глубине более 4 м проводят с использованием полевых штампов площадью 600 см<sup>2</sup>. Для этого пробуривают на заданную глубину скважину, на дно которой устанавливают металлический круглый штамп. Применяют два типа штампов — плоские с перфорацией или без и в виде винтовой лопасти (полтора винта).

Передача давления на штамп производится обычно через систему буровых штанг, а перемещения штампа фиксируют с помощью измерительных датчиков. Нагрузка на штамп передается ступенями (по аналогии с нагружением штампов большого диаметра).

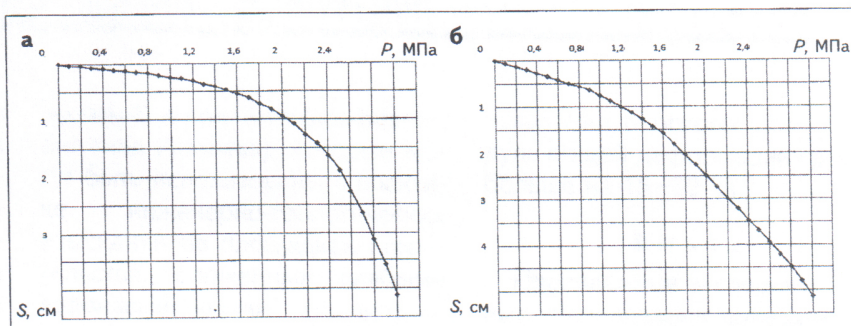


Рис. 2. Зависимость осадки штампа  $S$  от давления  $P$  для суглинка текучей консистенции (Калининград) при испытании статическими нагрузками:  $H = 5,7$  абс. отм.  $-3$  м (а);  $H = 6,8$  м абс. отм.  $-4,1$  м (б)

### 3. Сравнение деформационных свойств грунтов, определенных различными методами

Характеристика грунта	Испытания		Статическое зондирование
	лабораторные	штамповые	
<i>Торф слаборазложившийся, уплотненный, водонасыщенный (Ярославль)</i>			
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,12	—	—
Модуль деформации $E$ , МПа	5,5 (стабилометр)	7,3	0,9
Угол внутреннего трения $\varphi^\circ$	9	—	—
Удельное сцепление, кПа	14	—	—
<i>Ил глинистый, уплотненный до глины мягкопластичной консистенции (Москва)</i>			
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,37	—	—
Модуль деформации $E$ , МПа	8,3 (стабилометр)	10,3	0,6
Угол внутреннего трения $\varphi^\circ$	3	—	—
Удельное сцепление, кПа	9	—	—
<i>Суглинок текучепластичной консистенции (Сочи)</i>			
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,93	—	—
Модуль деформации $E$ , МПа	$E_k = 3,1$ (одомер)	9	0,7
Угол внутреннего трения $\varphi^\circ$	7	—	—
Удельное сцепление, кПа	12	—	—
<i>Супесь текучей консистенции (Калининград)</i>			
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,03	—	—
Модуль деформации $E$ , МПа	$E_k = 6,9$ (одомер)	17	3,8
Угол внутреннего трения $\varphi^\circ$	18	—	—
Удельное сцепление, кПа	10	—	—

Для определения возможности использования таких штампов на экспериментальных поли-

гонах были проведены натурные экспериментальные исследования на больших толщах (бо-

лее 6 м) слабых водонасыщенных глинистых грунтов в Сочи (медиацентр), на площадке устройства фундаментов в Имеретинской низменности, при сооружении стадионов для чемпионата мира по футболу в Калининграде (о. Октябрьский) и на водонасыщенных лёссовых грунтах в Ростове-на-Дону, а также при строительстве жилых зданий в Ярославле и Москве [7, 8].

Полученные по результатам испытаний штампами площадью 600 см<sup>2</sup> характеристики деформируемости слабых водонасыщенных глинистых грунтов сопоставляли с аналогичными показателями, определенными в лабораторных условиях, при применении штампов большого диаметра (более 3000 см<sup>2</sup>) и по результатам статического зондирования. Результаты таких испытаний приведены на *рис. 2* и *табл. 2, 3*. Время условной стабилизации деформации было принято согласно ГОСТ 20276–2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости» до 4 ч для органоминеральных грунтов (ИГЭ №1).

Полученные результаты экспериментальных исследований показывают возможность проведения лабораторных (компрессионных) испытаний для определения характеристик деформируемости, необходимых для проектирования фундаментов сооружения без трудоемких полевых натурных опытов.

По данным экспериментов определены вероятные коэффициенты перехода от лабораторных

значений к полевым (коэффициент типа Агишева), которые могут быть использованы в практике инженерно-геологических изысканий на площадках строительства, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами.

При проведении экспериментальных исследований деформируемости слабых водонасыщенных глинистых грунтов в 2017–2018 гг. на объектах в Калининграде, Сочи и Москве в основании штампов площадью 600 см<sup>2</sup> и 3000–10 000 см<sup>2</sup> определяли по глубине значения порового давления. Для изучения порового давления применяли струнные датчики производства США с точностью измерения 0,05 МПа. В основании круглых штампов площадью 600 см<sup>2</sup> датчик порового давления устанавливали по вертикальной оси штампа на глубину 10–20 см.

Кроме того, исследовали распределение эффективных напряжений по глубине грунтового основания экспериментальных штампов. В некоторых случаях значения модуля общей деформации (илы оз. Сиваш и г. Калининграда), определенные в лабораторных условиях и в полевых условиях, оказались близкими (разница 7–17 %). При изменении вертикального давления на подошву штампа от 0,05–0,15 МПа модуль общей деформации изменялся от 12 до 21 %.

Сопоставления результатов экспериментов для плоского металлического штампа с перфорациями и винтового штампа площадью 600 см<sup>2</sup> показали, что при

испытании плоского штампа модуль общей деформации грунтов больше на 15–30 %.

### Вывод

Проведенные экспериментальные исследования показали, что для слабых водонасыщенных глинистых грунтов значения модуля деформации грунтов, полученные в лабораторных условиях, отличаются от величин, определенных по результатам испытаний полевых штампов, на 23–63 %. Согласно действующим нормативным документам РФ, необходимо использовать переводные коэффициенты для перехода от компрессионного модуля деформации к общему расчетному модулю деформации.

Полученные при лабораторных исследованиях в компрессионных приборах результаты определения модуля деформации слабого глинистого грунта ( $E \leq 5$  МПа) для каждой генетической группы должны быть подтверждены результатами штамповых испытаний в количестве не менее трех опытов.

Это позволит при исследовании характеристик деформируемости слабых водонасыщенных глинистых грунтов выявить необходимые коэффициенты перехода в пределах экспериментальной площадки, не проводить большого количества полевых штамповых испытаний (кроме случаев строительства уникальных сооружений) и в дальнейшем ограничиться только лабораторными методами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Агишев А. И. Зависимость между пористостью и модулем деформации, установленная полевыми исследованиями глинистых грунтов // Основания и фундаменты. М. : Госстройиздат, 1957. № 20. С. 3–6.
2. Горбунов-Посадов М. И., Синельников С. И. Определение значения модуля деформации по величине простейших грунтовых характеристик // Основания и фундаменты. М. : Госстройиздат, 1958. № 21. С. 17–21.
3. Разоренов В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М. : Стройиздат, 1968 г. 183 с.

4. Игнатова О. И. Деформационные характеристики юрских глинистых грунтов Москвы // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2009. № 5. С. 24–28.
5. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М. : Стройиздат, 1983. 248 с.
6. Трофименков Ю.Г., Воробков Л. Н. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М. : Стройиздат, 1981. 216 с.
7. Аверин И. В., Чунюк Д. Ю. Современные методы контроля подготовки грунтового основания в сложных инженерно-геологических условиях Калининграда // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 67–71.
8. Аверин И. В., Кorableва У. А., Каблукова А. В. Исследования процессов уплотнения большой толщи водонасыщенных глинистых грунтов в основании Главного медиацентра Сочи // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 23–27.

REFERENCES

1. Agishev A. I. The relationship between porosity and modular deformations, established by field studies of clay soils. *Osnovaniya i fundamenti* [Bases and foundations]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1957, no. 20, pp. 3–6. (In Russian).
2. Gorbunov-Posadov M. I., Sinelshchikov S. I. Determination of the strain modulus values by the value of the simplest soil characteristics. *Osnovaniya i fundamenti* [Bases and foundations]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1958, no. 21, pp. 17–21. (In Russian).
3. Razorenov V. F. *Penetratsionnye ispytaniya gruntov* [Penetration testing of soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968. 183 p. (In Russian).
4. Ignatova O. I. Diffraction characteristics of the Jurassic clay soils of Moscow. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*, 2009, no. 5, pp. 24–28. (In Russian).
5. Abelev M. Yu. *Stroitel'stvo promyshlennykh i grazhdanskikh sooruzheniy na slabykh vodonasyshchennykh gruntakh* [Construction of industrial and civil structures on weak water-saturated soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 248 p. (In Russian).
6. Trofimenkov Yu.G., Vorobkov L. N. *Polevye metody issledovaniya stroitel'nykh svoystv gruntov* [Field research methods of soil construction properties]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 216 p. (In Russian).
7. Averin I. V., Chyunuk D. Yu. Modern control methods of preparation of earth foundation under complex engineering-geological conditions in the city of Kaliningrad. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2017, no. 10, pp. 67–71. (In Russian).
8. Averin I. V., Korableva U. A., Kablukova A. V. Investigation of processes of compaction of a large bed of water-saturated clayey soils in the base of the main media centre in Sochi. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 4, pp. 23–27. (In Russian).

Для цитирования: Абелев М. Ю., Аверин И. В., Коштева О. В. Сравнение результатов полевых и лабораторных исследований характеристик деформируемости глинистых грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 40–45. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.40-45.

For citation: Abelev M. Yu., Averin I. V., Kohteva O. V. Comparison of Field and Laboratory Studies Results of the Clay Soils Deformability Characteristics. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2019, no. 6, pp. 40–45. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.40-45. ■

НА НАШЕЙ ОБЛОЖКЕ

## Воссоздание Собора Казанской иконы Божией матери

В 2016 г. началось возрождение главного храма города Казани — Собора Казанской иконы Божией матери. Он воссоздается на месте обретения иконы, на территории мужского Богородицкого монастыря, неподалеку от Казанского кремля.

Воссоздание собора предусмотрено по проекту знаменитого русского зодчего И. Е. Старова, по которому он был построен в 1798–1808 гг. Интерьеры, как и само здание, восстанавливаются с максимальной точностью к оригиналу по сохранившимся обмерам храма, а также архивным фотографиям.

Это пятиглавый, квадратный в плане, четырех-

стопный с центральным световым барабаном, с двумя приделами храм. Расчетная вместимость в верхнем храме составляет 600 человек, в пещерном храме — 45 человек. Реставрация подземной части храма заключается в восстановлении пещерного храма, что, в свою очередь, предусматривает комплекс противоаварийных мероприятий.

Проект удостоен Золотого диплома II Всероссийского фестиваля с международным участием «Архитектурное наследие-2019» в номинации «Объекты гражданской архитектуры».