



**Ключевые слова:** испытания грунтов винтовым штампом; модули деформации; автоматизированная система; расчет осадки.

**Аннотация:** рассмотрено состояние вопроса испытаний грунтов винтовым штампом. Описаны конструкции винтовых штампов и устройств для их погружения. Рассмотрены методики определения начального и секущего модулей деформации. Проанализированы данные испытаний винтовым штампом глинистых грунтов.

**Key words:** screw plate tests of soils; deformation moduli; automated system; settlement computation.

**Abstract:** the state-of-the-art of screw plate tests of soils is reviewed. Constructions of screw plates (stamps) and devices for penetration of them are described. Techniques of determination of the initial and secant deformation moduli are considered. Data of screw plate tests of clay soils are analyzed.

# ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ ВИНТОВЫМ ШТАМПОМ SCREW PLATE TESTS OF SOILS

## **БОЛДЫРЕВ Г.Г.**

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

## **КАШИРСКИЙ В.И.**

Директор ООО «ГрандГЕО», к. т. н., г. Москва, kvi4908@gmail.com

## **СКОПИНЦЕВ Д.Г.**

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

## **МУНАЕВ С.-Э.Р.**

Главный геолог ГУП «Проектный институт «Миндорстройпроект»», г. Грозный, msr-1986@mail.ru

## **BOLDYREV G.G.**

Professor 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

## **KASHIRSKIY V.I.**

Director of the «GrandGEO» LLC, PhD (candidate of science in Technics), Moscow, kvi4908@gmail.com

## **SKOPINTSEV D.G.**

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

## **MUNAEV S.-E.R.**

Chief geologist of the «Mindorstroyproekt Design Institute» state unitary enterprise, Grozny, msr-1986@mail.ru

## **Введение**

Важной составляющей инженерных изысканий для строительства являются полевые испытания грунтов. Испытания винтовыми штампами не являются самыми распространенными, однако они имеют свои преимущества, к тому же в России их проведение регламентируется нормативными документами. После обзора состояния этого вопроса в статье будут рассмотрены конструкции установок и методы проведения испытаний винтовыми штампами, а также практические примеры и анализ их результатов в сравнении с данными других видов лабораторных и полевых испытаний.

Исследования с помощью винтового штампа впервые были выполнены О. Кюммеем [26, 27]. Позднее такие испытания провели Дж.Х. Голд [22] и Дж. Шмертман [36] в песчаных грунтах. Н. Янбу и К. Сеннесет [24] предложили методику интерпретации результатов полевых испытаний винтовым штампом для определения деформационных и консолидационных характеристик мелкозернистых грунтов. Р. Дальберг [20] применил такой штамп для оценки влияния предварительного уплотнения на деформируемость сыпучих грунтов. Значительный объем работ в этом направлении выполнил А. Мазленд [28–32]. И.Ф. Шваб и Б.Б. Бромс [37, 38] предложили использовать данный метод для испытаний слабых глинистых грунтов.

Позднее А.П.С. Селвадурай с соавторами [39] выполнили обобщение многочисленных теоретических решений задачи о нагружении упругого полупространства штампами с разными жесткостью и конфигурацией и обосновали возможность применения винтовых штампов для определения недренированных модуля упругости и прочности. Недренированный модуль упругости определяется по формуле:

$$E_u = \frac{pr}{s}, \quad (1)$$

где  $p$  — давление;  $s$  — осадка штампа;  $r$  — радиус штампа; отношение  $E_u s/pr$  изменяется в пределах 0,750–0,525 (нижний предел характерен для водонасыщенных глинистых грунтов).

Следует отметить обзорную статью Ф.Г. Белла с соавторами [17], в которой рассказывается об испытаниях плоским и винтовым штампами. В ней показано, что в результате штамповых испытаний определяется не только модуль деформации, но и показатель недренированной прочности  $c_u$  по формуле:

$$c_u = \frac{P_{ult} - \gamma z}{N_c}, \quad (2)$$

где  $p_{ult}$  — предельная нагрузка;  $\gamma$  — удельный вес грунта;  $z$  — глубина испытаний;  $N_c$  — коэффициент, равный для круглого плоского штампа 6,2 на поверхности и 9,3 в забое скважины.

Модуль упругости  $E$  находится по формуле:

$$E = \frac{\pi p D (1 - \nu^2)}{4s}, \quad (3)$$

где  $p$  — давление, соответствующее осадке  $s$ ;  $D$  — диаметр плоского штампа;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Ф.Г. Белл с соавторами [17] и Дж.А. Хупер [23] сопоставили данные, полученные при испытаниях лондонской глины разными методами. Они установили, что из-за трещиноватости глины полевые штамповые испытания дают меньшие значения недренированной прочности и большие величины модуля упругости по сравнению с лабораторными трехосными испытаниями. Следует отметить, что значение дисперсии возрастает с увеличением размера штампа [30].

Ф.Г. Белл с соавторами [17] отметили, что испытания винтовым штампом

аналогичны испытаниям круглым плоским штампом [25], однако преимущество первых состоит в том, что для погружения винтового штампа не требуются шурфы или скважины и испытания легко выполнять ниже уровня грунтовых вод. Их недостатком является нарушение структуры грунта при его резании вращающимся штампом.

Одними из относительно новых в этом направлении являются работы Л. Нам-У с соавторами [33] (где приведены результаты лабораторных испытаний грунтов винтовым штампом с целью отработки его конструкции), С.Т. Нора с соавторами [34] и др.

Следует отметить, что за рубежом с конца 1980-х годов исследования в этом направлении не ведутся и в настоящее время проводятся испытания не винтовым, а плоским штампом (например, с целью определения приведенного модуля упругости при контроле качества полотна автомобильных дорог) [15, 16].

В России согласно ГОСТ 20276 [2] испытания грунтов штампами проводят для определения следующих характеристик деформируемости: модуля деформации  $E$  для крупнообломочных грунтов, песков, глинистых, органоминеральных и органических грунтов; начального просадочного давления  $p_{sp}$ ; относительной деформации просадочности  $\varepsilon_{sl}$  для просадочных глинистых (кроме набухающих и засоленных) грунтов при испытании с замачиванием.

Чаще всего цель испытаний заключается в определении модулей деформации грунтов в их естественном состоянии, а в некоторых случаях — после их искусственной модификации, например уплотнения. Искомыми характеристиками являются модуль общей деформации  $E_o$  и упругий модуль деформации  $E_e$ , которые необходимы для расчета осадок фундаментов  $s$  с использованием следующего выражения (по СП 22.13330 [11]):

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zv,i}) h_i}{E_{o,i}} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zv,i} h_i}{E_{e,i}}, \quad (4)$$

где  $\beta$  — безразмерный коэффициент, равный 0,8;  $i$  — номер слоя грунта;  $n$  — число слоев грунта в пределах сжимаемой толщи под подошвой фундамента;  $\sigma_{zp,i}$  — среднее вертикальное нормальное напряжение в  $i$ -м слое грунта от внешней нагрузки;  $\sigma_{zv,i}$  — среднее вертикальное напряжение в  $i$ -м слое от собственного веса грунта, выбранного при откопке котлована;  $h_i$  — толщина

$i$ -го слоя;  $E_{o,i}$  — модуль деформации  $i$ -го слоя по ветви первичного нагружения;  $E_{e,i}$  — модуль деформации  $i$ -го слоя по ветви вторичного нагружения.

Обратные вычисления по измеренным осадкам (см. формулу (4)) при известном давлении под подошвой фундамента позволяют интегрально оценить грунтовые условия (слоистость оснований, перераспределение нагрузки, временные эффекты), которые сложно учесть при прямых полевых или лабораторных испытаниях.

Испытания в полевых условиях выполняются с наименьшим нарушением природной структуры грунтов в отличие от лабораторных исследований, для которых приходится отбирать монолиты и вырезать из них образцы. Кроме того, полевые испытания проводятся при существующем уровне природных вертикальных и горизонтальных напряжений от собственного веса грунта, в то время как в случае лабораторных исследований уровень горизонтальных природных напряжений заранее не известен и требуются дополнительные испытания для их определения. Еще одним достоинством полевых испытаний является то, они проводятся при естественном дренировании, которое в лабораторных условиях приходится моделировать.

Целесообразность штамповых испытаний отражена в ряде нормативных документов [11, 12]. В СП 22.13330.2011 [11] более конкретно прописана необходимость проведения испытаний штампами. Например, в пункте 5.3.3 этого документа указано: «Достоверными методами определения деформационных характеристик дисперсных грунтов являются полевые испытания статическими нагрузками в шурфах, дудках или котлованах с помощью плоских горизонтальных штампов площадью 2500–5000 см<sup>2</sup>, а также в скважинах или в массиве с помощью винтовой лопасти-штампа площадью 600 см<sup>2</sup>». Далее в пункте 5.3.4 говорится о том, что для сооружений I уровня ответственности значения модуля деформации по данным прессиометрических испытаний должны уточняться на основе их сопоставления с результатами параллельно проводимых испытаний того же грунта штампами. Для сооружений I и II уровня ответственности результаты испытаний зондированием также должны корректироваться на основе данных штамповых испытаний (п. 5.3.5) (применяя статическое зондирование, следует иметь в виду, что модуль деформации, определяемый этим методом, как и

параметры прочности, является эмпирическим, так как при интерпретации его данных используются результаты лабораторных испытаний). Точно такие же требования предъявляются и к результатам определения модулей деформации с помощью компрессионных и трехосных испытаний: они должны уточняться по данным испытаний того же грунта штампами (п. 5.3.6).

Таким образом, отечественные нормативные документы говорят о необходимости использования штамповых испытаний при определении модулей деформации. Однако на практике изыскатели очень часто пренебрегают этими требованиями и не проводят испытания штампами, ссылаясь на несогласие заказчиков, а некоторые используют повышающие коэффициенты для корректировки компрессионных модулей деформации даже для сооружений I и II уровней ответственности, что вообще недопустимо.

Стоит отметить, что в зарубежной практике изысканий ситуация несколько иная. Так, согласно требованиям Еврокода-7 [21] в Евросоюзе используются следующие методы для определения модуля деформации: обратные вычисления по измеренным осадкам фундаментов существующих зданий при известных грунтовых условиях; выполнение эмпирических оценок с использованием не прямых полевых испытаний, таких как статическое, динамическое и дилатометрическое зондирование; штамповые и прессиометрические испытания; компрессионные испытания образцов грунта в лабораторных условиях; испытания образцов в условиях трехосного сжатия.

### Конструкция винтового штампа

На рисунке 1 показаны примеры штампов, применяемых за рубежом и в России.

Определяющими характеристиками винтового штампа являются его жесткость и толщина лопасти. Показатель относительной жесткости штампа  $R$  определяется по формуле [33]:

$$R = \frac{\pi(3 - 4\nu)(1 + \nu)}{12(1 - \nu_s)(1 - \nu)} \cdot \frac{E_s}{E} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^3 \geq 10, \quad (5)$$

где  $E$ ,  $\nu$  — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона грунта;  $E_s$ ,  $\nu_s$  — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала штампа;  $t$  — толщина лопасти штампа;  $r$  — радиус штампа.

Вначале винтовой штамп был предложен для испытаний песчаных грунтов [22], но затем его начали применять и в глинистых отложениях [18, 25, 38]. ГОСТ 20276 рекомендует применять штамп диаметром 277 мм и площадью 600 см<sup>2</sup>. Однако на практике в большинстве случаев используются штампы различных диаметров — от 100 до 350 мм.

Толщина винтовой лопасти принимается равной 1 см. Однако, по мнению В.И. Каширского, она должна быть 2 см: «Это обусловлено тем, что увеличивается заглубление зданий и сооружений и возрастают удельные нагрузки на грунты. Испытания грунтов винтовыми штампами все чаще выполняются до давления 500 кПа и более. Если толщину лопасти не увеличить до указанных размеров, то при больших нагрузках будет происходить изгиб периферийной части лопасти и она уже не будет являться жестким штампом» [4].

Шаг лопасти зависит от способа погружения штампа. В массиве без бурения скважины он должен быть равен 8 см, в забое скважины — 5 см. С.-М.К. Хубаев [13] и М.Д. Иродов [3] на основе своих исследований считают, что шаг лопасти штампа площадью 600 см<sup>2</sup> должен составлять 0,18–0,20 его диаметра.

Основные различия между известными конструкциями винтовых штампов заключаются в способах анкеровки системы нагружения и снятия сил трения между грунтом и штангой (при этом конфигурация и размеры лопасти остаются неизменными). В.И. Каширский пишет о выбранном для испытаний винтовом штампе следующее: «Диаметр ствола с учетом уменьшения сил трения по боковой поверхности штампа и при испытании грунта, принят С.-М.К. Хубаевым... равным 5 см (с учетом длины ствола, равной 60 см, с выступанием над забоем скважины). Для обеспечения центрирования винтового штампа при его закручивании он был дополнительно оснащен лидирующим конусным наконечником с углом заострения 60°. Форма лопасти была выбрана одновитковой толщиной 1 см» [4].

Следует отметить, что общим недостатком многих конструкций для испытаний грунтов является громоздкость и многодельность реперных систем, на которые могут оказывать негативное влияние ветер и температурное расширение или сужение металла в зависи-

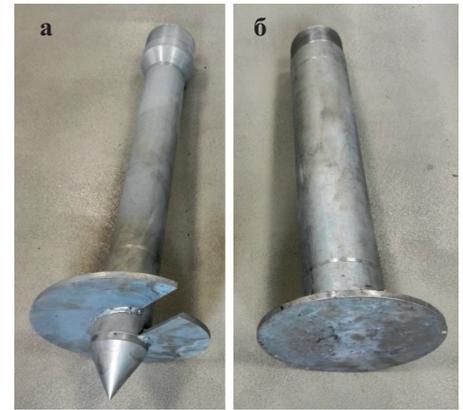


Рис. 1. Примеры винтового (а) и плоского (б) штампов

мости от температуры воздуха и освещенности солнцем. В связи с этим неизбежны значительные погрешности при измерении осадок (линейных перемещений). Поэтому точность измерений по ГОСТ 20276-2012 [2] принята равной 0,1 мм.

Также следует обратить внимание на то, что все без исключения устройства для испытаний грунтов на больших глубинах (в скважинах) имеют следующие общие недостатки:

- нагрузка (давление) создается на дневной поверхности и передается через колонну труб (штанг) на глубину испытаний грунта;
- осадки (линейные перемещения) устройства происходят на глубине испытаний, а регистрация их выполняется опять на дневной поверхности.

Это может приводить к искажению результатов испытаний. Поэтому идеальным было бы создание нагрузок и измерение осадок непосредственно в зоне установки винтового штампа.

В соответствии с патентами РФ № 2252296 [5] и 2252297 [6] способы испытаний грунтов винтовыми штампами (рис. 2, 3) обеспечивают проведение всех измерений непосредственно вблизи глубины испытаний и предусматривают их выполнение как в ускоренном режиме методом релаксации напряжений, так и стандартным методом для проведения параллельных сравнительных тестов.

Вариант винтового штампа в соответствии с патентом РФ № 2252297 [6] является промежуточным между собственно винтовым штампом и клиновым дилатометром, то есть представляет собой винтовой дилатометр (см. рис. 3). Рекомендации [14], разработанные в ПНИИИС и ЗапСибТИСИЗ для расклинивающего дилатометра РД-100 [7] и введенные в действие в 1991 году,

вполне могут быть применены и к данному винтовому штампу-дилатометру.

Испытания винтовым дилатометром выполняют следующим образом. С помощью бурового станка с применением минимально необходимой осевой нагрузки заворачивают в массив грунта на заданную глубину винтовой штамп в виде штанги с закрепленной на ее нижнем конце винтовой лопастью. При этом деформация грунта под штампом происходит одновременно с заворачиванием штампа за счет использования винтовой лопасти с равномерно увеличивающейся толщиной от периферии к центру. Лопасть оборудована заподлицо с ее нижней поверхностью тензодатчиками давления, соединенными кабелем с дневной поверхностью. При достижении заданной глубины испытания непосредственно перед остановкой процесса погружения штампа фиксируют нестабилизированное давление, а сразу после остановки снимают с датчиков стабилизированные показания (значения модуля деформации) и сразу включают секундомер. Затем через каждые 2 минуты снимают еще по 3 показания с каждого датчика с момента включения секундомера. После этого винтовой штамп погружают на следующую глубину испытания. При этом кабель в скрученном в спираль виде размещают в полый колонне труб и извлекают на дневную поверхность после заворачивания лопасти на заданную глубину с помощью электромагнитной ловушки.

#### Методика проведения испытаний грунтов винтовым штампом

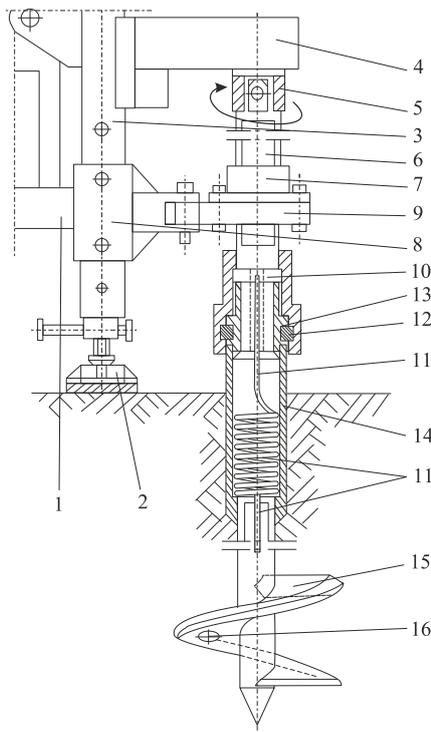
В России свою конструкцию винтового штампа и методику испытаний грунтов с его помощью первым разработал Л.Г. Мариупольский [9, 10] (за рубежом в этом отношении обычно ссылаются на отмеченную выше работу О. Кюмменера [26]).

Для контроля заворачивания штампа ниже забоя скважины Л.Г. Мариупольский [10] предложил использовать так называемый коэффициент погружения:

$$K_n = \frac{\Delta h}{a}, \quad (6)$$

где  $\Delta h$  — глубина погружения лопасти в грунт за один оборот;  $a$  — шаг винтовой лопасти.

С.-М.К. Хубаев [13] показал, что оптимальный режим погружения винтовой лопасти имеет место в том случае, если выполняется следующее

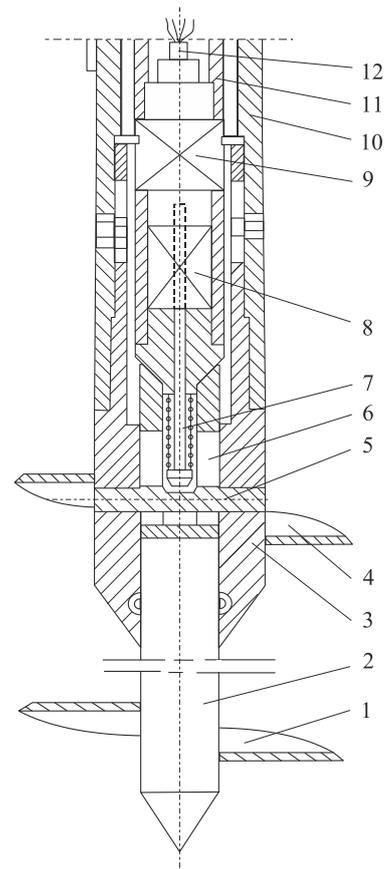


**Рис. 2.** Схема устройства винтового штампа и системы нагружения с передачей данных («осадка – нагрузка») с глубины испытания на поверхность: 1 — буровой станок; 2 — триггеры; 3 — поворотная мачта; 4 — вращатель; 5 — вал вращателя; 6 — винт; 7 — силовая гайка; 8 — кронштейн; 9 — шарнирные упоры; 10 — прорезь для кабеля; 11 — кабель; 12 — вилка; 13 — верхний конец колонны труб; 14 — колонна труб; 15 — винтовая лопасть; 16 — датчики

условие:  $0,7 \leq K_n \leq 1,0$ . При  $K_n > 1,0$  глубина погружения винтовой лопасти превышает ее шаг и происходит уплотнение грунта под штампом (в водонасыщенных слабых глинистых грунтах, если сумма осевой нагрузки и веса колонны буровых штанг превышает давление предварительного уплотнения). А при  $K_n < 0,7$  погружение невозможно (когда в массиве встречаются прослой жесткого грунта или жесткие включения).

Внедрение винтового штампа проводят заворачиванием без бурения скважины или ниже ее забоя. В слабых глинистых грунтах используются специальные обсадные трубы с внутренним диаметром 300 мм.

При испытании в скважине глубина заворачивания винтового штампа ниже ее забоя должна быть 50 см для глинистых грунтов с показателем текучести  $I_L > 0,75$  и для водонасыщенных песков и 30 см для других разновидностей отложений [13].



**Рис. 3.** Схема устройства винтового дилатометра: 1 — винтовой штамп; 2 — хвостовик; 3 — обойма репера; 4 — репер; 5 — опорный диск; 6 — сквозное окно; 7 — шток датчика линейных перемещений; 8 — датчик линейных перемещений; 9 — датчик нагрузки; 10 — колонна труб; 11 — штанга; 12 — кабель

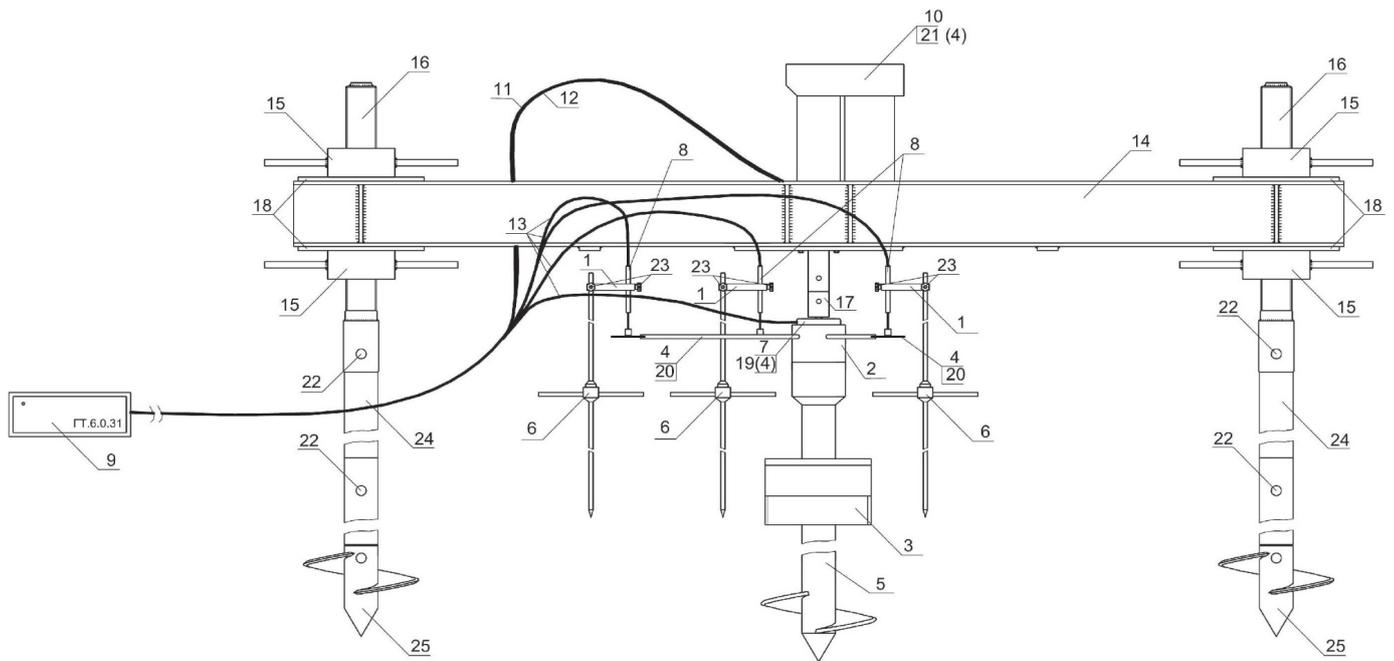
Нагрузку на винтовой штамп, как и на плоский, рекомендуют прикладывать ступенями. Общее число ступеней после достижения давления, соответствующего вертикальному эффективному напряжению от собственного веса грунта на отметке испытания, должно быть не менее четырех.

#### Оборудование для испытаний

Комплект оборудования для полевых испытаний дисперсных грунтов винтовым штампом, используемый, например, в ООО «НПП «Геотек»», состоит из автоматизированного испытательного комплекса АСИС и дополнительных приспособлений, предназначенных для проведения испытаний по ГОСТ 20276 (рис. 4).

В состав комплекта входят:

- винтовой и плоский штампы площадью 600 см<sup>2</sup>;
- устройство силового нагружения на 100 кН, предназначенное для создания осевой нагрузки на штамп



**Рис. 4. Схема комплекта оборудования для полевых испытаний дисперсных грунтов винтовым штампом, используемого в ООО «НПП «Геотек»»:** 1 — держатель датчиков перемещения; 2 — основание датчика силы; 3 — оголовок; 4 — упор; 5 — винтовой штамп; 6 — стержень; 7 — датчик силы; 8 — датчики перемещений; 9 — блок электропитания; 10 — устройство для силового нагружения; 11–13 — кабель; 14 — опорная балка; 15 — гайка; 16 — переходник; 17 — упор; 18 — плита; 19–21 — винт; 22 — палец шнекового соединения; 23 — лепестковая ручка; 24 — шнековая штанга; 25 — винтовой анкер

Таблица

**Физические характеристики инженерно-геологических элементов (ИГЭ) на испытательном полигоне в г. Пензе\***

№ ИГЭ**	Грунт (название по ГОСТ 25100)	W, %	ρ, г/см <sup>3</sup>	e	S <sub>r</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>
2	Суглинок полутвердый	21	1,86	0,752	0,74	14	0,01
3	Глина полутвердая	21	1,96	0,683	0,84	20	0,18
4	Глина тугопластичная	23	2,00	0,674	0,93	20	0,34
5	Песок средней крупности, средней плотности, водонасыщенный	19	1,98	0,601	0,85	-	-

\* W — природная влажность; ρ — плотность грунта; e — коэффициент пористости; S<sub>r</sub> — коэффициент водонасыщения; I<sub>p</sub> — число пластичности; I<sub>L</sub> — показатель текучести.  
 \*\* ИГЭ-1 — это почвенно-растительный слой, поэтому он не указан.

- при статическом и кинематическом способах нагружения;
- измерительная система АСИС (датчик силы, три датчика линейных перемещений, блок электроники) для определения нагрузки на штамп и его осадки;
- программное обеспечение АСИС для управления процессом создания нагрузки на штамп и регистрации показаний датчиков силы и перемещений;
- реперная система для обеспечения независимого измерения осадки штампа;
- анкерная система для восприятия реактивного усилия от штампа;
- комплект изделий для передачи нагрузки от устройства силового нагружения на штамп.

**Результаты испытаний**

Все испытания были выполнены с использованием вышеописанного комплекта оборудования в полутвердом суглинке на полигоне ООО «НПП «Геотек»» в г. Пензе (см. таблицу) и в просадочных грунтах в г. Грозном при природной влажности без замачивания. В общей сложности было проведено 12 испытаний по методикам ГОСТ 20276-2012 и с непрерывным нагружением со скоростью 0,1 мм/мин.

На рисунке 5 показан общий вид полевой лаборатории, разработанной ООО «НПП «Геотек»» (г. Пенза) совместно с ООО «Завод буровых технологий» (г. Санкт-Петербург), которая использовалась при испытаниях в г. Пензе. Этот комплект включает буровой станок и лабораторное оборудование внутри кузова. Там же находится пресс для заедвливания зонда или дилатометра при проведении полевых испытаний грунтов. В отличие от известных буровых станков этот комплект оснащен смещаемым устройством для динамического зондирования, которое размещено на мачте. На переднем плане рис. 5 видна собранная установка для испытаний винтовым

штампом. С использованием данной машины была пробурена скважина, завинчен штамп и установлены два анкера для крепления опорной балки (рис. 6).

На рисунках 7, 8 показан вид установки для испытаний винтовым штампом, собранной на площадке с просадочными грунтами в г. Грозном.

На рисунке 9 приведены результаты нескольких испытаний в полутвердом суглинке. Осевая нагрузка прикладывалась ступенями по 0,025 МПа, в то время как в таблице 5.3 ГОСТ 20276-2012 [2] рекомендуется использовать значение 0,1 МПа.

Для определения модуля деформации согласно рекомендациям ГОСТ [2]

по зависимости «осадка — нагрузка» следует найти осадку от бытового давления  $\sigma_{zg}$ , соответствующую прямолинейному участку (до четвертой точки графиков на рис. 9).

На рисунке 10 в большем масштабе показан начальный участок зависимости осадки от нагрузки (см. рис. 9, а) для случая испытаний на глубине 1,5 м.

Бытовое давление определяется по формуле:

$$\sigma_{zg} = \gamma \cdot z, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — удельный вес грунта;  $z$  — глубина от поверхности природного рельефа до подошвы штампа.

В нашем случае  $\sigma_{zg} = 18,6 \cdot 1,5 = 27,9 \text{ кН/м}^2 \approx 0,028 \text{ МПа}$ , а четвертая ступень давления равна 0,125 МПа.

Как видно из рис. 9, б, среднее значение модуля деформации по данным двух испытаний составляет 4,7 МПа. Если же находить модуль в интервале давления от бытового до третьей ступени нагружения величиной 0,1 МПа, то получим значение модуля деформации 5,25 МПа. Видно, что модуль деформации является функцией осадки, возрастающей с ее уменьшением.

Естественно, возникает вопрос: почему за расчетную надо брать четвертую точку на линейном участке зависимости «осадка — нагрузка»? Если бы данные испытания были проведены при ступенях величиной 0,1 МПа (по ГОСТ 20276), то четвертая точка соответствовала бы осадке 70 мм (см. рис. 9, а) и мы бы получили модуль деформации менее 1 МПа.

Так какие же ступени давления следует создавать при проведении испытаний винтовым штампом? Чем меньше, тем лучше! Однако в этом случае кто-то может возразить, что продолжительность испытаний увеличится, так как следует дожидаться стабилизации деформаций на каждой ступени нагружения. Однако опыты авторов показывают, что при малых ступенях нагружения время стабилизации деформаций в твердых суглинках не превышает 30 минут. К тому же при использовании системы АСИС, которая автоматически создает и поддерживает постоянные нагрузки (присутствие оператора на этапе проведения испытания не требуется) трудоемкость испытаний резко уменьшается.

Какой же модуль деформации следует рекомендовать проектировщикам?



Рис. 5. Полевая лаборатория, использованная для испытаний на полигоне ООО «НПП «Геотек»» в г. Пензе



Рис. 6. Установка двух анкеров и штампа в скважине без обсадной трубы на полигоне ООО «НПП «Геотек»» в г. Пензе



Рис. 7. Испытания винтовым штампом в г. Грозном



Рис. 8. Комплект для испытаний грунтов винтовым штампом, использованный при работах в г. Грозном

Если выполняется расчет методом элементарного послойного суммирования (по формуле (4)) — то тот, который соответствует дополнительным напряжениям от веса здания на глубине испытаний.

На рисунке 11, а приведена схема нагружения грунта винтовым штампом. Слева и справа от штампа показаны эпюры напряжений от собственного

веса грунта, а под ним — эпюра напряжений от нагрузки.

На рисунке 11, б показана расчетная схема осадки по СП 22.13330.2011 [11]. Как видно из нее, сжатие элементарного слоя грунта на какой-либо глубине ниже подошвы фундамента определяется дополнительным давлением от веса сооружения  $\Delta\sigma_{zp}$ . Эти напряжения добавляются к бытовым напряжениям  $\sigma_{zg}$  и вызы-

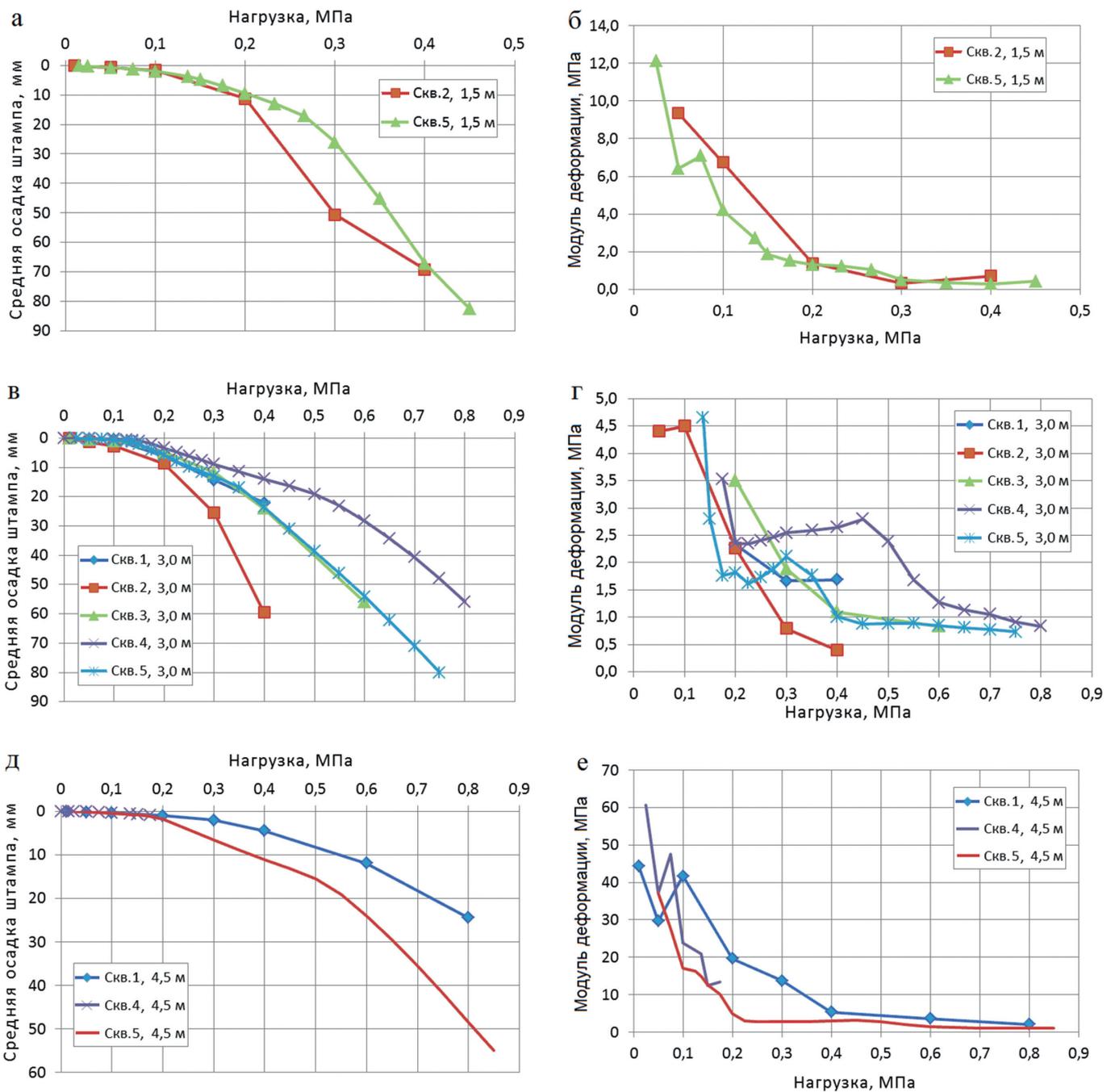


Рис. 9. Результаты испытаний винтовым штампом в полутвердом суглинке в различных скважинах (скв.) на разной глубине: а, б — 1,5 м; в, г — 3,0 м; д, е — 4,5 м

вают сжатие грунта и тем самым осадку фундамента. Следовательно, секущий модуль деформации ( $E_c$  на рис. 11, в) также должен находиться по данным испытаний штампом при этих дополнительных напряжениях. Например, если дополнительное давление на глубине 1,5 м равно 200 кПа, то, используя зависимость, показанную на рис. 9, а, находим, что секущий модуль деформации равен 2,8 МПа. Начальный, или касательный, модуль деформации, найденный на прямолинейном участке зависимости осадки от давления, значительно больше и равен в этом случае 10,5 МПа.

Поскольку дополнительные напряжения рассеиваются с глубиной, на большей глубине приращение дополнительных напряжений  $\Delta\sigma_{zp}$  будет меньше, бытовые напряжения будут больше — следовательно, модуль деформации будет выше. В некоторых работах закон возрастания модуля деформации с глубиной принимается линейным, однако это в большей степени справедливо для однородной грунтовой толщи.

Если предполагается рассчитать осадку фундамента с использованием упругопластического закона деформирования, то для расчета осадки следует

рекомендовать начальный модуль деформации  $E_n$  (см. рис. 11, б), который с натяжкой можно назвать упругим модулем деформации.

Иногда задают следующий интересный вопрос. В каком интервале давления проводить сравнение компрессионного и штампового модулей деформации? До сих пор многие находят связь между компрессионным и начальным штамповым модулями в интервале давлений 100–200 кПа. Из изложенного в статье ранее следует, что коэффициент перехода надо определять при равных интервалах давлений в компрессионном приборе с учетом результатов ис-

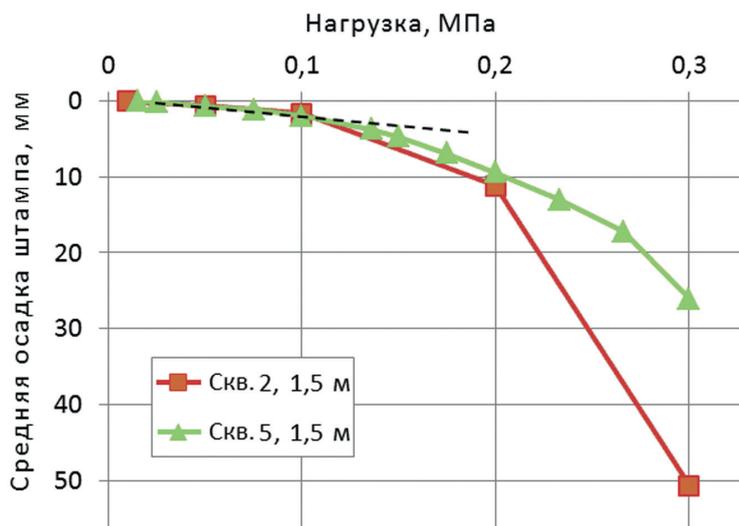


Рис. 10. К выбору ступеней давления (увеличенный фрагмент рис. 9, а)

пытаний штампом. На рисунках 11 в, г показаны зависимости «осадка — давление» и «деформация — давление» для одного и того же грунта, полученные по данным испытаний штампом и в компрессионном приборе соответственно. Зная величину дополнительного давления на рассматриваемой глубине под фундаментом ( $\Delta\sigma_{zp}$ ), по компрессионной кривой для этого интервала давления находим значение одометрического модуля деформации  $E_{oed}$  (с учетом напряжений от собственного веса грунта  $\sigma_{zg}$ ) (см. рис. 11, в). Далее по кривой зависимости для этого же дополнительного давления  $\Delta\sigma_{zp}$  находим значение секущего модуля деформации  $E_c$ . Тогда коэффициент перехода  $m_k = E_c / E_{oed}$ . Отметим, что в интервале линейного деформирования начальный и секущий модули деформации совпадают.

Изложенное выше противоречит устоявшимся представлениям о постоянстве модуля деформации и его независимости от напряженного состояния. Это видно из таблицы 5.1 СП 22.13330, в которой модуль деформации является функцией вида грунта и коэффициента пористости.

Начальный модуль деформации в какой-то степени характеризует упругое поведение грунта, не зависит от напряженного состояния, а зависит только от физического состояния грунта. Поэтому его можно применять при определении  $m_k$ . Однако не ясно, какой модуль деформации использовать при этом сравнении — компрессионный или одометрический.

Авторы настоящей работы исходят из того мнения, что при нахождении осадки фундаментов по формуле (4)

следует применять начальное значение штампового модуля деформации, так как метод расчета основан на решении задачи о распределении напряжений в упругом полупространстве. В этом случае нахождение коэффициента перехода не требуется и компрессионные испытания можно не проводить. Понятно, что подобный взгляд не понравится изыскателям, так как это уменьшает их объем работ. Однако если используются численные методы для расчета осадки, то компрессионные испытания необходимы, так как по их данным находятся параметры, характеризующие зависимость объемного сжатия от давления.

Существует еще одна проблема — зависимость начального модуля деформации от площади штампа. Чем больше штамп, тем выше модуль деформации. Испытания штампами площадью 600 см<sup>2</sup> дают меньшие значения модуля деформации по сравнению с более крупными штампами [8]. Однако в этом случае расчетная осадка получается самой большой из возможных. Данное обстоятельство приводит к увеличению стоимости фундаментов, но, с другой стороны, повышает надежность проектируемых оснований.

Перейдем к анализу испытаний винтовым штампом на просадочных грунтах. На рис. 12 приведен один из графиков испытаний винтовым штампом в лессовых породах при их природной влажности на глубине 3,5 м.

Для просадочного грунта природной влажности ступень давления должна быть принята равной 0,5 МПа (в соответствии с таблицей 5.4 ГОСТ 20276-2012 [2]). Однако испытания (рис. 12) были проведены при ступенях давления величи-

ной 0,05 МПа, то есть в 10 раз меньше по сравнению с рекомендуемой.

Какие же значения ступеней давления следует принимать? Надо ли учитывать рекомендации таблиц 5.2–5.4 ГОСТ 20276-2012 [2]? В пункте 5.5.1 данного ГОСТ допускается возможность применения меньших ступеней давления в том случае, если зависимость «осадка — нагрузка» имеет нелинейный характер на начальных ступенях нагружения. Вопрос только в том, что неизвестно, какие деформации проявятся — упругие или неупругие, а вернуться назад уже невозможно. Отсюда вытекает рекомендация изначально принимать небольшие ступени давления. Конечно, это приведет к увеличению продолжительности испытания, но результаты будут отражать реальное деформационное поведение грунта под нагрузкой.

Рассмотрим теперь возможность использования таблицы 5.3 ГОСТ 20276-2012 [2], которую не рекомендуют применять для просадочных грунтов. Показатель текучести просадочного грунта  $I_L$  равен 0,1. Согласно указанной таблице для глинистых непросадочных грунтов при  $I_L \leq 0,25$  и коэффициенте пористости  $e = 0,84$  ступень давления должна быть принята равной 0,025 МПа. Авторами же были выполнены испытания при ступенях давления величиной 0,05 МПа. Если бы испытания провели, приняв ступени давления по 0,025 МПа, полученная зависимость, показанная на рис. 12, имела бы более выраженную нелинейность на начальном участке, а угол ее наклона к оси давления был бы еще меньше. Отсюда напрашивается еще один вывод: чем меньше ступени давления, тем больше начальный модуль деформации. В идеале, уменьшая их значения, можно получить упругий модуль деформации.

На рисунке 13 приведены зависимости, подобные рассмотренным ранее (см. рис. 9). Отличие в том, что они получены при непрерывном нагружении штампа со скоростью 0,1 мм/мин., что позволяет делать комплекс АСИС. В этом случае зависимости «осадка — нагрузка» выглядят билинейными в отличие от приведенных на рис. 9. Первые их прямолинейные участки можно использовать для определения величин упругого/начального модуля деформации. Были получены значения модулей от 22,5 до 25,3 МПа. С использованием углов наклона вторых прямолинейных участков получились модули деформации от 1,8 до 2,8 МПа, которые суще-

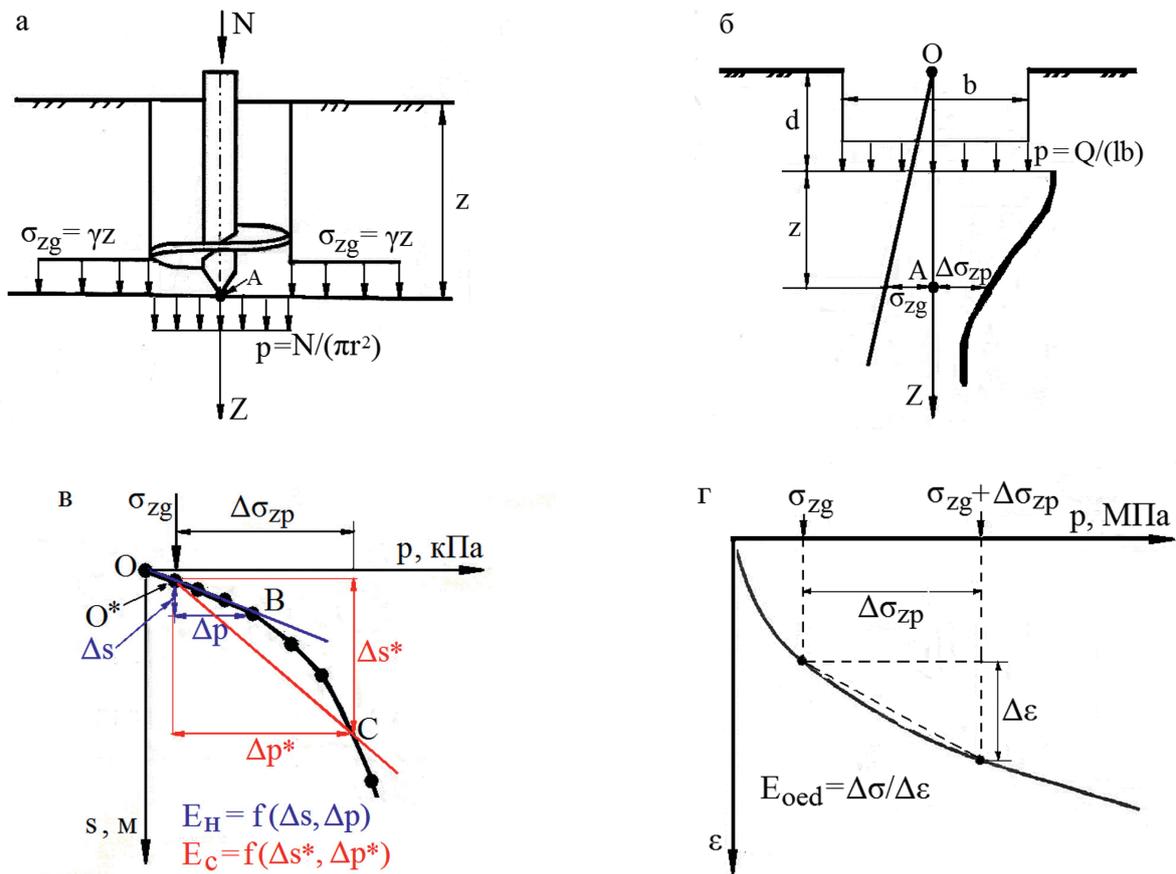


Рис. 11. К определению модуля деформации для расчета осадки по СП 22.13330.2011: а — схема нагружения грунта винтовым штампом (слева и справа от него показаны эпюры напряжений от собственного веса грунта, под ним — эпюра напряжений от нагрузки); б — расчетная схема осадки по СП 22.13330.2011; в, г — зависимости «осадка — давление» и «деформация — давление» для одного и того же грунта, полученные по данным испытаний штампом и в компрессионном приборе соответственно. Буквенные обозначения:  $\sigma_{zg}$  — бытовое напряжение;  $\gamma$  — удельный вес грунта;  $z$  — глубина;  $p$  — давление;  $N$  — нагрузка на штамп;  $r$  — радиус штампа; точкой А отмечена глубина испытаний винтовым штампом;  $\Delta\sigma_{zp}$  — дополнительное давление от веса сооружения;  $d$  — глубина заложения подошвы фундамента;  $Q$  — нагрузка от веса здания;  $l$  — длина фундамента;  $b$  — ширина фундамента;  $s$  — осадка; ОВ — касательная; О\*С — секущая;  $\Delta p$ ,  $\Delta p^*$  — приращения давления в точках В и С соответственно;  $\Delta s$ ,  $\Delta s^*$  — приращения осадки в точках В и С соответственно;  $E_n = f(\Delta s, \Delta p)$  — начальный модуль деформации;  $E_c = f(\Delta s^*, \Delta p^*)$  — секущий модуль деформации;  $\varepsilon$  — относительная деформация;  $E_{oed} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$  — одометрический модуль деформации;  $\Delta\sigma$  — приращение напряжения;  $\Delta\varepsilon$  — приращение относительной деформации

ственно отличаются от полученных при статическом нагружении штампа. Так как нагружение выполнялось быстро, без стабилизации деформаций, то следует говорить об определении недренированного модуля деформации. Планируется провести сравнительные испытания и найти связь между дренированным и недренированным модулями деформации, а также определить влияние скорости нагружения на характер зависимости «осадка — нагрузка».

На курсах повышения квалификации в ООО «НПП «Геотек»» были проведены штамповые испытания в скважинах без предварительной зачистки забоя. При этом наличие шлама в забое существенно повлияло на результаты. Первый опыт был выполнен с помощью плоского штампа (рис. 14, а), второй — с завинчиванием винтового штампа ниже забоя скважины (рис. 14, б). Интересно отметить, что в первом случае

зависимость похожа по виду на компрессионную, а во втором — на классическую с обратной кривизной. Модули деформации получились равными 0,5 и 5,7 МПа соответственно. Таким образом, результаты испытаний указывают на необходимость зачистки забоя скважины в случае испытаний плоским штампом.

**Интерпретация результатов испытаний**

В России, как и за рубежом, для определения штампового модуля деформации используется решение Ф. Шлейхера [35] для задачи о жестком штампе на упругом полупространстве. Теоретически данное решение позволяет найти только упругий модуль деформации, но для этого надо измерять осадки порядка  $10^{-7}$ – $10^{-9}$  м, что невозможно в полевых условиях. В реальности мы измеряем осадку, которая яв-

ляется суммой упругой и остаточной осадок. Отсюда получаем модуль деформации, значение которого в 6–10 раз меньше упругого модуля деформации.

Для определения модуля деформации  $E$  по ГОСТ 20276 используется решение Ф. Шлейхера [35], которое приведено к следующему виду:

$$E = (1 - \nu^2) \cdot K_p \cdot K_1 \cdot D \frac{\Delta p}{\Delta s}, \quad (8)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,27 для крупнообломочных грунтов, 0,30 для песков и супесей, 0,35 для суглинков, 0,42 для глин;  $K_p$  — коэффициент, величина которого принимается в зависимости от отношения  $z/D$  (где  $z$  — глубина расположения штампа относительно дневной поверхности, см;  $D$  — диаметр штампа, см);  $K_1$  — коэффициент, при-

нимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79;  $\Delta p$  — приращение давления на штамп, МПа;  $\Delta s$  — приращение осадки штампа, соответствующее величине  $\Delta p$ , см.

Подобные формулы используются и за рубежом при обработке результатов испытаний штампами. Некоторые из них приведены в данной статье ранее.

При испытаниях грунтов винтовыми штампами в буровых скважинах ниже забоя и в грунтовых массивах без бурения скважин величину коэффициента  $K_p$  принимают в зависимости от отношения  $z/D$  следующим образом:

$z/D$	$K_p$
0	1,00
1	0,90
2	0,82
3	0,77
4	0,73
>5	0,70

Как уже отмечалось, за рубежом в настоящее время проводят испытания не винтовым, а плоским штампом (в соответствии с ASTM D 1194 [15], ASTM D 1195 [16], ENV 1997-2 [21]) — как правило, с целью определения упругого модуля деформации, предельной нагрузки, параметра недренированной прочности и коэффициента постели для оценки качества насыпей дорог и аэродромных покрытий.

При определении предельной нагрузки учитывается влияние ширины штампа на глубину деформирования грунта под реальным фундаментом. Обычно полагают, что эта глубина составляет 2–3 диаметра штампа. В монографии Дж.Э. Боулза [19] приведено следующее уравнение для экстраполяции результатов испытаний штампом в соответствии с реальными размерами фундамента:

для сыпучих грунтов:

$$p_{ult} = p_{plt} \frac{b}{D}, \quad (9)$$

где  $p_{ult}$  — предельная нагрузка на основание, кПа;  $p_{plt}$  — предельная нагрузка на штамп, кПа;  $b$  — ширина фундамента, м;  $D$  — диаметр штампа, м.

для связных грунтов:

$$p_{ult} = p_{plt}. \quad (10)$$

Величина предельной нагрузки на штамп определяется как точка пересечения двух касательных, проведен-

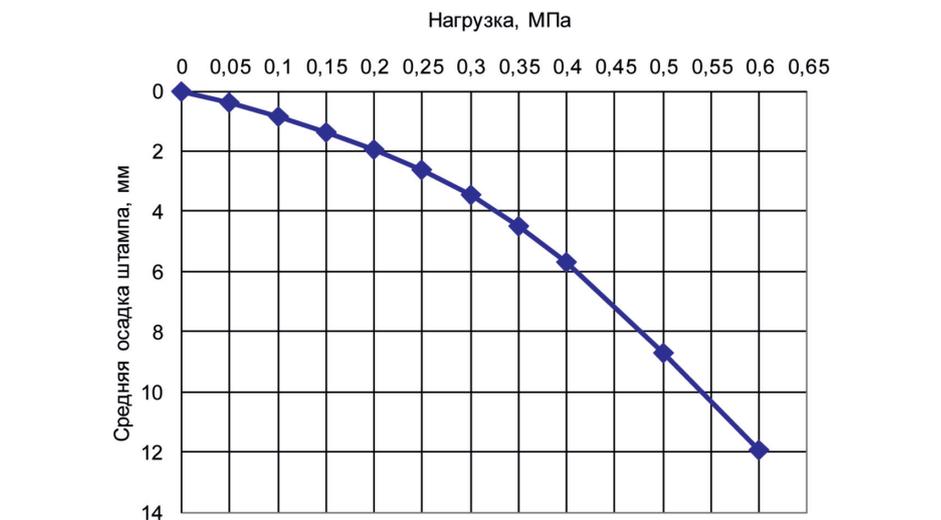


Рис. 12. Зависимость осадки от нагрузки (давления) для просадочного грунта природной влажности

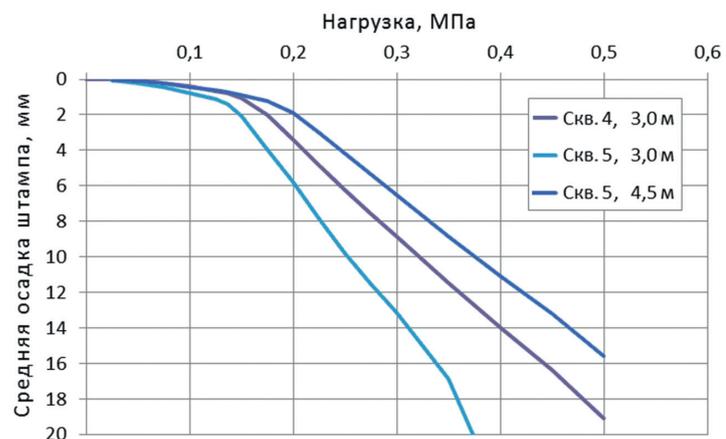


Рис. 13. Результаты штамповых испытаний в режиме непрерывного нагружения в разных скважинах (скв.)

ных к начальному и к конечному участкам зависимости «осадка — нагрузка» (рис. 15).

Расчетная нагрузка на основание определяется по формуле:

$$p_c = \frac{P_{ult}}{\gamma_f}, \quad (11)$$

где  $\gamma_f$  — коэффициент надежности, величину которого рекомендуется брать не менее 2,5.

Следует отметить, что предельная нагрузка на основание  $p_{ult}$  практически совпадает с расчетным сопротивлением грунта, определяемым по СП 22.13330.2011 [11] и соответствующим давлением на грунт под фундаментом, при котором зоны пластической деформации развиваются на глубину, равную 1/4 ширины фундамента. На рисунке 15 это расчетное сопротивление соответствует завершению линейного участка ОС, а за предельную принимается нагрузка, отмеченная точкой А

(120 кПа). Участки ОС, СА и АВ/ВА используются при интерпретации данных испытаний:

- ОС — для определения упругого, или начального, модуля деформации  $E_n$ ;
- СА — для определения текущего модуля деформации  $E_c$ ;
- АВ/ВА — для определения модуля деформации  $E_c$  на ветви «разгрузка — повторное нагружение» (как правило,  $E_c$  в несколько раз больше  $E$ ).

Пересечение двух касательных ОД и АД используется для определения предельной нагрузки — расчетного сопротивления грунта по СП 22.13330.2011 [11].

Используя данные испытаний штампом, можно найти коэффициент постели  $k$  по формуле:

$$k = \frac{p_c}{s}, \quad (12)$$

где  $s$  — осадка, соответствующая расчетной нагрузке;  $p_c$  — расчетная нагрузка.

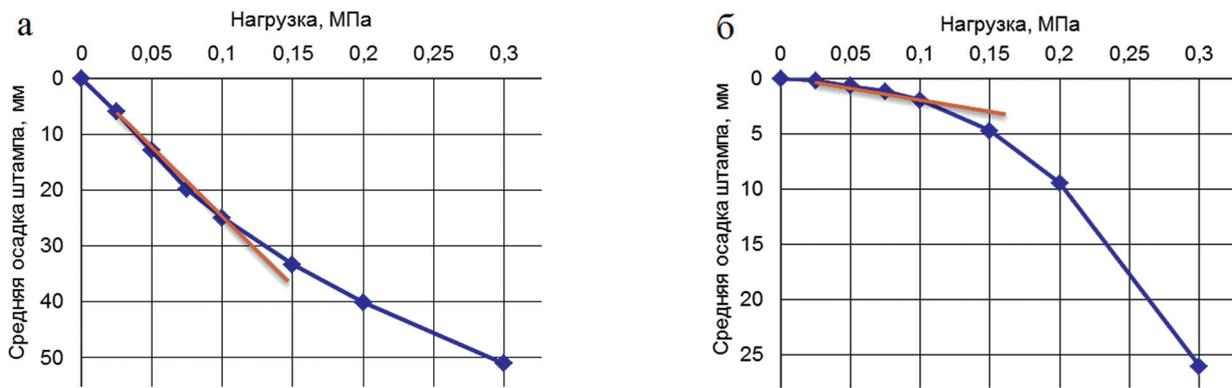


Рис. 14. Результаты испытаний плоским (а) и винтовым (б) штампами

Используя найденную величину  $k$ , можно определить упругий модуль деформации:

$$E \approx 1,5kr, \quad (13)$$

где  $r$  — радиус штампа.

К сожалению, формулу (12) нельзя использовать для определения коэффициента постели, так как он зависит не только от вида грунта, но и от размеров фундамента. Однако в зарубежной литературе ее часто используют для этого. Более подробную информацию по определению коэффициента постели можно найти в работе [1].

Недренированная прочность  $c_u$  может быть определена, если использовать рекомендации приложения К Еврокода-7 ENV 1997-2:2007 [21], где приведена следующая формула (подобная формуле (2)):

$$c_u = \frac{P_{plt} - \gamma z}{N_c}, \quad (14)$$

где  $p_{plt}$  — предельное контактное давление по результатам испытаний плоским штампом (см. рис. 15);  $\gamma z$  — полное бытовое напряжение на глубине испытаний в скважине  $z$ ;  $\gamma$  — удельный вес грунта;  $N_c$  — коэффициент несущей способности, обычно примерно равный 6 для круглого штампа на дне котлована и 9 для круглого штампа в скважине на глубине, превышающей диаметр штампа более чем в 4 раза.

Штамповый модуль деформации  $E_{plt}$  по результатам испытаний на поверхности грунта или на дне котлована может быть найден по формуле (8), а по данным испытаний в основании скважины в работе [1] его рекомендуется

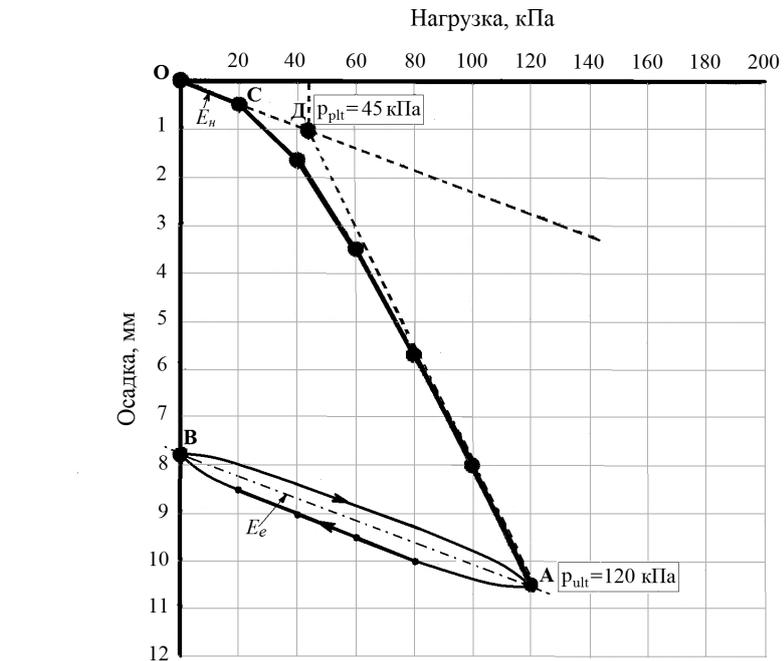


Рис. 15. Определение предельной нагрузки на штамп  $p_{plt}$ , начального модуля деформации  $E_n$  и модуля деформации на ветви «разгрузка — повторное нагружение»  $E_e$  ( $p_{ult}$  — предельная нагрузка на основание)

определять с помощью следующего выражения:

$$E_{plt} = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot \frac{\pi D}{4} \cdot (1 - \nu^2) \cdot C_z, \quad (15)$$

где  $C_z$  — коэффициент коррекции глубины, зависящий от относительной глубины расположения штампа  $z/D$  (где  $z$  — глубина,  $D$  — диаметр штампа) и определяемый с использованием зависимостей, приведенных на рис. 16 ( $C_z = s_z/s_n$ , где  $s_z$  — осадка штампа на глубине  $z$ ;  $s_n$  — осадка штампа на поверхности).

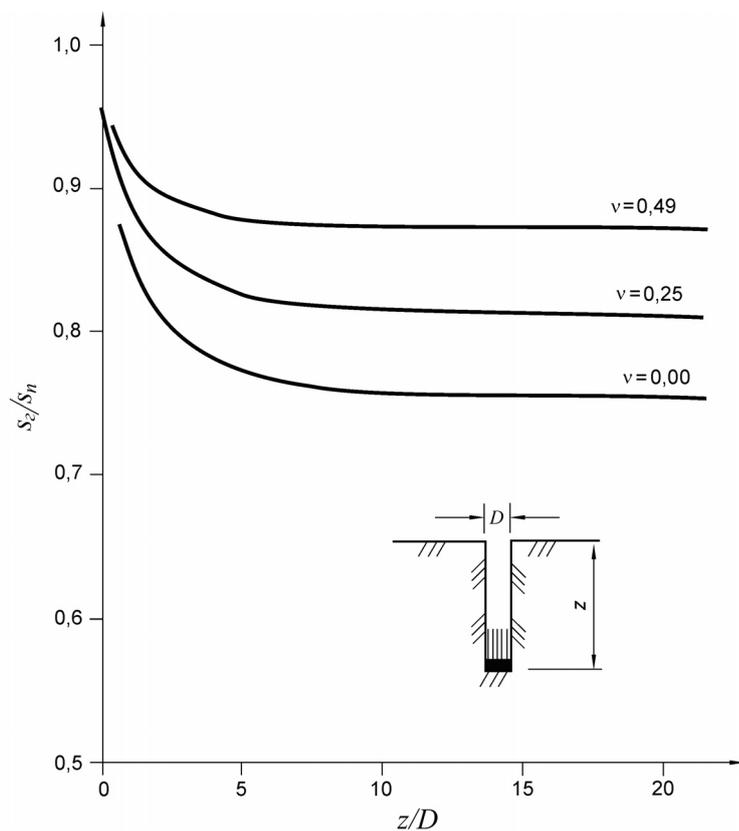
Формула (15) учитывает напряжение от собственного веса на глубине штампового испытания. Отметим, что решение это практически одинаково для плоского и винтового штампов —

различия имеются только в коэффициентах формул (8) и (15).

**Заключение**

Испытания дисперсных немерзлых грунтов винтовым штампом позволяют определить не только модуль деформации и показатель недренированной прочности, но и расчетное сопротивление грунта (в зарубежной классификации последний параметр называется предельным давлением).

Используя различные методы интерпретации данных испытаний, можно найти упругий (начальный) и секущий модули деформации. Секущий модуль должен находиться по данным испытаний штампом при давлении, равном дополнительному напряжению от веса строительного



**Рис. 16.** Изменения коэффициента коррекции глубины  $C_z = s_z / s_n$  с ростом относительной глубины для результатов штамповых испытаний, полученных для равномерно распределенной нагрузки по всей площади дна скважины. Буквенные обозначения:  $s_z$  — осадка штампа на глубине  $z$ ;  $s_n$  — осадка штампа на поверхности;  $z$  — глубина расположения подошвы штампа;  $D$  — диаметр штампа;  $\nu$  — коэффициент Пуассона

объекта в основании проектируемого фундамента.

При интерпретации результатов испытаний следует обращать внимание на методы расчета осадок фундаментов, в которых используются различные модули деформации. Для расчета осадки по СП 22.13330.2011 [11] необходимы упругий (начальный) модуль деформации  $E$  и модуль деформации на вторичной ветви нагружения  $E_e$ . В случае использования упругопластических моделей грунтов достаточно найти значение упругого модуля деформации.

Штамповый модуль деформации не является постоянной величиной и изменяется с ростом нагрузки. В начальном диапазоне малых по величине ступеней нагрузок можно говорить об упругом деформировании грунта и исходя из этой гипотезы определить упругий (начальный) модуль деформации. При нагрузках выше предела пропорциональности зависимости «осадка — нагрузка» деформационное поведение грунта следует определять с использованием секущего модуля деформации, который зависит от текущего уровня напряжений в массиве грунта.

Принятые в ГОСТ 20276-2012 [2] ступени давления явно завышены, что не позволяет найти истинное значение упругого (начального) модуля деформации. ❏

## Список литературы

1. Барваиов В.А., Болдырев Г.Г., Уткин М.М. Расчет осадок и кренов сооружений с учетом неопределенности свойств грунтовых оснований // Геотехника. 2016. № 1. С. 12–29.
2. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2012 (по сост. на 18.07.2016).
3. Иродов М.Д. Применение винтовых свай в строительстве. М.: Издательство литературы по строительству, 1968. 147 с.
4. Каширский В.И. Методика исследования состава и свойств дисперсных грунтов полевыми методами в условиях мегаполиса (на примере г. Москвы): автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во ПНИИИС, 2005. 26 с.
5. Каширский В.И. Способ испытания грунтов винтовым штампом и устройство для его осуществления: патент РФ № 22252296 // Официальный бюллетень Роспатента по объектам интеллектуальной собственности. М.: Роспатент, 2005.
6. Каширский В.И. Способ испытания грунтов статической нагрузкой и устройство для его осуществления: патент РФ № 2252297 // Официальный бюллетень Роспатента по объектам интеллектуальной собственности. М.: Роспатент, 2005.
7. Лавров С.Н. Опыт применения и перспективы использования клиновидных инденторов для полевых исследований грунтов // Материалы 14-й Конференции молодых специалистов по геологии и геофизике Восточной Сибири. Иркутск, 1990. С. 58.
8. 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.
9. Мариупольский Л.Г. Исследования грунтов для проектирования и строительства свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1989. 199 с.
10. Мариупольский Л.Г., Хубаев С.-М.К. Разработка и исследование методов испытания грунтов статическими нагрузками в скважинах с применением винтовой лопасти-штампа // Труды НИИОСП им. Н.М. Герсееванова. 1982. Вып. 78. С. 24–39.
11. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2012.

12. СП 47.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой России, 2013.
13. Хубаев С.-М.К. Исследования сжимаемости грунтов с применением винтовой лопасти-штампа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1982.
14. Якимов Ю.Ф. Методика применения расклинивающего дилатометра в практике инженерных изысканий. М.: Изд-во ПНИИИС, 1990.
15. ASTM D1194. Test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings. ASTM International, 2012.
16. ASTM D1195. Standard test method for repetitive static plate load tests of soils and flexible pavement components, for use in evaluation and design of airport and highway pavements. ASTM International, 2015.
17. Bell F.G., Cripps J.C., Culshaw M.G. Field testing methods for engineering geological investigations // Field Testing in Engineering Geology. Geological Society, 1990. Engineering Geology Special Publication № 6. P. 3–20.
18. Bergado D.N., Huan N.M. Undrained deformability and strength characteristics of soft Bangkok clay by the screw plate test // Geotechnical Testing Journal. 1987. V. 10. № 3. P. 113–122.
19. Bowels J.E. Foundation analysis and design. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988. 1169 p.
20. Dahlberg R. Settlement characteristic of preconsolidated natural sands: report ISBN 91-540-2410-2. Stockholm, Sweden: National Swedish Institute for Building Research, 1975.
21. ENV 1997-2:2007. Eurocode 7. Geotechnical design. Ground investigation and testing. CEN, 2007.
22. Gould J.H. The comparative study of screw plate and rigid plate bearing tests: M.S. thesis, Gainesville: University of Florida, 1961.
23. Hooper J.A. Observation on the behavior of a piled raft foundation on London clay // Proceedings of the Institution of Civil Engineering. 1973. Part 2. № 55. P. 855–877.
24. Janbu N., Senneset K. Field compressometer — principles and applications // Proceedings of the 8-th International conference on soil mechanics and foundation engineering. Volume 1.1. Moscow, 1973. P. 191–198.
25. Kay J.N., Parry R.H.G. Screw plate tests in a stiff clay // Ground Engineering. 1982. V. 15. № 6. P. 22–30.
26. Kummeneje O. Fundamentirng av oljetank I Drammen: NGI Report № 12. Oslo, Norway: NGI, 1956.
27. Kummeneje O., Eide O. Investigation of loose sand deposits by blasting // Proceedings of the 5-th International conference on soil mechanics and foundation engineering. Volume 2. Paris, 1961. P. 491–497.
28. Marsland A. Comparison of the results from static penetration tests and large in-situ plate tests in London clay. Carston: Building Research Establishment, 1974. CP 87/74.
29. Marsland A. Laboratory and in situ measurements of the deformation moduli of London clay. Carston: Building Research Establishment, 1973. CP 24/73.
30. Marsland A. Large in situ tests to measure the properties of stiff fissured clays. Carston: Building Research Establishment, 1973. CP 1/73.
31. Marsland A. Relationships between the pressuremeter test and full scale behaviour of foundations // Proceedings of the 7-th European conference on soil mechanics and foundation engineering. Brighton, 1980. V. 4. P. 75.
32. Marsland A. The evaluation of the engineering design parameters for glacial clays // Quarterly Journal of Engineering Geology. 1976. V. 10. P. 1–26.
33. Nam-Woo L., Woong-Ki H., Yong-Kyu C., Tae-Hyung K. Evaluation of ground characteristic using the new developed screw plate load test device // Journal of the Korean Geotechnical Society. 2011. V. 27. № 3. P. 5–17.
34. Noor S.T., Islam S., Haider B. Screw plate load test and SPT in the estimation of allowable bearing capacity // Proceedings of the 1-t International conference on advances in civil infrastructure and construction materials. Dhaka, Bangladesh: MIST, 2015. P. 730–737.
35. Schleicher F. Senkungsmittelwert und ahnlichkeitsbedingung fur platen und balken auf isotroper elastischer unterlage // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. 1928. Band 8. P. 68–70.
36. Schmertmann J. Static cone to compute static settlement over sand // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, 1970. V. 97. SM3. P. 1011–1043.
37. Schwab E.F. Bearing capacity, strength and deformation behavior of soft organic sulphide soils: PhD thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 1976.
38. Schwab E.F., Broms B.B. Pressure — settlement — time // Proceedings of the 9-th International conference on soil mechanics and foundation engineering. Tokyo, 1977. V. 1. P. 281–288.
39. Selvadurai A.P.S., Bauer G.E., Nicholas J. Screw plate testing of a soft clay // Canadian Geotechnical Journal. 1980. V. 17. № 4. P. 465–472.