**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 1, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.03

УДК 624.131

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОТЕХНИКИ И МЕХАНИКИ ГРУНТА

Б.И. Кулачкин¹, А.А. Митькин¹, С.С. Магомедов²

¹ ООО «Институт по проектированию транспортных сооружений – “Транспроект”», Москва, Россия

² ОАО «Мостоотряд-99», Махачкала, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 декабря 2016
Принята: 30 декабря 2016
Опубликована: 30 марта 2017

Ключевые слова:

природное залегание грунта, геотехническая модель, вес грунта, поровое давление, аналого-дискретная модель, модуль Юнга, капиллярная модель грунта, эффект Кулачкина–Радкевича, несущая способность, акустика в геотехнике

АННОТАЦИЯ

Определены основные положения (категории) новой механики грунта и геотехники, изложены в иерархическом порядке, систематизированы. Приведены принципиальные отличия новых разработок от существующих, в том числе представлены новая классификация состояния грунта (переуплотненный – нормально уплотненный – недоуплотненный), геотехническая модель (геомассив – основание – фундамент – сооружение), вес грунта (оценка γh in situ), поровое давление (элемент образования и эволюции литосферы), аналого-дискретная модель грунта (хрупкое тело с бесконечным модулем упругости), модуль Юнга (модуль упругости), капиллярная модель грунта (четочные капилляры и капилляры Жомена), эффект Кулачкина–Радкевича (поровое давление может быть ниже атмосферного), несущая способность (Герсеванов и акустика в грунте), акустика в геотехнике (сплошность, целостность, прочность и геометрия свай и других железобетонных конструкций). Приведены аналитические и экспериментальные данные о различных регионах РФ и дальнего зарубежья. Даны оценки состояния и перспектив геотехники и механики грунта.

© ПНИПУ

© **Кулачкин Борис Иванович** – доктор геолого-минералогических наук, кандидат технических наук, академик РАЕН, заместитель директора, e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

Митькин Александр Александрович – заведующий лабораторией, e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

Магомедов Саид Сулейманович – начальник производственно-технического отдела, e-mail: info@mostootryad-99.ru.

Boris I. Kulachkin – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Ph.D. in Technical Sciences, Academician of the RAS, Deputy Director, e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

Aleksandr A. Mit'kin – Head of Laboratory, e-mail: transproekt-geotech@mail.ru.

Said S. Magomedov – Head of Production and Technical Department, e-mail: info@mostootryad-99.ru

STATE AND PROSPECTS OF GEOTECHNICAL ENGINEERING AND SOIL MECHANICS

B.I. Kulachkin¹, A.A. Mit'kin¹, S.S. Magomedov²

¹IPTS – “Transproject”, Moscow, Russian Federation

²“Mostootryad-99”, Makhachkala, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 December 2016

Accepted: 30 December 2016

Published: 30 March 2017

Keywords:

natural occurrence, geotechnical model, soil weight, pore pressure, analogue-discrete model, Young's modulus, capillary soil model, Kulachkin–Radkevich effect, bearing capacity, acoustics in geotechnics

ABSTRACT

The basic principles (categories) of the new soil mechanics and geotechnical engineering are determined, set out in a hierarchical order and classified. Fundamental differences between new and previous developments are specified in the paper, such as a new classification of the soil state (overconsolidated – normally consolidated – underconsolidated), geotechnical model (geomassiv – basement – foundation – building), soil weight (assessment of γh in situ), pore pressure (element of formation and evolution of lithosphere), analogue-discrete soil model (brittle body with an infinite elastic modulus), Young's modulus (elasticity modulus), capillary soil model (beaded capillaries and capillaries of Zhomen), the effect of Kulachkin – Radkevich (pore pressure may be lower than atmospheric), load-bearing capacity (Gersevanov and acoustics in the soil), acoustics in geotechnics (continuity, integrity, strength and geometry of piles and other reinforced concrete structures). The analytical and experimental data in various regions of Russia and abroad has been given in the paper. The assessment of state and prospects of geotechnics and soil mechanics are described.

© PNRPU

Введение

Настоящая статья написана под впечатлением от международной конференции «Геосинтетика – 2016», проходивший в г. Москве. Н. Быстров, председатель ТК 418 «Дорожное хозяйство», и Д. Казуффи, председатель ТК 189 «Геосинтетика» (Европа), в своих сообщениях отметили, что имеют место недостаток, заключающийся в отсутствии полной нормативной базы, и необходимость повышения уровня технологий в геосинтетике. Б.И. Кулачкин участвовал в разработке и внедрении технологий геосинтетики, в том числе в совершенствовании устоев мостов с раздельными функциями¹, которые проектируются «Дорпроектом» и другими организациями для различных мостов. В конструкциях устоев мостов с раздельными функциями используются анкерно-контрфорсные элементы, а также армогрунтовые конструкции (рис. 1) [1, 2]. Были разработаны технологии возведения армогрунтовых систем устоев мостов и подпорных стен на автомобильных дорогах, устоев диванного типа, армогрунтовых систем при слабых основаниях подходной насыпи [3, 4].

Данная статья посвящена последним исследованиям, связанным с фундаментальными основами новой механики грунта и геотехники, обобщению оригинальных работ, написанных в разное время, и по возможности их систематизации.

1. Природное состояние (залегание) грунта

Природное состояние грунта является краеугольным камнем механики грунта и геотехники.

¹ Устой моста: пат. № 2136806 / Б.И. Кулачкин, А.Д. Соколов [и др.]. 5 с.; Устой моста: пат. № 2136807 / А.Д. Соколов, Б.И. Кулачкин [и др.]. 5 с.; Устой моста: пат. № 2136808 / Б.И. Кулачкин, А.Д. Соколов [и др.]. 5 с.

Рис. 1. Армогрунтовые подпорные стены съездов с эстакад транспортной развязки Волоколамского шоссе и ул. Свободы (Москва)

Fig. 1. Reinforced ground supporting walls of exit ramps in the transport junction between Volokolamskoe shosse and Svobody Street (Moscow)

Разработана новая классификация, которая предполагает деление грунта на переуплотненный, нормально уплотненный и недоуплотненный. Еще К. Терцаги отмечал наличие в природе переуплотненного грунта.

Действительно, ледники, тектоника, вулканизм, изменение уровня морей и океанов и др. являются причиной образования не только переуплотненного, но и недоуплотненного грунта, который включен в новую классификацию, в отличие от традиционной, и уже рассматривается на разных конференциях как данность. Профессор З.Г. Тер-Мартirosян неоднократно отмечал, что во Вьетнаме им был исследован недоуплотненный грунт. Нам в процессе зондирования, штамповых испытаний и др. для оценки предельного сопротивления грунта также встречается данный вид грунта. В процессе статического зондирования недоуплотненный грунт можно выделить при рассмотрении параметра q_c [1].

В Израиле при строительстве автострды «Север – Юг» было предложено в проекте предусмотреть влияние переуплотненного грунта (Г. Лискевич).

При проектировании и строительстве автодороги Шантала – Клявлино в Самарской области была поставлена задача оценки переуплотненного и недоуплотненного грунта. Впервые оценка степени переуплотненного грунта была внесена в МГСН 2.07–97 «Основания, фундаменты и подземные сооружения», для этого используется параметр статического зондирования q_c . Следствиями этой классификации должны стать существенно новое представление об основаниях и геомассивах как о главных объектах механики грунта, геотехники и повышение достоверности определения механических характеристик в их современном понимании за счет моделирования природных нагрузок как в лабораторных, так и в полевых условиях и режима нагружения при испытаниях с учетом состояния грунта.

К примеру, по нашим оценкам, на широте Москвы в Московском регионе ледник мог достигать 100 м над поверхностью земли.

Что касается природного бокового давления, то нами был сконструирован прибор – зонд² (q_c, f_c) с датчиком нормального давления p_c , который позволяет определить боковое давление и с помощью коэффициента бокового давления рассчитать γh . Пока это единственный экспериментальный способ, который дает реальное представление о γh . Таким

² Зонд для статического зондирования: пат. № 1191521 / Б.И. Кулачкин, А.И. Радкевич. 5 с.

образом был исследован грунт в порту Салиф (Йемен), что позволило выявить недоуплотненный грунт и реальное значение γh .

Эти исследования проводились на базе широкоизвестных полевых измерительных комплектов аппаратуры («ПИКА») для статического зондирования, которые конструктивно были согласованы с буровыми установками, и таким образом была разработана новая технология комбинированного статического зондирования и бурения, что существенно повысило эффективность инженерных изысканий³ [5] и информативность исследований *in situ*.

2. Геотехническая модель грунта

Геотехника стала существенно глубже и шире. Разломы, карст, оползни, активная гидрогеология и другие природно-техногенные условия и процессы в значительной мере влияют на проекты зданий и сооружений и особенно на их безаварийную эксплуатацию, поскольку в процессе эксплуатации зданий и сооружений (их реального срока службы) возможно проявление тех или иных природно-техногенных факторов.

Разработана новая геотехническая модель: геомассив – основание – фундамент – сооружение. Принципиальное отличие предлагаемой модели от традиционной (основание – фундамент – сооружение) заключается в том, что она более широко охватывает объект исследований и в полной мере дает представление о характере процесса взаимодействия сооружения с окружающей средой. При этом необходима организация комплексных инженерных изысканий, включая инженерно-геологические и инженерно-экологические исследования геомассивов с учетом природно-техногенных условий, отмеченных выше, и выполнение более полного и активного мониторинга как геомассива, так и самого сооружения с приоритетом воздействия на окружающую среду [5–7]. Наиболее эффективна геотехническая модель для линейных сооружений.

Один из практических выводов модели заключается в следующем: для больших и средних мостов каждая опора должна рассматриваться как отдельное сооружение со всеми вытекающими отсюда последствиями в инженерных изысканиях (в том числе количество буровых скважин, точек зондирования, геофизики и контрольных испытаний).

В ИПТС – «Транспроект» организована лаборатория геомассивов, оснований и фундаментов. Геотехническая модель использована при проектировании и строительстве мостов в г. Владивостоке через пролив Босфор-Восточный, в Ульяновске и Саратове (у с. Пристаное) на Волге, порту Салиф (Йемен), на более 10 объектах транспортного строительства в Москве («ТрансКапСтрой», «МО-99», «Бурбау») и др.

3. Вес грунта (бытовое давление)⁴

Вес грунта (бытовое давление) имеет исключительно важное значение для оползней, склонов, подпорных стен, ограждающих конструкций и т.д. и тем более для величины коэффициентов надежности, запаса и др.

Повторим известное высказывание профессора С.Б. Ухова и др. [8]: «...точное определение начального и исходного напряженного состояния массива грунтов представ-

³ Кулачкин Б.И., Радкевич А.И. Комплект аппаратуры для статического зондирования ПИКА-1Н: паспорт НТД. М.: ВНИИОСП, 1988. 7 с.

⁴ Здесь не рассматриваются вопросы гравиметрии, поскольку результаты исследований не дают возможность применять их для механики грунта и геотехники.

ляет собой сложную задачу, связанную с необходимостью учета многих факторов. До настоящего времени пригодного для инженерных расчетов решения этой задачи еще не получено». Здесь следует заметить, что вес грунта γh и его использование в таком виде напрямую зависят от того, в каком состоянии находится грунт. Интересно отметить, что нагрузка от собственного веса грунта была связана с коэффициентом надежности в СП 20.13330.2011, что вполне логично. Вернемся в прошлое. Когда появилась табл. 1 в СНиП 2.01.07–85* «Нагрузки и воздействия», сразу было необходимо обратить внимание на грунты $\gamma_f = 1,1$ (коэффициент надежности по нагрузке от собственного веса) в природном состоянии и насыпные $\gamma_f = 1,15$, что ранее отмечалось как ошибка, поскольку неоднородность грунтов существенно выше, нежели бетона [8].

Кроме того, вызывает вопросы и терминология.

Анализ табл. 1 СНиП 2.01.07–85 приведен в работе [9]. Еще раз отметим, что вступают в диссонанс с коэффициентом надежности для грунта аналогичные коэффициенты для металла (1,05) и бетона (1,1–1,3). Основным параметром, определяющим коэффициент надежности от собственного веса материала, является его неоднородность по плотности. Неоднородность грунта существенно выше неоднородности металла и бетона, и, соответственно выше коэффициент надежности.

Следует также отметить, что в одной из наиболее полных работ по насыпным грунтам [10] не приводится каких-либо коэффициентов надежности по нагрузке от собственного веса. Вместе с тем сам автор – профессор В.И. Крутов – неоднократно заявлял, что γ_f должен быть существенно выше. Что касается грунта в природном состоянии, то его неоднородность можно сравнить с бетоном (рис. 2–4).

Рис. 2. Аналоговая диаграмма статического зондирования грунтов, полученная фирмой Fugro (Сахалин-1)

Fig. 2. Diagram (analogue) of cone penetration test obtained by Fugro company (Sakhalin-1)

Рис. 3. График скорости ультразвука по длине сваи БНС № 4 опоры № 3, объект «Эстакада автомобильной дороги Джубга – Сочи на участке “Обход г. Сочи” (р. Сочи)»

Fig. 3. Graph of ultrasound speed along the length of the pile BNS Nr. 4 of the support № 3, object “Ramp of the motoroad Dzhubga – Sochi, the part of Sochi bypass road (Sochi river)”

Рис. 4. Исследование сплошности бетона буронабивной сваи № 12 фундамента опоры № 3 (РД) (Chum), объект «Развитие Московского авиационного узла. Строительство комплекса новой взлетно-посадочной полосы (ВПП-3) международного аэропорта Шереметьево, Московская область» (Рулежная дорога)
Fig. 4. Graph resulted from studying the continuity of concrete in the bored pile № 12 of the foundation support (RD) № 3 (Chum), project “Development of Moscow air cluster. Construction of a new runway (runway 3) of Sheremetyevo International Airport, Moscow region” (taxiway road)

Некая оценка веса грунта *in situ* может быть дана на основе исследований с учетом классификации грунта (переуплотненный – нормально уплотненный – недоуплотненный) по методике, изложенной в разд. 1 данной работы.

Графики на рис. 2–4 дают общее представление об однородности, сплошности, целостности грунта и бетона. Корректная вероятностно-статистическая обработка экспериментального материала как по грунту, так и по бетону (банк данных – более 60 тыс. единиц хранения), включающая исследования гипотез распределения случайных величин и затем оценки статистических показателей, подтвердила несоответствие γ_f для грунта в природном залегании и насыпных [11, 12]. Тогда же был предложен $\gamma_f = 1,32$ для грунтов в природном залегании и 1,35 для насыпных. Однако почему только для насыпных? Почему нет просадочных, намывных и др.? Строго говоря, существенно ничего в новой версии не изменилось.

Необходимо также отметить, что данные коэффициенты надежности по нагрузке от собственного веса «перекочевали» в другие нормы – для тоннелей, метрополитенов, мостов и труб и др.

Процесс пересмотра норм и стандартов начался в 2010-х гг. достаточно бурно. Создавалось впечатление, что нормы и стандарты были просто переписаны, часто с ошибками, как отмечают многие специалисты.

Одним из таких примеров является табл. 7.1 СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* “Коэффициенты надежности по нагрузке для веса строительных конструкций и грунтов”» (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты надежности по нагрузке для веса строительных конструкций и грунтов

Table 1

The load safety coefficients for the weight of structures and soils

Конструкции сооружений и вид грунтов	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f
<i>Конструкции</i>	
Металлические, за исключением случаев, указанных в 2.3	1,05
Бетонные (со средней плотностью выше 1600 кг/м ³), железобетонные, каменные, армокаменные, деревянные	1,1
Бетонные (со средней плотностью 1600 кг/м ³ и менее), изоляционные, выравнивающие и отделочные слои (плиты, материалы в рулонах, засылки, стяжки и т.п.), выполняемые:	
– в заводских условиях	1,2
– на строительной площадке	1,3
<i>Грунты</i>	
В природном залегании	1,1
На строительной площадке	1,15

Вышеназванная ошибка вновь повторена, только под другим названием: «грунты на строительной площадке», $\gamma_f = 1,15$. Название, на наш взгляд, тоже неудачное, поскольку есть фундаменты на естественном основании, туда также могут входить насыпные, намывные грунты и др.

Подводя некий итог сказанному, следует отметить, что необходимо упорядочить табл. 7.1 СП 20.13330.2011 и привести в соответствие с различного рода коэффициентами надежности (запасов и др.) в геотехнике.

4. Поровое давление, проницаемость⁵

Первый зонд с измерением порового давления был продемонстрирован Б. Бромсом (Швеция) в г. Москве в 1973 г. на Международном конгрессе по механике грунтов и фундаментостроению. В 1980-х гг. Б.И. Кулачкиным и А.И. Радкевичем был разработан зонд с поровым давлением⁶, а также была создана новая методика измерения порового давления при остановке зонда в процессе релаксации⁷.

Необходимо отметить, что методика измерения порового давления, представленная в международном стандарте, предусматривала жесткие ограничения в конструкции зонда, и, что самое важное, измерения выполнялись в процессе движения зонда со скоростью $V = 1 \pm 0,3$ м/мин. Все это было ошибкой, поскольку гидрогазодинамика, шумы не позволяют извлечь полезную информацию.

Вопрос о поровом давлении во многом был решен с помощью открытия № 186 «Закономерность распределения порового давления в глинистых породах»⁸.

⁵ Не рассматриваются аномально высокие пластовые давления, связанные с газом и нефтью.

⁶ Способ измерения порового давления: пат. № 2167238 / Б.И. Кулачкин, А.И. Радкевич. 5 с.; Кулачкин Б.И. Поропьезометр – 1М: паспорт НТД. М.: НИИОСП, 1983.

⁷ Кулачкин Б.И. Новая методика измерения порового давления: паспорт НТД. М.: НИИОСП, 1984. 7 с.

⁸ Кулачкин Б.И., Радкевич А.И., Александровский Ю.В., Остюков Б.С. Закономерность распределения порового давления в глинистых породах: науч. открытие; диплом № 186. М.: РАЕН, 1991. 5 с.

Было доказано, что поровое давление, измеренное в процессе релаксации после остановки зонда при статическом зондировании, является единственным способом определения порового давления *in situ*. Давление изменяется по экспоненте, параметры которой зависят от вида грунта и его характеристик (рис. 5). Данное открытие позволяет рассматривать поровое давление как элемент памяти образования и эволюции верхних слоев литосферы.

Рис. 5. Процесс релаксации порового давления:
 a – поровое давление *in situ*; P_0 – поровое давление при остановке зонда
Fig. 5. The relaxation process of pore pressure

Следует отметить, что вслед за этим открытием последовало много научных работ о некой памяти воды и больших возможностях методики ее оценки. Исследования показали⁹ [13], что в водонасыщенных песках поровое давление в полной мере соответствует гидростатическому. В глинистой породе [14, 15] поровое давление распределено неравномерно и может быть меньше, равно или больше гидростатического, вплоть до литостатического [1]. В качестве такого примера можно привести измерение порового давления в неоднородном геомассиве в одном из районов Таллина [1]. Широкое применение методики измерения порового давления было основано на применении прибора «ПИКА» [16–19].

Следует также заметить, что методика релаксации параметров при статическом зондировании, связанная с поровым давлением, была существенно расширена, и уже с 1990-х гг. Б.И. Кулачкин и А.И. Радкевич распространили ее на температуру грунта T , радон (α -излучение), объемную влажность грунта (ННК), плотность грунта (ГГК), «горячий зонд», что позволило получить параметры грунта *in situ*, значительно более достоверные, нежели в лабораторных условиях.

Так, были исследованы тепловое поле и его динамика в порту Салиф (Йемен), которое распространялось от огромного соляного диапира и террикона в 3 км от порта. Был найден источник утечки горячей воды в основании кинотеатра «Октябрь» в Москве и др.

Что касается проницаемости, то релаксация и экспонента, представленная на рис. 5, вполне могут быть использованы для оценки коэффициента фильтрации, пористости при некоторых методических дополнениях.

Однако методика с остановкой зонда в процессе зондирования и регистрацией релаксации параметров появилась только в ГОСТ 19912–2012 «Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием».

⁹ Кулачкин Б.И. Руководящий нормативный документ. Морские инженерно-геологические изыскания. Определение строительных свойств донных грунтов комплектом ПИКА-10. Баку, 1984. С. 56–74.

5. Эффект Кулачкина–Радкевича

Данный эффект позволил в некоторой степени обнаружить аномальное явление [20, 21]: *поровое давление внутри песчаной насыпи, образованной гидронамывом (строительство мостового перехода в г. Саратове через р. Волгу у с. Пристанное), оказалось меньше атмосферного.*

Этот результат был получен благодаря изложенной выше методике измерения порового давления в процессе статического зондирования. В данном случае проводилось измерение порового давления в процессе его релаксации при остановке зонда. Указанная методика принципиально отличается от рекомендуемой, изложенной в международном стандарте на СРТ.

В итоге оказалось, что поровое давление внутри песчаной насыпи являлось неким стабилизирующим фактором, что повышало устойчивость песчаной насыпи. Данный эффект важен для понимания процессов, происходящих в массиве грунта как при техногенном воздействии, так и в процессе эволюции верхних слоев литосферы.

6. Капиллярная модель грунта

Высота капиллярного поднятия, капиллярные силы и их учет в различного рода расчетах имеют важное значение в геотехнике. Высота капиллярного поднятия h_k определяется не только классическими капиллярными силами, но часто условиями образования и эволюции литосферы и вполне адекватно описывается нашей капиллярной моделью, где присутствуют четочные капилляры и капилляры Жомена [22]. Эта модель не может дать представления о возможности высокого капиллярного поднятия, например в несколько десятков метров (К. Терцаги предполагал капиллярное поднятие до нескольких сотен метров). В нормах РФ в достаточно общем виде обозначены высоты капиллярного поднятия для различных видов грунта. Были проведены исследования в различных регионах РФ, а также в Узбекистане, Молдавии и Украине совместно с ВСЕГИНГЕО, ПНИИС, Гидроингео с использованием установок СПК (станция пенетрационного каротажа) [23]. Следует отметить, что эта установка, не имеющая аналогов (измеряемые штатные параметры – q_c , f_c , ННК, ГГК, ГК), а также приспособления измерения порового давления и температуры позволяют проводить исследования на самом высоком уровне. Кстати говоря, попытка создать аналог такого устройства в США не увенчалась успехом. Использование нейтрон-нейтронного (ННК) и гамма-каротажа (ГК) позволило достаточно подробно и достоверно исследовать капиллярную кайму. Ее высота, влажность и цвет нестабильны и не достигали величины более 2 м в различных грунтах [11, 12]. В процессе эволюции или техногенеза могут образовываться традиционные (четочные) капилляры и капилляры Жомена в геомассиве основания. На этой основе была разработана комбинированная капиллярная модель, одним из главных выводов которой является отсутствие прямой связи между высотой и силой капиллярного поднятия, поскольку объемная и весовая влажность по высоте каймы капиллярного поднятия нестабильна.

Результаты исследования порового давления и капиллярного поднятия могли бы дополнить фильтрационную теорию консолидации (уплотнения).

7. Аналого-дискретная модель грунта

Разработана аналого-дискретная модель грунта [24], в которой заложено новое свойство – дискретность. Его суть заключается в том, что идеальное тело состоит из неопределенного количества стержней, объединенных в одно целое, различной длины и поперечных сечений (дискретность), с бесконечным модулем упругости. Данное тело названо *KR* (Кулачкин–Радкевич) (рис. 6).

В качестве примера можно привести модель Бингама (рис. 7), где к известным идеальным телам *H* (упругость), *N* (вязкость) и *StV* (сухое трение) добавлено *KR* (дискретность). Таким образом, получается полный набор свойств уникальной аналого-дискретной модели.

Отличием аналого-дискретной модели является то, что традиционная последовательность фаз (упругость – пластичность – разрушение) напряженно-деформированного состояния может не соблюдаться.

В комбинации с упругопластичными моделями предлагаемая модель позволяет существенно расширить область применения реологических моделей в теории сред.

Использование предложенной модели в реологической механике грунтов может открыть новые направления развития теории как для скальных, так и для обычных грунтов.

Рис. 6. Идеальное хрупкое тело (*KR*)-х
Fig. 6. A perfect brittle body (*KR*)-x

Рис. 7. Упруговязкопластичнохрупкая модель
Fig. 7. Elastic-visco-plastic-brittle model

Для скальных грунтов блочной структуры предложенная модель имеет физическое обоснование.

Особенно важным может быть применение данной модели в динамике, когда происходят разуплотнение и изменение структуры грунта, приводящие к быстрым осадкам.

Применение предложенной модели в теории железобетона представляется ясным, и неслучайно доклад Б.И. Кулачкина на международной конференции по бетонам Concrete – 2014 вызвал интерес и получил поддержку [25].

Наиболее ярко дискретность грунта проявляется при статическом зондировании. Примером наглядности дискретности грунта может быть диаграмма статического зондирования (см. рис. 2).

Здесь необходимо отметить проблему измерений в строительстве, в том числе в геотехнике и механике грунта, связанную с быстродействием измерительных систем, когда параметры систем измерений не могут фиксировать быстропротекающие процессы в материалах. Это в полной мере относится к аналого-дискретной модели.

Применение быстродействующих систем измерений и регистрации может существенно обогатить так называемую теорию предельного равновесия.

8. Модуль Юнга

Модуль Юнга в механике и геотехнике широко используется в различных интерпретациях: модуль Юнга, модуль упругости, модуль общей деформации, модуль механической деформации, а также статический модуль упругости, динамический модуль упругости, начальный модуль упругости и т.д., причем последнее относится к грунту и бетону.

Существуют две методики определения модуля Юнга: механическое нагружение грунта в различных условиях (коробка, *in situ*) и измерение скорости волны в грунте путем приложения импульсного воздействия УЗД (Ultrasonic), сейсмоакустика (Low Strain Test).

С точки зрения физики модуль упругости, определенный вторым способом, более близок к самому определению упругости, поскольку только упругие свойства (модуль Юнга) определяют процесс в рамках волновой теории, тем более что статические испытания модуля упругости грунта могут не дать достоверной информации согласно аналого-дискретной модели. Выделить упругость из полного набора H , N , StV , KR представляется очень сложным. Что касается динамики и статики, то и здесь имеются серьезные трудности, поскольку, например, для грунта при трехфазной среде трудно понять, где статика, а где динамика. Динамика настолько размыта во времени, что определить (назначить) ее параметры очень сложно.

Оценка определения модуля Юнга первым способом была изложена М. Жамиолковским в его сообщении, когда он, будучи президентом ISSMGE, приезжал в 1990-х гг. в РФ. Он выполнял эксперименты совместно с японскими специалистами и путем приложения небольших нагрузок измерял с большой точностью осадки образца грунта. К сожалению, результаты этих экспериментов не были опубликованы, хотя они имели бы большое значение.

Что касается модуля Юнга грунта в рамках волновой теории, то каких-либо публикаций не было найдено ни в России, ни за рубежом. Скорость и E_d по данным УЗД в различных грунтах представлены в табл. 2 [26].

Таблица 2

Результаты ультразвуковых исследований

Table 2

Results of ultrasound examinations

Образцы грунтов (количество)	v_p , м/с	v_s , м/с	v_s/v_p	Динамический модуль упругости E_d , МПа	Коэффициент Пуассона μ
Суглинки М1 (20)	400–2000	200–550	0,20–0,54	170–1380	0,29–0,48
Суглинки М2 (24)	700–2000	300–500	0,16–0,50	650–1620	0,33–0,49
Супеси М3 (30)	520–1700	160–500	0,22–0,52	160–1600	0,31–0,48
Супеси М4 (29)	720–1500	190–420	0,18–0,43	220–1050	0,39–0,48
Суглинки и супеси (gQIdns) (25)	1050–2000	170–410	0,08–0,42	200–950	0,45–0,47
Суглинки и глины (J _{3ox}) (14)	950–1850	240–340	0,11–0,39	300–600	0,47–0,48

Поскольку методом Low Strain Test каким-либо образом исследовать массив грунта на данный момент сложно, были выполнены работы на грунтоцементных сваях. ИПТС – «Транспроект» и «Мостоотряд-47» провели комплексное испытание грунтоцементной сваи № 80 в подпорной стенке существующего путепровода по ул. Барклайя (Москва). Сваи были устроены по технологии струйной цементации Jet Grouting. Диаметр свай – 600 мм. Исследования выполнялись в два этапа.

I этап – определение с помощью прибора «Пульсар-1.2» скорости распространения УЗД на поверхности грунтоцемента: а) зачищенного торца сваи; б) на сколе зачищенной боковой поверхности.

Результаты испытаний скорости распространения УЗД:

- торец сваи – 1500–2200 м/с;
- на сколе зачищенной боковой поверхности – 1800–2500 м/с.

II этап – испытание свай по технологии РЕТ (Pile Echo Test). Исследования выполняли с помощью прибора РЕТ.

В качестве источника сейсмоакустического воздействия был использован специальный молоток, входящий в комплект оборудования РЕТ. Приемник ответных сигналов (акселерометр) располагался на предварительно подготовленном торце сваи вблизи от точки сейсмоакустического воздействия (рис. 8).

Рис. 8. Схема испытаний свай по технологии РЕТ:

0(ц) – центр сваи; 1(с), 2(к) – на ободу сваи или вблизи каркаса соответственно

Fig. 8. The scheme of pile testing according to PET technology

Обработка результатов основана на анализе инженерно-геологических условий, технологии устройства свай, акустических рефлектограмм с возможностью уменьшения погрешности измерений, использования параметров скорости, амплитуды, фазы, частоты, экспоненциального усиления, практической независимости скорости распространения акустического воздействия от частоты возмущения и параметров $t50\%$, $3D$, Z [27].

По результатам выполненных измерений были получены рефлектограммы (табл. 3). Отмечено, что:

- измеренная длина свай $L_{\text{факт}} = 10,9\text{--}11,0$ м;
- сплошность бетона сваи № 80 обеспечена.

Исходя из значений скорости по данным УЗД и формулы для одномерной волновой теории,

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; ρ – плотность.

Таблица 3

Рефлектограммы сваи № 80 ($H = 11,0$ м)

Table 3

Reflectograms of pile № 80 ($H = 11,0$ m)

Глубина, м	Детализация	Свая	Рефлектограмма	Примечания
11,0	11.08.2016 C: 1850 m/s Amp: 650	80-1, край		1. Значение интегральной скорости распространения упругих воздействий
11,0	11.08.2016 C: 2500 m/s Amp: 470	80-2, центр		($v = 1850\text{--}2500$ м/с) соответствует бетону класса B10.
10,9	11.08.2016 C: 2200 m/s Amp: 250	80-3, середина		2. Влияние инженерно-геологических условий на геометрические параметры сваи находится в интервале а.о. – [133.24–134.90].

При $\rho = 2200$ кг/см³ и $C \approx 2200$ м/с модуль Юнга грунтоцемента $E \approx 10$ ГПа, что вполне соизмеримо с бетоном.

Далее была определена прочность грунтоцементной сваи, при этом использовалось извлечение из стандарта (ГОСТ 17264–2012) методики оценки прочности по скорости C . Получили $\approx B10$, что также соизмеримо с бетоном.

9. Несущая способность сваи

Существуют два основных метода испытания свай – статический и динамический. Динамическим испытаниям свай посвящено много работ. Известны формулы Крендэлла, Сандера, Челлиса, голландская, Engineering News и др. [28]. Среди динамических формул выделяется формула Н.М. Герсеванова, которая существенно выше аналогичных, широко применяется в РФ. Между прочим, по оценкам французских специалистов, СНиП по свайным фундаментам лучший в мире (В.А. Ильичев)¹⁰.

Компания TNO (Profound, Голландия) рекомендует для испытаний такие методы, как Static Load Test (статика), Dynamic Load Test (динамика), Statnamic (вибрация, дизель).

Отметим, что наиболее современными являются метод Profound Dynamic Instrument и расчет по формуле Герсеванова применительно к буронабивным сваям. Анализ показал, что наиболее эффективный способ – использование формулы Герсеванова с учетом незначительных поправок ИПТС – «Транспроект» для буронабивных свай. Основным преимуществом данной формулы является феноменологический подход, использующий два параметра: энергию и осадку. ИПТС – «Транспроект» применяет этот метод. Впервые в 1999 г. была дана сравнительная оценка методов SLT, DLT и представлен расчет по формуле Герсеванова [29].

Среди статики наиболее известен метод Osterberg [30]. Он имеет недостаток, поскольку практически создать нагрузку на сваю при испытании больше силы трения по ее боковой поверхности сложно.

¹⁰ Б.И. Кулачкин участвовал в разработке разд. 5 СНиП 2.02.0385.

Анализ динамических и статических испытаний свай показывает, что все методы имеют следующие недостатки:

- 1) ограничения в количестве испытаний;
- 2) невысокая достоверность;
- 3) технические сложности;
- 4) время испытаний.

Здесь уместно привести известное высказывание К. Терцаги: «...лучше знать неточно обо всем объекте, чем точно о малой его части...».

ИПТС – «Транспроект» проводит интенсивные исследования по оценке несущей способности свай на основе акустики, которые позволяют определять несущую способность, используя Low Strain Test, получая при этом полную статистику. Зная минимальные параметры инженерно-геологических условий, вполне достаточно в условиях высоких темпов строительства осуществить контрольные испытания.

Альтернативы предлагаемому методу на основе акустики практически нет [31].

На данный момент проводятся исследования совместно с Институтом прикладной физики РАН (Нижний Новгород), МГУ (Москва) в широком диапазоне акустических частот и различных технологий.

10. Акустика в геотехнике

Акустическая эмиссия применяется для оценки прочностных, сдвиговых и фрикционных свойств грунтов [32].

При строительстве моста через р. Волгу в г. Ульяновске в 2000-х гг. были выполнены комплексные исследования оползня (бурение, зондирование, деформометры, искиметрия) Милановского (самый большой в РФ), у подножия которого был построен главный пилон.

Исследования проводились совместно с УльяновскТИСИЗом (С.И. Трибунский) и Институтом геоэкологии РАН (Г.П. Постоев). В итоге было дано заключение об устойчивости оползня с рекомендациями об ограничении поступления воды в его тело от жил-массива, находящегося наверху.

В последние годы акустика все шире применяется для оценки сплошности, целостности, прочности и геометрии свай и других железобетонных конструкций, оценки влияния инженерно-геологических условий на качество глубокозаложенных фундаментов.

Ведущими фирмами в этой области, выполняющими аппаратные разработки и аналитику, являются Profound (SIT, Sonic Integrity Test; TNO, Голландия), DI (Dynamic Instrument, США), PET (Pile Echo Test, Израиль). В России это «Интерприбор» (Челябинск), «Луч» (Балашиха) и др. С этими организациями ИПТС – «Транспроект» сотрудничает, внедряет новые приборы и методики измерений.

Акустика в геотехнике применяется в двух видах: Ultrasonic (Chum, Pulsar, Бетон) и Low Strain Test (PET, SIT, PSI и др.). Основным параметром для исследования бетона в конструкциях является скорость акустической волны C [33].

Фундаментальной основой всех акустических исследований является зависимость скорости от модуля Юнга и плотности (для одномерной волновой теории):

$$C = f(E, \rho). \quad (2)$$

Показано, что, по данным SIT (Profound), модуль Юнга напрямую влияет на скорость C (табл. 4) [34].

Таблица 4

Связь между длиной сваи, скоростью звука и качеством бетона

Table 4

Example relation pile length, wave velocity and concrete quality

Характеристики	Монолитная свая	Сборная свая
Класс бетона	B35	B60
Плотность ρ , кг/м ³	2400	2400
Модуль упругости (модуль Юнга) E , ГПа	35	42
Длина сваи L , м	20	20
Скорость звука C , м/с	3820	4185
Время Δt , мс	10,48	9,56

Что касается плотности, то, по нашим оценкам, формула (2) практически не может быть использована для оценки скорости в бетоне в широком диапазоне. На данном этапе технологии производства бетона существенно ушли вперед, и это же касается состава бетона (физические и химические компоненты), тем более что изменение ρ при этом находится в очень узком диапазоне, а прочности – в широком.

Наиболее используемыми параметрами в геотехнике являются прочность и дефекты (сплошность, целостность, прочность и геометрия) бетона.

Эффективным и целесообразным считаем для практических целей использовать зависимость скорости $C = \varphi(B)$, где B – класс бетона по прочности. В ГОСТ РФ 17624–2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» имеет место линейная зависимость между скоростью и прочностью.

Нами была распространена эта зависимость на Echo Test (PET, SIT) с учетом того, что частота акустического сигнала не влияет на скорость бетона (это наше предположение, поскольку о таких исследованиях нам неизвестно).

Необходимо отметить также зависимость Pile Test [27] для Ultrasonic:

$$C = Kf_c^{1/6}, \quad (3)$$

где C – скорость волны; f_c – прочность бетона на сжатие; K – коэффициент с учетом фактора трубок при использовании прибора Chum (Ultrasonic), изготовленного фирмой Pile Test.

Проведены аналитические и экспериментальные исследования, которые позволяют нам комплексировать Ultrasonic и Low Strain Test [35–38], получая при этом более полную информацию о сплошности, целостности, прочности и геометрии фундамента в рамках одномерной волновой теории.

Сравнение результатов Ultrasonic и Low Strain Test (рис. 9, 10) дает идентичные результаты оценки длины сваи, сплошности, целостности и прочности относительно основного параметра C . Результаты вполне приемлемые, причем дополняют друг друга на одной и той же свае.

Проводятся исследования по оценке несущей способности буронабивных свай по данным Low Strain Test. По методике ИПТС – «Транспроект» был выполнен эксперимент, в результате которого были получены два вида рефлектограмм с измерением скорости и длины сваи, а также длины сваи вместе с грунтом ниже пяты сваи – 48,2 и 51,5 м (табл. 5, 6). Свая (пята сваи) была погружена в гипс светло-серый, от мелко- до крупнокристаллического, скальный, пониженной прочности.

Рис. 9. График, полученный по методу Ultrasonic (УЗД), прибор «Бетон»
Fig. 9. Graph by Ultrasonic detection, “Beton” equipment

Рис. 10. Рефлектограммы, полученные по методу Low Strain Test (сейсмоакустика), PET
Fig. 10. Reflectograms by Low Strain Test (seismoacoustics), PET

Таблица 5

Рефлектограммы, полученные в результате исследования сплошности, целостности, прочности и геометрии буронабивной сваи № 36 фундамента опоры № 6, г. Уфа, Башкортостан (Low Strain Test (сейсмоакустика), PET)

Table 5

Reflectograms resulting from the study of continuity, integrity, strength and geometry of bored pile № 36 of the support foundation № 6, Ufa, Bashkortostan (Low Strain Test (seismoacoustics), PET)

Свая	Глубина, м	Детализация	Рефлектограмма
36 t-1	48,2	20.01.2016 C: 3850 m/s Amp: 170 Planned: 48.0 m Avg: 10	
36 t-2	48,2	20.01.2016 C: 3950 m/s Amp: 230 Planned: 48.0 m Avg: 10	
36 t-3	48,3	20.01.2016 C: 3950 m/s Amp: 327.3 Planned: 48.0 m Avg: 10	
36 t-4	48,3	20.01.2016 C: 3900 m/s Amp: 60 Planned: 48.0 m Avg: 10	

Таблица 6

Рефлектограммы, полученные в результате исследования сплошности, целостности, прочности и геометрии буронабивной сваи № 36 и грунта ниже пяты сваи фундамента опоры № 6, г. Уфа, Башкортостан (Low Strain Test (сеймоакустика), PET)

Table 6

Reflectograms resulting from the study of continuity, integrity, strength and geometry of the bored pile № 36 and ground beneath the heel № 6 of the support foundation, Ufa, Bashkortostan (Low Strain Test (seismoacoustics), PET)

Свая	Глубина, м	Детализация	Рефлектограмма
1	51,5	20.01.2016 C: 3650 m/s Amp: 170 Planned: 48.0 m Avg: 7
3	51,5	20.01.2016 C: 3550 m/s Amp: 410 Planned: 52.0 m Avg: 10
5	51,6	20.01.2016 C: 3650 m/s Amp: 270 Planned: 52.0 m Avg: 10

Сравнивая две серии рефлектограмм (табл. 5, 6), можно сказать, что при использовании методики ИПТС – «Транспроект» возможно определить скорость акустической волны в грунте. Путем несложных расчетов она получается равной ≈ 1750 м/с. С помощью данной методики можно принять частное значение предельного сопротивления грунта под нижним концом сваи равным $41,5 \text{ кг/см}^2$, модуль Юнга (упругости) ≈ 6 ГПа.

Таким образом, для свай-стоек вполне можно использовать методику ИПТС – «Транспроект» в экспертных оценках, нестандартных ситуациях и др.

Закключение

Таким образом, в данной работе сделана попытка систематизации основ новой механики грунта и геотехники. Особое внимание уделено исследованиям *in situ*. Даны оценки состояния и перспектив геотехники и механики грунта. По нашим наблюдениям, перспективным направлением в механике грунта и геотехнике является акустика.

Б.И. Кулачкин выражает глубокую благодарность Н. Быстрову, председателю ТК 418 «Дорожное хозяйство», и Д. Казуффи, председателю ТК 189 «Геосинтетика» (Европа), за предоставленную возможность выступить в дискуссии с сообщением о современном состоянии геотехники и механики грунта с перспективой использования научно-технических достижений в геосинтетике и дорожном хозяйстве.

Библиографический список

1. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И., Соколов А.Д. Проблемы и перспективы геотехники. – М.: РАЕН, 2003. – 107 с.
2. Пластмассы в геотехнике: седьмой интернац. сб. Спец. выпуск «Геотехника» / Нем. о-во по геотехнике. – Essen, 2001. – 42 с.
3. Опыт проектирования моста через р. Ликову / Б.И. Кулачкин, В.И. Шмидт, В.И. Солодунин [и др.] // Вестник мостостроения. – 2004. – № 3-4. – С. 151.
4. Соколов А.Д. Арматурные системы автодорожных мостов и транспортных развязок. – СПб.: Держава, 2013. – 504 с.
5. Morgenstern N.R. The observational method in environmental geotechnics // Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics. – Edmonton, 1994. – P. 265–273.
6. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И., Александровский Ю.В. Основы строительной экологии. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2000. – 434 с.
7. Mainstreaming the environment. The world bank. – Washington DC: Fiscal, 1995. – 324 p.
8. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов [и др.]. – М.: АСВ, 1994. – 527 с.
9. Кулачкин Б.И., Митькин А.А. О коэффициенте надежности по нагрузке в геотехнике // Транспортное строительство. – 2010. – № 4. – С. 2–31.
10. Крутов В.И. Строительство на насыпных грунтах. – М.: Стройиздат, 1988. – 224 с.
11. Кулачкин Б.И. Экспериментально-теоретические исследования и разработка метода зондирования в инженерной геологии: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. – М.: НИИОСП, 1990. – 34 с.
12. Кулачкин Б.И. Исследование и разработка методов определения относительной просадочности и коэффициента фильтрации лессовых грунтов статическим зондированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИИОСП, 1975. – 27 с.
13. Кулачкин Б.И. Аномально высокие пластовые давления и средства их измерения. Библиографическая информация // Строительство и архитектура. – 1984. – Вып. 5. – С. 216.
14. Dalmatov B.I., Kulachkin B.I. Field investigations clay soils // Proceedings of 10th Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng. – Rotterdam, 1981. – Vol. 2. – P. 45–50.
15. Кулачкин Б.И. Измерение порового давления в грунтах зондированием. Библиографическая информация // Строительство и архитектура. – 1984. – Вып. 5. – С. 44.
16. Кулачкин Б.И. Использование результатов статического зондирования для оценки физико-механических характеристик грунтов // Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М.: Стройиздат, 1984. – 173 с.
17. Советско-голландский эксперимент в области зондирования грунтов / В.А. Ильичев, Б.И. Кулачкин, А. Van den Berg, A. Dajfich // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. – № 5. – С. 154.
18. Kulachkin B.I., Trofimenkov Yu.G. Cone penetration testing in Russia // Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing. – Linköping, 1995. – P. 92.
19. Кулачкин Б.И. Литологическое расчленение грунтовых массивов в Волгоградском Поволжье по результатам статического зондирования комплектом ПИКА-10 // Инженерная геология. – 1986. – № 4. – С. 25–29.

20. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И. Эффект Кулачкина–Радкевича при возведении песчаной насыпи гидронамывом // Материалы 8-й Междунар. конф. по экспериментальным исследованиям инженерных сооружений. – М., 1998. – С. 113.
21. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И. Область пониженного порового давления внутри песчаной насыпи, образованной гидронамывом // Транспортное строительство. – 1999. – № 8. – С. 8–10.
22. Кулачкин Б.И., Митькин А.А. Инновации в геотехнике мостов // Транспортное строительство. – 2015. – № 10. – С. 7–9.
23. Ферронский В.И. Пенетрационно-каротажные методы инженерно-геологических исследований (теория и практика применения). – М.: Недра, 1969. – 240 с.
24. Фундаментальные и прикладные проблемы в геотехнике / Б.И. Кулачкин, А.И. Радкевич, Ю.В. Александровский, Б.С. Остюков. – М., 1999. – 151 с.
25. Кулачкин Б.И., Митькин А.А., Шмидт Д.Д. Аналого-дискретная модель бетона // Concrete and Reinforced-Clance at Future. III AI Russian (II International) Conference and Reinforced Concrete. – 2014. – С. 106–115.
26. Пиоро Е.В. Деформационные и акустические свойства глинистых грунтов по результатам лабораторных инженерно-геологических и ультразвуковых исследований: дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М.: Изд-во МГУ, 2014. – 220 с.
27. PET User Manual. Geotechnical Instrumentation Division. – 2nd ed. – 1998. – 127 p.
28. Косте Ж., Санглера Г. Механика грунтов / пер. с фр.; под ред. Б.И. Кулачкина. – М.: Стройиздат, 1984. – 445 с.
29. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И., Гадаев Н. Проблема испытания свай большой несущей способности // Транспортное строительство. – 2001. – № 4. – С. 30–35.
30. Osterberg J.O. A new simplified method for load drilled shafts // Foundation Drilling. – 1994. – Vol. 23, № 6. – С. 23–28.
31. Кулачкин Б.И., Радкевич А.И., Шмидт Д.Д. Проблема буронабивной сваи // Транспортное строительство. – 2013. – № 9. – С. 25–26.
32. Буфеев К.В. Определение сдвиговых и фрикционных свойств грунтов: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М., 1999. – 16 с.
33. Кулачкин Б.И., Митькин А.А. Акустика в мостостроении // Дорожная держава. – 2014. – Спец. выпуск. – С. 10–15.
34. Manual Profound SIT-series, software version 7.9. – 2012. – 140 p.
35. Schellingerhout A.J.G., Rietschoten-Rietveld van A.J. Pile integrity testing developments // Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2011. – P. 100.
36. Schellingerhout A.J.G. Quantifying pile defects by integrity testing // Proceedings of the Fourth International Conference On The Application of Stress-Wave Theory to Piles. – 1992. – P. 702–704.
37. Chow Y.K., Phoon K.K., Chow W.F. Three-dimensional stress wave analysis of pile integrity tests // Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. – 2004. – P. 83–93.
38. Joram M. Amir, Erez I. Amir. Modulus of elasticity in deep bored piles. – 2004. – P. 90–104.

References

1. Kulachkin B.I., Radkevich A.I., Sockolov A.D. Problems and prospects of geotechnics. Moscow: RAEN, 2003. 107 p.
2. *Seventh international book «Plastics in geotechnics»: Spets.vypusk «Geotechnics»*, German Society for Geotechnical Engineering. Essen, 2001. 42 p.
3. Kulachkin B.I., Shmidt V.I., Solodunin V.I. et al. Experience in design of the bridge across the Likova river. *Journal of bridge engineering*, 2004, no. 3-4, pp. 151.
4. Sokolov A.D. Reinforced system of highway bridges and road junctions. Saint-Petersburg: Derzhava, 2013. 504 p.
5. Morgenstern N.R., The Observational method in environmental geotechnics. *Proceedings of the First International Congress on Environmental Geotechnics*, Edmonton, Canada, 1994. pp. 265–273.
6. Kulachkin B.I., Radkevich A.I., Aleksandrovskiy Yu.V. Basics of building ecology. Publishing House of Saratov Univ., 2000. 434 p.
7. Mainstreaming the environment. The World Bank. Washington: D.C. Fiscal, 1995. 324 p.
8. Uhov S.B. et al. Mechanics of soils, bases and foundations. Moscow: ASV publ., 1994. 527 p.
9. Kulachkin B.I., Mitkin A.A. On the coefficient of reliability for the load in geotechnics. *Transport construction*, 2010. no. 4. pp. 29-31.
10. Krutov V.I. Construction on bulk soil. Moscow: Stroyizdat, 1988. 224 p.
11. Kulachkin B.I. Experimental and theoretical research and development of the method of sensing in engineering geology. Abstract of Doctors degree dissertation, Moscow, NIIOSP, 1990. 34 p.
12. Kulachkin B.I. Research and development of methods for determining the relative subsidence and filtration coefficient loess soils static probing. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow: NIIOSP 1975. 27 p.
13. Kulachkin B.I. Abnormally high reservoir pressures and measuring instruments. Bibliographic information. *Construction and architecture*, 1984, iss. 5, pp. 216.
14. Dalmatov B.I., Kulachkin B.I. Field investigations clay soils. *Proceedings of 10th Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng.*, 1981, vol. 2, pp. 45–50.
15. Kulachkin B.I. Measurement of the pore pressure in the ground probing. Bibliographic information. *Construction and architecture*, 1984, iss. 5, pp. 44.
16. Kulachkin B.I. Using the results of static probing to assess the physical and mechanical properties of soils. *Coll. № 74. Grounds, foundations and underground structures*. Moscow: Stroyizdat, 1984. 173 p.
17. Ilyichev V.A., Kulachkin B.I. A. Van den Berg, Dajfich A. Soviet-Dutch experiment in the field of soil sensing. *Grounds, foundations and soil mechanics*, 1986, no. 5, pp. 154.
18. Kulachkin B.I., Trofimenkov Yu.G. Cone penetration testing in Russia. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing. Linkoping*, Sweden, 1995. pp. 92.
19. Kulachkin B.I. Lithological soil masses in the Volgograd Volga region as a result of static sounding set of PICA-10. *Engineering geology*, 1986, no. 4. pp. 25-29.
20. Kulachkin B.I., Radkevich A.I. Effect Kulachkina-Radkevich in the construction of a sand mound gidronamyvom. *8th International Conference on experimental studies of engineering structures, EIIS 98*, 1998, pp. 113.

21. Kulachkin B.I., Radkevich A.I., The region of reduced pore pressure inside the sand mound, formed gidronamyvom. *Transport building*, 1999, no. 8, pp. 8-10.
22. Kulachkin B.I., Mitkin A.A. Innovations in geotechnics bridges. *Transport building*, 2015. no. 10, pp. 7-9.
23. Ferronsky V.I. A penetration-logging methods of geotechnical investigations (Theory and Practice). Moscow: Nedra, 1969. 240 p.
24. Kulachkin B.I., Radkevich A.I., Aleksandrovskiy Yu.V., Ostyukov B.S. Fundamental and applied problems in geotechnics. Moscow: RAEN, 1999. 151 p.
25. Kulachkin B.I., Mitkin A.A., Schmidt D.D. Analogue-discrete model of concrete. *Concrete and Reinforced-Clance at Future. III Al Russian (II International) Conference and Reinforced Concrete*, Moscow, 2014, pp. 106-115.
26. Pioro E.V. Deformation and acoustic properties of clay soils from laboratory geotechnical and ultrasound examinations. Ph.D. thesis. Moscow: Moscow State University, 2014. 220 p.
27. PET User Manual. Geotechnical Instrumentation Division. Second ed., May 1998. 127 p.
28. Koste Zh., Sanglera G. Soil Mechanics. Trans. French. Ed. by B.I. Kulachkina. Moscow: Stroyizdat, 1984. 445 p.
29. Kulachkin B.I., Radkevich A.I., Gadaev N. The problem of testing piles large load capacity. *Transport building*, 2001, no. 4, pp. 30-35.
30. Osterberg J.O. A new simplified method for load drilled shafts. *Foundation drilling*, 1994, vol. 23, no. 6, pp. 23-25.
31. Kulachkin B.I., Radkevich A.I., Shmidt D.D. The problem of bored piles. *Transportation construction*, 2013, no. 9, pp. 25-26.
32. Bufeef K.V. Determination of shear and friction properties of soils. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow: MGGA, 1999, 16 p.
33. Kulachkin B.I., Mitkin A.A. Acoustics in bridge construction. *Dorozhnaya Derzhava*, 2014, Special Edition, pp. 10-15.
34. Manual Profound SIT-series, software version 7.9. June, 2012. 140 p.
35. Schellingerhout A.J.G., Rietschoten-Rietveld van A.J. Pile integrity testing developments. *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, p. 100.
36. Schellingerhout A.J.G. Quantifying pile defects by integrity testing. *Proceedings of the fourth International Conference On The Application of Stress-Wave Theory to Piles*, 1992, pp. 702-704.
37. Chow Y.K., Phoon K.K., Chow W.F., Three-dimensional stress wave analysis of pile integrity tests. *Proceedings of the seventh International Conference On The Application of Stress-Wave Theory to Piles*, 2004, pp. 83-93.
38. Joram M. Amir, Erez I. Amir. Modulus of elasticity in deep bored piles, 2004, pp. 90-104.