

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ
ПО ДАННЫМ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Е.Ю. Трацевская

Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246019, Гомель, Беларусь
E-mail: eltrats@mail.ru

Проведено сравнение результатов определения деформационных и прочностных характеристик грунтов методами штамповых испытаний и консолидированно-дренированного плоского среза с результатами исследований статическим зондированием. Отмечено, что характеристики грунта одного и того же инженерно-геологического элемента, установленные разными методами, могут отличаться. Модули деформации – в два раза, углы внутреннего трения – до полутора, удельное сцепление – до трех раз. Показано, что при установлении причинно-следственных связей между показателями состава, строения и свойств грунтов (например, прочностных и деформационных характеристик по данным статического зондирования) необходимо учитывать генезис грунтов и условия проведения испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

Статическое зондирование относится к косвенным полевым методам исследования дисперсных грунтов в условиях их естественного залегания. Этот метод довольно прост, требует небольших затрат времени на производство работ и характеризуется невысокой стоимостью. Полевые испытания грунтов зондированием применяют в комплексе с другими видами инженерно-геологических работ или отдельно для целей, определенных ГОСТом, в том числе для количественной оценки характеристик физико-механических свойств грунтов (плотности, модуля деформации, угла внутреннего трения, сцепления и др.) [6]. Исследования грунтов статическим зондированием относятся к экспресс-методам и не являются достаточно точным, они дают предварительные, главным образом, приближенные представления об их свойствах [2; 9; 10]. Трудности интерпретации материалов зондирования связаны как с точностью и надежностью самих параметров зондирования, так и с проблемой объективных оценок состава, состояния и свойств грунтов [7].

В литературе приведены рекомендации по оценке свойств грунтов и расчету оснований, в том числе и корреляционные зависимости между прочностными и деформационными их характеристиками и показателями статического зондирования [2; 7; 11]. Буслом И.А. установлены такого рода связи, обусловленные типом, видом и происхождением грунтов [2]. Коэффициенты корреляции, определенные для численных значений удельного сопротивления под наконечником зонда q_c и сцепления C для дисперсных грунтов разного генезиса, составляют от 0,60 до 0,84; для q_c и φ (угла внутреннего трения) – 0,30–0,64. Вычисленные им по уравнениям регрессии нормативные характеристики деформационных и прочностных свойств глинистых грунтов мало отличаются от значений, приведенных в ТКП 45-5.01-15-2005. Следует отметить, что в техническом кодексе разновидности песчаных (прочные, средней прочности и малопрочные) и глинистых (очень прочные, прочные, средней прочности и слабые) грунтов приведены без учета их происхождения. Также происхождение не учитывается при определении их модуля

деформации E , а для глинистых грунтов оно принимается условно через эмпирические коэффициенты [11].

Повышение достоверности определения деформационных и прочностных характеристик грунта по данным статического зондирования может быть достигнуто при изучении зависимостей между показателями сопротивления внедрению зонда и результатами исследований другими стандартными методами.

В предлагаемой статье приводятся сравнение результатов определения деформационных и прочностных характеристик грунтов методами штамповых испытаний и консолидированно-дренированного плоского среза с результатами исследований статическим зондированием.

В качестве объекта исследований служили пески различных номенклатурных видов, супеси и суглинки моренные ($g\Pi dn$), флювиогляциальные ($f\Pi d^s$), озерно-аллювиальные ($la\Pi prz$) и аллювиальные первой и второй надпойменных террас реки Сож ($a_{1,2}\Pi prz$). В статье рассмотрены нормативные показатели основных механических свойств грунтов, полученные изыскательскими организациями, работавшими в юго-восточной части Республики Беларусь в разное время. Ранее особенности формирования и свойства дисперсных грунтов исследовались в работах [12; 13; 14].

СТАТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Статическим зондированием называется процесс погружения зонда в грунт под действием статической вдавливающей нагрузки с измерением показателей сопротивления грунта внедрению зонда [6]. К основным характеристикам статического зондирования относятся: удельное сопротивление грунта под наконечником зонда (q_c , МПа) и удельное сопротивление на участке боковой поверхности зонда (f_s , кПа).

При вдавливании зонда в грунте происходит целый ряд изменений. Порода, выдавливаемая из-под наконечника, оказывает давление на грунт, находящийся в непосредственной близости от стенок зонда, отодвигает его и увлекает вниз. Выжатая порода окружает боковую поверхность зонда тонкой рубашкой. Следующая за ней зона преимущественно вертикальных перемещений частиц породы – это, по сути, область сдвига [10]. Затем располагается наиболее объемная зона, в которой преобладают горизонтальные перемещения частиц грунта, хотя происходит и смещение вниз по вертикали. Ее можно считать областью сжатия

породы. Дальше идет зона упругих деформаций. Таким образом, при вдавливании зонда процессы сдвига и сжатия породы тесно связаны и протекают одновременно [1; 10].

При внедрении зонда в рыхлые слабопроницаемые водонасыщенные песчаные или глинистые грунты происходит увеличение порового давления, временно снижаются эффективные напряжения, что ведет к уменьшению величины статического сопротивления. Результаты зондирования в этом случае занижены [1].

По нашим данным, для песков величины сопротивления погружению конуса q_c и удельного сопротивления на участке боковой поверхности зонда f_s составляют: для песка среднего $q_c = 6,0-22,0$ МПа; $f_s = 106-390$ кПа; мелкого – $q_c = 1,2-16,1$ МПа; $f_s = 30-370$ кПа; пылеватого – $q_c = 0,8-13,6$ МПа; $f_s = 5,5-355$ кПа. Для глинистых грунтов $q_c = 0,7-18,9$ МПа, $f_s = 10-351$ кПа, у супесей; у суглинков соответственно $q_c = 1,7-5,9$ МПа, $f_s = 5,8-115$ кПа. Таким образом, для песков сопротивление статическому зондированию повышается с увеличением их крупности. С увеличением пластичности глинистых грунтов возрастает как общее сопротивление сдвигу, так и деформируемость. Поэтому для сопротивления погружению конуса зависимость от глинистости не прослеживается, а удельное сопротивление по боковой поверхности зонда уменьшается при увеличении пластичности грунта.

ПОКАЗАТЕЛИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Одним из распространенных методов определения деформационных свойств грунтов являются штамповые испытания. Метод заключается в изучении сжимаемости грунтов в условиях естественного залегания под нагрузкой, передаваемой на грунт через штамп. Напряжения от штампа распространяются в некотором объеме грунта, залегающего под штампом в так называемой активной зоне, глубина которой принимается равной двойной-тройной ширине штампа [10].

При доведении штамповых испытаний до разрушения выделяют несколько стадий деформирования грунта; первая – уплотнение при нагрузках ниже природной, вторая – уплотнение при нагрузках выше природной, третья – сдвигов [10]. Вторая стадия характеризуется зависимостью близкой к линейной между напряжениями и деформациями. Она используется для нахождения общего модуля деформации грунта E . В основу расчета берется

теория упругого деформируемого изотропного полупространства, исходя из которой модуль общей деформации рассчитывается по уравнению [5]:

$$E = (1 - \mu^2)K_p K_1 D \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона; K_p – коэффициент, принимаемый в зависимости от заглубления штампа; K_1 – коэффициент, принимаемый равным 0,79 для жесткого круглого штампа; ΔP – приращение давления на штамп; ΔS – приращение осадки штампа, соответствующее ΔP .

В рассматриваемом случае интервалы давления, для которых рассчитывался модуль деформации, изменялись в зависимости от типа, вида и разновидности грунтов. Например, для песков мелких плотных интервал составлял 0,10–0,50 МПа, а для песков этого же вида, но средней плотности – 0,25–0,50 МПа. Минимальные значения интервала нормального давления приходятся на суглинки мягкопластичные – 0,1–0,2 МПа.

Модули деформации песчаных грунтов по результатам статического зондирования табулируются, а глинистых определяют по формуле [11]:

$$E = \frac{3,14\alpha(1 + \mu)(3 - 4\mu)q_c}{16(1 - \mu)}, \quad (2)$$

где α – эмпирический коэффициент, μ – коэффициент Пуассона.

Полученные нормативные значения модулей деформации приведены в табл. 1. На выбранной для проведения штамповых испытаний площадке проводилось повторное зондирование для проверки строения грунтовой толщи и уточнения глубины установления штампа. При этом результаты исходного и повторного зондирования (удельное сопротивление грунта под наконечником зонда q_c) в пределах выделенного инженерно-геологического элемента (ИГЭ) отличались до двух раз. Соответственно изменились значения модулей деформации, рассчитанные по формуле 2, и могут измениться разновидности грунта, определяемые по результатам зондирования.

Отношение значений модулей деформации грунтов, определенные штамповыми испытаниями $E_{шт}$, к модулям, определенным по данным зондирования $E_{зонд.}$, показаны на рис. 1. Следует отметить, что эти отношения для песков мелких и пылеватых не зависимо от происхождения находятся близко к единице и не превышают в основном 1,5. Значения модуля деформации супесей, полученные при штамповых испытаниях, превышают значения,

полученные при статическом зондировании, до 2,5 раза и более. Для суглинков зависимость обратная: значения модулей деформации, полученные при зондировании, могут оказаться больше в два раза.

Для песчаных пород характерны контакты зацепления механической природы, они отличаются большей однородностью по сравнению с межчастичными контактами, характерными для глинистых грунтов. Поэтому режим испытаний (штампы – зондирование), состав, строение и происхождение несвязных грунтов крайне слабо отражается на полученных результатах, что мы видим на рис. 1.

Таблица 1 – Значения модулей деформации для грунтов различных генетических типов

Грунты	Модуль деформации E, МПа	
	штамповые испытания	статическое зондирование
Пески мелкие: озерно-аллювиальные (laIIIpz) и аллювиальные первой и второй надпойменных террас поозерские (a _{1,2} IIIpz) флювиогляциальные надморенные (fIIId) ледниковые днепровские (gIIId)	17–38 39 39	18–40 39,9 42
Пески пылеватые: озерно-аллювиальные (laIIIpz) и аллювиальные первой и второй надпойменных террас поозерские (a _{1,2} IIIpz) ледниковые днепровские (gIIId)	7–26 33	6–31,5 34
Супеси: озерно-аллювиальные (laIIIpz) и аллювиальные первой и второй надпойменных террас поозерские (a _{1,2} IIIpz) ледниковые днепровские (gIIId)	8–23 7–42	6,14–22,39 3,65–98,65
Суглинки: озерно-аллювиальные (laIIIpz) и аллювиальные первой и второй надпойменных террас поозерские (a _{1,2} IIIpz) ледниковые днепровские (gIIId)	3,8–10 12	4,87–16,44 8,87

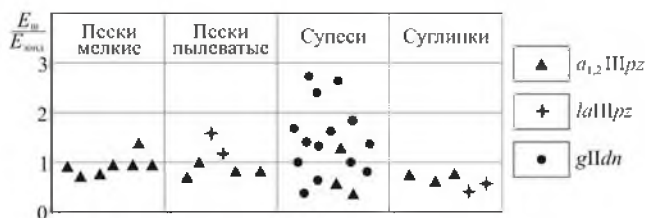


Рисунок 1 – Диаграмма рассеяния отношений значений модулей деформации, полученных при штамповых испытаниях, к определенным по удельному сопротивлению под наконечником зонда

Супеси состоят, главным образом, из песчаных и пылеватых частиц с добавлением около 3–10% пелитовых или глинистых частиц. Их структура образована за счет непосредственного контакта песчаных частиц, при этом адсорбированное на поверхности крупных зерен глинистое вещество не образует сплошной сетки. Это значит, что кулоновское трение между частицами меньше, чем в чистых песках, а коагуляционная сетка слабая и прерывистая [3]. Тем не менее глинистые частицы чрезвычайно активны, даже 3% глинистой фракции достаточно, чтобы связный грунт приобрел глинистые свойства. По-видимому, довольно значительный разброс значений отношений $E_{ш}/E_{зонд}$ двухфазных и трехфазных супесей обусловлен большой неоднородностью структурных связей, главным образом физических и физико-химических при коагуляционных, капиллярных и механических контактах частиц. Поэтому при оценке механических свойств супесей при зондировании могут возникнуть некоторые искажения.

У суглинков глинистость по сравнению с супесями повышена, структурные связи механической природы играют существенно меньшую роль, по этой причине значения $E_{ш}/E_{зонд}$ менее единицы и характеризуются большей сгруппированностью (рис. 1).

Следовательно, применение методов зондирования как самостоятельных методов определения количественных показателей физико-механических свойств грунтов, в данном случае – модуля деформации, может привести к грубым ошибкам при прогнозе осадок естественных оснований по методу, например, послойного суммирования.

ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СУПЕСЕЙ И СУГЛИНКОВ

При оценке прочностных характеристик грунтов используют теорию предельного состояния, определяющую параметры предельных значений напряжений, которые может выдержать образец грунта без разрушения. В данном случае рассмотрено напряженное состояние грунта при плоском срезе, то есть показатели прочности грунта определяются соотношением величин нормального сжимающего σ и касательного сдвигающего τ напряжений. Здесь используются принципы механики твердых тел, применяемые в грунтоведении как теория прочности Мора-Кулона и теория эффективных напряжений Терцаги. Взаимосвязь предельных касательных и нормальных напряжений описывается уравнением [3]:

$$\tau = (\sigma - U) \tan \varphi + C, \quad (3)$$

где U – давление в поровой воде (поровое давление), МПа; φ – угол внутреннего трения, град; $tg\varphi$ – коэффициент внутреннего трения; C – сцепление, МПа.

Уравнение Мора-Кулона решают с использованием данных максимальных сдвигающих усилий, поэтому оно характеризует условия предельного состояния грунтов – предельного равновесия, непосредственно предшествующего его разрушению [8]. При разных схемах нагружения определяются характеристики прочности грунта в тотальных и эффективных напряжениях, мгновенная и длительная, остаточная; в условиях дренированного и недренированного, консолидированного и неконсолидированного сдвига и т. п. Каждая получаемая при этом характеристика прочности имеет параметры φ и C , отличные от полученных при испытаниях по другим схемам приложения нагрузок.

В изыскательских организациях прямые показатели прочностных свойств обычно определяют лабораторным методом одноплоскостного среза по схемам консолидированно-дренированного и неконсолидированно-недренированного сдвига для грунтов соответственно в стабилизированном и нестабилизированном состоянии [4]. При этом в большинстве случаев испытания проводят по первой схеме. Результаты таких испытаний приведены в табл. 2. При этом следует обратить внимание на то, что в литературе приводятся аргументы о наибольшем соответствии работы грунта при погружении в него зонда неконсолидированно-недренированному срезу [2].

Как было упомянуто выше, в глинистых породах общее сопротивление сдвигу повышается с увеличением глинистости, хотя внутреннее трение при этом уменьшается [8], что прослеживается, например, по f_s в супесях и суглинках. Эта тенденция, по нашим данным, проявляется в значениях основных показателей прочностных свойств грунтов, полученных как по лабораторным исследованиям, так и по данным зондирования (см. табл. 2).

Как известно, общее сопротивление сдвигу глинистых пород состоит из двух частей: сцепления и внутреннего трения.

Сцепление пород обусловлено всеми видами структурных связей и не зависит от нормального давления. Оно вносит более существенный вклад в прочность грунта по сравнению с углом внутреннего трения [2].

Таблица 2 – Значения показателей прочностных свойств грунтов

Наименование грунта	Методы исследования					
	плоский сдвиг		статическое зондирование		литературные источники	
	удельное сцепление С, МПа	угол внутреннего трения φ, град.	удельное сцепление С, МПа	угол внутреннего трения φ, град.	удельное сцепление С, МПа	угол внутреннего трения φ, град.
Супесь	0,023–0,028	26–36	0,011–0,048	18–31	0,033–0,053	24–33
Суглинок	0,021–0,039	17–30	0,011–0,053	13–26	0,047	25

Отношение значений удельного сцепления $C_{\text{лаб.}}/C_{\text{зонд.}}$, полученные соответственно лабораторным методом и методом статического зондирования, находятся в интервале 0–3 для супесей и суглинков (рис. 2). Для супесей слабых, средней прочности и прочных это отношение преимущественно превышает единицу (рис. 3). На наш взгляд, это связано с тем, что процессы, происходящие при консолидированно-дренированном сдвиге, существенно изменяют естественное сложение грунтов – они уплотняются, следовательно, увеличивается и их прочность.

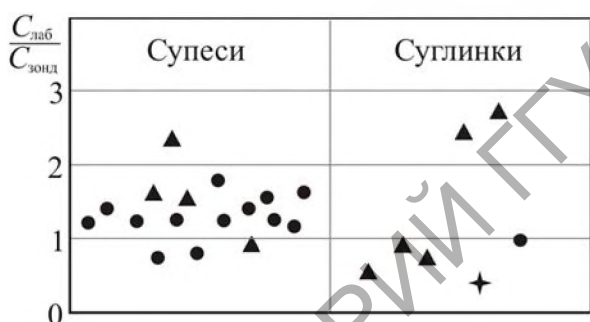


Рисунок 2 – Диаграмма рассеяния отношений значений удельного сцепления, полученных методами плоского среза и статического зондирования
Условные обозначения – на рис. 1

Внутреннее трение обуславливается силами трения, срезом частиц грунта и типом структурных связей, оно зависит от нормального давления и в известных пределах прямо пропорционально ему [3].

Отношение значений угла внутреннего трения, полученных методом одноплоскостного среза $\varphi_{\text{лаб.}}$ и методом зондирования $\varphi_{\text{зонд.}}$, изменяется в основном от 1 до 1,5 и, что характерно, практически во всех случаях больше единицы (рис. 4). На наш взгляд, это связано с уплотнением грунтов при лабораторных исследованиях, а также с тем, что здесь существенную роль играет внутреннее трение, а влияние капиллярных сил на этом фоне не так значительно, как в случае со сцеплением.

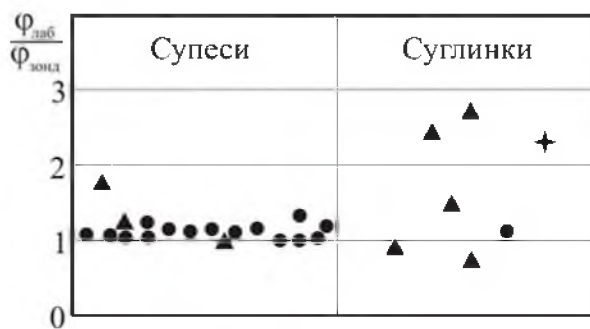


Рисунок 4 – Диаграмма рассеяния отношений значений угла внутреннего трения, определенных методом плоского среза и по результатам статического зондирования
Условные обозначения – на рис. 1



Рисунок 3 – Диаграмма рассеяния отношений значений удельного сцепления супесей, полученных методами плоского среза и статического зондирования
Условные обозначения – на рис. 1

При установлении корреляционных связей между показателями состава, строения и свойств грунтов (например, прочностных и деформационных характеристик грунтов по данным статического зондирования) необходимо учитывать условия проведения испытаний, в частности характер напряженного состояния пород. При статическом зондировании оно определяется давлением

и скоростью погружения зонда, которая должна быть постоянной и составлять $1,2 \pm 0,3$ м/мин [6]. Причем, показатели статического зондирования соответствуют состоянию грунта в процессе разрушения. Модуль деформации при штамповых испытаниях определяется, как правило, при нагрузках выше природных, при условии, что зависимость между напряжениями и деформациями может быть принята линейной. В основу расчета берется теория упругого деформируемого изотропного полупространства [5]. Напряженное состояние при плоском срезе характеризует условия предельного равновесия, непосредственно предшествующего разрушению грунта [8].

Тем не менее, как было сказано выше, к настоящему времени установлены корреляционные за-

висимости между показателями деформационных и прочностных характеристик грунтов и данными статического зондирования. Это связано с тем, что наиболее общие черты прочностного и деформационного поведения дисперсных пород контролирует вид структурных связей, тип и форма контактов частиц, которые формируются на стадиях седиментогенеза и диагенеза [3]. Поэтому при изучении физической природы процессов, происходящих в грунтах при приложении нагрузок (в напряженном состоянии), а также влияния на их изменения состава и строения грунтов необходимо учитывать их генезис.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондарик, Г. К.** Динамическое и статическое зондирование грунтов в инженерной геологии / Г. К. Бондарик. – Москва : Недра, 1964. – 163 с.
2. **Бусел, И. А.** Прогнозирование строительных свойств грунтов / И. А. Бусел. – Минск : Наука и техника, 1989. – 246 с.
3. **Грунтоведение** / под ред. Трофимова В. Т. [и др.]. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 1023 с.
4. **Грунты.** Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости : ГОСТ 12248–2010. – 2010. – 108 с.
5. **Грунты.** Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости : ГОСТ 20276–99. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2001. – 53 с.
6. **Грунты.** Методы полевых испытаний динамическим и статическим зондированием : ГОСТ 19912–2001. – Москва : МНТКС, 2001. – 21 с.
7. **Захаров, М. С.** Статическое зондирование в инженерных изысканиях / М. С. Захаров. – Санкт-Петербург, 2007. – 72 с.
8. **Ломтадзе, В. Д.** Инженерная геология. Инженерная петрология / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недра, 1984. – 511 с.
9. **Ломтадзе, В. Д.** Инженерная геология. Специальная инженерная геология / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недра, 1978. – 496 с.
10. **Методическое** пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / под ред. Е. М. Сергеева // Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. – Москва : Недра, 1984. – Т. 1 : Полевые методы. – 422 с.
11. **Прочностные** и деформационные характеристики грунтов по данным статического зондирования и пенетрационного каротажа : ТКП 45-5.01-15-2005 (02250). – Минск : Министерство архитектуры, 2005. – 21 с.
12. **Трацевская, Е. Ю.** Термин «субаквальные отложения» в системе нормативных документов инженерной геологии / Е. Ю. Трацевская, Г. А. Литвин, К. С. Коршукова // Літасфера. – 2020. – № 1 (52). – С. 122–132.
13. **Трацевская, Е. Ю.** Характеристики пластичности супесчаных неводонасыщенных грунтов юго-востока Беларуси / Е. Ю. Трацевская // Літасфера. – 2018. – № 1 (48). – С. 12–17.
14. **Трацевская Е. Ю.** Экспериментальное исследование параметров автотранспортного вибродинамического воздействия на массивы грунтов / Е. Ю. Трацевская // Вестник Белорусского государственного университета транспорта : Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 58–61.

Статья поступила в редакцию 13.10.2021

Рецензент В.В. Талецкий

УПЛЫЎ СТРУКТУРНЫХ СУВЯЗЕЙ НА ВЫНІКІ ВЫЗНАЧЭННЯ МЕХАНІЧНЫХ ХАРАКТАРЫСТЫК ДЫСПЕРСНЫХ ГРУНТОЎ ПА ДАНЫХ СТАТЫЧНАГА ЗАНДЗІРАВАННЯ

А.Ю. Трацэўская

Гомельскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Францыска Скарыны
вул. Савецкая, 104, 246019, Гомель, Беларусь
E-mail: eltrats@mail.ru

Праведзена параўнанне вынікаў вызначэння дэфармацыйных і трывальных характарыстык грунтоў метадамі штапавых выпрабаванняў і кансалідавана-дрэнаванага плоскага зрэзу з вынікамі даследаванняў статычным зандзіраваннем. Адзначана, што характарыстыкі грунту аднаго і таго ж інжыерна-геалагічнага элемента, устаноўленыя рознымі метадамі, могуць адрознівацца. Модулі дэфармацыі – у два разы, куты ўнутранага трэння – да паўтара, удзельнае счэпленне – да трох разоў. Паказана, што пры ўсталяванні прычынна-следчых сувязей паміж паказчыкамі складу, будовы і ўласцівасцей грунтоў (напрыклад, трывальных і дэфармацыйных характарыстык па даных статычнага зандзіравання) неабходна ўлічваць генезіс грунтоў і ўмовы правядзення выпрабаванняў.

INFLUENCE OF STRUCTURAL CONNECTIONS ON THE RESULTS OF DETERMINING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DISPERSED SOILS ACCORDING TO STATIC SOUNDING DATA

E. Tratsenskaya

Francysk Skaryna Gomel State University
104, Sovetskaya str., 246019, Gomel, Belarus
E-mail: eltrats@mail.ru

The results of determining the deformation and strength characteristics of soils by the methods of stamp tests and consolidated-drained flat section are compared with the results of static sounding studies. It is noted that the characteristics of the soil of the same engineering-geological element, established by different methods, may differ. The deformation modules are doubled, the internal friction angles are up to one and a half, and the specific adhesion is up to three times. It is shown that when establishing causal relationships between indicators of the composition, structure and properties of soils (for example, strength and deformation characteristics according to static sounding data), it is necessary to take into account the genesis of soils and the test conditions.