

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

2016 № 6

Москва

НИУ МГСУ

СОДЕРЖАНИЕ

Соловьев А.А. Становление современной возобновляемой энергетики и ее роль в развитии строительной индустрии5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Громов П.А., Емельянов Р.Т., Серватинский В.В. Эффективность применения плоских георешеток с металлическими жилами в конструкциях армогрунтовых автодорожных насыпей.....7

Малахова А.Н. Пустотные кессонные плиты перекрытий монолитных многоэтажных зданий.....15

Мкртычев О.В., Андреев М.И. Расчет уникального высотного здания на землетрясения в нелинейной динамической постановке.....25

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н., Волгарева Н.Л. К вопросу прогноза осадки сваи на аргиллитоподобной глине численными и аналитическими методами.....34

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ. МЕХАНИЗМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Тускаева З.Р. Обеспечение эргономических основ безопасности деятельности машинистов.....46

Основан в 2005 году, 1-й номер вышел в сентябре 2006 г.
Выходит ежемесячно

Учредители:
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ»

Выходит при научно-информационной поддержке Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), международной общественной организации «Ассоциация строительных высших учебных заведений» (АСВ)

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Индексируется в РИНЦ, UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science)

Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering

Scientific and Technical Journal
on Construction and Architecture

Founded in 2005,
1st issue was published in September, 2006.
Published monthly

Founders: Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGUSU), ASV Publishing House

The Journal enjoys the academic and informational support provided by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International Association of Institutions of Higher Education in Civil Engineering

The Journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral Theses are to be published

Главный редактор
 акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
Валерий Иванович Теличенко (НИУ МГСУ)

Редакционная коллегия:

Х.И.Х. Броуэрс (Технический университет Эйндховена, Нидерланды),

А.И. Бурханов (ВолГАСУ),

А.А. Волков (НИУ МГСУ),

П.Г. Грабовый (НИУ МГСУ),

О.В. Игнатьев (РУДН),

Е.В. Королев (НИУ МГСУ),

О.И. Поддаева (НИУ МГСУ),

А.П. Пустовгар (НИУ МГСУ),

Б.Н. Родионов (зам. гл. редактора, НИУ МГСУ),

Д.Н. Силка (НИУ МГСУ),

Н.В. Сироткина (ВГУ),

А.В. Шамшин (Университет Центрального Ланкашира, Соединенное Королевство)

Редакционный совет:

А.А. Волков (председатель),

Ю.М. Баженов, Н.Г. Верстина, О.О. Егорычев,

Е.А. Король, А.Н. Ларионов, И.Г. Лукманова,

Н.С. Никитина, В.И. Теличенко,

З.Г. Тер-Мартirosян (НИУ МГСУ),

С.А. Амбарцумян (Концерн «МонАрх»),

А.Г. Бадалова (МГТУ СТАНКИН)

А.Т. Беккер (ДВФУ, ДВРО РААСН, Владивосток),

Н.В. Баничук, С.В. Кузнецов (ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН),

Й. Вальравен (Технический университет Дельфта, Нидерланды),

Й. Вичан (Университет Жилина, Словакия),

З. Войчицки (Вроцлавский технологический университет, Польша),

М. Голицки (Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика),

В.Т. Ерофеев (МГУ им. Н.П. Огарева)

Н.П. Кошман (Ассоциация строителей России),

П. МакГи (Университет Болтона, Соединенное Королевство),

Н.П. Осмоловский (МГУ им. М.В. Ломоносова),

П.Я. Паль (Технический университет Берлина, Германия),

В.В. Петров (СГТУ, Саратов),

Е.И. Пупырев (Межрегиональный союз проектировщиков),

А.Ю. Русских (Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации),

Ю.А. Табунчиков (МАРХИ),

О.В. Токмаджян (Совет старейшин г. Еревана, Армения),

П.А. Акимов, В.И. Травуш (РААСН)

Адрес редакции:

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

Тел./ факс +7 (499) 188-15-87, (499) 188-29-75,

e-mail: vestnikmgsu@mgsu.ru

Официальный сайт журнала

<http://vestnikmgsu.ru>

ISSN 2304-6600 (Online)

Периодическое научное издание

Вестник МГСУ. 2016. № 7

Научно-технический журнал

Редакторы **Е.Б. Махиянова**

Корректор **А.А. Дядичева**

Верстка **А.Д. Федотов**

Перевод на английский язык **О.В. Иванова**

Подписан в печать 23.06.2016. Подписан в свет 30.06.2016.

Формат 70x108/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Гарнитура Таймс. Усл.-печ. л. 16,75. Уч.-изд. л. 10,82.

Тираж 200 экз. Цена свободная. Заказ № 155.

Издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«**Национальный исследовательский**

Московский государственный строительный университет».

Издательство МИСИ — МГСУ

www.mgsu.ru, nc@mgsu.ru

(495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75.

Отпечатано в типографии Издательства МИСИ — МГСУ,

(499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90,

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

Перепечатка или воспроизведение материалов

номера любым способом полностью или по частям

допускается только с письменного разрешения Издателя.

Распространяется по подписке.

Подписка по каталогу агентства «Роспечать».

Подписной индекс 18077 (полугодовая),

36869 (годовая)

© НИУ МГСУ, 2016

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Еремин А.В., Пустовгар А.П., Голотина А.А., Неведов С.В., Пашкевич С.А., Шейн А.Л.** Оптимизация состава и свойств гипсового вяжущего, полученного в варочном котле56
- Ерофеев В.Т., Ликомаскина М.А.** Оценка долговечности асфальтобетонов при испытаниях в климатических условиях с переменной влажностью, ультрафиолетовым облучением и агрессивной морской водой63

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Теличенко В.И., Курочкина В.А.** Методология оценки техногенного загрязнения водных объектов урбанизированных территорий80

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

- Уварова С.С., Канхва В.С., Рогачева Я.А.** Когнитивные технологии — императив устойчивого развития инновационной деятельности в строительстве90

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЛОГИСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

- Ланидус А.А., Фельдман А.О.** Информационное взаимодействие участников строительного проекта как дополнительный фактор оценки организационно-технологического потенциала101

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

- Канен М.Г.Ф., Масленников В.А.** Методика и алгоритм оптимизации потребности населенных пунктов в линиях технического осмотра автотранспортных средств107
- Юшков В.С., Кычкин В.И., Бармин Н.Д.** Реализация диагностики и ремонта мостовых сооружений118
- Авторам**126

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.1

А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина, Н.Л. Волгарева

ПНИПУ

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗА ОСАДКИ СВАИ НА АРГИЛЛИТОПОДОБНОЙ ГЛИНЕ ЧИСЛЕННЫМИ И АНАЛИТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрена проблема проектирования свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах. Выполнен расчет осадки одиночной забивной сваи численными методами, реализованными в программном комплексе Plaxis 2D, и аналитическим методом, согласно методике СП 24.13330.2011. Особое внимание уделено расчету осадки сваи с учетом зон уплотнения в околосвайном грунтовом пространстве. Расчетные значения сопоставлены с результатами натуральных экспериментов. Даны рекомендации по прогнозу осадки свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах.

Ключевые слова: осадка, забивная свая, аргиллитоподобная глина, статические испытания свай, аналитический метод, метод конечных элементов, численное моделирование

Развитие инфраструктуры городов, наличие социальных, транспортных, экологических и экономических проблем приводит к необходимости комплексного освоения подземного пространства и широкого применения фундаментов голубого заложения. Одной из актуальных проблем при активном освоении подземного пространства является прогноз осадки свай на основаниях, сложенных древними грунтовыми отложениями. Данные отложения могут быть представлены скальными грунтами — аргиллитами, песчаниками, алевролитами, а также их разновидностями, выветрелыми до состояния глин, супесей, песков, щебня. В качестве примера можно привести аргиллитоподобные глины пермского возраста Европейской части России [1], аргиллитоподобные глины позднепалеогенового возраста Южной части России [2], переуплотненные глины и песчаники Европы [3—6], Северной Америки и Канады [7, 8], Японии [9].

В данной работе рассмотрен вопрос работы свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах раннепермского возраста, залегающих на территории г. Перми. Согласно работам В.Т. Трофимова, аргиллит представляет собой полускальный грунт, образовавшийся в результате окаменения дисперсных глинистых грунтов при уплотнении, дегидратации и кристаллизации коллоидов [10]. В отличие от аргиллита аргиллитоподобная глина обладает значительной влагоемкостью и способностью размягчаться в воде, что может привести к неравномерным деформациям и снижению прочности основания [1, 11, 12].

Вопросами определения осадки и напряженно-деформированного состояния оснований свайных фундаментов в различные годы занимались А.А. Бартоломей [13], Н.М. Герсеванов, З.Г. Тер-Мартirosян [14], В.А. Барвашов,

Б.Ш. Далматов, В.Н. Голубков, А.Л. Готман, В.В. Лушников [15], Б.С. Юшков, А.Б. Пономарев, А.Б. Фадеев, В.Г. Федоровский, С.Б. Ухов и другие исследователи. Среди зарубежных ученых можно отметить работы А.С. Эзоуза и М.Дж. Моррисона [16], С. Бенсэлама [17], М.И. Фаттаха [18], К. Гэвина [19], Р. Катценбаха [20], Г.Г. Мейерхофа [21], М.Ф. Рэндольфа, Дж.П. Картера и К.П. Рота [22], М. Сузуки. А.А. Бартоломеем [13] было доказано, что в результате забивки свай в грунте вдоль боковой поверхности свай и в плоскости острия образуются зоны уплотнения с измененными значениями физико-механических характеристик грунтов. Основные результаты выполненных исследований нашли отражение в отечественных нормативных документах, однако наличие зон уплотнения с измененными физико-механическими свойствами грунта в околосвайном пространстве в настоящее время не учитывается при выполнении аналитического расчета, реализованного в СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты». Помимо аналитических методов для расчета осадки свайных фундаментов могут быть использованы численные методы, которые практически не имеют ограничений, связанных с выбором типа грунтового основания и схемы нагружения. Вместе с тем результаты численных расчетов в значительной мере зависят от грамотного выбора модели грунта и назначения ее параметров.

Ранее в работах А.Б. Пономарева и Е.Н. Сычкиной [1, 24] отмечалось, что для современных отложений вопрос назначения параметров и расчетной модели в программном комплексе Plaxis является хорошо изученным, но для аргиллитоподобных глин пермского возраста, обладающих анизотропной деформируемостью, данный вопрос остается открытым. Исходя из вышесказанного, очевидным становится тот факт, что современная практика проектирования свайных фундаментов требует комплексного сопоставления результатов аналитических и численных расчетов с натурными исследованиями работы свай для разработки технически правильного и экономически выгодного проекта возведения здания или сооружения.

Целью данной работы является разработка рекомендаций по применению аналитических и численных методов расчета для прогноза осадки одиночной свай, основанием которой является аргиллитоподобная глина. Для достижения поставленной цели в ходе исследования были решены *следующие задачи*:

- проанализированы данные полевых испытаний натуральных свай под статической нагрузкой на экспериментальной площадке г. Перми;
- определена осадка одиночной свай с применением численных методов в Plaxis 2D без учета и с учетом формирования зон уплотнения в околосвайном грунтовом пространстве согласно данным А.А. Бартоломея, выявлены расчетные модели, применимые для аргиллитоподобной глины;
- определена осадка одиночной свай аналитическим методом, реализованным в СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», без учета и с учетом формирования зон уплотнения в околосвайном грунтовом пространстве согласно данным А.А. Бартоломея;
- выполнена верификация результатов расчета численным и аналитическим методами путем сравнения с результатами натуральных испытаний свай;
- на основании полученных результатов разработаны рекомендации о применимости численных и аналитических методов для прогноза осадки одиночной свай на аргиллитоподобных глинах.

Описание экспериментальной площадки и методики испытаний натуральных свай. Рассматриваемая экспериментальная площадка расположена в пределах IV левобережной надпойменной террасы р. Камы в г. Перми. В геологическом строении площадки участвуют аргиллитоподобные глины, залегающие на глубинах более 5 м, перекрытые современными песчано-глинистыми отложениями (табл. 1). Подземные воды были встречены на глубинах от 16,4 до 23,3 м. Геологические условия площадки соответствуют типичному геологическому строению территории г. Перми.

На экспериментальной площадке были выполнены испытания четырех натуральных свай, которые подвергали статическим вдавливающим нагрузкам в соответствии с ГОСТ 5686—2012 «Грунты. Методы полевых испытаний грунтов сваями». Все испытанные натурные сваи — забивные железобетонные, сечением $0,3 \times 0,3$ м из бетона класса В25. Свая № 407 имеет длину 8 м, сваи № 592 и 403 — 10 м, свая № 587 — 5 м. Грунт под острием натуральных свай — аргиллитоподобные глины сильновыветрелые (с заглублением сваи в слой от 1,0 до 2,5 м). Максимальные нагрузки на сваи составляли 1,1 МН (свая № 407) и 1,2 МН (сваи №№ 592, 403, 587).

Методика численного расчета. Численный расчет осадки одиночной сваи выполнен методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis 2D. Расчеты производились по двум схемам: первая — без учета зон уплотнения грунта в околосвайном пространстве; вторая — с учетом формирования в околосвайном пространстве зон уплотнения грунта, согласно исследованиям А.А. Бартоломея. При расчетах по каждой из двух схем для моделирования аргиллитоподобной глины были использованы три модели: Mohr-Coulomb, Jointed Rock и Hardening Soil. Это было выполнено с целью выбора наиболее оптимальной модели работы сваи на аргиллитоподобной глине, реализованной в программном комплексе Plaxis.

Для моделирования системы «свая — грунтовое основание» использованы исходные данные, соответствующие условиям натуральных испытаний свай №№ 407, 592, 403, 587. При составлении расчетной схемы для слоев грунта, перекрывающих аргиллитоподобную глину, была применена изотропная упругопластическая модель Mohr-Coulomb. Краткое описание инженерно-геологических элементов и значения некоторых параметров модели Mohr-Coulomb приведены в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики инженерно-геологических элементов для модели Mohr-Coulomb

Описание инженерно-геологического элемента	Модуль Юнга E , кПа	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , °
Насыпной грунт	5 000	15	3
Суглинок полутвердый и мягкопластичный	11 800	31	21
Песок мелкий	28 000	0	32
Супесь твердая	10 000	30	10
Глина полутвердая	10 000	25	20
Аргиллитоподобная глина	50 000	30	26

Модель Mohr-Coulomb не учитывает ряд особенностей поведения грунта при упрочнении, однако позволяет быстро выполнить расчеты и получить первое представление о деформациях основания. Помимо модели Mohr-Coulomb для моделирования аргиллитоподобной глины были использованы усовершенствованные модели трещиноватой анизотропной скалы Jointed Rock и упрочняющегося грунта Hardening Soil.

Анизотропная упругопластическая модель трещиноватой скалы Jointed Rock учитывает изменение прочности грунта на растяжение в различных направлениях. Для моделирования анизотропной деформируемости аргиллитоподобной глины авторами были использованы различные модули жесткости в горизонтальном ($E_1 = 48\ 240$ кПа) и вертикальном ($E_2 = 24\ 000$ кПа) направлениях. Модель упрочняющегося грунта Hardening Soil учитывает зависимость модуля жесткости грунта от напряжений. В качестве параметров модели упрочняющегося грунта используется секущий модуль жесткости ($E_{50} = 28\ 600$ кПа), получаемый при испытании на дренированное трехосное сжатие, и касательный модуль жесткости ($E_{\text{oed}} = 50\ 390$ кПа), рассчитанный при первичном одометрическом нагружении грунта. Значения параметров аргиллитоподобной глины приняты по результатам исследований, выполненных ранее Е.Н. Сычкиной и А.Б. Пономаревым [1, 24].

Для моделирования работы сваи применялась линейная упругая модель Linear Elastic с жесткостными параметрами, принятыми по СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». При моделировании в Plaxis нагрузка на сваю передавалась ступенями, аналогичными по величине ступеням при натурных испытаниях исследуемых свай.

Расчет численными методами в Plaxis с использованием описанных выше моделей грунта был выполнен по двум схемам — без учета зон уплотнения вокруг сваи и с учетом уплотненных зон по данным А.А. Бартоломея. В качестве примера на рис. 1 приведена расчетная схема с зонами уплотнения для сваи № 407.

На рис. 1 в околосвайном грунтовом пространстве выделены три зоны уплотнения грунтов, описанных А.А. Бартоломеем [13]:

- первая зона расположена в околосвайном пространстве с радиусом $3d$ (d — длина стороны сваи) и имеет объемную массу скелета грунта на 12 % выше природной, удельное сцепление грунта близкое к природному, модуль деформации грунта увеличен на 283 % по сравнению с природным;
- вторая зона выделена в околосвайном пространстве

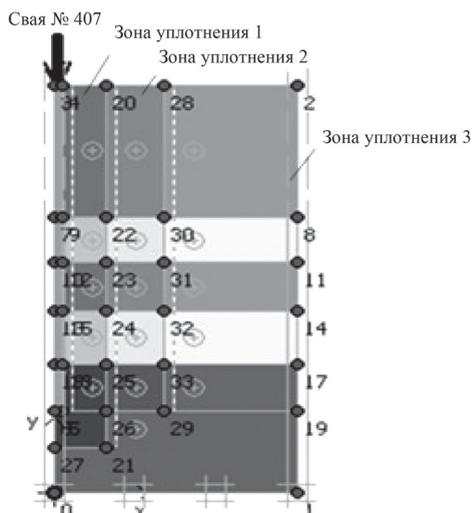


Рис. 1. Расчетная схема сваи № 407 при моделировании в Plaxis 2D с учетом зон уплотнения, описанных А.А. Бартоломеем

с радиусом от $3d$ до $7d$ и имеет объемную массу скелета грунта на 7 % выше природной, удельное сцепление близкое к природному;

- третья зона не имеет четкой границы и не оказывает влияния на несущую способность свайного фундамента.

Методика аналитического расчета. Одновременно с моделированием в Plaxis для свай №№ 407, 592, 403, 587 был произведен аналитический расчет осадки по методу, приведенному в СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», п.п. 7.4.2. — п.п. 7.4.3. Расчет также выполнялся для двух случаев: для грунтового основания в природном состоянии, т.е. без учета зон уплотнения в околосвайном пространстве, и с учетом зон уплотнения, формирующихся в околосвайном пространстве, согласно данным А.А. Бартоломея. С целью верификации значения осадки свай, полученные в результате численного моделирования и аналитического расчета по методу СП 24.13330.2011, были сопоставлены с величинами осадки натуральных свай. На основании результатов сравнения были сформулированы рекомендации по использованию численных и аналитических методов для расчета осадки одиночной свай, а также указана необходимость учета зон уплотнения вдоль поверхности забивных свай при расчете.

Полученные результаты. Значения осадки натуральных свай №№ 407, 592, 403, 587 изменялись в пределах 2,17...3,37 мм. Расчет численными методами, реализованными в Plaxis 2D, с применением для аргиллитоподобной глины моделей Mohr-Coulomb, Jointed Rock и Hardening Soil без учета зон уплотнения в околосвайном пространстве показал завышенные значения осадки свай по сравнению с результатами натуральных испытаний. Наибольшее различие между расчетными и экспериментальными данными было получено при использовании модели анизотропной скалы Jointed Rock: при нагрузке 1,1 МН расчетная осадка в 2,6...18,8 раза превысила экспериментальную. Наименьшие значения осадки, определенные численными методами без учета зон уплотнения, были получены при использовании модели Hardening Soil: при нагрузке 1,1 МН расчетная осадка превысила экспериментальную в 2,4...8,6 раза. При использовании модели Mohr-Coulomb для свай №№ 592 и 403 превышение расчетной осадки над экспериментальной при нагрузке 1,1 МН изменялось в пределах 2,3...4,0 раза. Для более коротких свай №№ 407 и 587 расчет с применением модели Mohr-Coulomb был выполнен до нагрузки 0,8 МН, поскольку большие значения превышали несущую способность свай. Следует также отметить, что величина расчетной осадки для коротких свай №№ 407 и 587 имела большие превышения над величиной натурной осадки, чем для более длинных свай №№ 592 и 403, вне зависимости от используемой модели грунта в программе Plaxis.

Расчет аналитическим методом, реализованным в СП 24.13330.2011, без учета зон уплотнения в околосвайном грунтовом пространстве также показал завышенные значения осадки: при нагрузке 1,1 МН расчетная осадка превысила экспериментальную в 2,9...4,7 раза.

Учет зон уплотнения, образующихся в околосвайном пространстве, при расчете как численным, так и аналитическим методом, позволил получить значения осадки свай, достаточно близкие натурным. Графики осадки свай,

построенные по результатам использования численного и аналитического методов с учетом зон уплотнения в околосвайном пространстве, представлены на рис. 2. Также для сравнения на рис. 2 показаны графики осадки свай, рассчитанные по методу СП 24.13330.2011 без учета зон уплотнения грунта.

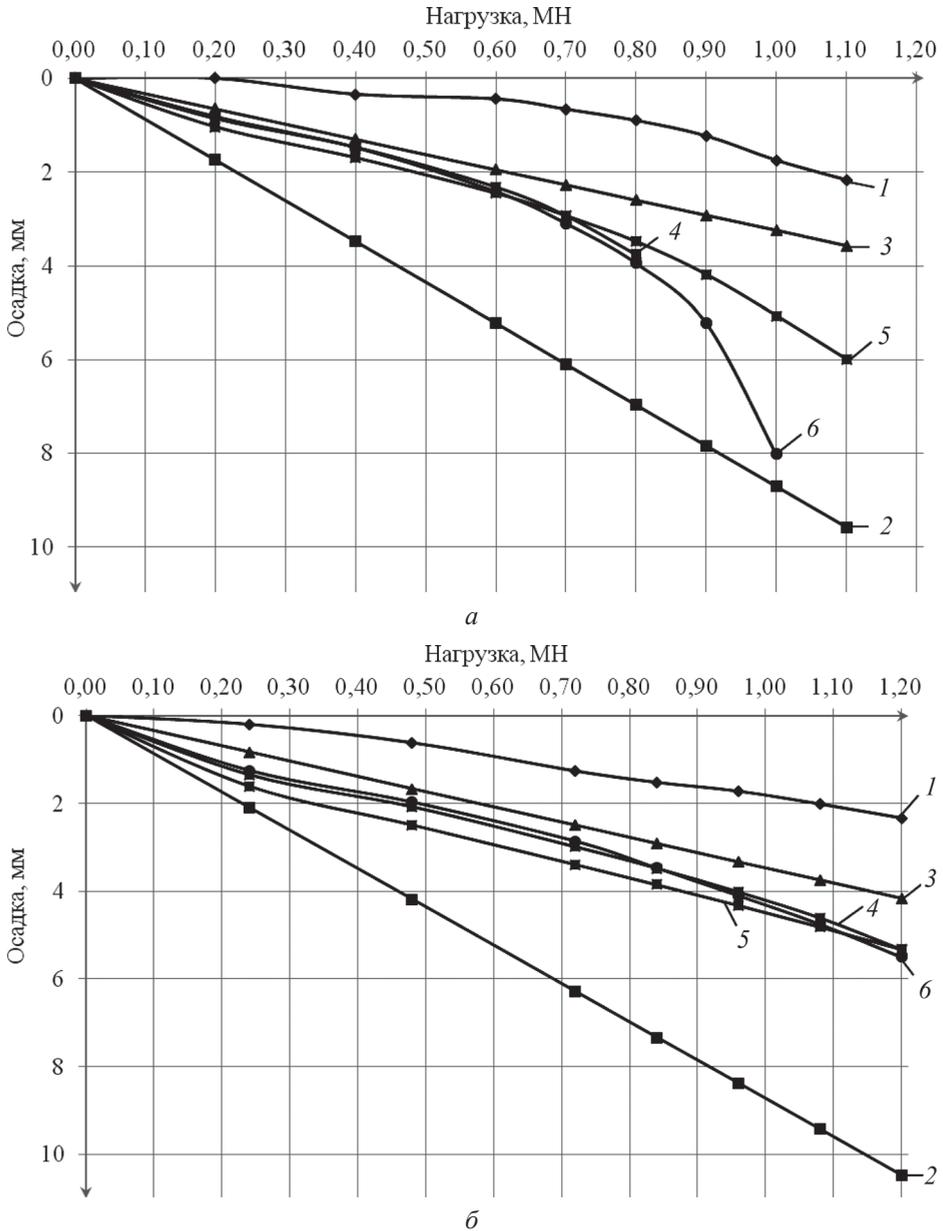


Рис. 2. (начало) Графики зависимости осадки свай №№ 407 (а), 592 (б): 1 — натурная свая; 2, 3 — расчет по методу СП 24.13330.2011 без учета зон уплотнения и с учетом зон уплотнения по А.А. Бартоломею; 4, 5, 6 — расчет в программе Plaxis с учетом зон уплотнения для моделей Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Jointed Rock

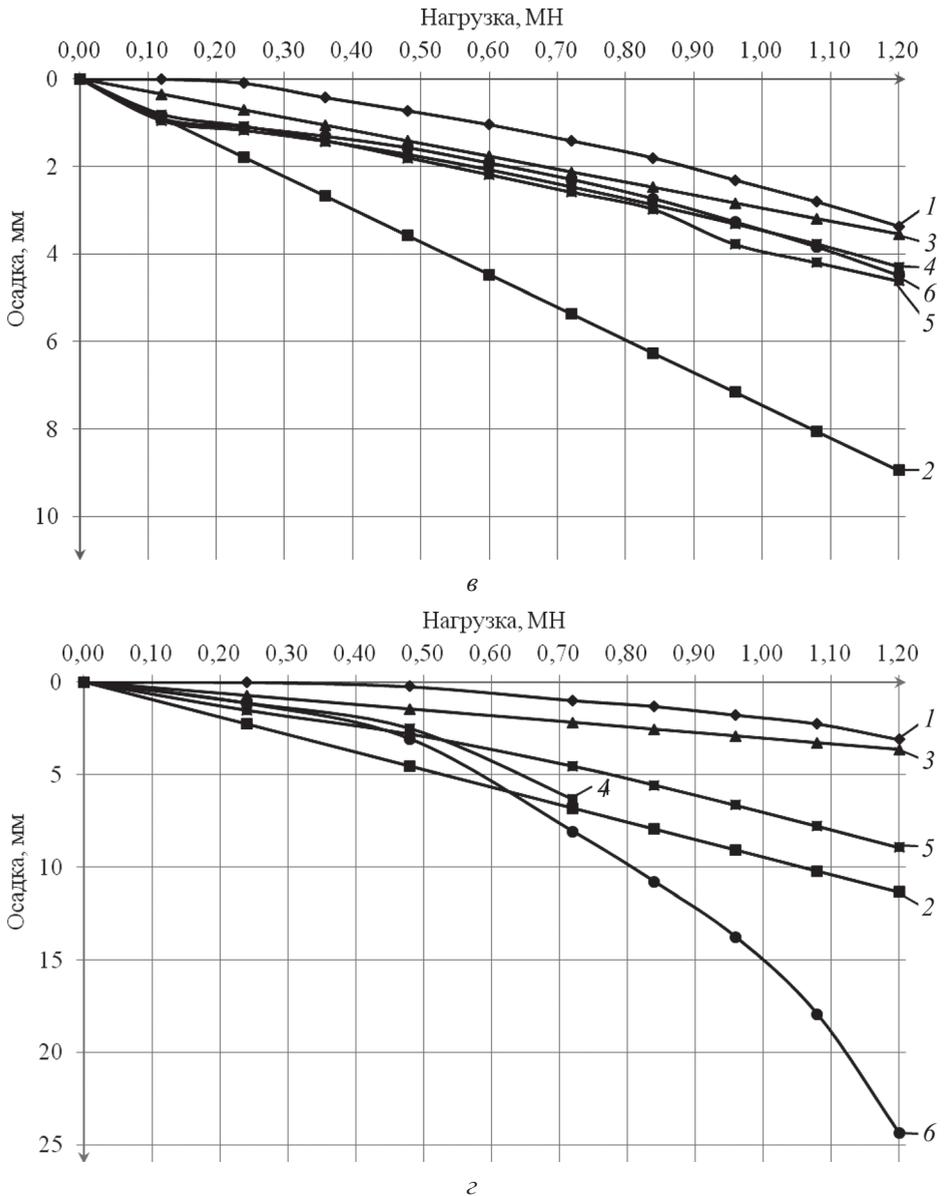


Рис. 2. (окончание) Графики зависимости осадки свай №№ 403 (а), 587 (z): 1 — натурная свая; 2, 3 — расчет по методу СП 24.13330.2011 без учета зон уплотнения и с учетом зон уплотнения по А.А. Бартоломео; 4, 5, 6 — расчет в программе Plaxis с учетом зон уплотнения для моделей Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Jointed Rock

Изучение графиков показывает, что величина и характер осадки свай, рассчитанной аналитическим методом согласно СП 24.13330.2011 с учетом зон уплотнения, оказались наиболее близкими к результатам натурных испытаний: при нагрузке на сваю 1,1 МН расчетная осадка превышала натурную в 1,1...1,9 раз. Таким образом, учет изменения значений физико-механических характеристик грунта в околосвайном пространстве при расчете осадки свай на аргиллитоподобной глине по методу СП 24.13330.2011 приводит к снижению величины осадки приблизительно в 2,5 раза.

Осадка сваи, рассчитанная численными методами в Plaxis с учетом зон уплотнения в околосвайном пространстве, превышала значения осадки, полученные аналитическим методом согласно СП 24.13330.2011 с учетом зон уплотнения. Для более длинных свай №№ 592 и 403 результаты расчета с применением моделей Mohr-Coulomb, Jointed Rock и Hardening Soil оказались близкими между собой и при нагрузке 1,1 МН превышали значения натурной осадки в 1,3...2,4 раза. Для более коротких свай №№ 407 и 587 расчет с применением модели Hardening Soil показал наиболее близкие к натурным значения осадки: при нагрузке 1,1 МН превышение осадки составляло 2,8...3,5 раза. Расчет осадки с применением модели Mohr-Coulomb для свай №№ 407 и 587 был выполнен до нагрузок 0,7...0,8 МН, поскольку при больших нагрузках была превышена несущая способность свай. Наибольшее различие между расчетными и экспериментальными данными было получено при использовании модели анизотропной скалы Jointed Rock: при нагрузке 1,1 МН превышение расчетной осадки экспериментальной достигало 8 раз.

Выводы и рекомендации:

- расчет осадки одиночной сваи на аргиллитоподобной глине численными методами, реализованными в Plaxis 2D, и аналитическим методом, описанным в СП 24.13330.2011, без учета зон уплотнения и изменения значений характеристик грунтов в околосвайном пространстве показал завышенные значения осадки свай по отношению к результатам натурных испытаний. Для численного расчета при нагрузке на сваю 1,1 МН это различие в зависимости от применяемой для аргиллитоподобной глины модели составило от 2,4 до 18,8 раз. Для аналитического расчета это различие изменялось в пределах 2,9...4,7 раз;

- учет зон уплотнения, образующихся в околосвайном пространстве, при расчете как численным, так и аналитическим методом, позволил получить достаточно близкие натурным значения осадки свай. Величина и характер осадки сваи, рассчитанные аналитическим методом согласно СП 24.13330.2011 с учетом зон уплотнения, оказались наиболее близкими к результатам натурных испытаний свай: при нагрузке на сваю 1,1 МН расчетная осадка превышала натурную в 1,1...1,9 раз. Осадка сваи, рассчитанная численными методами в Plaxis с учетом зон уплотнения в околосвайном пространстве, превышала значения осадки, полученные аналитическим методом согласно СП 24.13330.2011 с учетом зон уплотнения. Для численного расчета при нагрузке на сваю 1,1 МН это различие в зависимости от применяемой для аргиллитоподобной глины модели составило от 1,3 до 8 раз;

- опираясь на полученные результаты, для прогноза осадки одиночной сваи на аргиллитоподобной глине авторы рекомендуют использовать аналитический метод, реализованный в СП 24.13330.2011, учитывая при расчете изменение значений характеристик грунтов в околосвайном пространстве, согласно исследованиям А.А. Бартоломея. Для прогноза осадки одиночной сваи на аргиллитоподобной глине численными методами в Plaxis 2D авторы рекомендуют использовать для аргиллитоподобной глины модель Hardening Soil, показавшую наиболее близкие значения осадки к результатам расчета по методу СП 24.13330.2011, учитывая при расчете изменение значений характеристик грунтов в околосвайном пространстве, согласно данным А.А. Бартоломея.

Полученные выводы справедливы для одной экспериментальной площадки г. Перми, поэтому для повышения достоверности расчетов осадки свайных фундаментов необходимо продолжить комплексные исследования работы фундаментов глубокого заложения и на других экспериментальных площадках.

Библиографический список

1. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Прогноз осадки свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах (на примере Пермского региона) // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. № 3. С. 20—24.
2. Хмелевцов А.А. Аргиллитоподобные глины в районе Большого Сочи и их физико-механические характеристики // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2011. № 5. С. 77—79.
3. Bond A.J., Jardine R.J. Effects of installing displacement piles in high OCR clay // Geotechnique. 1991. No. 41. Pp. 341—363.
4. Cooke R.W., Price G., Tarr K. Jacked piles in London Clay: a study of load transfer and settlement under working conditions // Geotechnique. 1979. No. 29. Pp. 113—147.
5. Salager S., Francois B., Nuth M., Laloui L. Constitutive analysis of the mechanical anisotropy of Opalinus Clay // Acta Geotechnica. 2013. Vol. 8. Issue 2. Pp. 137—154.
6. Nishimura S., Minh N. A., Jardine R. J. Shear strength anisotropy of natural London clay // Geotechnique. 2007. No. 57 (1). Pp. 49—62.
7. De Ruiter J., Beringen F.L. Pile foundations for large North Sea structures // Marine Geotechnology. 1979. No. 3. Pp. 267—314.
8. Lehane B.M., Jardine R.J. Displacement pile behaviour in glacial clay // Canadian Geotechnical Journal. 1994. No. 31. Pp. 79—90.
9. Matsumoto T., Michi Y., Hirano T. Performance of Axially loaded steel pipe piles driven in soft rock // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 1995. No. 121 (4). Pp. 305—315.
10. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Зиангиров П.С. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 2005. 1023 с.
11. Zhang C.L., Wiczeorek K., Xie M.L. Swelling experiments on mudstones // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2010. No. 2 (1). Pp. 44—51.
12. Zhang F., Xie S.Y., Hu D.W., Shao J.F., Gatmiri B. Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone // Applied Clay Science. 2012. No. 69. Pp. 79—86.
13. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов / под ред. А.А. Бартоломея. М. : Стройиздат, 1994. 380 с.
14. Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Чинь Туан Вьет, Лузин И.Н. Осадка и несущая способность длинной сваи // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 52—60.
15. Лушников В.В., Ярдяков А.С. Анализ расчетов осадок в нелинейной стадии работы грунта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 44—55.
16. Azzouz A.S., Morrison M.J. Field measurements on model pile in two clay deposits // Journal of Geotechnical Engineering. 1988. No. 114. Pp. 104—121.
17. Bensallam S., Bahi L., Ejjaaouani H., Shakhirev V., Rkha Chaham K. Clay soil settlement: In-situ experimentation and analytical approach // Soils and Foundations. 2014. No. 54. Pp. 109—115.
18. Fattah M.Y., Shlash K.T., Al-Soud Madhat S.M. Pile-clayey soil interaction analysis by boundary element method // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2012. No. 4 (1). Pp. 28—43.

19. *Gavin K., Gallagher D., Doherty P., McCabe B.* Field investigation assessing the effect of installation method on the shaft resistance of piles in clay // *Canadian Geotechnical Journal*. 2010. No. 47 (7). Pp. 730—741.
20. *Катценбах Р.* Последние достижения в области фундаментостроения высотных зданий на сжимаемом оснований // *Вестник МГСУ*. 2006. № 1. С. 105—118.
21. *Meyerhof G.G.* Bearing capacity and settlement of pile foundations // *Journal of Geotechnical Engineering*. 1976. Vol. 102. No. 3. Pp. 195—228.
22. *Randolph M.F., Carter J.P., Wroth C.P.* Driven piles in clay — the effects of installation and subsequent consolidation // *Geotechnique*. 1979. No. 29. Pp. 361—393.
23. *Suzuki M., Fujimoto T., Taguchi T.* Peak and residual strength characteristics of cement-treated soil cured under different consolidation conditions // *Soils and Foundations*. 2014. No. 54 (4). Pp. 687—698.
24. *Ponomaryov A., Sychkina E.* Analysis of strain anisotropy and hygroscopic property of clay and claystone // *Applied Clay Science*. 2015. Vol. 114. Pp. 61—169.

Поступила в редакцию в марте 2016 г.

Об авторах: **Пономарев Андрей Будимирович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства и геотехники, **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, 8 (342) 219-83-74, spstf@pstu.ru;

Сычкина Евгения Николаевна — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, 8 (342) 219-83-77, aspirant123@mail.ru;

Волгарева Надежда Леонидовна — магистрант кафедры строительного производства и геотехники, **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, 8 (342) 219-83-77, nad900@mail.ru.

Для цитирования: *Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н., Волгарева Н.Л.* К вопросу прогноза осадки сваи на аргиллитоподобной глине численными и аналитическими методами // *Вестник МГСУ*. 2016. № 6. С. 34—45.

A.B. Ponomarev, E.N. Sychkina, N.L. Volgareva

FORECASTING PILE SETTLEMENT ON CLAYSTONE USING NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS

In the article the problem of designing pile foundations on claystones is reviewed. The purpose of this paper is comparative analysis of the analytical and numerical methods for forecasting the settlement of piles on claystones. The following tasks were solved during the study: 1) The existing researches of pile settlement are analyzed; 2) The characteristics of experimental studies and the parameters for numerical modeling are presented, methods of field research of single piles' operation are described; 3) Calculation of single pile settlement is performed using numerical methods in the software package Plaxis 2D and analytical method according to the requirements SP 24.13330.2011; 4) Experimental data is compared with the results of analytical and numerical calculations; 5) Basing on these results recommendations for forecasting pile settlement on claystone are presented. Much attention is paid to the calculation of pile settlement considering the impacted areas in ground space beside pile and the comparison with the results of field experiments. Basing on the obtained results, for the prediction of settlement of single pile on claystone the authors recommend using the analytical method considered in SP

24.13330.2011 with account for the impacted areas in ground space beside driven pile. In the case of forecasting the settlement of single pile on claystone by numerical methods in Plaxis 2D the authors recommend using the Hardening Soil model considering the impacted areas in ground space beside the driven pile. The analyses of the results and calculations are presented for examination and verification; therefore it is necessary to continue the research work of deep foundation at another experimental sites to improve the reliability of the calculation of pile foundation settlement. The work is of great interest for geotechnical engineers engaged in research, design and construction of pile foundations.

Key words: settlement, driven pile, claystone, static pile tests, analytical method, finite element method, numerical modeling

References

1. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Prognoz osadki svaynykh fundamentov na argillitopodobnykh glinakh (na primere Permskogo regiona) [Forecast of Pile Foundations Settlement at Claystones (on the Example of the Perm Region)]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Bases, Foundations and Soil Mechanics]. 2014, no. 3, pp. 20—24. (In Russian)
2. Khmelevtsov A.A. Argillitopodobnye gliny v rayone Bol'shogo Sochi i ikh fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki [Claystones in the Bolshoy Sochi and Their Physical and Mechanical Properties]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Proceedings of the Higher Educational Institutions. North-Caucasian Region. Natural Sciences]. 2011, no. 5, pp. 77—79. (In Russian)
3. Bond A.J., Jardine R.J. Effects of Installing Displacement Piles in High OCR Clay. *Geotechnique*. 1991, no. 41 (3), pp. 341—363. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1991.41.3.341>.
4. Cooke R.W., Price G., Tarr K. Jacked Piles in London Clay: A Study of Load Transfer and Settlement Under Working Conditions. *Geotechnique*. 1979, vol. 29, no. 2, pp. 113—147. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1979.29.2.113>.
5. Salager S., Francois B., Nuth M., Laloui L. Constitutive Analysis of the Mechanical Anisotropy of Opalinus Clay. *Acta Geotechnica*. 2013, vol. 8, no. 2, pp. 137—154. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-012-0187-2>.
6. Nishimura S., Minh N.A., Jardine R.J. Shear Strength Anisotropy of Natural London Clay. *Geotechnique*. 2007, no. 57 (1), pp. 49—62. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2007.57.1.49>.
7. De Ruiter J., Beringen F.L. Pile Foundations for Large North Sea Structures. *Marine Geotechnology*. 1979, vol. 3, no. 3, pp. 267—314. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10641197909379805>.
8. Lehane B.M., Jardine R.J. Displacement Pile Behaviour in Glacial Clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 1994, no. 31 (1), pp. 79—90. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/t94-009>.
9. Matsumoto T., Michi Y., Hirano T. Performance of Axially Loaded Steel Pipe Piles Driven in Soft Rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1995, no. 121 (4), pp. 305—315. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:4\(305\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:4(305)).
10. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskiy E.A., Ziangirov R.S. *Gruntovedenie* [Soil Science]. 6-th edition, revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 2005, 1023 p. (In Russian)
11. Zhang C.L., Wiczorek K., Xie M.L. Swelling Experiments on Mudstones. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2010, no. 2 (1), pp. 44—51. DOI: <http://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1235.2010.00044>.
12. Zhang F., Xie S.Y., Hu D.W., Shao J.F., Gatmiri B. Effect of Water Content and Structural Anisotropy on Mechanical Property of Claystone. *Applied Clay Science*. 2012, no. 69, pp. 79—86. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.024>.
13. Bartolomey A.A., Omel'chak I.M., Yushkov B.S. *Prognoz osadok svaynykh fundamentov* [Forecast of Pile Foundation Settlement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994, 380 p. (In Russian)
14. Ter-Martirosyan A.Z., Ter-Martirosyan Z.G., Trinh Tuan Viet, Luzin I.N. Osadka i nesushchaya sposobnost' dlinnoy svai [Settlement and Bearing Capacity of Long Pile]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 5, pp. 52—60. (In Russian)

15. Lushnikov V.V., Yaryakov A.S. Analiz raschetov osadok v nelineynoy stadii raboty grunta [Analysis of Settlement Calculation in Nonlinear Stage of Soil Operation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Proceedings of PNRPU. Construction and Architecture]. 2014, no. 2, pp. 44—55. (In Russian)
16. Azzouz A.S., Morrison M.J. Field Measurements on Model Pile in Two Clay Deposits. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1988, vol. 114, no. 1, pp. 104—121. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:1\(104\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:1(104)).
17. Bensallam S., Bahi L., Ejjaaouani H., Shakhirev V., Rkha Chaham K. Clay Soil Settlement: In-Situ Experimentation and Analytical Approach. *Soils and Foundations*. 2014, vol. 54, no. 2, pp. 109—115. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2014.02.003>.
18. Fattah M.Y., Shlash K.T., Al-Soud Madhat S.M. Pile-Clayey Soil Interaction Analysis by Boundary Element Method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012, no. 4 (1), pp. 28—43. DOI: <http://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00028>.
19. Gavin K., Gallagher D., Doherty P., McCabe B. Field Investigation Assessing the Effect of Installation Method on the Shaft Resistance of Piles in Clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 2010, no. 47 (7), pp. 730—741. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/T09-146>.
20. Kattsenbakh R. Poslednie dostizheniya v oblasti fundamentostroeniya vysotnykh zdaniy na szhimaemom osnovanii [Recent Advances in the Field of Construction of High-Rise Buildings Foundations on Compressible Grounds]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2006, no. 1, pp. 105—118. (In Russian)
21. Meyerhof G.G. Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1976, vol. 102, no. 3, pp. 195—228.
22. Randolph M.F., Carter J.P., Wroth C.P. Driven Piles in Clay — The Effects of Installation and Subsequent Consolidation. *Geotechnique*. 1979, no. 29 (4), pp. 361—393. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.361>.
23. Suzuki M., Fujimoto T., Taguchi T. Peak and Residual Strength Characteristics of Cement-Treated Soil Cured Under Different Consolidation Conditions. *Soils and Foundations*. 2014, no. 54 (4), pp. 687—698. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2014.06.023>.
24. Ponomaryov A., Sychkina E. Analysis of Strain Anisotropy and Hygroscopic Property of Clay and Claystone. *Applied Clay Science*. 2015, vol. 114, pp. 161—169. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.023>.

About the authors: **Ponomarev Andrey Budimirovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, chair, Department of Construction Operations and Geotechnology, **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**, 29 Komsomol'skiy prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; +7 (342) 219-83-74, spstf@pstu.ru;

Sychkina Evgeniya Nikolaevna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Operations and Geotechnology, **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**, 29 Komsomol'skiy prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; +7 (342) 219-83-74, aspirant123@mail.ru;

Volgareva Nadezhda Leonidovna — Master student, Department of Construction Operations and Geotechnology, **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**, 29 Komsomol'skiy prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; +7 (342) 219-83-74, nad900@mail.ru.

For citation: Ponomarev A.B., Sychkina E.N., Volgareva N.L. K voprosu prognoza osadki svai na argillitopodobnoy gline chislennymi i analiticheskimi metodami [Forecasting Pile Settlement on Claystone Using Numerical and Analytical Methods]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 6, pp. 34—45. (In Russian)