

**БОЛДЫРЕВ Г.Г.**

Профессор кафедры геотехники и дорожного строительства Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по научной работе и инновациям ООО «НПП «Геотек»», д. т. н., г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

СКОПИНЦЕВ Д.Г.

Инженер-исследователь ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза, dmitriy.geotechnic@mail.ru

BOLDYREV G.G.

Professor of the Geotechnics and Road Construction Department of the Penza State University of Architecture and Construction, director for research and innovation of the «NPP «Geotek»» LLC, DSc (doctor of science in Technics), Penza, g-boldyrev@geotek.ru

SKOPINTSEV D.G.

Research engineer of the «NPP «Geotek»» LLC, Penza, dmitriy.geotechnic@mail.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

METHODOLOGICAL ISSUES OF DETERMINING DEFORMATION MODULI OF DISPERSE SOILS

Ключевые слова: модуль деформации; упругий модуль деформации; секущий модуль деформации; касательный модуль деформации; компрессионный модуль деформации; одометрический модуль деформации; трехосный модуль деформации; штамповый модуль деформации; расчет деформаций; решения теории упругости; эмпирические методы; коэффициент перехода.

Аннотация: в статье приведены основные понятия и правила определения и использования модулей деформации при расчете осадок фундаментов. Показаны различия между штамповым, компрессионным, одометрическим и трехосным модулями деформации. Проанализированы требования ГОСТ 12248, СП 22.13330, СП 47.13330 к методам определения модулей деформации.

Введение

Как и для чего следует определять модули деформации дисперсных грунтов? Этот вопрос часто задают геологи на курсах повышения квалификации, например в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства, что и побудило авторов написать эту обзорную статью. В ней предпринята попытка

последовательно ответить на данный вопрос, рассмотреть основные понятия и правила определения и использования модулей деформации при расчетах осадок фундаментов, показать различия между модулями деформации, получаемыми разными методами, и проанализировать требования нормативных документов к этим методам.

Key words: deformation modulus; elastic modulus; secant modulus; tangent modulus; compression (constrained) modulus; oedometric modulus; triaxial modulus; plate loading modulus; deformation analysis; solutions of the elasticity theory; empirical methods; transition coefficient.

Abstract: the paper presents the main concepts and rules of determining and using deformation moduli for calculating settlements of foundations. Differences between the plate loading, compression, oedometric and triaxial moduli are shown. Requirements of the GOST 12248, SP 22.13330, SP 47.13330 for methods of determining deformation moduli are analyzed.

Какие параметры характеризуют деформационные свойства грунтов?

В отечественной практике проектирования оснований зданий и сооружений для расчета осадок фундаментов по СП 22.13330, СП 24.13330 и др. необходимо знать всего несколько деформационных характеристик грунтов. Это модуль упругости на вторичной ветви нагружения E_s , упругий модуль

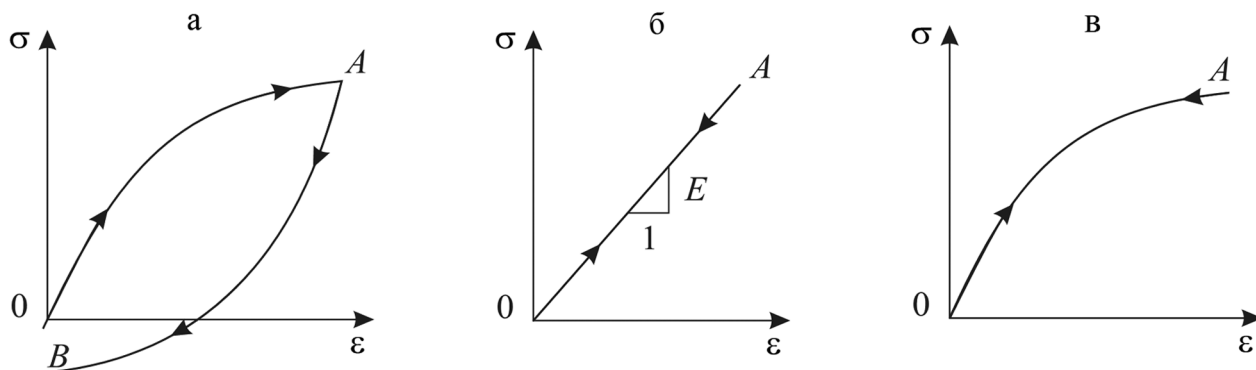


Рис. 1. Поведение грунта: а — упругопластическое; б — линейно-упругое; в — нелинейно-упругое. Обозначения: σ — напряжение; ε — относительная деформация; E — упругий модуль деформации; стрелка вверх — ветвь нагрузки; стрелка вниз — ветвь разгрузки

деформации E и коэффициент Пуассона ν . Подобные обозначения модулей деформации приняты в СП 22.13330 и часто отличаются от приведенных в литературе, в особенности в зарубежной.

Кроме упругого модуля деформации E и других перечисленных выше параметров, используя формулы теории упругости, можно найти упругие модули сдвига (G) и объемного сжатия (K):

$$E = 2G(1 + \nu), \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (3)$$

Из этих выражений видно, что, зная значения упругого модуля деформации E и коэффициента Пуассона ν , можно найти упругий модуль сдвига G и модуль объемной деформации K . Если известны величины E и G , то можно рассчитать коэффициент Пуассона ν .

Следует иметь в виду, что значения, найденные по формулам (1–3), будут отличаться от величин E , G , K , ν , полученных прямым методом по результатам опытов в приборе трехосного сжатия. Эти упругие характеристики применяются при расчетах осадок фундаментов с использованием решений теории упругости различными методами, которые будут рассмотрены ниже.

Эти же выражения можно использовать и при оценке достоверности значений, полученных по результатам трехосных испытаний образцов грунта,

сравнив их с вычисленными по формулам (1–3). Если расхождения будут превышать 10%, то следует более тщательно отбирать монолиты, вырезать образцы грунта и проводить испытания.

Что такое модуль упругости?

Модулем упругости (упругим модулем деформации) материала называется коэффициент пропорциональности E в предложенной Гуком зависимости «одноосное напряжение σ — относительная линейная деформация ε »¹:

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (4)$$

Здесь каждому равному приращению одноосного напряжения σ соответствует пропорциональное возрастание осевой деформации ε . Параметр E является величиной постоянной для данного материала (среды).

Значение упругого модуля деформации можно найти по результатам опытов в условиях трехосного сжатия с использованием начального участка зависимости относительной деформации от напряжения $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$ или используя ветвь разгрузки АВ (рис. 1, а).

Этот закон деформирования (см. формулу (4)) был предложен Гуком для описания поведения идеально упругой среды, при нагружении и разгрузке которой не возникают остаточные деформации² (рис. 1, б). Как видно из рис. 1, б, для такого материала ветвь нагрузки (стрелка вверх) совпадает с ветвью разгрузки (стрелка вниз). По углу наклона графика зависимости относительной деформации от напряжения (прямой линии) находим коэффициент пропорциональности, называемый модулем упругости, или модулем Юнга.

Таким образом, модуль упругости не является непосредственным показателем физического свойства материала, в том числе грунта, а является параметром уравнения (4). Однако по его величине можно судить о «жесткости» материала. Чем выше значение этого модуля, тем больше жесткость материала и меньше его сжимаемость. Закон Гука используется для определения упругой деформации, которая присуща и грунтам, но при очень малых нагрузках.

Модуль упругости всегда больше модуля деформации. Первый определяется по данным испытаний образцов грунта при их упругом поведении, которое имеет место при разгрузке или очень малых начальных деформациях ($\varepsilon < 10^{-3} \div 10^{-6}$), а второй характеризует поведение грунта при наличии как упругих, так и остаточных деформаций и находится по результатам испытаний на ветви нагружения ОА (см. рис. 1, а, в).

Упругий модуль деформации E не равен начальному модулю деформации, найденному по данным трехосных и тем более компрессионных испытаний.

Чтобы найти значение E , проводят трехосные испытания с измерением скорости прохождения поперечной волны [1], которая практически не вызывает уплотнения грунта ($\varepsilon < 10^{-6}$). В этом случае определяется упругий модуль сдвига G , используя значение которого вычисляют упругий модуль деформации E по формуле (1). Величина коэффициента Пуассона ν для этого может быть найдена с помощью консолидированно-дренированных трехосных испытаний или испытаний в компрессионном приборе с измерением боковых напряжений.

¹ В законе Гука для относительных величин.

² Остаточные деформации являются следствием деформаций сдвига и называются в нелинейной теории упругости (или в теории пластичности) пластическими деформациями.

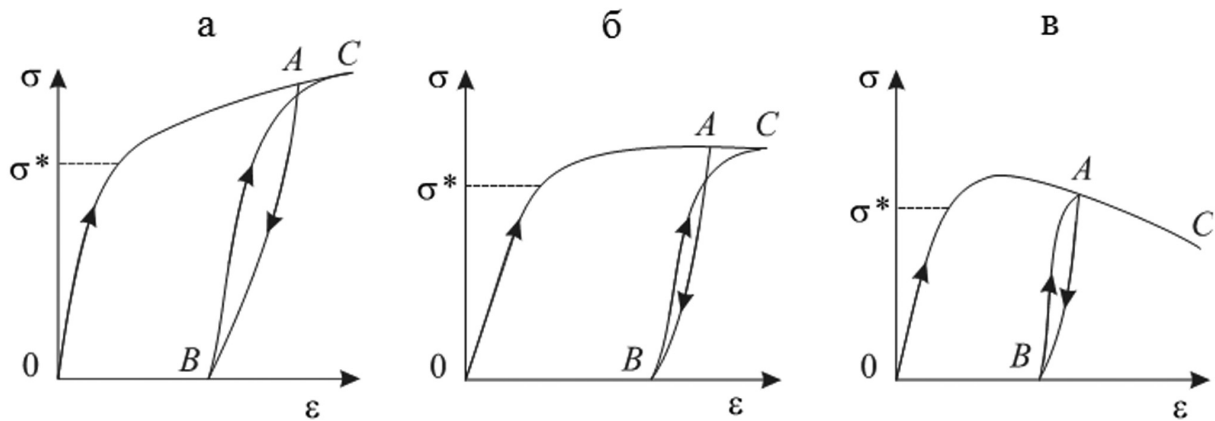


Рис. 2. Деформирование грунта: а — с упрочнением; б — идеально пластическое; в — с упрочнением и разупрочнением. Обозначения: σ — напряжение; ε — относительная деформация; σ^* — напряжение, до которого на графике зависимости σ от ε наблюдается начальный линейный участок; стрелка вверх — ветвь нагрузки; стрелка вниз — ветвь разгрузки; ОА — ветвь первичного нагружения; АВ — ветвь разгрузки; ВА — ветвь повторного нагружения

В соответствии с отечественными нормами и правилами модуль упругости не используется при проектировании оснований зданий и сооружений. В то же время он необходим в случае применения численных методов расчета.

Что такое модуль деформации?

Практически все грунты испытывают нелинейное деформирование в большом диапазоне внешней нагрузки. В зависимости от их «жесткости» и условий нагружения в результате испытаний можно получить несколько кривых деформирования, показанных на рис. 2. На всех них можно найти начальный линейный участок, отмеченный уровнем напряжения σ^* . Это напряжение называют пределом пропорциональности линейной связи между напряжениями и деформациями. Его величина зависит от вида грунта и может достигать нескольких сотен килопаскалей в скальных грунтах. В механике грунтов, принято считать, что до этого уровня напряжения применим закон Гука.

Модулем деформации называют тот же коэффициент пропорциональности в уравнении (4), но в том случае, если в материале или грунте возникают пластические/остаточные деформации. Тогда зависимость (4) становится нелинейной и ветвь нагружения ОА не совпадает с ветвью разгрузки АВ (см. рис. 2). Если при упругом деформировании модуль упругости постоянен (один и тот же угол наклона графика, см. рис. 1, б), то при неупругом деформировании он является переменным, зависящим от текущего напряжения (см. рис. 1, в). Для того чтобы найти модуль деформации, следует провести прямую линию через начало координат и точку на графике с рассматриваемым

уровнем напряжения. Угол ее наклона определяет текущий, или так называемый секущий, модуль деформации. Таких линий для разных моментов испытания можно провести множество.

Модуль упругости, найденный по данным трехосных испытаний, не является чисто упругим, так как он находится при относительной деформации, превышающей 10^{-2} . Для определения чисто упругого модуля деформации необходимо провести опыты с начальными напряжениями (соответствующими линейному участку графика зависимости σ от ε), в десятки раз меньшими по сравнению с рекомендуемыми ГОСТ 12248.

Зависимостей модуля деформации от уровня напряжений предложено множество. Приведем формулу из работы [10]:

$$E = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma}{P_a} \right)^n, \quad (5)$$

где E — модуль упругости; K_{ur} и n — безразмерные константы, определяемые опытным путем; p_a — атмосферное давление, в среднем равное 101,25 кПа; σ — всестороннее давление.

Что такое касательный и секущий модули деформации?

Из закона Гука (см. формулу (4)) следует постоянство модуля деформации (модуля упругости). В то же время из рис. 3 видно, что этот закон справедлив только до точки a зависимости «напряжение — деформация». Если участок Oa прямолинейный, то, проведя через него прямую линию и определив угол ее наклона, получим для точки a касательный модуль деформации $E_t = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$. В то же время через точки O и a можно прове-

сти секущую, совпадающую с касательной к начальному участку кривой деформирования грунта. Угол наклона этой секущей также будет равен углу наклона касательной. Поэтому на начальном участке кривой деформирования касательный модуль E_t^0 совпадает с секущим модулем деформации E_s^0 . При небольшом уровне деформации (менее 0,01–0,05%) значения E_t^0 и E_s^0 равны между собой и характеризуют упругое поведение грунта, то есть $E_t^0 = E_s^0 = E$.

Если провести прямую из начала координат в точку c (см. рис. 3), то она будет секущей для кривой деформирования и ее наклон будет определять значение секущего модуля деформации E_s при уровне напряжений σ_c в точке c . Значение этого модуля используется при проектировании фундаментов мелкого заложения с учетом допуска развития остаточных деформаций, ограниченных величиной расчетного сопротивления грунта основания.

Если провести прямую, касательную к точке c , то по углу ее наклона можно вычислить касательный модуль деформации E_t для этой точки. Данный модуль можно использовать для определения приращения осадки фундамента, соответствующего приращению внешней нагрузки (например, от следующего надстраиваемого этажа здания).

Если теперь провести прямую через точки c и b , то угол ее наклона позволит вычислить значение упругого модуля при разгрузке грунта E_u , который используется для расчета величины подъема дна котлована при его разработке.

Прямая, проведенная через точки b и e , используется для определения модуля E_e , характеризующего повторное нагружение грунта после его разгрузки

(например, при нагружении основания глубокого (более 5 м) котлована весом здания или сооружения, равным весу вынуженного грунта).

При циклическом нагружении грунта после определенного количества циклов «нагрузка — разгрузка» грунт начинает вести себя упруго, без остаточной деформации. В этом случае его упругая осадка определяется с помощью упругого модуля E_c , который находится по наклону прямой, проведенной на рис. 3 через точки g и f . Этот модуль используется, например, при проектировании железнодорожного балласта или жесткого покрытия автомобильного полотна.

Какие деформационные характеристики грунтов используются при проектировании оснований зданий и сооружений?

В отечественной практике проектирования оснований зданий и сооружений при расчете конечной стабилизированной осадки фундаментов используется характеристика, называемая модулем деформации E . Он, в частности, используется при расчете осадки фундаментов методом послойного элементарного суммирования (в соответствии с СП 22.13330 [5]) и называется в данном случае нормативным модулем деформации, так как его определяют с коэффициентом надежности $\gamma_g = 1$. Однако выбрать правильное значение данного модуля непросто, так как для этого используется несколько методов испытаний, дающих разные значения. В таблице 1 приведены основные методы определения модуля деформации и их сравнение.

Кроме перечисленных в табл. 1 модулей деформации к параметрам, характеризующим сжимаемость и начальное напряженное состояние грунта, относятся: коэффициент Пуассона ν ; давление предварительного уплотнения σ_p ; коэффициент переуплотнения OCR ; модуль объемной деформации K ; коэффициент бокового давления в состоянии покоя K_0 ; коэффициент первичной консолидации c_v ; коэффициент вторичной консолидации (ползучести) c_a .

Как видно из табл. 1, значения модулей деформации получаются разными и зависят от метода испытаний.

В то же время для расчета осадки фундаментов методом послойного суммирования по СП 22.13330 [5] требуются только два модуля деформации — E и E_c (см. рис. 3), причем второй используется только в том случае, если глубина котлована проектируемого здания превышает 5 м.

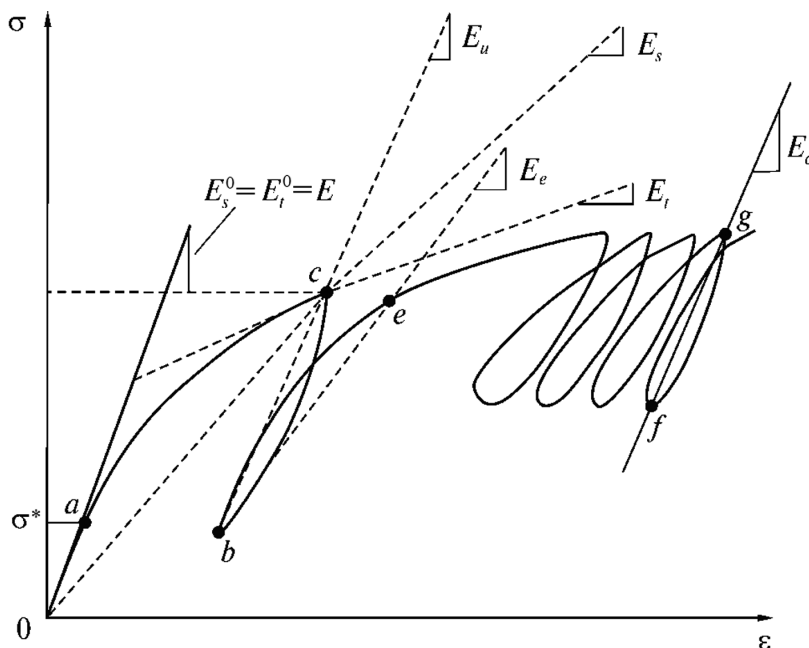


Рис. 3. К определению модулей деформации. Обозначения: σ — напряжение; ε — относительная деформация; σ^* — напряжение, до которого на графике зависимости σ от ε наблюдается начальный линейный участок; E_t^0 — касательный модуль деформации на начальном участке; E_s^0 — секущий модуль деформации на начальном участке; E — упругий модуль деформации; E_s — секущий модуль деформации; E_t — касательный модуль деформации; E_u — модуль деформации при разгрузке грунта; E_c — модуль деформации, характеризующий повторное нагружение грунта после его разгрузки; E_c — модуль деформации, характеризующий упругую осадку грунта после определенного количества циклов «нагрузка — разгрузка»

Модули деформации песчаных и глинистых грунтов, не обладающих выраженной анизотропией свойств в горизонтальном и вертикальном направлениях, могут быть определены по результатам испытаний прессиометрами в скважинах или в массиве в соответствии с ГОСТ 20276, но они также должны быть скорректированы с использованием данных испытаний плоским или винтовым штампом.

Модули деформации песчаных и глинистых грунтов могут быть определены путем статического зондирования, а песков (кроме пылеватых водонасыщенных) — с помощью динамического зондирования (в соответствии с ГОСТ 19912) с использованием корреляционных зависимостей.

Вертикальные нагрузки при испытаниях грунтов штампами, прессиометрами, в компрессионных, срезных приборах и в приборах трехосного сжатия необходимо назначать с учетом давления, передаваемого на основание сооружением (σ_p), природных напряжений от собственного веса грунта (σ_{zg}) и учитывать историю формирования грунтов (OCR , σ_p).

Следует отметить, что в зависимости от метода расчета оснований по деформациям могут потребоваться разные деформационные характеристики.

Если используются аналитические решения, приведенные в сводах правил (например, в СП 22.13330, СП 23.13330), то достаточно найти нормативный модуль деформации и можно рассчитать осадку здания. В то же время, если расчет деформаций выполняется с помощью численных методов, то надо будет найти и другие параметры той или иной модели грунта. Однако при этом все конечноэлементные программы начинают расчет деформаций, применяя упругий модуль деформации. На рисунке 4 показаны модули деформации, используемые в программе PLAXIS.

Расчет осадки с использованием решений теории упругости

Осадку может быть вычислена с применением решения задачи теории упругости о распределении напряжений в упругом полупространстве с введением в расчет модуля упругости или компрессионного модуля деформации. В случае действия на поверхности достаточно широкой гибкой нагрузки, такой как широкая насыпь, изменения в распределении напряжений могут быть определены как по глубине, так и в горизонтальной плоскости за пределами площади нагружения. Осадки затем могут быть вычислены

Методы определения модулей деформации				
Нормативный документ	Модуль деформации		Испытание	Сравнение
	наименование	обозначение*		
ГОСТ 12248, ASTM D 2435, ASTM D 2850, ASTM D 4767, ASTM D7181, BS 1377-7, BS 1377-8, JGS 0544:2011	одометрический	E_{oed}	компрессионное сжатие	$E_{oed} > E_k$
	компрессионный на первичной ветви нагружения	E_k		$E_e = (5\div 10)E$
	компрессионный на вторичной ветви нагружения	E_e		
	трехосный начальный дренированный	$E^0_{TX,D}$	трехосное сжатие по траектории сжатия (СТС)	$E^0_{TX,D} = (1\div 6)E_k$
	трехосный секущий дренированный	$E^S_{TX,D}$		$E^S_{TX,D} \leq E^0_{TX,D}$
	трехосный начальный недренированный	$E^0_{TX,U}$		$E^0_{TX,U} < E^S_{TX,D}$
	упругий модуль сдвига	G		$E > E^S_{TX,D}$
	упругий модуль деформации	E		
ГОСТ 20276, ASTM D 5778, ASTM D 4719, ASTM D 6635, ISO 22476-45, ISO 22476-55, ISO 22476-86, ISO 22476-11	штамповый	E_{PLT}	плоским или винтовым штампом	$E_{PLT} > (1\div 6)E_k \geq E^0_{TX,D}$
	дилатометрический	E_{DMT}	дилатометром Маркетти	$E_{DMT} < E_{PLT}$
	прессиометрический	E_{PRT}	прессиометром	$E_{PRT} < E_{PLT}$
	по данным статического зондирования	E_{CPT}	статическое зондирование конусным пенетрометром	$E_{CPT} = E_{oed}$
Стандарта нет	динамометрический	E_{DMS}	динамометрическим зондом	$E_{DMS} < E_{PLT}$

* Обозначения модулей $E^0_{TX,D}$ (соответствует E^0_f на рис. 3), $E^S_{TX,D}$ (соответствует E_s на рис.3), $E^0_{TX,U}$, E_{DMS} введены авторами настоящей статьи.

с использованием эмпирических модулей деформации, найденных по результатам испытаний зондированием, полуэмпирических модулей по данным испытаний дилатометром, плоским или винтовым штампом, а также в компрессионном приборе или приборе трехосного сжатия. В последних двух случаях при расчете осадки может быть учтена зависимость модуля деформации от напряжения. В случаях высоких насыпей или фундаментов при определенной нагрузке прочность грунта под их краями может быть превышена до такой степени, что возможен сдвиг грунта в горизонтальном направлении или его прорезка в соответствии с работой В.А. Барвашова [1].

Для жестких фундаментов распределение напряжений рассчитывается ниже подошвы фундамента. Осадки затем вычисляются с использованием модулей деформаций, найденных различными методами испытаний (см. табл. 1). Для жесткого фундамента ограниченной ширины прочность грунта основания на краях в зависимости от его сжимаемости уменьшается с ростом напряжений, а модуль деформации уменьшается так же, как в случае трехосного сжатия. В то же время под центром

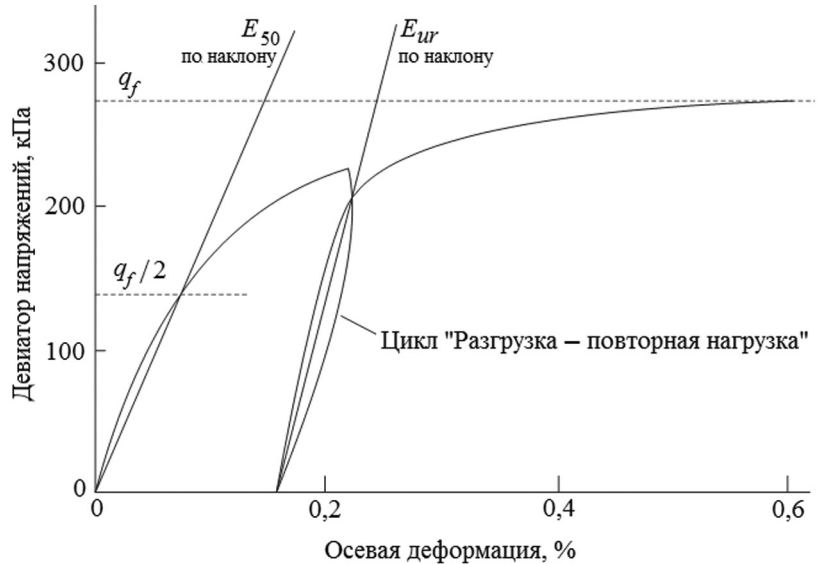


Рис. 4. Модули деформации, используемые в программе PLAXIS. Обозначения: q_f — максимальное значение напряжения в момент разрушения (пиковая прочность грунта); E_{50} — модуль деформации, соответствующий уровню напряжений 50% от прочности грунта; E_{ur} — модуль деформации при разгрузке и повторном нагружении

фундамента грунт уплотняется и его прочность возрастает, как и при компрессионном сжатии. Таким образом, в расчетах должно быть учтено уменьшение и возрастание модулей деформации в массиве грунта под фундаментом [1]. В идеальном случае компрессионный модуль деформации должен

вводиться в расчет осадки для широкого фундамента (насыпи, плиты), а модуль упругости — в случае узкого фундамента. Однако это различие редко учитывается на практике из-за сложности аналитических решений.

Расчет осадки фундамента с использованием модели упругого полупро-

странства выполняется по следующей формуле из СП 22.13330 [5]:

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zg,i})h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zg,i}h_i}{E_{e,i}}, \quad (6)$$

где β — безразмерный коэффициент, учитывающий поперечное расширение грунта в массиве под фундаментом и равный здесь 0,8; $\sigma_{zp,i}$ — среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, кПа; h_i — толщина i -го слоя грунта, см, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента; E_i — модуль деформации i -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа; $\sigma_{zg,i}$ — среднее значение вертикального напряжения в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, от собственного веса выбранного при откопке котлована грунта, кПа; $E_{e,i}$ — модуль деформации i -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения, кПа; n — число слоев, на которые разбита сжимаемая толща основания.

При этом распределение вертикальных напряжений по глубине основания принимают в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5. Слева от оси симметрии показана эпюра напряжений от собственного веса грунта, справа — эпюра дополнительных напряжений от внешней нагрузки. Мощность сжимаемой толщи H_c определяет минимальную глубину выработок для исследований свойств грунтов. В данном случае при определении модуля деформации значение H_c находят, исходя из следующих условий:

- для ленточных и столбчатых (в том числе свайных) фундаментов $\sigma_{zp} = 0,2\sigma_{zg}$, но если граница сжимаемой толщи оказывается в слое грунта с модулем деформации, который равен или меньше 5 МПа, то $\sigma_{zp} = 0,1\sigma_{zg}$;
- для плитных фундаментов $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$.

Несмотря на то что формула (6) получена из решения задачи об идеально упругом полупространстве, СП 22.13330 рекомендует вводить в нее нормативный модуль деформации, а не модуль упругости. Так как первый меньше второго, при использовании нормативного модуля расчетная осадка по формуле (6) всегда получается ближе к наблюдаемой.

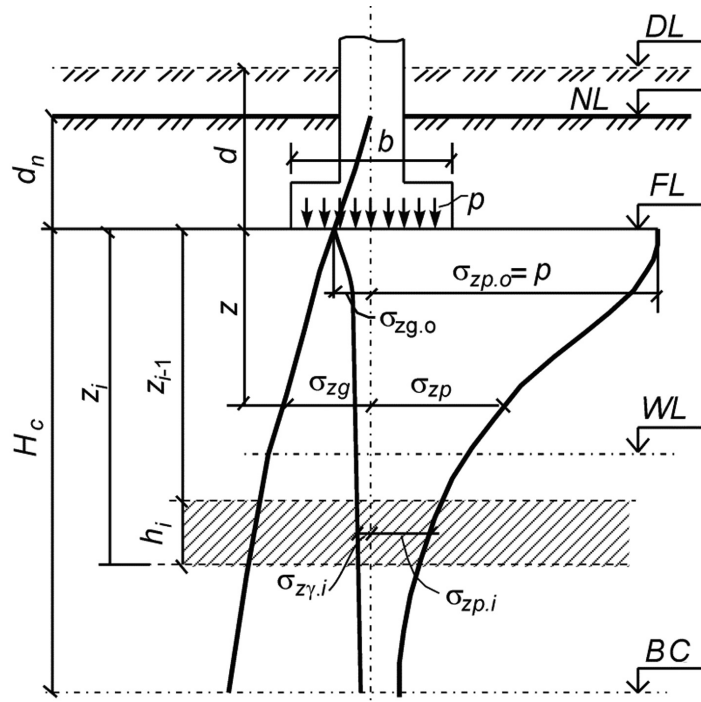


Рис. 5. Распределение напряжений в грунте основания под фундаментом с глубиной. Слева — напряжения от собственного веса грунта; справа — дополнительные напряжения от нагрузки. Обозначения: H_c — глубина сжимаемой толщи; d_n — расстояние от природной поверхности рельефа до подошвы фундамента; d — расстояние от поверхности планировки до подошвы фундамента; b — ширина подошвы фундамента; p — среднее давление под подошвой фундамента; z — текущая глубина, на которой показаны соотношения бытовых и дополнительных напряжений; h_i — толщина i -го слоя грунта; z_i — глубина залегания i -го слоя грунта; z_{i-1} — глубина залегания $(i-1)$ -го слоя грунта; σ_{zp} — давление, передаваемое на основание сооружением; σ_{zg} — природное напряжение от собственного веса грунта (бытовое напряжение); $\sigma_{zp,0}$ — дополнительное напряжение от веса сооружения непосредственно под подошвой фундамента; $\sigma_{zg,0}$ — бытовое напряжение от веса сооружения непосредственно под подошвой фундамента; $\sigma_{zp,i}$ — среднее значение вертикального нормального дополнительного напряжения от внешней нагрузки в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента; $\sigma_{zg,i}$ — среднее значение вертикального напряжения в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, от собственного веса выбранного при откопке котлована грунта; DL — поверхность планировки; NL — поверхность природного рельефа; FL — уровень подошвы фундамента; WL — уровень грунтовых вод; BC — нижняя граница сжимаемой толщи

За рубежом для этой цели также используют решения теории упругости, однако в них подставляется упругий или одомерический модуль деформации в зависимости от вида краевой задачи.

Эмпирические методы расчета осадки

Оценка осадок фундаментов мелкозаложения на песчаных грунтах часто выполняется на основе данных статического зондирования (СРТ) и результатов использования эмпирических методов, специально разработанных для этой цели. Подобные методы были предложены в работах [9, 12, 13] и в других.

Согласно работе [9] осадку жесткого фундамента s за 10 лет находят по формуле:

$$s = \sum_0^z \left[\frac{2,3}{C} \lg \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \cdot z_i \right], \quad (7)$$

где $C = 1,5q_c / \sigma'_0$; q_c — лобовое сопротивление грунта под конусом зонда; σ'_0 — эффективное напряжение от собственного веса грунта; $\Delta\sigma$ — дополнительное вертикальное напряжение; z — глубина залегания подошвы сжимаемой толщи; z_i — мощность элементарного слоя в пределах сжимаемой толщи; i — номер элементарного слоя.

Дополнительные напряжения вычисляются с использованием решения теории упругости, а суммирование выполняется до глубины, на которой приращение дополнительных напряжений не превышает 10% от бытовых напряжений (рис. 6). Осадку находят в так называемой характеристической точке на контакте жесткого фундамента с грунтом. Этот метод дает завышенные значения осадок фундаментов.

В работе [13] предложено следующее выражение для определения осадки фундамента s :

$$s = C_1 C_2 q^* \sum_0^n \left[\frac{I_{zp}}{E_{zz}} z_i \right], \quad (8)$$

где $C_1 = 1 - 0,5q_0/q^*$; $C_2 = 1 + 0,2q_0 \cdot \lg(10t)$; t — время действия нагрузки, год; q^* — нетто-давление на уровне подошвы фундамента, соответствующее максимальному значению коэффициента влияния, $q^* = q_{cz} - q_0$; q_{cz} — лобовое сопротивление внедрению конуса на глубине z ниже подошвы фундамента; $q_0 = \sigma'_{z0}$ — эффективное напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента; I_{zp} — коэффициент влияния на глубине залегания i -го слоя грунта (рис. 7), $I_{zp} = 0,5 + 0,1\sqrt{(q^*/\sigma'_{vp})}$; σ'_{vp} — эффективное нетто-давление от внешней нагрузки на глубине залегания i -го слоя грунта; E_{zz} — эквивалентный модуль упругости на глубине залегания i -го слоя грунта, изменяющийся от $2,5q_c$ для квадратного фундамента ($l/b = 1$, где l, b — длина и ширина фундамента соответственно) до $3,5q_c$ для ленточного фундамента ($l/b \geq 10$); z_i — мощность i -го слоя грунта слоя в пределах сжимаемой толщи; n — количество элементарных слоев, на которые условно разбивается сжимаемая толщина.

Два рассмотренных выше метода отличаются друг от друга. Первый [9] основан на определении напряжений и осадки из решения теории упругости в предположении, что модуль упругости увеличивается с ростом напряжения и деформации. Это соответствует случаю компрессионного сжатия грунта. Второй метод [13] использует эмпирический закон распределения напряжений (деформаций) с глубиной в предположении, что модуль упругости уменьшается с ростом напряжения и деформации. Это в большей степени соответствует случаю трехосного сжатия грунта. Получаемый вид зависимостей «осадка — нагрузка» показан на рис. 8.

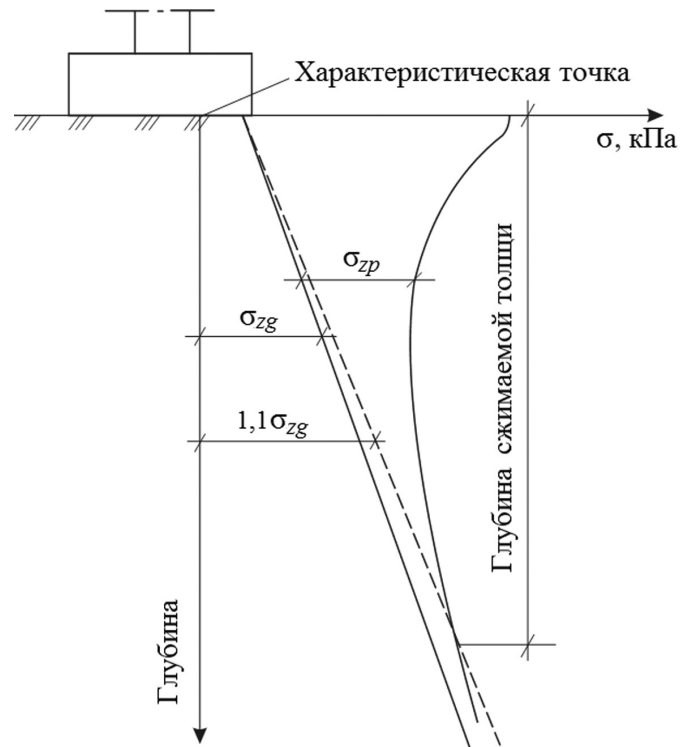


Рис. 6. Расчетная схема оценки осадок фундамента мелкого заложения на песчаных грунтах по работе [9]. Обозначения: σ — полное напряжение; σ_{zg} — природное (бытовое) напряжение от собственного веса грунта; σ_{zp} — дополнительное напряжение от веса сооружения

Более простой метод был предложен в работе [12], в котором представлена следующая формула для вычисления осадки s :

$$s = \frac{pb}{2q_c}, \quad (9)$$

где q_c — лобовое сопротивление грунта внедрению конуса под подошвой фундамента; p — давление под подошвой фундамента; b — ширина фундамента.

Сравнение различных методов расчета осадки

В отчете [11] приведено сравнение эмпирических и теоретических методов расчета осадок жестких квадратных штампов размером от 0,5 до 2,0 м на слабых глинистых грунтах. На рисунке 9 приведены зависимости, полученные при испытаниях квадратным штампом со стороной 0,5 м.

Осадку s в отчете [11] рассчитывалась методом послойного суммирования по следующей формуле:

$$s = \sum_1^n \left[\frac{\sigma_{zp,i}}{E_{oed}} \right]. \quad (10)$$

При этом использовался одометрический модуль деформации и не учитыва-

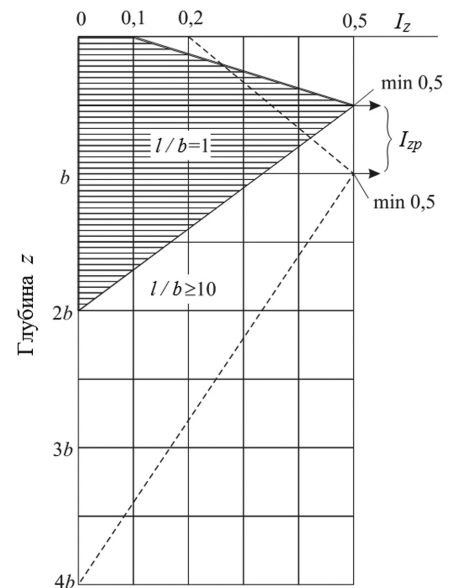


Рис. 7. Изменения коэффициента влияния I_z с глубиной z . Обозначения: I_{zp} — коэффициент влияния на глубине залегания i -го слоя грунта (см. формулу (8)); l — длина фундамента; b — ширина фундамента

лось расширение грунта (коэффициент поперечного расширения грунта $\beta = 1$). Глубина сжимаемой толщи принималась из условия $\sigma_{zp} = 0,1\sigma_{zg}$.

При расчете осадки с модулями деформации, найденными при зондировании, применялись формулы (7, 8).

Из рисунка 9 видно, что все использованные методы дали разные осадки. Максимальное значение получилось из упругого решения с одометрическим модулем деформации.

В случае использования модулей деформации, найденных путем эмпирической оценки данных статического зондирования, исключение составляет метод из работы [9], который не учитывает разупрочнение грунта под краями фундамента. Он был предложен для песчаных грунтов, что ограничивает его применение по сравнению с упругим решением, которое не зависит от вида грунта (при условии, что модуль упругости найден для конкретного типа грунта).

Парадоксы требований отечественных норм

Основные требования к определению нормативного модуля деформации приведены в СП 47.13330 и СП 22.13330.

Приведем сначала основные требования из СП 22.13330 и прокомментируем их.

«5.3.3. Наиболее достоверными методами определения деформационных характеристик дисперсных грунтов являются полевые испытания статическими нагрузками в шурфах, дудках или котлованах с помощью плоских горизонтальных штампов площадью 2 500–5 000 см², а также в скважинах или в массиве с помощью плоского штампа или винтовой лопасти-штампа площадью 600 см² (ГОСТ 20276)».

Следует заметить, что штамповый модуль деформации зависит от размера штампа: чем больше площадь штампа, тем больше значение модуля деформации. В работе [4] приведены результаты оценки модулей деформации E_{5000} и E_{600} , полученных при испытаниях штампами площадью 5 000 и 600 см² соответственно (табл. 2). Соотношение E_{5000}/E_{600} достигает значений 1,2–2,1.

«Очевидно, такая же проблема поиска переходных коэффициентов будет актуальной и при решении проблемы получения по результатам других полевых испытаний с целью определения модуля деформации, соответствующего E_{5000} ».

Этот модуль ($E_{5000} = E$) является «эталонным» и рекомендуется для расчета оснований зданий и сооружений первого и второго уровней ответственности в соответствии с СП 22.13330.

«5.3.5. Модули деформации E песков и глинистых грунтов могут быть определены методом статиче-

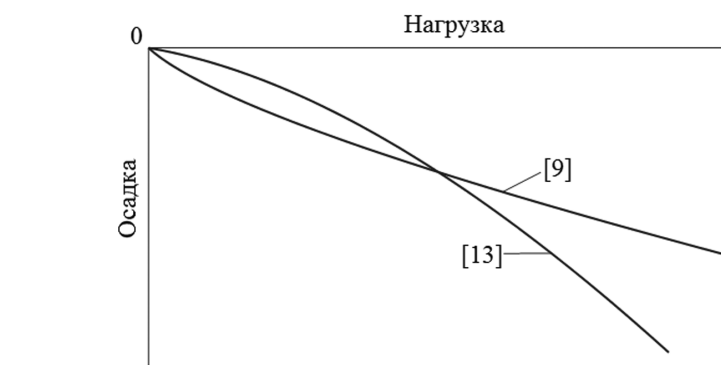


Рис. 8. Типичные зависимости «осадка — нагрузка», полученные в соответствии с работами [9] и [13]

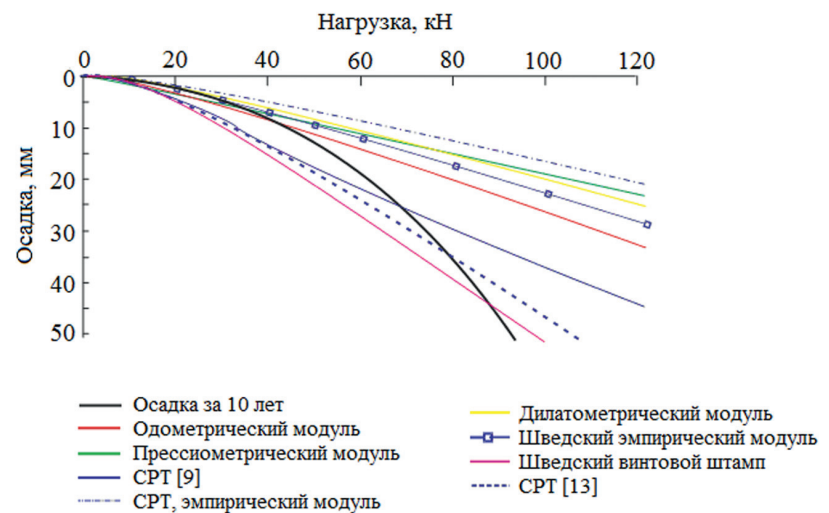


Рис. 9. Вычисленные и экстраполированные осадки для штампа 0,5×0,5 м, полученные разными методами (по [11])

Таблица 2

Соотношения между модулями деформации E_{5000} и E_{600} , полученными при испытаниях штампами площадью 5 000 и 600 см ² (по [4])			
Генетический тип грунтов	E_{5000}/E_{600} при коэффициенте пористости e		
	0,4–0,7	0,7–1,0	>1,0
Аллювиальные	1,25	1,50	1,75
Делювиальные	1,90	2,00	2,10
Элювиальные	1,20	1,40	1,60

ского зондирования, а песков (кроме пылеватых водонасыщенных) — методом динамического зондирования (ГОСТ 19912), используя таблицы, приведенные в СП 11-105 (ч. I) или региональные таблицы, приведенные в территориальных строительных нормах. Для сооружений I и II уровней ответственности значения модуля деформации E по данным зондирования должны уточняться на основе их сопоставления с результатами параллельно проводимых испытаний того же грунта штампами, прессометрами (см. 5.3.3, 5.3.4),

а также в приборах трехосного сжатия (ГОСТ 12248)».

Вопрос: зачем проводить статическое зондирование, если необходимо уточнение с помощью штамповых и прессометрических испытаний? Кроме того, чтобы найти корреляционную зависимость, надо иметь значительный объем данных испытаний. Но их нет, так как рекомендуется проводить по три испытания штампом в каждом инженерно-геологическом элементе. Этой выборки явно недостаточно для статистической обработки результатов испытаний.

«Для зданий и сооружений III уровня ответственности допускается определять значения E только по результатам зондирования, используя таблицы, приведенные в СП 11-105 (ч. I), а при наличии статистически обоснованных региональных данных, приведенных в территориальных строительных нормах, и для сооружений II уровня ответственности».

Можно с полной уверенностью утверждать, что в настоящее время в РФ нет подобных региональных данных. В свое время ТИСИЗы проводили испытания штампами в рамках программы Госстроя, и в некоторых из них сохранились значения переходных коэффициентов. Однако они не обновлялись не менее 30 лет.

«5.3.6. В лабораторных условиях модули деформации глинистых грунтов могут быть определены в компрессионных приборах и приборах трехосного сжатия (ГОСТ 12248)».

Интересно отметить, что модули деформации рекомендуется определять в компрессионных приборах и приборах трехосного сжатия, но о том, какой из них рекомендовать проектировщикам, ничего не говорится.

«Для сооружений I и II уровней ответственности значения E по лабораторным данным должны уточняться на основе их сопоставления с результатами параллельно проводимых испытаний того же грунта штампами, прессиометрами (см. 5.3.3, 5.3.4), а также в приборах трехосного сжатия».

Непонятно, что это за лабораторные данные? Скорее всего, это результаты компрессионных испытаний. Таким образом, проведя испытания в приборе трехосного сжатия, все равно надо выполнить штамповые испытания. А если вы проводите компрессионные тесты, то надо найти коэффициент перехода. Проще и дешевле его найти с помощью параллельных трехосных испытаний. Но зачем же тогда проводить штамповые или прессиометрические испытания?

Известно, что значения модуля деформации, найденные по результатам трехосных испытаний, также ниже штамповых, но в меньшей степени по сравнению с компрессионными. Фактически и для них необходима корреляция со штамповым модулем деформации.

«Для сооружений III уровня ответственности допускается определять значения E только по результатам компрессионных испытаний, корректируя их с помощью повы-

шающих коэффициентов t_k , приведенных в таблице 5.1. Эти коэффициенты распространяются на четвертичные глинистые грунты с показателем текучести $0 < I_L \leq 1$, при этом значения модуля деформации по компрессионным испытаниям следует вычислять в интервале давлений $0,1-0,2$ МПа, а значение коэффициента, учитывающего отсутствие поперечных деформаций грунтов, принимать в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12248».

Из этого следует, что таблица 5.1 СП 22.13330 не имеет практического интереса, так как большинство проектируемых зданий относится ко II или I уровню ответственности.

Далее напрашивается следующий «крамольный» вывод. Зачем проводить компрессионные или трехосные испытания, если в обязательном порядке надо выполнять параллельные штамповые испытания?

В примечаниях к формуле 5.16 СП 22.13330 говорится о том, что при отсутствии опытных данных по определению модуля деформации E_e для сооружений II и III уровней ответственности допускается принимать соотношение $E_e = 5E$, где E_e — модуль деформации i -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения; E — модуль деформации i -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения. Однако в большинстве случаев оно дает ошибочные результаты. Значения упругого модуля деформации E_e , найденные при разгрузке образца грунта в компрессионном приборе или приборе трехосного сжатия от давления, соответствующего природным напряжениям, с последующей повторной нагрузкой могут оказаться значительно больше $5E$.

Теперь перейдем к рассмотрению второго нормативного документа, требования которого следует выполнять при определении модуля деформации. Анализ раздела 6 СП 47.13330 показывает, что в нем практически ничего нет по вопросу определения модулей деформации. Исключение составляют пункты 6.3.14–6.3.16, касающиеся полевых методов определения модуля деформации.

Следует дать комментарий к пункту 6.3.17, в котором говорится о достаточности трех испытаний штампом для определения модуля деформации и нахождения коэффициента перехода.

«По результатам полевых испытаний уточняют значения модулей деформации грунтов, определенных ла-

бораторными методами согласно требованиям СП 22.13330».

Из этого следует, что и результаты трехосных испытаний следует корректировать по данным штамповых тестов.

Таким образом, в двух рассмотренных нормативных документах является **обязательным** проведение штамповых испытаний, которые геологи практически никогда не выполняют, объясняя это тем, что заказчики не хотят платить и не платят за это деньги, забыв при этом про надежность и достоверность данных в сдаваемых отчетах.

Какие же модули деформации рекомендовать проектировщикам для использования?

Как было отмечено выше, для расчета по СП 22.13330 надо найти нормативный модуль деформации.

Нормативное значение модуля деформации E принимается равным модулю деформации E_{PLT} , определенному путем испытаний грунтов штампами. По существующим в РФ представлениям, достоверным считается значение, найденное при испытаниях штампами площадью 5 000 и 10 000 см². Поэтому модули деформации, найденные другими методами испытаний, приводятся к штамповым с использованием коэффициентов перехода t_k . В частности, при переходе от компрессионного модуля деформации к штамповому:

- для зданий и сооружений III уровня ответственности допускается использовать коэффициент перехода, который зависит от вида грунта и изменяется от 1 до 6;
- для зданий и сооружений I и II уровней ответственности этот коэффициент следует находить путем сравнительных лабораторных и полевых (желательно плоским или винтовым штампами) испытаний.

Исходя из сложившейся практики испытаний грунтов и существующих методов расчета определяющими модулями деформации в РФ являются компрессионный и штамповый. В ГОСТ 12248 рекомендуется определять не только компрессионный, но и одометрический модуль. Ранее этого не было, так как в расчетах применялся только первый. Однако определение одометрического модуля деформации рекомендовано в связи с использованием программы PLAXIS, в которой он является одним из параметров модели грунта. За рубежом этот модуль широко используется при получении корре-

ляционных зависимостей между ним и параметрами зондирования.

Между компрессионным (E_k) и одометрическим (E_{oed}) модулями деформации существует следующая связь:

$$E_k = \beta E_{oed}. \quad (11)$$

где β — коэффициент, учитывающий поперечное расширение грунта в массиве под фундаментом, $\beta = (1-2\nu^2)/(1-\nu)$.

Если выражение (11) подставить в знаменатель формулы (6), то β сокращается и получается формула (10).

Одометрический модуль деформации находят, используя для этого зависимость относительной осевой деформации от нормального давления, которая показана на рис. 10.

Одометрический модуль деформации, как и компрессионный, также находится в выбранном интервале нормального давления (см. рис. 10).

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}, \quad (12)$$

где $\Delta\sigma_z$ — напряжение от дополнительной нагрузки (веса сооружения) на глубине z (приращение давления); $\Delta\varepsilon_z$ — соответствующее приращение деформации.

Одометрический модуль деформации не используется в расчетах оснований по отечественным нормативным документам. Для расчета осадки методом элементарного послойного суммирования используется формула (5), где в знаменателе находится модуль деформации, полученный путем умножения компрессионного модуля деформации E_k на повышающий коэффициент m_k , то есть:

$$E = m_k E_k. \quad (13)$$

Если в формуле (6), отбросив второй член, подставить в знаменатель выражения (13) и (11), то получим:

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}) h_i}{m_k E_{oed}}. \quad (14)$$

Поскольку величина коэффициента m_k зависит от вида грунта (см. табл. 5.1 СП 22.13330) и коэффициента пористости e , для всех значений e осадка получается наибольшей в глинистых грунтах, а наименьшей — в супесях. Так как коэффициент m_k изменяется от 1 (для песка) до 6 (для глины), то при одном и том же значении E_{oed} по-

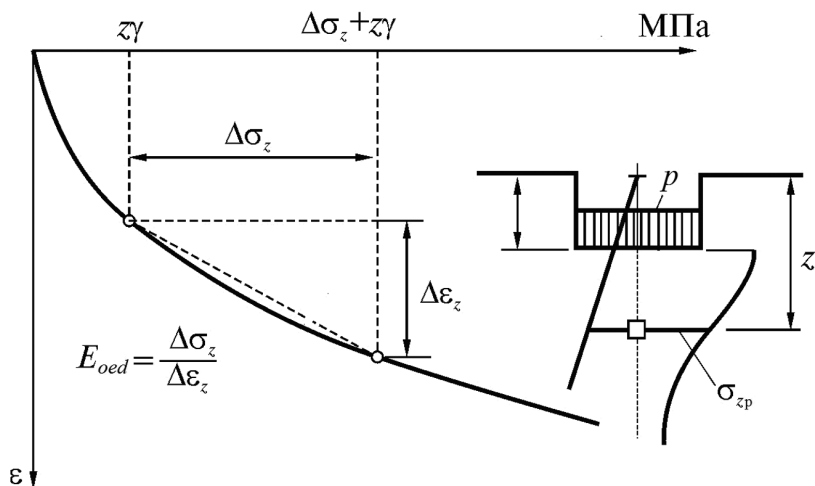


Рис. 10. К определению одометрического модуля деформации. Обозначения: σ — нормальное давление; ε — относительная осевая деформация; z — глубина; γ — удельный вес грунта; $z\gamma = \sigma_{zg}$ — напряжение от собственного веса грунта γ на глубине z ; $\Delta\sigma_z = \sigma_{zp}$ — напряжение от дополнительной нагрузки (веса сооружения) на глубине z , то есть приращение давления; $\Delta\varepsilon_z$ — соответствующее приращение деформации; E_{oed} — одометрический модуль деформации; p — среднее давление под подошвой фундамента

лучаем осадку в глинистых грунтах, в 6 раз меньшую, чем в песчаных. Для исключения данной неопределенности в зарубежной практике [11] расчет осадки выполняют без использования m_k , подставляя в знаменатель формулы (14) только значение одометрического модуля деформации.

Так как одометрический и компрессионный модули деформации зависят от выбранного интервала нормального давления, их следует определять, используя значения вертикальных сжимающих напряжений σ_{zp} от давления под подошвой проектируемого фундамента. Как видно из рис. 10, модули деформации определяются с учетом как напряжений от собственного веса грунта $\sigma_{zg} = \gamma z$ (где γ — удельный вес грунта; z — глубина), так и напряжений от внешней нагрузки σ_{zp} на заданной глубине z под фундаментом.

Таким образом, модулей деформации получается столько, сколько ступеней давления было выбрано в программе компрессионных испытаний. Какой из них принимать при расчете осадки, геолог не знает, так как ему неизвестно распределение напряжений, показанное на рис. 5. Поэтому и рекомендовать одно значение неправильно, как это делают практически все геологи, составляя сводную таблицу физико-механических характеристик грунтов. Правильнее приводить таблицу с данными расчета одометрического/компрессионного модуля деформации для каждой глубины отбора монолитов. Привязка к инженерно-геологическим элементам (ИГЭ) никакой роли в данном слу-

чае не играет, так как ИГЭ нет в расчетной схеме на рис. 5. Там имеются только глубина, напряжения и соответствующий им модуль деформации.

В таблице 3 приведен пример представления результатов одного из компрессионных испытаний. В ней указано пять компрессионных модулей деформации, а геологи, как правило, рекомендуют одно значение, полученное в интервале давления 100–200 кПа (см. последние два столбца табл. 3). Это неправильно, так как при расчете осадки используется модуль деформации, соответствующий сумме напряжений от собственного веса грунта и дополнительных напряжений, величина которых может быть как меньше, так и больше 100–200 кПа. Интервал давлений 100–200 кПа был принят ранее исходя из того, что в первом под подошвой фундамента слое грунта давление не превышало 200 кПа. А что будет, если оно составит 400 кПа? В таблице 3 находим модуль деформации, равный 4,07 МПа.

Далее. До какой величины давления следует проводить испытания в условиях компрессионного сжатия? В США нормативный документ ASTM D2435 не регламентирует эту величину. Для высотных сооружений она может достигать 3 200 кПа. В пункте 5.4.1.3 ГОСТ 12248 указано следующее: «Диапазон давлений, при которых проводят испытания, определяется в программе испытаний с учетом напряженного состояния грунта в массиве, т.е. с учетом передаваемых на основание нагрузок и бытового давления. Во всех слу-

Результаты определения компрессионных модулей деформации суглинка с коэффициентом пористости 0,67

Дата/время	Давление σ , МПа	Относит. деформация ε , безразм.	Коэффициент пористости e , безразм.	Компрессионный модуль деформации E_k , МПа	Коэффициент перехода m_k , безразм.	Модуль деформации E , МПа
-	0,00	0,000	0,674	-	-	-
-	0,05	0,014	0,650	2,13	-	-
-	0,10	0,028	0,628	2,35	-	-
-	0,20	0,052	0,587	2,57	4,5	11,6
-	0,30	0,071	0,556	3,31	-	-
-	0,40	0,086	0,530	4,07	-	-

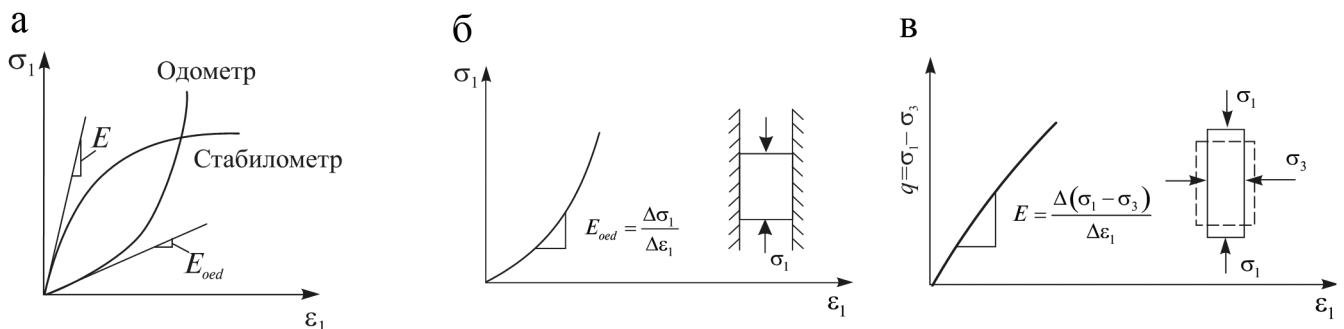


Рис. 11. Зависимости «деформация — нагрузка» в условиях компрессионного и трехосного сжатия. Обозначения: σ_1 — наибольшее главное напряжение (вертикальное в стабилометре и одометре); σ_3 — наименьшее главное напряжение (боковое в стабилометре); ε_1 — деформация по направлению действия наибольшего главного напряжения (вертикальная); $\Delta\sigma_1$, $\Delta\varepsilon_1$ — приращения σ_1 и ε_1 соответственно; $q = \sigma_1 - \sigma_3$ — девиатор напряжений; E — начальный модуль деформации/упругости; E_{oed} — одометрический модуль деформации

чаях конечное давление должно быть больше бытового давления на глубине залегания образца грунта». Более точно следующее: конечное давление должно быть больше суммарного значения напряжений от собственного веса грунта и дополнительных напряжений на глубине отбора монолита грунта. В связи со строительством высотных зданий это давление может достигать 1 000 кПа и более в первом под подошвой фундамента слое грунта. При проектировании обычных зданий это давление не превышает 200–300 кПа.

Следующий вопрос: как определить коэффициент перехода m_k ? СП 22.13330 и СП 47.13330 рекомендуют находить его из сравнительных компрессионных и штамповых испытаний. Однако этого никто не делает — все используют табличные значения m_k , которые привязаны к интервалу давления 100–200 кПа. Но, как было показано выше, это только для одной величины модуля деформации, а в расчетной схеме модуль переменный, возрастающий с глубиной.

Чтобы разрешить данную ситуацию, надо изменить метод расчета осадки, приведенный выше (см. формулу (6)), че-

го, к сожалению, не может сделать геолог, а те, кто ответственен за так называемую актуализацию СП 22.13330, переписывающие решения, полученные в 1962 году. Как, впрочем, и те, кто СНиП 11-02-96 переделал в СП 47.13330.

Теперь перейдем к модулю деформации по данным трехосных испытаний. Сравнить компрессионный/одометрический и трехосный модули невозможно, так как соответствующие им деформации имеют разный характер (рис. 11). Из рис. 11, а видно, что деформирование грунта в условиях компрессионного сжатия сопровождается упрочнением, а в условиях трехосного сжатия — упрочнением с последующим разупрочнением. Начальные углы наклона, по которым находятся модули деформации, также различны. Явно видно, что начальный трехосный модуль деформации значительно больше начального одометрического.

Согласно ГОСТ 12248 модуль деформации в условиях трехосного сжатия находится по схеме консолидированно-дренированных испытаний (КД). В США допускается его определение в условиях как консолидированно-недренированного сдвига (КН), так и КД.

Это объясняется тем, что при испытаниях как по схеме КД, так и по схеме КН на первом этапе образец грунта консолидируется, а затем выполняется сдвиг, соответствующий КД или КН. Так как в обоих случаях проводится консолидация грунта, начальные модули деформации выходят одинаковыми. Значения прочности — нет. В условиях КН она получается меньше, чем при схеме КД.

Слушатели курсов повышения квалификации часто задают также следующий вопрос: «Какое всестороннее давление σ_3 в камере следует принимать при испытаниях по схеме КД?». В пункте 5.3.6.1 ГОСТ 12248 указано следующее: «При проведении КД испытаний водонасыщенных в природных условиях грунтов образец грунта водонасыщается и уплотняется в соответствии с 5.3.5.1–5.3.5.5». Здесь мы должны учесть требования таблицы 5.6 ГОСТ 12248 при назначении давления консолидации. Указанные в ней значения давления консолидации зависят от вида грунта, и это давление создается ступенями от 0,05 до 0,5 МПа. Величину максимального давления консолидации σ_3 необходимо назначать в зависи-

мости от предполагаемого напряженного состояния грунтового массива (с учетом расчетных нагрузок от сооружения и бытового давления). Как отмечалось ранее, геологу на стадии изысканий неизвестны напряжения от нагрузки. Поэтому боковое давление следует принимать равным напряжениям от собственного веса грунта на глубине отбора монолита с учетом или без учета взвешивающего действия грунтовых вод. Далее следует прикладывать вертикальную нагрузку так, как указано в ГОСТ 12248.

Как видно из рис. 12, а, при обработке результатов испытаний можно получить начальный модуль деформации, называемый упругим (E), и секущий модуль деформации ($E_s = E_{50}$, где E_{50} — модуль деформации, соответствующий уровню напряжений 50% от прочности грунта). Последний следует находить при напряжении σ_1 , равном дополнительным напряжениям $\sigma_{сп}$ от нагрузки под весом сооружения на глубине отбора монолита грунта. Так как геологу априори оно неизвестно, эту работу за него должен сделать проектировщик, имея в распоряжении паспорт испытаний с кривой деформирования.

На рисунке 12 показаны зависимости, получаемые в результате испытаний образцов грунта при его нагружении вплоть до разрушения.

Начальный модуль деформации (или модуль упругости E) находят по наклону прямолинейного участка графика зависимости $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$:

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1}, \quad (15)$$

где $\Delta\sigma_1$ — приращение наибольшего главного напряжения; $\Delta\varepsilon_1$ — приращение осевой деформации.

А модули деформации E_s находят по углам наклона секущих к заданным уровням напряжений. Одним из секущих модулей является модуль деформации E_{50} , соответствующий уровню напряжений 50% от прочности грунта (см. рис. 12, а):

$$E_s = E_{50} = \frac{q_f / 2}{\varepsilon_{1,q_f/2}}, \quad (16)$$

где q_f — максимальное значение напряжения в момент разрушения (пиковая прочность грунта); $\varepsilon_{1,q_f/2}$ — соответствующая осевая деформация к моменту достижения этого напряжения.

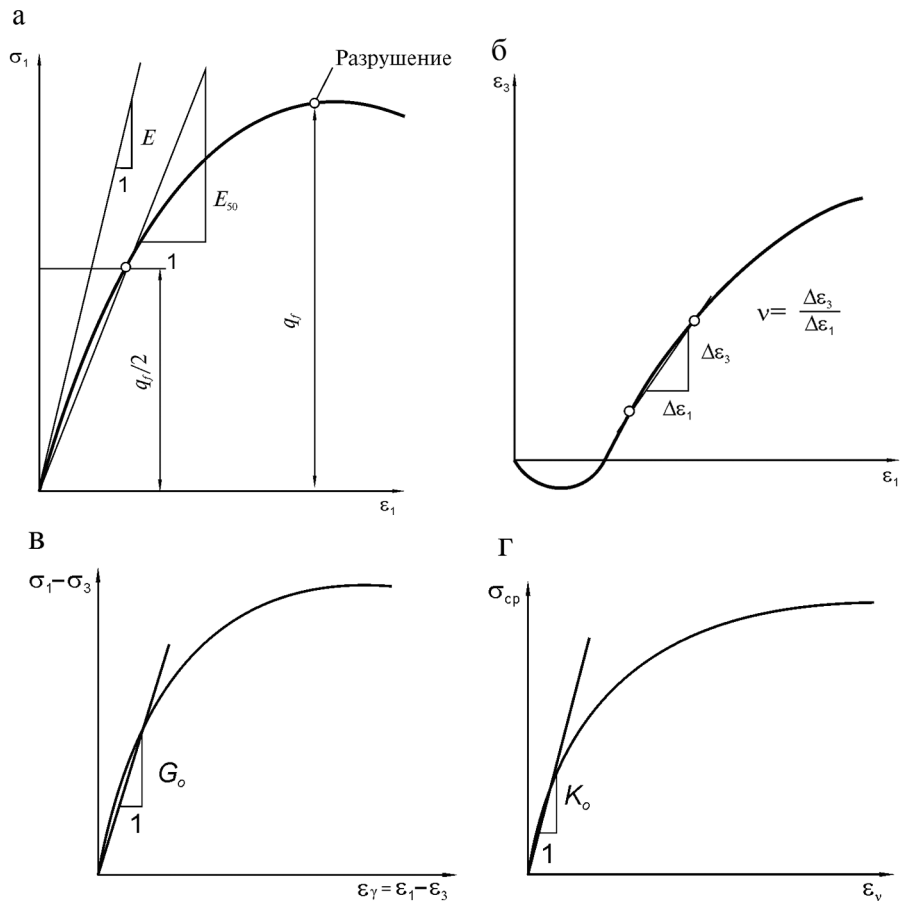


Рис. 12. К определению деформационных характеристик грунта: а — модулей деформации; б — коэффициента Пуассона; в — модуля сдвига; в — модуля объемной деформации. *Обозначения:* σ_1 — наибольшее главное напряжение; σ_3 — наименьшее главное напряжение; ε_1 — деформация по направлению действия наибольшего главного напряжения (вертикальная); ε_3 — деформация по направлению действия наименьшего главного напряжения (радиальная); $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_3$, $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_3$ — приращения σ_1 , σ_3 , ε_1 , ε_3 соответственно; q_f — максимальное значение напряжения в момент разрушения (пиковая прочность грунта); E — модуль упругости (начальный модуль деформации); E_{50} — модуль деформации, соответствующий уровню напряжений 50% от прочности грунта; ν — коэффициент Пуассона; G_0 — начальный модуль сдвига; ε_γ — сдвиговая деформация; ε_v — объемная деформация; σ_{cp} — среднее всестороннее давление (напряжение) в камере; K_0 — начальный объемный модуль

Данный модуль деформации используется в программе PLAXIS.

Упругий модуль сдвига G , модуль объемной деформации K и коэффициент Пуассона ν находят по наклонам начальных участков графиков зависимостей, показанных рис. 12, б, в, г:

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = f(\sigma_1 - \sigma_3); \quad (17)$$

$$\varepsilon_v = f[(\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3]; \quad (18)$$

$$\varepsilon_3 = f(\varepsilon_1), \quad (19)$$

где ε_γ — сдвиговая деформация; ε_v — объемная деформация; σ_3 — наимень-

шее главное напряжение (боковое); ε_3 — деформация по направлению действия наименьшего главного напряжения (горизонтальная).

Используя начальные участки этих зависимостей, находят значения G , K и ν :

$$G = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}; \quad (20)$$

$$K = \frac{\Delta\sigma_{cp}}{\Delta\varepsilon_v}; \quad (21)$$

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1}, \quad (22)$$

где $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ — приращение девиатора напряжений; $\Delta(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ — приращение

деформации сдвига; $\Delta\sigma_{cp}$ — приращение всестороннего давления в камере (среднего напряжения); $\Delta\varepsilon_v$ — приращение объемной деформации; $\Delta\varepsilon_1$ — приращение вертикальной деформации; $\Delta\varepsilon_3$ — приращение горизонтальной (радиальной) деформации.

Если известны значения коэффициента Пуассона и модуля упругости, то упругий модуль сдвига и модуль объемной деформации можно найти по формулам (1–3) из решений теории упругости. Эти формулы можно использовать как оценочные для сравнения с модулями, которые получены по результатам прямых испытаний.

Заключение

Выбор правильного типа испытаний грунта, напряженно-деформированное состояние при котором наиболее точно соответствует расчетному случаю поведения грунта в реальном массиве под фундаментом, существенным образом влияет на результаты определения деформационных характеристик грунтов, что, в свою очередь, определяет качество изысканий. Изыскатель и проектировщик должны совместно работать над постановкой и корректировкой технического задания на проведение изысканий. Взаимопонимание между проектировщиком и изыскателем, особенно в условиях наблюдаемой терминологической неоднозначности нормативных документов (как отечественных, так и иностранных), является важной задачей.

логической неоднозначности нормативных документов (как отечественных, так и иностранных), является важной задачей.

На основе рассмотренных в данной статье вопросов хотелось бы привести следующие рекомендации.

1. Модуль деформации не является постоянным параметром, так как зависит от уровня напряженного состояния. Поэтому в сводной таблице физико-механических характеристик грунтов инженерно-геологического отчета следует приводить начальное значение модуля деформации по результатам испытаний в условиях трехосного сжатия.


2. Компрессионный или одометрический модуль деформации следует определять в интервале нормального давления, соответствующего дополнительным напряжениям в основании проектируемого здания или сооружения.

3. Поскольку на стадии инженерно-геологических изысканий геологу неизвестны данные о нагрузках на основание, размерах и типе фундамента и он не может вычислить дополнительные напряжения, то в отчетах по изысканиям следует приводить паспорта компрессионных и трехосных испытаний с зависимостями между напряжениями и деформациями. В дальнейшем, используя эти зависимости, проектировщик сможет найти параметры

грунтов, необходимые для расчета основания по деформациям.

4. Целесообразно передавать данные лабораторных испытаний заказчику не только в виде паспортов испытаний, но и в виде цифровых массивов данных, что облегчит в дальнейшем работу проектировщика при определении дополнительных параметров различных моделей грунтов.

5. Методы интерпретации данных лабораторных испытаний зависят от методов расчета осадок в соответствии с действующими сводами правил и используемыми программными комплексами и должны согласовываться с проектной организацией или заказчиком на этапе составления технического задания.

6. В связи с неоднозначностью коэффициента перехода m_k между компрессионными и штамповыми модулями деформации следует отказаться от его использования. Это позволит исключить из практики изысканий процедуру сравнения результатов компрессионных и штамповых испытаний. Для этого следует ввести коррективы в методику интерпретации данных трехосных испытаний по ГОСТ 12248 и в метод расчета осадки по СП 22.13330, перейдя к использованию модуля деформации по результатам трехосных испытаний. 

Список литературы

1. Барвашов В.А., Болдырев Г.Г. Расчет осадок и кренов сооружений с учетом неопределенности свойств грунтовых оснований // Геотехника. 2016. № 1. С. 12–29.
2. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010: монография. М.: Прондо, 2014. 811 с.
3. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2010.
4. Лушников В.В. Усовершенствование методов определения деформационных и прочностных свойств элювиальных глинистых грунтов Урала: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск: Изд-во Уральского политехнического института им. С.М. Кирова, 1966. 19 с.
5. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2011.
6. СП 24.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85). Свайные фундаменты. М.: Минрегион России, 2011.
7. СП 47.13330-2012 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой России, 2012.
8. ASTM D7181-11. Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils. American Society for Testing and Materials, 2011.
9. DeBeer E.E. Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand // Proceedings of the Symposium on bearing capacity and settlement of foundations. Durham, UK: Duke University Press, 1965. P. 15–33.
10. Lade P.V., Yamamoto J.A., Bopp P.A. Significance of particle crushing in granular materials // Journal of Geotechnical Engineering. 1996. V. 122. № 4. P. 309–316.
11. Larson R. Investigations and load tests in silty soils. Results from a series of investigations in silty soils in Sweden: report 57 of the Swedish Geotechnical Institute, 1997. 260 с.
12. Meyerhof G.G. Shallow foundation // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, 1965. V. 91. № SM2. P. 21–31.
13. Schmertman J.H. Static cone to compute static settlement over sand // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, 1970. V. 96. № SM3. P. 1011–1043.