

УДК 624.15

ГЕЙДТ В. Д.
ГЕЙДТ Л. В.

Лабораторные исследования скорости консолидации грунта при устройстве песчаных дренах: на примере Западной Сибири



**Гейдт
Владимир
Давидович**

кандидат технических наук,
доцент кафедры
Проектирование зданий
и градостроительство,
ФГБОУ ВО Тюменский
индустриальный
университет

e-mail: geidtv@tyuiu.ru



**Гейдт
Лариса
Викторовна**

старший преподаватель
кафедры геотехники,
ФГБОУ ВО Тюменский
индустриальный
университет

e-mail: geidtlv@tyuiu.ru

В современной строительной практике для ускорения консолидации грунта при инженерной подготовке хорошо себя зарекомендовало вертикальное дренирование. Авторами проведен комплекс экспериментальных лабораторных исследований по изучению влияния глубинного вибрирования на процесс консолидации водонасыщенного грунта при наличии вертикальных песчаных дренах. Вибрирование способствует возникновению дополнительных избыточных давлений в поровой воде. Поиск способов ускорения консолидации (уплотнение грунта за счет отжима поровой воды) является достаточно актуальным.

Ключевые слова: консолидация грунта, поровое давление, глубинное вибровоздействие, вертикальная дрена, заторфованный грунт.

HEIDT V. D., HEIDT L. V.

LABORATORY INVESTIGATIONS OF THE SPEED OF GROUND CONSOLIDATION UNDER THE SAND DRENE DEVICE: ON THE EXAMPLE OF WESTERN SIBERIA

In modern construction practice to accelerate the consolidation of soil for engineering preparation of the well-proven vertical drainage. The authors conducted a complex of experimental laboratory studies on the effect of the deep vibrations on the consolidation process-saturated soil in the presence of vertical sand drains. Vibrating contributes to the emergence of additional overpressure in the pore water. The search for ways to accelerate consolidation (soil compaction due to the extraction of pore water) is quite relevant.

Keywords: soil consolidation, pore pressure, deep vibration control, vertical drainage, ground.

В настоящее время гражданские и промышленные объекты достаточно часто возводят на слабых грунтах. Например, для Западной Сибири характерен высокий уровень грунтовых вод, более половины территории заторфовано. Это типично для северной половины Тюменской области, где целые города построены на болотах [1]. Один из кардинальных способов решения проблемы — замена торфа минеральным грунтом. Однако он приводит к большим объемам земляных работ и значительным трудозатратам [2]. Более экономичным и рациональным способом инженерной подготовки заторфованных территорий под застройку является предварительное уплотнение грунта слоем намывного или насыпного грунта [3, 4]. Однако при большой толщине торфяных грунтов процесс консолидации грунта занимает несколько лет.

В последние десятилетия для ускорения консолидации грунта в строительной практике начали все чаще использовать вертикальное дренирование совместно с горизонтальными дренами в виде намывного песка [5–8]. Большой вклад в освоение и развитие метода предпостроечного уплотнения грунта с помощью вертикальных песчаных дренах принадлежит М. Ю. Абелеву, П. А. Коновалову, А. С. Строганову, Ю. В. Светинскому, А. С. Марченко, Ф. Ф. Зехниеву и др. [9–15]. Несмотря на успехи, такой способ не получил повсеместного распространения. Основные недостатки ранее предлагавшихся способов устройства вертикальных песчаных дренах сводятся к следующему:

1) несовершенство существующих установок для устройства цилиндрической вертикальной дренах вызывает значительные трудности технологического характера;

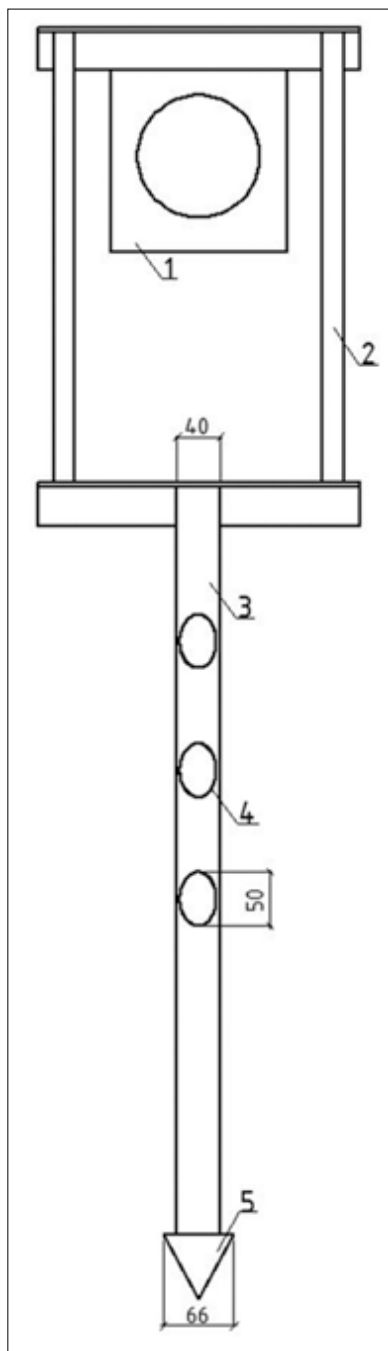


Иллюстрация 1. Схема вибродренообразователя: 1 — источник вертикальных колебаний; 2 — стальная контурная рама; 3 — дrenoобразователь; 4 — перфорация; 5 — теряемый наконечник

2) образуемые при погружении большеразмерных обсадных труб (диаметром 0,4–0,6 м) зоны замыкания вокруг дрен отрицательно влияют на процесс ускорения консолидации, так как препятствуют подтоку поровой воды к дрене;

3) устройство вертикальных дрен с помощью труб малого диаметра (менее 0,3 м) технологически очень трудоемко из-за заклинивания песка вследствие появления арочного эффекта внутри труб;

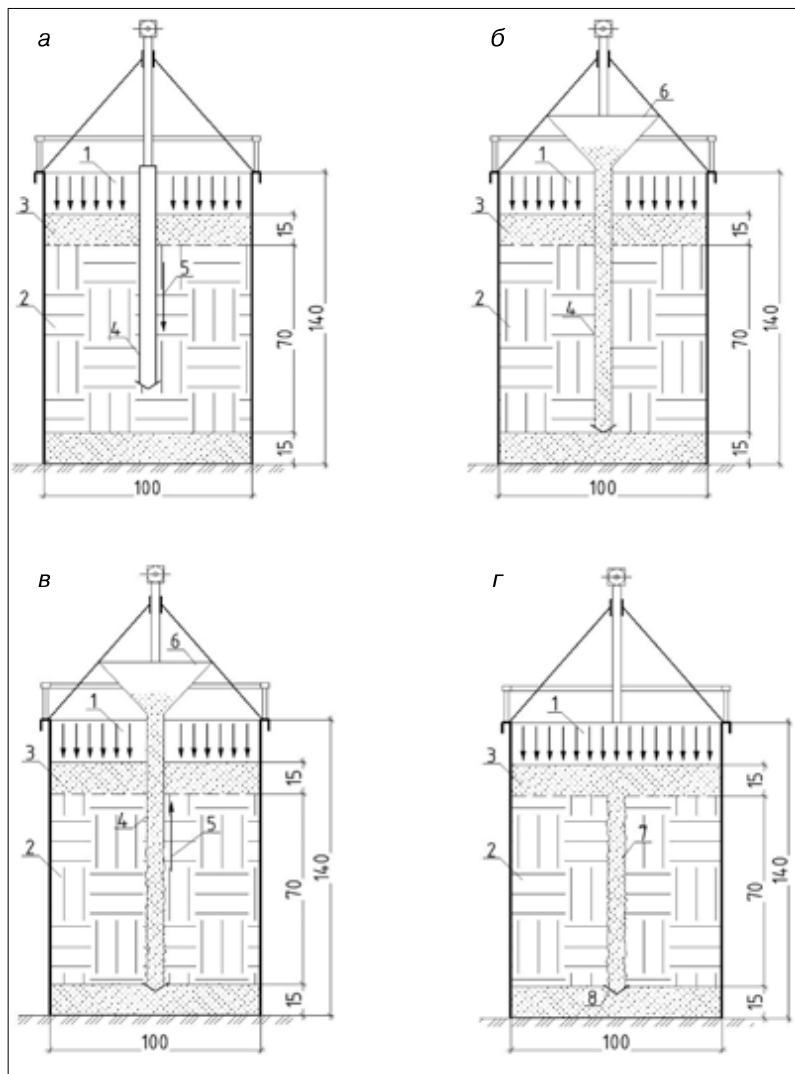


Иллюстрация 2. Технологическая схема устройства песчаной дрены:

а — погружение дrenoобразователя; б — подача песка в дrenoобразователь; в — извлечение дrenoобразователя; г — готовая песчаная дрена; 1 — перфорированный штамп; 2 — заторфованный грунт; 3 — денирующий слой песка; 4 — дrenoобразователь; 5 — движение дrenoобразователя; 6 — воронка; 7 — готовая дрена; 8 — теряемый наконечник

4) в качестве материала для изготовления вертикальных песчаных дрен по ранее предлагавшимся способам использовался в основном крупный песок или гравий, что значительно увеличивает расходы на проведение таких работ в условиях северных территорий Западной Сибири.

В связи с этим является важным дальнейший поиск способов ускорения консолидации водонасыщенного заторфованного грунта.

Для этого в лабораторных условиях сконструирован и изготовлен специальный вибродренообразователь со съемными обсадными перфорированными трубами (Иллюстрация 1), позволяющий моделировать различные способы устройства дрен и ряд технологических ситуаций, а также контролировать качество изготовленных дрен.

На первом этапе лабораторных исследований проведены испытания способа устройства вертикальных песчаных дрен. На основании выполненных исследований разработаны чертежи универсальной мобильной установки, предназначенной для проведения полевых экспериментов, а также разработана и апробирована технологическая последовательность устройства вертикальных песчаных дрен (Иллюстрация 2).

В результате первого этапа лабораторных экспериментов установлено, что:

1) погружение дrenoобразователя в намыивный песок, подстилаемый торфом, с помощью вибрации является наиболее технологичным приемом устройства дрен;

2) перфорация дrenoобразователя позволяет использовать местный пы-

леватый песок в качестве материала дрены;

3) вибропогружение перфорированного дренообразователя позволяет получать качественно выполненные дрены в заторфованных грунтах, пригруженных слоем песка.

На этом втором этапе для более детального изучения самого процесса консолидации водонасыщенного заторфованного грунта под влиянием глубинного вибровоздействия разработана и изготовлена лабораторная установка, принципиальная схема которой показана на Иллюстрации 3. Установка состоит из следующих элементов:

- типичный металлический лоток цилиндрической формы диаметром 3 м и высотой 1 м. В стенки лотка вмонтировано 4 крана. В нижней части лотка в боковой стенке вмонтирован сливной кран, предназначенный для подачи и отвода воды. В болтовых соединениях и в разрезе сливного крана произведена тщательная гидроизоляция, исключающая утечку воды из лотка [16];
- источник вертикальных колебаний — электровибратор ИВ-98;
- виброелка, изготовлена из тонкостенной трубки, длиной 800 мм, к которой припаяны лопасти с шагом 30 мм из тонких пластин длиной 50–110 мм.

Лабораторная установка позволяет производить глубинное вибровоздействие, передавать внешнюю нагрузку, осуществлять измерение деформаций грунта, давления в поровой воде, а также количество отфильтрованной воды в вертикальном и радиальном направлениях. Необходимо особо отметить, что в практику лабораторных исследований процесса консолидации грунта были введены замеры количества отфильтрованной воды как удобная, надежная и достаточно информативная (относительно изучаемого процесса консолидации) измеряемая величина. С ее помощью можно определять степень консолидации как отношение отфильтрованной воды к предельно возможному количеству воды, отфильтрованному при данной внешней нагрузке. Эта величина особенно удобна в ситуациях, когда осадка зависит от расстояния до дрены (по R -радиусу) и может быть использована в качестве интегральной меры степени завершения процесса консолидации. На Иллюстрации 3 можно увидеть, что в лабораторной установке 4 крана, позволяющие производить измерения количества воды, отфильт-

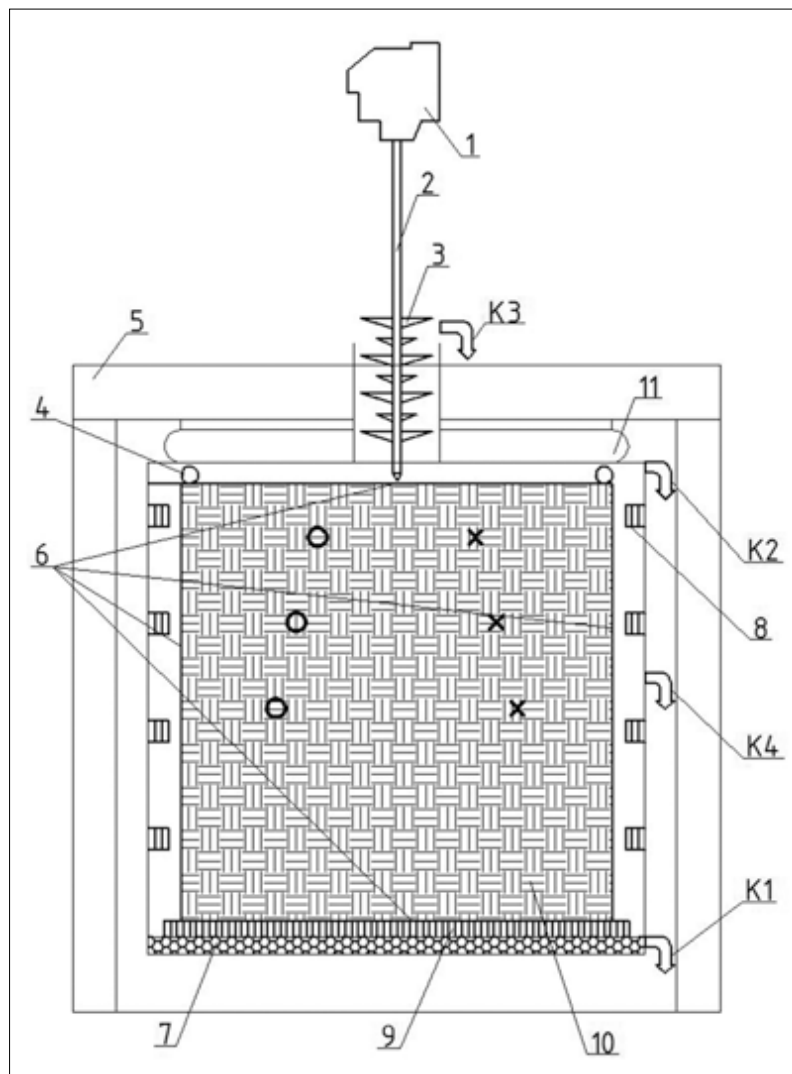


Иллюстрация 3. Принципиальная схема лабораторной экспериментальной установки: K1, K2, K3, K4 — краны; 1 — электровибратор ИВ-98; 2 — тонкостенная трубка; 3 — лопасти из тонких пластин; 4 — перфорированная труба; 5 — опорная рама; 6 — дорнит; 7 — подшипниковые шарики; 8 — опорные планки; 9 — перфорированный диск; 10 — торф; 11 — пневмобаллон; о — датчики порового давления (ДПД); х — датчики для определения напряжений в грунте

рованной в разных направлениях при различных сочетаниях граничных условий:

- водоупор или отток в донной части лотка (кран № 1);
- водоупор или отток в верхней части грунта (кран № 2);
- водоупор или отток в радиальном направлении наружу (кран № 4);
- водоупор или отток в радиальном направлении к оси вибровстола (кран № 3).

По окончании предварительного уплотнения закрывались все краны и прикладывалась внешняя нагрузка заданной величины. В опытах величина этой внешней нагрузки составляла $q = 30$ кПа, а интенсивность механических волн на границе вибровстола составляла приблизительно $W = 15$ кВт/м². Для наблюдения за изменениями общих напряжений

в грунте и избыточного порового давления были использованы обычные тензометрические датчики. Момент включения вибратора принимался за начало отсчета времени. После включения вибратора показания всех датчиков изменились. При этом избыточные давления в поровой воде увеличились, а эффективные напряжения в скелете грунта (вычисленные по известной формуле Терцаги) уменьшились.

Сравнение показаний датчиков, предназначенных для измерения напряжений в скелете, с показаниями датчиков для измерения избыточного порового давления P показало, что при наличии вибровоздействия сумма напряжений в скелете и избыточного порового давления в данной точке равна величине внешней нагрузки.

После включения вибратора избыточное поровое давление монотонно возрастает, по истечении нескольких десятков секунд достигает своих максимальных значений и в дальнейшем не изменяется (при условии продолжающегося вибрирования). После выключения вибрации все датчики измерения избыточного порового давления показали монотонное уменьшение избыточного порового давления до исходного (давления до включения вибратора) в течение нескольких минут.

Обнаружено, что в начальный момент времени после включения вибратора происходит возрастание скорости консолидации на 30% по сравнению с безвибрационной. Однако по истечении нескольких секунд скорость оттока воды как в вертикальном, так и в радиальном направлениях практически не зависит от вибровоздействия.

Отсюда можно сделать выводы, что вибровоздействие приводит к увеличению избыточного порового давления P . При этом относительно величины этого увеличения избыточного порового давления выявлены следующие закономерности:

- величина увеличения избыточного порового давления уменьшается с увеличением расстояния до оси вибрирования;
- увеличение избыточного порового давления P во времени после включения вибрации, а также уменьшение избыточного порового давления P после выключения вибрации носит ярко выраженный «релаксационный» характер.

Относительно величины максимального избыточного порового давления $P_{\max}$ выявлены следующие закономерности:

- а) до некоторого критического радиуса $R_{\text{крит}}$ величина максимального увеличения избыточного порового давления $P_{\max}$ равна внешней нагрузке ($R_{\text{крит}} \cong 75 \pm 15$ см);
- б) на расстояниях от оси вибрации, превышающих этот критический радиус, величина $P_{\max}$ уменьшается с увеличением расстояния от оси вибрирования;
- в) это критическое расстояние увеличивается с увеличением интенсивности вибрирования и уменьшается с уменьшением коэффициента пористости e .

Обсудим полученные результаты. Итак, пусть на некотором удалении от дрены на всю глубину торфяной толщи погружена виброелка. В определенный момент времени выключен вибратор. Что при этом происходит? До момента включения вибратора грунт под действием дренирующей песчаной пригрузки уплотнялся согласно законам фильтрационной консолидации. При этом вблизи поверхности грунта и вокруг дрены образуются уплотненные зоны. В остальных областях грунт имеет повышенное значение коэффициента пористости e . С течением времени процесс оттока воды замедляется. Замедление обусловлено тем, что с уплотнением торфа резко уменьшаются его фильтрационные свойства. Можно сказать, что уплотненные слои грунта экранируют отток воды и не дают остальному грунту уплотниться. В определенный момент времени t_k включается вибрация.

Далее процесс проходит по следующему сценарию. Под действием вибрации грунт в зоне вибровствала переходит в разжиженное состояние. Часть песка начинает интенсивно проваливаться в вибрационный ствол, увеличивая тем самым его водопроницаемость. Таким образом, с определенного момента времени вибрационный ствол можно рассматривать как дренаж. По мере дальнейшего продолжения вибрации наблюдается следующая картина. В первый момент времени по вертикали вибрационного ствола интенсивно начинает изливаться вода. Однако с течением времени интенсивность стока воды замедляется. Расчеты показывают, что имеет мес-

то также увеличение оттока воды и в других источках, каковыми являются поверхности основания и граница зоны влияния (в случае водооттока на ней). Кроме того, обнаружено значительное повышение избыточного порового давления P . Наблюдаемое увеличение избыточного порового давления, во-первых, уменьшается по мере удаления от вибровствала, во-вторых, повышение P тем выше, чем больше коэффициент пористости e . Наблюдаемая картина позволяет предположить, что вибровоздействие приводит к ускорению консолидации.

Заключение

- 1 На основании выполненных лабораторных исследований разработаны чертежи универсальной мобильной установки, предназначенной для проведения полевых экспериментов.
- 2 Разработана и апробирована технологическая последовательность устройства вертикальных песчаных дрэн.
- 3 Установлено, что вибровоздействие для местных торфов приводит к увеличению избыточного давления в поровой воде.
- 4 Обнаружено, что вибровоздействие может привести как к увеличению, так и к уменьшению отфильтрованной воды.

Список использованной литературы

- 1 Коновалов П. А. Строительство сооружений на заторфованных территориях. М. : Стройиздат, 1995. 344 с.
- 2 Результаты исследований процесса консолидации дренированных многослойных заторфованных оснований / П. А. Коновалов, В. Г. Гончаров, Ю. Н. Платонов, Ф. Ф. Зехниев // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1993. № 5. С. 18–23.
- 3 Коновалов П. А., Зехниев Ф. Ф., Безволев С. Г. Оценка эффективности предварительного уплотнения слабого водонасыщенного глинистого основания способом перегрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 2. С. 18–22.
- 4 Коновалов П. А., Зехниев Ф. Ф., Безволев С. Г. О расчете консолидации водонасыщенных оснований при одностороннем сжатии и осесимметричном дренаже // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. 2001. № 4. С. 310–315.
- 5 Nagaraj T. S. et al. Analysis of compressibility of sensitive soils // Journal of Geotechnical Engineering / ASCE. 1990. Vol. 116. № 1. P. 105–118.
- 6 Aboshi H., Matsuda H., Okuda M. Preconsolidation by separate type consolidometer // Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). Stockholm, 1981. Vol. 3. P. 577–580.
- 7 Akagi T. State-of-the art report on settlement and time rates of consolidation // Geotechnical Engineering. 1979. Vol. 10. № 2. P. 179–198.
- 8 Imai G. A unified theory of one-dimensional consolidation with creep // Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). Rio de Janeiro, 1989. Vol. 1. P. 57–60.
- 9 Кушнир С. Я. Консолидационные явления в торфяных грунтах при динамических воздействиях // Тр. II Балтийской конференции по механике грунтов и фундаментостроению. Т. 1. М. : ПЭМ ВНИИС, 1988. С. 210–213.
- 10 Коновалов П. А., Кушнир С. Я. Намывные грунты как основания сооружений. М. : Недра, 1991. 256 с.
- 11 Зарецкий Ю. К. Консолидация торфяного основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1970. № 6. С. 12–15.

- 12 Зехниев Ф. Ф. Стабилизация оснований с плоскими вертикальными песчаными дренами : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 25 с.
- 13 Абелев М. Ю. Строительство гражданских и промышленных сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. М. : Стройиздат, 1983. 248 с.
- 14 Абелев М. Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. М. : Стройиздат, 1973. 288 с.
- 15 Светинский Е. В., Трескин В. П. Оборудование для уплотнения слабых водонасыщенных грунтов песчаными дренами. М. : НИИОСП им. Н. М. Герсеева, 1979. Сб. № 61. С. 129–135.
- 16 Гейдт В. Д. Стабилизация водонасыщенных заторфованных оснований самоформирующимися дренами : дис. ... канд. техн. наук: 28.02.03. М., 2003. 203 с.

Spisok ispol'zovannoj literatury

- 1 Kononov P. A. Stroitel'stvo sooruzhenij na zatorfovannyh territoriyah. M.: Strojizdat, 1995. 344 s.
- 2 Rezul'taty issledovaniy processa konsolidacii drenirovannyh mnogoslojnyh zatorfovannyh osnovanij/P. A. Kononov, V. G. Goncharov, Yu. N. Platonov, F. F. Zekhniev // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1993. № 5. S. 18–23.
- 3 Kononov P. A., Zekhniev F. F., Bezvoley S. G. Ocenka ehffektivnosti predvaritel'nogo uplotneniya slabogo vodonasyschennogo glinistogo osnovaniya sposobom peregruzki // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2002. № 2. S. 18–22.
- 4 Kononov P. A., Zekhniev F. F., Bezvoley S. G. O raschete konsolidacii vodonasyschennyh osnovanij pri odnomernom szhatii i osesimmetrichnom drenazhe // Visnik Odes'koi Derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi. 2001. № 4. S. 310–315.
- 5 Nagaraj T. S. et al. Analysis of compressibility of sensitive soils // Journal of Geotechnical Engineering/ASCE. 1990. Vol. 116. № 1. P. 105–118.
- 6 Aboshi H., Matsuda H., Okuda M. Preconsolidation by separate type consolidometer // Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). Stockholm, 1981. Vol. 3. P. 577–580.
- 7 Akagi T. State-of-the art report on settlement and time rates of consolidation // Geotechnical Engineering. 1979. Vol. 10. № 2. P. 179–198.
- 8 Imai G. A unified theory of one-dimensional consolidation with creep // Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). Rio de Janeiro, 1989. Vol. 1. P. 57–60.
- 9 Kushnir S. YA. Konsolidacionnye yavleniya v torfyanyh gruntah pri dinamicheskikh vozdeystviyah // Tr. II Baltijskoj konferencii po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu. T. 1. M.: PEHM VNIIS, 1988. S. 210–213.
- 10 Kononov P. A., Kushnir S. YA. Namyvnye grunty kak osnovaniya sooruzhenij. M.: Nedra, 1991. 256 s.
- 11 Zareckij Yu. K. Konsolidaciya torfyanogo osnovaniya // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1970. № 6. S. 12–15.
- 12 Zekhniev F. F. Stabilizaciya osnovanij s ploskimi vertikal'nymi peschanyimi drenami: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1986. 25 s.
- 13 Abelev M. Yu. Stroitel'stvo grazhdanskih i promyshlennyh sooruzhenij na slabых водонасыщенных грунтах. М.: Стройиздат, 1983. 248 с.
- 14 Abelev M. Yu. Slabye водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. М.: Стройиздат, 1973. 288 с.