

## МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 630.3; 624.131.43

DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.52

### МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ КАК ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

А.Ю. Виноградов<sup>1,2</sup>, В.И. Каширский<sup>7</sup>,  
И.Ю. Лободенко<sup>4</sup>, О.В. Зубова<sup>2</sup>,  
И.А. Виноградов<sup>1,6</sup>, Е.А. Парфенов<sup>1,2</sup>,  
А.В. Кучмин<sup>1,2</sup>, В.А. Обызов<sup>1,3</sup>,  
А.П. Платонов<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай,  
Россия; <sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный лесотехнический университет  
имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург,  
Россия; <sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Российский  
государственный гидрометеорологический  
университет», г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>4</sup>ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и  
радиационной безопасности», г. Москва, Россия;

<sup>5</sup>ФГБУН «Федеральный исследовательский  
центр «Субтропический научный центр  
Российской академии наук», г. Сочи, Россия;

<sup>6</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный  
университет», г. Москва, Россия;

<sup>7</sup>ФГБУ «Научно-исследовательский институт  
строительной физики» Российской академии  
архитектуры и строительных наук, г. Москва,  
Россия

gd@npogtp.ru

### THE MODULUS OF DEFORMATION AS THE MAIN CHARACTERISTIC OF THE DEFORMATION ABILITY OF SOILS IN THE DESIGN OF STRUCTURES OF THE FOREST COMPLEX

Alexey Yu. Vinogradov<sup>1,2</sup>,  
Vladimir I. Kashirskiy<sup>7</sup>, Ivan Yu. Lobodenko<sup>4</sup>,  
Oksana V. Zubova<sup>2</sup>, Ivan A. Vinogradov<sup>1,6</sup>,  
Evgeni A. Parfenov<sup>1</sup>, Alexey V. Kuchmin<sup>1,2</sup>,  
Victor A. Obyazov<sup>1,3</sup>, Andrey P. Platonov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Scientific and Industrial Research Association  
Gidrotehproekt, Valday, Russia;

<sup>2</sup>Saint Petersburg State Forest Technical University,  
Saint-Petersburg, Russia;

<sup>3</sup>Russian State Hydrometeorological University,  
Saint-Petersburg, Russia;

<sup>4</sup>Scientific and Engineering Centre for Nuclear and  
Radiation Safety, Moscow, Russia;

<sup>5</sup>Federal Research Centre the Subtropical Scientific  
Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi,  
Russia;

<sup>6</sup>National Research Moscow State University of  
Civil Engineering, Moscow, Russia;

<sup>7</sup>Research Institute of Construction Physics of the  
Russian Academy of Architecture and Building  
Sciences, Moscow, Russia

gd@npogtp.ru

**Аннотация.** Для безопасной эксплуатации любых сооружений необходимо на стадии изысканий правильно оценить физико-механические свойства грунтов, на котором они будут располагаться. Согласно нормативным документам, основной деформационной

**Abstract.** For the safe operation of any structures, it is necessary at the survey stage to correctly assess the physical and mechanical properties of the soils. The deformation modulus is used in the design of any construction facilities and is one of the main design parameters of soils. At the same time, the modulus of

Vinogradov A.Yu., Kashirskiy V.I., Lobodenko I.Yu., Zubova O.V., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kuchmin A.V., Obyazov V.A., Platonov A.P. The modulus of deformation as the main characteristic of the deformation ability of soils in the design of structures of the forest complex. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2022, vol. 4, iss. 1, pp. 52–67. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2022.4.1.52](https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.1.52).

характеристикой, позволяющей оценить устойчивость проектируемого сооружения, будь то технологическая автодорога, целлюлозно-бумажный комбинат или реакторное отделение АЭС, является модуль деформации грунта. Модуль деформации используется при проектировании любых строительных и инфраструктурных объектов и является одним из основных расчётных параметров грунтов. При этом определяемый разными способами модуль деформации одного и того же грунта может различаться в несколько раз. В статье проанализированы причины столь большого расхождения в значениях модуля деформации грунтов-аналогов. Вначале оценивается погрешность интерполяции и измерений; рассматриваются различные методики определения модуля деформации. Делается вывод, что результаты компрессионных, штамповых и трёхосных испытаний несравнимы в принципе, поскольку проводятся при различных граничных условиях. При использовании методов определения модуля деформации с различными граничными условиями для приведения результатов к единому знаменателю должны использоваться физически и математически обоснованные переходные коэффициенты. Но авторы считают, что основная проблема состоит в том, что для естественных грунтов данная характеристика является нелинейной функцией трёх независимых аргументов – нормального напряжения, внутреннего давления грунта и площади внешнего воздействия нормального напряжения на грунт. В связи с этим, оцениваемое неким отвлечённым числом значение модуля, не привязанного к нормальному напряжению, признается физически и математически неправомерным. В результате инженерных изысканий проектировщику должна передаваться аппроксимированная или графическая зависимости для различных интервалов нагрузок с учётом глубины заложения фундамента и его площади. Последний, в зависимости от

deformation of the same soil determined in different ways, depending on the method of determination, may differ several times. The article analyzes the reasons for such a large discrepancy in the values of the deformation modulus of one soil. At the beginning, the error of interpolation and measurements is estimated; various methods for determining the modulus of deformation are considered. It is concluded that the results of compression, stamp and triaxial tests are incomparable in principle, since they are carried out under different boundary conditions. When using methods for determining the modulus of deformation with different boundary conditions, physically and mathematically justified transition coefficients should be used to bring the results to a single denominator. However, the authors believe that the main problem is that for natural soils, this characteristic is a nonlinear function of three independent arguments – normal stress, internal pressure of the soil and the area of external influence of normal stress on the soil. In this regard, the value of the module estimated by some abstract number, which is not tied to the normal voltage, is recognized as physically and mathematically illegal.

расчётной нагрузки, которое проектируемое здание или сооружение будет оказывать на грунт, сможет по представленной зависимости провести ориентировочный расчёт проектной осадки здания или устойчивости любого линейного сооружения.

**Ключевые слова:** деформационные характеристики грунтов; модуль деформации; осадка и площадь фундамента; внутреннее давление грунта; испытания грунтов; инфраструктура лесопромышленного комплекса.

### Введение

При проектировании крупных промышленных объектов, зданий, сооружений и дорожной инфраструктуры лесопромышленного комплекса необходимо соблюдать требования федерального закона «О техническом регулировании»<sup>1</sup> в части, соответствующей целям защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества [Виноградов, 2012]. Достичь указанных целей при эксплуатации таких объектов возможно только в том случае, если они будут отвечать своему назначению всё расчётное время эксплуатации, что в свою очередь обеспечивается их устойчивостью.

**Keywords:** deformation characteristics of soils; modulus of deformation; sediment and foundation area; internal soil pressure; soil testing; timber industry infrastructure.

Устойчивость сооружения – способность сооружения или лесохозяйственной дороги противостоять усилиям, стремящимся вывести его из исходного состояния статического или динамического равновесия (РД 03 380 00<sup>2</sup>, СТО-ГК Трансстрой 004-2007<sup>3</sup>, ОДМ 218.4.003-2009<sup>4</sup>), определяемая деформационными свойствами грунтов [Грунтоведение, 1983].

Такой параметр механических свойств грунтов, как модуль деформации  $E$ , необходимо оценивать согласно требованиям всех основных регламентирующих документов:

СП 22.13330.2016<sup>5</sup> (пункты 5.1.16, 5.3.3),  
СП 50-101-2004<sup>6</sup> (пункт 5.3.1),  
СП 23.13330.2018<sup>7</sup> (пункт 5.4),  
СП 243.1326000.2015<sup>8</sup>,  
СП 288.1325800.2016<sup>9</sup>,

<sup>1</sup>Федеральный закон Российской Федерации от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901836556>.

<sup>2</sup>РД 03-380-00. Руководящие документы Госгортехнадзора России. Инструкция по обследованию шаровых резервуаров и газгольдеров для хранения сжиженных газов под давлением [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026046>.

<sup>3</sup>СТО-ГК Трансстрой 004-2007. Стандарт организации. Металлические пролетные строения. Навесной и полунавесной монтаж [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200051834>.

<sup>4</sup>ОДМ 218.4.003-2009. Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по объединению металлических балок с монолитной железобетонной плитой посредством непрерывных гребенчатых упоров в сталежелезобетонных пролетных строениях мостов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200074366>.

<sup>5</sup>СП 22.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206>.

<sup>6</sup>СП 50-101-2004. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200038307>.

<sup>7</sup>СП 23.13330.2018. Свод правил. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553863425>.

<sup>8</sup>СП 243.1326000.2015. Свод правил. Проектирование и строительство автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128150>.

<sup>9</sup>СП 288.1325800.2016. Свод правил. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069592>.

СП 248.1325800.2016<sup>10</sup>,  
СП 446.1325800.2019<sup>11</sup>.

Модуль деформации – важнейший параметр грунта, используемый при проектировании любых строительных и инфраструктурных объектов. Согласно требованиям федеральных норм и правил при проектировании любых объектов, не только в области лесного хозяйства, но и даже в столь специфической области как использование атомной энергии (НП-064-17<sup>12</sup>), модуль деформации является одним из основных расчётных параметров грунтов.

Цель работы – определить точность и правильность количественной оценки основной деформационной характеристики грунтов – модуля деформации – при проектировании промышленных объектов, зданий, сооружений и дорожной инфраструктуры лесопромышленного комплекса при полевых и лабораторных исследованиях.

### Определения и методы

Массив грунта чаще всего представлен чередованием нескольких видов грунтов с различными характеристиками. Для облегчения расчётов толщу грунтов разделяют на инженерно-геологические элементы (далее – ИГЭ).

За ИГЭ принимают некоторый объём грунта одного и того же происхождения, подвида или разновидности по ГОСТ 25100-2020<sup>13</sup> при условии, что значения характеристик грунта изменяются в пределах ИГЭ случайно либо наблюдающаяся закономерность такова, что ею можно пренебречь. ИГЭ наделяют постоянными

нормативными и расчётными значениями характеристик согласно ГОСТ 20522-2012<sup>14</sup>.

Разнородные грунты, различающиеся значениями каждой из характеристик (объёмного веса  $\rho_d$ , угла внутреннего трения  $\varphi$  и сцепления  $c$ ) не более чем на 20%, допускается рассматривать, например в ВСН 136-78<sup>15</sup> (приложение 11), как однородный грунт со средневзвешенными значениями характеристик.

Модулем деформации  $E$  называется отношение вертикальной нагрузки  $\sigma_z$  к вызываемой ею *относительной* вертикальной деформации  $e$  [Цытович, 1983]:

$$E = \sigma_z / e$$

где  $e$  – *относительная* деформация, равна отношению величины абсолютного уменьшения высоты нагруженного образца к его начальной высоте  $e = \Delta h / h_0$ .

Второй вариант: отношение вертикальной нагрузки к вызываемой ею *полной* вертикальной деформации [Пономарев и др., 2015]. На наш взгляд, между этими двумя определениями существует принципиальная разница. Даже в размерности терминов *относительной* и *полной* деформации: первая величина – безразмерная, вторая – метры.

Модуль общей деформации грунта  $E$  учитывает упругие и остаточные деформации грунта.

Модуль упругости  $E$  — в литературе определяется как «*константа* материала, которая характеризует упругие свойства материала» (ГОСТ 25100-2020<sup>13</sup>). То есть модуль деформации и модуль упругой деформации

<sup>10</sup>СП 248.1325800.2016 Свод правил. Сооружения подземные. Правила проектирования [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200137144>.

<sup>11</sup>СП 446.1325800.2019. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561027906>.

<sup>12</sup>НП-064-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556170189>.

<sup>13</sup>ГОСТ 25100-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>.

<sup>14</sup>ГОСТ 20522-2012. Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200096130>.

<sup>15</sup>ВСН 136-78. Ведомственные строительные нормы. Инструкция по проектированию вспомогательных сооружений и устройств для строительства мостов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005777>.

считаются постоянными характеристиками грунта [Беликов, 2013].

Модуль деформации является основной деформационной характеристикой и используется для расчётов осадок сооружений по методикам:

- линейно деформируемого слоя;
- модели упрочняющегося грунта.

Во втором случае расчёты осадок фундаментов проводят с использованием законов нелинейной механики грунтов, однако в этом случае необходимы более сложные модели грунта с большим количеством характеристик, определяемых опытным путём (СП 47.13330.2016<sup>16</sup>, ГОСТ Р 59958-2021<sup>17</sup>), с использованием программных средств, таких как например Plaxis<sup>18</sup>.

В работе использованы материалы геологических изысканий, используемых в производственной деятельности ООО НПО «Гидротехпроект».

В качестве примера приведены значения модуля деформации для выделенного ИГЭ (Тверская область) с условным номером ИГЭ-20, представленного среднечетвертичными ледниковыми отложениями (gIms), состоящими из глины лёгкой пылеватой, полутвёрдой консистенции, тёмно-коричневой, известковистой, с включениями до 5% гравия, щебня и отдельных валунов, среднедеформируемой, слабопучинистой с показателем текучести 0,1 и коэффициентом пористости 0,63. Грунты-аналоги повсеместно распространены в зоне тайги Российской Федерации.

В дальнейшем в тексте статьи приводятся расчётные данные для данного связного грунта, если не оговорено иное.

Полевые и лабораторные исследования проводились в различные годы, результаты представлены в таблице 1.

### Результаты и обсуждение

В таблице 2 приведены нормативные значения модуля деформации (Таблица Б.3 СП 22.13330.2016<sup>5</sup>) для связных грунтов четвертичных отложений при показателе текучести  $L_L=0,1$  и коэффициенте пористости  $e=0,63$  (расчёт проводился методом интерполяции). Значение нормального напряжения  $\sigma_z$ , для которого определён модуль деформации, в таблице СП 22.13330.2016 не приводится.

Различие в табличных нормативных значениях модулей деформации для различных типов грунтов не превышает 50%, в то время как различие в значениях модулей деформации одного ИГЭ в пределах одного участка на близкой глубине залегания составляет 300% и более (таблица 1).

Возникает вопрос о причинах столь большого различия полученных значений. Отличие модуля деформации различных видов грунтов – аллювиальных глинистых четвертичных отложений супесчаных – 18 и 25 МПа (таблица 2) – меньше, нежели отличие для одного ИГЭ – 12,6 и 44 (таблица 1). Расхождения могут быть вызваны несколькими причинами, которые обычно имеют место в комплексе.

<sup>16</sup>СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456045544>.

<sup>17</sup>ГОСТ Р 59958-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Грунты. Метод определения пределов прочности и модуля деформации при испытании сосредоточенной нагрузкой [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182318>.

<sup>18</sup>Plaxis 3D Tunnel. Material Models. Manual. Version 2. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/3D%20Tunnel%20Introductory/Manuals/Mat%20Man%20\(UK\)3D.pdf](https://www.civil.iitb.ac.in/~ajuneja/Plaxis%20program/3D%20Tunnel%20Introductory/Manuals/Mat%20Man%20(UK)3D.pdf).

**Таблица 1.** Модуль деформации ИГЭ-20, определённый в различные годы различными лабораториями. Значения нормального напряжения  $\sigma_z$ , для которых определялся модуль деформации, не приводятся.

**Table 1.** IGE-20 deformation modulus determined in different years by different laboratories. The values of  $\sigma_z$  for which the deformation modulus was determined are not given.

год	1977		1985	2002		2019			Нормативное экстраполированное	
	Компрессионный	Штамповый	Общий	Компрессионный	Общий	Компрессионный	Дилатометрический	Штамповый		
ИГЭ-20	43	38	28	12,6	44	12,5	23,8	22	21,1	32

**Таблица 2.** Нормативные значения модуля деформации связных нелессовых грунтов при  $I_L=0,1$ ;  $e=0,63$ .

**Table 2.** Normative values of the deformation modulus of connected nonless grounds at  $I_L=0.1$ ;  $e=0.63$ .

Возраст	Происхождение	Наименование	Е, МПа
Четвертичные отложения	Аллювиальные, делювиальные озёрные, озёрно-аллювиальные	Супеси	18
		Суглинки	23
		Глины	25
	Флювиогляциальные	Супеси	18
		Суглинки	28

Первой причиной является погрешность интерполяции и измерений. Геологическая погрешность интерполяции – погрешность определения положения геологических границ на инженерно-геологическом разрезе при расстоянии между скважинами до 40 м достигает 5% [Чернышев, Мартынов, 2018].

Погрешность измерений складывается из различий размеров испытуемого образца и сжимаемого грунтового слоя в основании сооружения, типа и неоднородности грунта, несоответствия напряжений и деформаций, скорости нагружения, ступеней нагрузки и времени релаксации, нарушения внутреннего напряжения грунта и свойств образцов при отборе, хранении и подготовке к испытаниям, влияния трения грунта о стенки колец и отсутствия бокового расширения.

Следует отметить, что многими учёными и исследователями указывается на существенное влияние отбора образцов ненарушенной (малонарушенной) структуры для лабораторных исследований. Так, например, профессор Г.Г. Болдырев в своей монографии указывает на то, что лабораторные образцы, вырезанные из монолитов, имеют больший коэффициент пористости (меньшую плотность), чем в полевых условиях (in situ). То есть по результатам обработки лабораторных испытаний грунтов получаются меньшие значения их механических характеристик и более высокая сжимаемость по сравнению с грунтами-аналогами природного сложения [Болдырев, 2014].

Ошибка внутрилабораторной воспроизводимости  $E_{0,1-0,2}$  составляет 23%, межлабораторной воспроизводимости – 27%, суммарно – 36%. Для интервала  $E_{0,2-0,3}$ ,

<sup>19</sup>ТСН 50-304-2001. Система нормативных документов в строительстве. Московские городские строительные нормы. Основания, фундаменты и подземные сооружения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031863>.

соответственно, 19, 22 и 29%. Погрешность использования различных типов приборов не превышает 5% [Дмитриев, Ярг, 2008]. Суммарная погрешность определения по одной и той же методике модуля деформации одного ИГЭ, следовательно, колеблется в пределах 20–50%.

Вторая причина кроется в неоднозначности трактовки понятия «модуль деформации». Значения модуля деформации в столбцах таблицы 1 получены разными методами, но в соответствующей обобщающей документации (например, итоговый отчет по инженерно-геологическим изысканиям) они приведены без всяких пояснений, в итоговой таблице даже не приводятся методы лабораторной оценки. Чтобы оценить их согласованность, нам пришлось провести некоторый дополнительный анализ.

Под термином «модуль деформации» может пониматься:

*Одометрический модуль деформации*  $E_{oed}$  – отношение изменения напряжения к соответствующему изменению деформации в заданном интервале напряжений (пункт 3.1 ГОСТ 20522-2012<sup>14</sup>).

Одометрический модуль деформации  $E_{oed}$  в заданном интервале давлений вычисляют с точностью до 1,0 МПа по формулам

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad E_{oed} = \frac{1 + e_0}{m_0} \quad (1)$$

где  $\Delta\varepsilon$  – изменение относительной деформации, соответствующее  $\Delta\sigma$ ;

$m_0$  – коэффициент сжимаемости, соответствующий  $\Delta\sigma$  (пункт 10.4 ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup>).

*Компрессионный модуль деформации:*

$$E_{\text{компр}} = E_{oed}\beta; \quad \beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент стеснения поперечной деформации.

Для характеристики сжимаемости используют *модуль общей деформации*

$$E_0 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{e_2 - e_1}$$

где  $e_1$  и  $e_2$  – относительные деформации, соответствующие нагрузкам  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ .

Модуль общей деформации связан с коэффициентом сжимаемости зависимостью:

$$E = \frac{1 + e_0}{m_0}$$

уже без  $\beta$  [Справочник по инженерной геологии, 1974].

Коэффициент сжимаемости  $m_0 = \Delta e / \Delta\sigma$  характеризует изменение коэффициента пористости при изменении нагрузки. Из приведенной зависимости этого не следует. В данном случае, видимо путаются понятия коэффициента сжимаемости и относительной деформации.

По [Дмитриев, Ярг, 2008] модуль общей деформации связан с коэффициентом уплотнения зависимостью:

$$E = \frac{\beta(1 + e_0)}{m_0} = E_{\text{компр}}\beta \quad (3)$$

Коэффициент сжимаемости [Каган, 1973],  $m_0$ , – величина обратная модулю общей деформации. В первом случае коэффициент уплотнения величина безразмерная [Дмитриев, Ярг, 2008], во втором имеет размерность – 1/МПа, там же, двумя строками ниже! Впрочем, в пункте 10.3 ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup> размерность  $m_0$  – МПа, что математически опровергается формулой 3, приведенной строкой ниже (страница 6 ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup>).

Если исходить из (2) и (3), модуль общей деформации [Дмитриев, Ярг, 2008] связан с одометрическим модулем (ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup>) зависимостью  $E_{\text{компр}} = E_{oed}\beta^2$ , что на наш взгляд является ярким показателем полной неразберихи в рассматриваемом вопросе.

Сравнение результатов  $E_{oed}$ , представленные грунтовой лабораторией и рассчитанные нами на основании первичных данных той же лаборатории представлены в таблице 3.

<sup>20</sup>ГОСТ 12248.4-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566409071>.

**Таблица 3.** Одометрический модуль деформации, лабораторные значения и рассчитанный нами по ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup> по первичным данным лаборатории.

**Table 3.** Odometric modulus of deformation, laboratory values and calculated by authors according to GOST 12248.4-2020 using to primary laboratory data.

	Р, МПа	Относительная деформация	$e$	$m_0, 1/\text{МПа}$		$E_{\text{од}}, \text{МПа}$	
				Лабораторное	Расчётное	Лабораторное	Расчётное
Скважина 3	0	0	0,642	-	-	-	-
$\rho, \text{г/см}^3$	2,04	0,05	0,0047	0,155	0,160	10,6	10,6
$I_p$	21	0,1	0,0093	0,149	0,140	11	10,8
$h, \text{м}$	14,1	0,2	0,0176	0,136	0,140	12	11,4
		0,3	0,0256	0,131	0,130	12,5	11,7
		0,4	0,0331	0,124	0,120	13,2	12,1
Скважина 4	0	0	0,604	-	-	-	-
$\rho, \text{г/см}^3$	2,06	0,05	0,0068	0,219	0,218	7,3	7,4
$I_p$	18,4	0,1	0,0131	0,201	0,202	8	7,6
$h, \text{м}$	15,4	0,2	0,0245	0,183	0,183	8,8	8,2
		0,4	0,0447	0,162	0,162	9,9	8,9
		0,6	0,0615	0,134	0,135	11,9	9,8
Скважина 12	0	0	0,555	-	-	-	-
$\rho, \text{г/см}^3$	2,12	0,05	-0,005	-0,143	-0,156	-10,9	-10,0
$I_p$	19,7	0,1	-0,003	0,05	0,062	31,3	-33,3
$h, \text{м}$	12,3	0,2	0,0074	0,161	0,162	9,7	27,0
		0,3	0,0146	0,113	0,112	13,8	20,5
		0,4	0,021	0,1	0,100	15,6	19,0
		0,6	0,0323	0,087	0,088	17,8	18,6

Различие между лабораторными и нашими результатами составляет от 0 до 18%, за исключением 12 скважины, где различие модулей деформации для давления 0,2 МПа почти трёхкратное. Причины таких расхождений представляются нам непонятными, поскольку расчёт был произведён в строгом соответствии с ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup>. Приведённые расхождения выходят за рамки анализа, проведённого в [Дмитриев, Ярг, 2008] и увеличивают суммарную погрешность определения модуля деформации ещё как минимум на 10%. Последующее использование коэффициента стеснения поперечной деформации  $\beta$  (формула 3), принимаемого субъективно постоянным при любых значениях  $\sigma_z$  с неизвестной

погрешностью, сводит весь метод к некоему качественному значению, которое мы, на основании вышеизложенного, в принципе не должны принимать во внимание. Практическая неприменимость расчётного значения  $E_{\text{компр}}$ , полученного методом, описанным в ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup>, наглядно проиллюстрирована в таблице 4. Согласно ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup> значение  $\beta$  для всех градаций осевого давления принято равным 0,4 [Справочник проектировщика, 1985]. Коэффициент Пуассона пересчитан обратным путём на основании лабораторных данных по зависимости (2). Надо иметь в виду, что исходя из зависимости (2),  $\beta \leq 1$ , поскольку  $\mu$  при значениях  $\beta > 1$  не определяется.



**Таблица 4.** Значения  $\beta$  для ИГЭ-20, полученные обратным путем из сравнения результатов компрессионных и трехосных испытаний для различных значений бытовой пригрузки  $\sigma_v$ .

**Table 4.**  $\beta$  values for IGE-20 obtained in the reverse way from a comparison of the results of compression and triaxial tests for different meanings  $\sigma_v$ .

$\sigma_z$	Компрессионные $\sigma_v$			$\beta$			$\mu$	Трёхосное $\sigma_v$
	1	2	3					
	0,268	0,258	0,25	1	2	3	Среднее	0,278
0,3	0,00097	0,00103	0,00136	0,94	1,00	1,32	0,16	0,00103
0,4	0,00119	0,00119	0,00158	0,58	0,58	0,77	0,37	0,00206
0,5	0,00134	0,00132	0,00172	0,24	0,24	0,31	0,45	0,00551
0,6	0,00149	0,00144	0,00186	0,12	0,11	0,14	0,48	0,01294
0,65	0,00154	0,001475	0,001905	0,08	0,08	0,10	0,49	0,01896

**Таблица 5.** Дилатометрический модуль деформации, лабораторные значения ИГЭ-20 и значения, рассчитанные нами по ГОСТ 12248.3-2020<sup>21</sup> по первичным данным лаборатории.

**Table 5.** Dilatometric modulus of deformation, laboratory values of IGE-20 and values calculated by authors according to GOST 12248.3-2020 using to primary laboratory data.

№ сква- жины	Н, м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_v$ , МПа	Относительная вертикальная деформация	E, МПа			
						расчётная, в интервале			лабора- торная
						0,5–0,6	0,3–0,5	0–разру- шение	
6	17,4	2 070	0,675	0,278	0,17	2,1	6,3	4,0	21,9
14	15,5	2 020	0,721	0,3	0,122	7,1	16,7	5,9	25,5
16	15,1	1 940	0,436	0,242	0,048	-	3,4*	9,1	20,7

\* в диапазоне 0,3–0,436 МПа

Приведённые лабораторные методы определения модуля деформации полностью ограничивают возможности бокового расширения грунта при нормальной нагрузке.

*Дилатометрический модуль деформации*  $E_D$ . Значения модуля дилатометрической деформации  $E_D$  и коэффициент поперечной деформации  $\mu$  вычисляются по формулам:

$$E_D = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1}; \mu = \frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1}; \Delta\varepsilon_3 = \frac{\Delta\varepsilon_v - \Delta\varepsilon_1}{2} \quad (4)$$

где  $\Delta\sigma_1$  – приращение вертикального напряжения в заданном диапазоне МПа (Приложение Ж ГОСТ 12248.3-2020<sup>21</sup>);

$\Delta\varepsilon_1$ ,  $\Delta\varepsilon_3$  – приращение относительных вертикальной и поперечной деформаций образца, д.е.;

$\Delta\varepsilon_v$  – приращение относительной объёмной деформации образца, д.е. (пункт 9.9 ГОСТ 12248.3-2020<sup>21</sup>).

В таблице 5 представлены лабораторные и пересчитанные нами результаты.

Данный лабораторный метод определения модуля деформации позволяет получить боковое расширение грунта при нормальной нагрузке. Ограничением бокового расширения является искусственно создаваемое встречное давление, обычно задаваемое близким естественному давлению грунта на заданной глубине.

В приведённом примере расчёт по промежуточным лабораторным результатам проведён по ГОСТ 12248.3-2020<sup>21</sup>, к полученному по формуле (4) результату дополнительных множителей по аналогии с коэффициентом стеснения поперечной деформации не

<sup>21</sup>ГОСТ 12248.3-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566409062>.

применяется. Результат, полученный нами, отличается от представленного лабораторией в 2–5 раз.

Поскольку осадки в критической фазе нагрузок «становятся неравномерными и порывистыми, эпюра осадок приобретает неправильный характер» [Герсеванов, 1948], следовательно, повышать нагрузку до полного разрушения образца вряд ли целесообразно, поскольку это ведёт к завышению значения  $\sigma_z$  как минимум на 10–15%.

Модуль деформации  $E_{RST}$  по данным полевых штамповых испытаний, например винтовым штампом площадью 600 см<sup>2</sup>, вычисляются по формуле

$$E_{RST} = (1 - \mu^2)K_p K_1 d \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta e} \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент поперечного расширения (Пуассона), принимаемый равным 0,30 для песков и супесей; 0,35 – для суглинков; 0,42 – для глин;

$K_p$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от заглубления штампа  $h/d$  ( $h$  – глубина расположения штампа относительно дневной поверхности грунта, м;  $d$  – диаметр штампа, м);

$K_1$  – коэффициент, принимаемый для жёсткого круглого штампа равным 0,79;

$\Delta e$  – осадка штампа, м [пункт 5.5 ГОСТ 20276.1-2020<sup>22</sup>].

Толщина лопасти винтового штампа  $f=1$  см, рекомендуемая таблицей Б.1 ГОСТ 20276.1-2020<sup>22</sup>, может привести к её изгибанию при нагрузках более 0,5 МПа [Каширский, 2005].

Несмотря на эти замечания, данный метод является полевым и даёт наиболее адекватные результаты.

Сравнительные результаты модулей деформации, полученные различными испытаниями и пересчитанные нами, сведены в таблице 6.

На наш взгляд, все полученные значения модуля деформации должны быть приведены к общему знаменателю, причём подобный пересчёт должен быть обоснован. В рассмотренных лабораторных протоколах такой результат недостижим в силу расчёта модулей деформации при априори различных, заранее не оговорённых, значениях нормальных (осевых) напряжений. В качестве иллюстрации вышесказанному приведена таблица 7, где представленные значения модуля деформации при различных осевых напряжениях. Подобная несурязица отмечена и в [Дмитриев, Ярг, 2008], где предлагается рассчитывать модуль деформации в определённом интервале (например, 0,1–0,3 МПа). Один этот шаг, по данным [Дмитриев, Ярг, 2008], уменьшит погрешность определения модуля деформации на 5–7%.

**Таблица 6.** Сводные значения модуля деформации, с результатами нашего пересчёта по первичным данным лаборатории, МПа.

**Table 6.** Comparative values of the deformation modulus, with the results of author's recalculation according to the primary laboratory data, MPa.

$E_{oed}$		$E_D$		$E_{RST}$	
Лаборатория	Наш пересчёт	Лаборатория	Наш пересчёт	Лаборатория	Наш пересчёт
26,9	21,2	22,7	6,3	21,6	21,6

<sup>22</sup>ГОСТ 20276.1-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Метод испытания штампом [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174754>.

**Таблица 7.** Расчётные величины модуля деформации ИГЭ-20 для различных значений  $\sigma_z$ .**Table 7.** Calculated values of the deformation modulus of IGE-20 for various values of  $\sigma_z$ .

Виды испытаний	№ скважины;	глубина отбора проб, м	E, МПа, при $\sigma_z$ :		
			$\sigma_z=0,1$	$\sigma_z=0,2$	$\sigma_z=0,4$
Одометрический	4,	h=14,1	10,8	11,4	12,1
	3,	h=15,4	7,6	8,2	8,9
	15,	h=15,1	9,5	10,0	10,5
	12,	h=12,3	33,3	27,0	19,0
Трёхосные	6,	h=17,4	50,0	28,6	28,6
	14,	h=15,5	66,7	50,0	44,4
	16,	h=15,1	40,0	33,3	14,8
Штамповый	7,	h=9,1	29,3	26,0	24,1
	12,	h=11	36,0	27,7	23,6
	14,	h=12	66,3	31,9	24,3

Третья причина выражается в том, что для большинства естественных грунтов модуль деформации является функцией давления. Поскольку функциональная зависимость модуля от напряжения не линейна, задавать таковой одним фиксированным значением для проведения любых предпроектных расчётов по меньшей мере некорректно.

Четвертая причина. Вертикальная нагрузка  $\sigma_z$  определяется как нормальная сила, приложенная к площади среза монолита при лабораторных или штампа при полевых испытаниях.

Испытание грунта штампом (пункт 5.1.1 ГОСТ 20276.1-2020<sup>22</sup>) проводят для определения следующих характеристик деформируемости дисперсных грунтов:

...

- модуля деформации  $E$ ;

...

Штампы, согласно ГОСТ 20276.1-2020<sup>22</sup>, жёсткие, круглой формы, следующих типов:

I – с плоской подошвой площадью 2 500 и 5 000 см<sup>2</sup>;

II – с плоской подошвой площадью 1 000 см<sup>2</sup> с кольцевой пригрузкой по площади, дополняющей площадь штампа до 5 000 см<sup>2</sup>;

III – с плоской подошвой площадью 600 см<sup>2</sup>;

IIIa – с плоской подошвой площадью 600 см<sup>2</sup> и встроенным зачистным устройством;

IV – винтовой штамп площадью 600 см<sup>2</sup>.

Тип и площадь штампа, согласно пункту 5.2.4 ГОСТ 20276.1-2020<sup>22</sup>, назначают в зависимости от вида, подвида или разновидности испытываемого грунта по таблице 8.

Испытания *методом трёхосного сжатия* в условиях осесимметричного нагружения (пункт 5.1 ГОСТ 12248.3-2020<sup>21</sup>) проводят для определения характеристик прочности и деформируемости дисперсных грунтов, включая модуль деформации  $E$ . Образцы должны иметь форму цилиндра диаметром не менее 35 мм и отношением высоты к диаметру от 1,85 до 2,25. Диаметр образца выбирается так, чтобы максимальный размер включений не превышал 1/6 его диаметра. В нашем конкретном случае диаметры образцов составляли 7,1–7,2 см (площадь 39,6–40,7 см<sup>2</sup>).

Метод компрессионного сжатия (пункт 5.2 ГОСТ 12248.4-2020<sup>20</sup>) проводят для определения секущего одометрического модуля деформации  $E_{од}$ . Образец грунта должен иметь форму цилиндра диаметром не менее 70 мм и отношение диаметра к высоте должно составлять от 2,8 до 3,5. Максимальный размер фракции грунта (включений, агрегатов) в образце должен быть не более 1/5 высоты образца. В нашем случае, площадь кольца – 40,0 см<sup>2</sup>.

**Таблица 8.** Тип и площадь штампа в зависимости от вида, подвида или разновидности грунта.**Table 8.** Type and area of the stamp depending on the type, subspecies or variety of ground.

Грунты	Положение штампа относительно уровня подземных вод	Глубина испытания	Место проведения испытания	Штамп	
				Тип	Площадь, см <sup>2</sup>
Крупнообломочные пески; глинистые при любых значениях показателя текучести	На уровне подземных вод и выше	По всей толще	В котловане, шурфе, дудке	I	5 000
				I	2 500
				II	1 000
Просадочные при испытаниях с замачиванием	Выше уровня подземных вод	По всей толще	В котловане, шурфе, дудке	I	5 000
Крупнообломочные; пески плотные; глины и суглинки с $I_L \leq 0,5$ ; супеси с $I_L \leq 0$	На уровне подземных вод и выше	По всей толще	В забое скважины	III	600
Глинистые с $I_L < 0,25$	Ниже уровня подземных вод	По всей толще	Ниже забоя скважины	IIIa	600
Пески; глинистые при любых значениях показателя текучести	На уровне подземных вод и выше	По всей толще	Ниже забоя скважины (без обсадки)	IV	600
Органо-минеральные и органические	Ниже уровня подземных вод	По всей толще	Ниже забоя скважины (с обсадкой)	IV	600
Глинистые с $I_L > 0,5$ ; органо-минеральные и органические	Выше и ниже уровня подземных вод	До 10 м	В массиве без бурения скважины		

Поскольку вертикальная деформация является функцией не только нормального давления, но и площади прикладываемой нагрузки (или площади среза исследуемого образца грунта), то получаемые значения модуля без приведения к некоторой условной единичной площади являются несравнимыми.

Пятая причина заключается в том, что модуль деформации помимо функциональной зависимости от нормального давления и площади его приложения является функцией внутреннего давления грунта.

Результаты полевых и лабораторных исследований модуля деформации глин ИГЭ-20 сведены в таблице 9.

Табличные данные для скважины 6339 даны в интервале нагрузок 0,3–0,5/0,5–0,8 МПа. Соответствующие расчётные – второй строчкой в том же столбце.

Для штамповых испытаний – в интервале нагрузок 0,3–0,5 МПа. Расчётные данные – для соответствующих интервалов 0–0,3; 0,3–0,4; 0,4–0,5; 0,5–0,6 и 0–0,6 МПа.

Для трёхосных испытаний – в 10 столбце – модуль, соответствующий нормальному давлению, при котором произошло разрушение пробы. Для скважины 6339 – 1 МПа, для штамповых испытаний – 0,8 МПа. В 11 столбце даны данные модуля общей деформации  $E$ , а также модуля общей деформации  $E_{0,50}$ .

Показательны сравнительные значения модуля деформации трёхосных и штамповых испытаний для близкого естественного давления: 37,5 и 27,6 МПа для осевого давления 0,3 МПа; 15,1 и 18,0 МПа для осевого давления 0,4 МПа. При давлении  $\sigma_z$  равном 0,5 МПа, образец при консолидированно-дренированном испытании в условиях трехосного сжатия разрушен, в естественных условиях – значение модуля деформации составило 22,5 МПа. Таким образом, для одного ИГЭ, находящегося в условиях одинакового естественного напряжения, модуль деформации по данным лабораторных и полевых испытаний может иметь значительное различие.

**Таблица 9.** Сравнение модулей деформации при различных испытаниях для различных значений внутреннего давления  $\sigma_v$

**Table 9.** Comparison of deformation modules under different tests for different values of internal pressure  $\sigma_v$

Номер скважины	Глубина испытаний h, м	$\sigma_v$ , МПа	Вид испытаний	S, см <sup>2</sup>	Значение модуля деформации при $\sigma_z$ , МПа						
					0,3	0,4	0,5	0,6	При разрушении или максимуме	В отчёте по геологическим изысканиям	Среднее значение
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	15,1	0,242	Трёхосное	40	37,5	15,1	-	-	9,1	20,7/13,4	20,6
6	17,4	0,278			50,0	29,6	13,5	6,9	4,0	21,9/8,4	20,8
14	15,5	0,3			40,0	44,4	26,3	17,4	5,9	25,5/16,9	26,8
7	9,1	0,177	Штамповое	600	23,8	25,2	19,1	11,0	19,4	21,8	19,7
12	11	0,213			22,1	29,3	22,1	11,9	13,4	25,2	19,7
10	12	0,244			27,6	18,0	22,5	11,4	14,2	20,0	18,7
3	14,1	0,259	Одометрическое	40	11,7	12,1	-	-	-	-	11,9
4	15,4	0,287			8,3	8,9	9,3	9,8	-	-	9,1
15	15,1	0,299			10,3	10,5	-	-	-	-	10,4
6339	18,3	0,359	Компрессионное	60	5,6	6,3	7,2	8,1	11,4	9,3/14,5 13,3/23,1	7,7
6339	19	0,373			7,3	8,3	9,4	10,3	14,3	14,1/22,0 16,7/27,3	9,9
6339	19,2	0,378			7,7	8,3	9,3	10,0	20,7	12,6/20,3 13,3/21,4	11,2

Шестая причина. Сами результаты компрессионных, штамповых и трёхосных испытаний несравнимы в принципе, поскольку проводятся при различных граничных условиях. При компрессионных лабораторных испытаниях боковое расширение грунта при нормальной нагрузке жёстко ограничено, что ведёт к затуханию осадки с ростом нормального давления. В полевых природных условиях (штамповые испытания) боковое сопротивление грунта имеет переменную величину; при лабораторных трёхосных испытаниях – некую постоянную, близкую к природному естественному давлению грунта на глубине проведения полевого исследования.

Следующий, на наш взгляд, принципиальный момент. В определении самого понятия «модуль деформации» заложена некоторая неопределённость. Что такое «относительная вертикальная деформация»?

В руководящих документах – утратившем силу СП 47.13330.2012 (пункт 6.3.15), как и в действующем СП 47.13330.2016<sup>23</sup>, – определено, что для расчётов осадок проектируемых зданий и сооружений необходимо, в первую очередь, пользоваться данными полевых испытаний грунтов – в нашем случае штамповым апробированием. Справедливо считается, что значение модуля деформации грунта, полученное с помощью лабораторных испытаний монолитов, не соответствует действительному, так как извлечение образца грунта из скважины или шурфа сопровождается уменьшением напряжений в скелете образца грунта и снижением до нуля давления в поровой воде. Поэтому фактически компрессионные испытания проводятся с образцами грунта нарушенной структуры, что ведёт к занижению значения модуля деформации [Далматов, 1988; Болдырев, 2014; Пыхтеева, Букша, Миронова, 2018].

<sup>23</sup>СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456045544>.

Другие способы определения состояния и свойств грунтов (лабораторные, геофизические) используются как вспомогательные (пункт 6.3.10 СП 47.13330.2016<sup>23</sup>).

При полевых штамповых испытаниях мы получаем непосредственно осадку в зависимости от нагрузки, то есть как раз ту информацию, которая и нужна проектировщику.

Но эту информацию мы затем сознательно искажаем путём введения неопределённых эмпирических коэффициентов, чтобы выйти через *относительную* вертикальную деформацию к искомому модулю.

В случае интерпретации результатов лабораторных работ, проводимых с монолитами различных размеров, действительно обосновано приведение результатов к общему знаменателю, что объясняет подобный шаг. Однако, с точки зрения инженера-проектировщика, логичнее было бы наоборот полученное лабораторным путём значение нефункционального «модуля *относительной* деформации» приводить к модулю «*истинной* деформации», получаемому при полевых штамповых испытаниях («неправильное» определение модуля [Пономарев и др., 2015]).

### Выводы

Модуль деформации является нелинейной функцией трёх независимых переменных – нормального давления  $\sigma_z$ , естественного

### Литература

Беликов Г.И. Центральное растяжение и сжатие стержней: общие сведения, решения задач, задания: учебно-практическое пособие [Электронный ресурс]. URL: [https://vgasu.ru/attachments/oi\\_belokov-01.pdf](https://vgasu.ru/attachments/oi_belokov-01.pdf).

Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: Прондо, 2014. 812 с.

Виноградов А.Ю. К вопросу о необходимости технического регулирования в инженерных изысканиях // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2012. № 4. С. 92–95.

внутреннего давления грунта на глубине обследования  $\sigma_v$ , толщины лопасти и площади штампа (лабораторного образца). Задавать одним числом значение функции, утверждая, что оно является константой и в полной мере характеризует деформационные свойства грунта, на взгляд авторов, – недостаточно обосновано.

В случае использования методов определения модуля деформации с различными граничными условиями для приведения результатов к единому знаменателю должны использоваться физически и математически обоснованные переходные коэффициенты.

В результате проведённого анализа можно констатировать, что использовать величину модуля общей деформации для расчёта деформаций от действий статических нагрузок без указания диапазона его определения допустимо только для некоторой отвлечённой качественной экспресс-оценки возможных осадок. По результатам инженерных изысканий проектировщику передаётся аппроксимированная или графическая зависимость для различных интервалов нагрузок. Проектировщик, в зависимости от расчётной нагрузки, которое проектируемое здание или сооружение будет оказывать на грунт, выполняет по представленной зависимости предварительный расчёт проектной осадки здания или устойчивости любого линейного сооружения.

### References

Belikov G.I. *Tsentral'noe rastyazhenie i szhatie stержней: obshchie svedeniya, resheniya zadach, zadaniya: uchebno-prakticheskoe posobie* [Central stretching and compression of rods: general information, problem solving, tasks: educational and practical guide]. URL: [https://vgasu.ru/attachments/oi\\_belokov-01.pdf](https://vgasu.ru/attachments/oi_belokov-01.pdf) (In Russian).

Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov s kommentariyami k GOST 12248-2010* [Methods for determining the mechanical properties of soils with comments to GOST 12248-2010]. Moscow, Publ. Prondo, 2014. 812 p. (In Russian).

- Герсеванов Н.М. Собрание сочинений в 2 т. Том 1. Свайные основания и расчет фундаментов сооружений. М.: Стройвоенмориздат, 1948. 270 с.
- Грунтоведение / Под общей редакцией Е.М. Сергеева. М.: Издательство МГУ, 1983. 212 с.
- Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л.: Стройиздат, 1988. 415 с.
- Дмитриев В.В., Ярг Л.А. Методы и качество лабораторного изучения грунтов: учебное пособие. М.: КДУ, 2008. 542 с.
- Каган А.А. Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов. Назначение, методы определения. Л.: Стройиздат, 1973. 144 с.
- Каширский В.И. Методика исследования состава и свойств дисперсных грунтов полевными методами в условиях мегаполиса: На примере г. Москвы. Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.: ФГУП ПНИИИС, 2005. 26 с.
- Пономарев А.Б., Захаров А.В., Золотозубов Д.Г., Калошина С.В. Основания и фундаменты: учебно-методическое пособие. Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2015. 318 с.
- Пыхтеева Н.Ф., Букуша В.В., Миронова В.И. Механика грунтов: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 116 с.
- Справочник по инженерной геологии / Под общей редакцией М.В. Чуринова. М.: Недра, 1974. 408 с.
- Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общей редакцией Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строительных вузов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
- Chernyshev S.N., Martynov A.M. Vliyanie pogreshnosti inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy na tochnost' rascheta osadki zdaniya [Influence of inaccuracies in engineering-geological surveys on the accuracy of calculation of a building]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]*, 2018, iss. 5, pp. 61–67. (In Russian; abstract in English).
- Dal'matov B.I. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty [Soil mechanics, bases and foundations]*. Leningrad, Publ. Stroiizdat, 1988. 415 p. (In Russian).
- Dmitriev V.V., Yarg L.A. *Metody i kachestvo laboratornogo izucheniya gruntov: uchebnoe posobie [Methods and quality of laboratory study of soils: textbook]*. Moscow, Publ. KDU, 2008. 542 p. (In Russian).
- Gersevanov N.M. *Sobranie sochinenii v 2 vol. Vol. 1. Svainye osnovaniya i raschet fundamentov sooruzhenii [Collected works in 2 volumes. Volume 1. Pile foundations and calculation of foundations of structures]*. Moscow, Publ. Stroivoenmorizdat, 1948. 270 p. (In Russian).
- Gruntovedenie [Soil science]*. Sergeev E.M. (ed.). Moscow, Publ. of Moscow State University, 1983. 212 p. (In Russian).
- Kagan A.A. *Raschetnye pokazateli fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov. Naznachenie, metody opredeleniya [Calculated indicators of physical and mechanical properties of soils. Purpose, methods of determination]*. Leningrad, Publ. Stroiizdat, 1973. 144 p. (In Russian).
- Kashirskii V.I. *Metodika issledovaniy sostava i svoystv dispersnykh gruntov polevymi metodami v usloviyakh megapolisa: Na primere g. Moskvy. Avtoref. diss. kand. tekhn. Nauk [Methodology for the study of the composition and properties of dispersed soils by field methods in a metropolis: On the example of Moscow Ph. D. (Technical) Thesis]*. Moscow, Publ. FGUP PNIIS, 2005. 26 p. (In Russian).
- Ponomarev A.B., Zakharov A.V., Zolotozubov D.G., Kaloshina S.V. *Osnovaniya i fundamenty: ucheb.-metod. Posobie [Bases and foundations: teaching aid]*. Perm': Publ. of Perm

- Чернышев С.Н., Мартынов А.М. Влияние погрешности инженерно-геологических изысканий на точность расчета осадки здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 5. С. 61–67.
- National Research Polytechnic University, 2015. 318 p. (In Russian).
- Pykhiteeva N.F., Buksha V.V., Mironova V.I. *Mekhanika gruntov: uchebno-metodicheskoe posobie [Mechanics of soils: educational and methodical manual]*. Ekaterinburg, Publ. of Ural University, 2018. 116 p. (In Russian).
- Spravochnik po inzhenernoi geologii [Handbook of engineering geology]*. Churinov M.V. (ed.). Moscow, Publ. Nedra, 1974. 408 p. (In Russian).
- Spravochnik proektirovshchika. Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya [Designer's Handbook. Foundations, foundations and underground structures]*. Sorochan E.A., Trofimenkov Yu.G. (eds.). Moscow, Publ. Stroiizdat, 1985. 480 p. (In Russian).
- Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkii kurs): uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov [Soil mechanics (short course): a textbook for construction universities]*. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).
- Vinogradov A.Yu. K voprosu o neobkhodimosti tekhnicheskogo regulirovaniya v inzhenernykh izyskaniyakh [On the necessity of technical regulations of engineering survey]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki [Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Natural Sciences]*, 2012, iss 4, pp. 92–95. (In Russian; abstract in English).