

*На правах рукописи*



**САЕНКО ЮРИЙ ВИКТОРОВИЧ**

**ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ  
В ФУНДАМЕНТАХ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗДАНИЙ**

Специальность 05.23.02 – Основания и фундаменты,  
подземные сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Волгоград - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Невзоров Александр Леонидович**

**Официальные оппоненты:** **Полищук Анатолий Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Основания и  
фундаменты» федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Кубанский  
государственный аграрный университет имени  
И.Т. Трубилина»

**Степанов Максим Андреевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Геотехника» федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Тюменский  
индустриальный университет»

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-строительный  
университет»

Защита состоится «29» ноября 2018 г. в 13–00 часов на заседании  
объединенного диссертационного совета Д 999.194.02 при ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный технический университет» по адресу:  
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, к. Б-203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского  
государственного технического университета и на официальном сайте по ссылке  
<http://www.vstu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchitakh/>

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

Акчурин Талгат Кадимович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Работам по реконструкции зданий, возведенных на свайных фундаментах, и связанным с увеличением на них нагрузки, должна предшествовать оценка несущей способности свай. В отличие от фундаментов мелкого заложения, для которых существуют рекомендации по определению расчетного сопротивления грунта в основании эксплуатируемых зданий, для свайных фундаментов, несмотря на наличие многочисленных исследований, подобные нормативные документы отсутствуют.

Несущую способность свай определяют, как правило, путем статического нагружения, для чего верхнюю часть исследуемых свай поочередно срезают и между ними и ростверком устанавливают домкрат. При этом существует ряд факторов, осложняющих проведение испытаний: высокий уровень грунтовых вод, отсутствие доступа к свае или обеспечение устойчивости фундамента, например, при срезке одной из трех свай в кусте и т.п.

Поэтому исследования, связанные с численным моделированием свай в фундаментах существующих зданий и определением резерва их несущей способности, как обеспечивающие повышение надежности зданий и сооружений при реконструкции, являются актуальными.

### **Степень разработанности темы исследований.**

В действующих нормативных документах отсутствует методика оценки несущей способности свай в фундаментах существующих зданий. Предлагаемые в настоящее время аналитические и численные решения, в которых учитывается изменение напряженно-деформированного состояния основания при погружении сваи и эксплуатации здания, прошли апробацию на небольшом количестве объектов и часто дают значения несущей способности, отличающиеся от данных натурных наблюдений.

Отечественные и зарубежные исследователи полагают, что увеличение несущей способности свай в глинистых грунтах может продолжаться в течение нескольких десятилетий. Основными факторами этого явления служат:

- рост эффективных напряжений во вмещающем сваю грунте по мере рассеивания избыточного порового давления и, как следствие, увеличение сопротивления на боковой поверхности и под нижним концом сваи;
- увеличение прочностных и деформационных свойств околосвайного грунта по мере усиления структурных связей между глинистыми частицами;
- увеличение эффективного радиуса сваи за счет вовлекаемого в работу околосвайного грунта.

**Цель исследований** – определение несущей способности забивных свай в фундаментах существующих зданий путем численного моделирования напряженно-деформированного состояния основания.

**Задачи исследования:**

1. Обобщить и систематизировать результаты исследований по оценке напряженно–деформированного состояния и свойств грунтов основания фундаментов существующих зданий с забивными сваями.

2. Выполнить лабораторные исследования ледниковых и морских суглинков, используемых в качестве основания свайных фундаментов в г.Архангельске, выявить корреляционные зависимости их модуля деформации от коэффициента пористости и показателя текучести.

3. Выполнить испытания статической нагрузкой забивных свай в фундаментах существующих зданий.

4. Создать и верифицировать алгоритм численного моделирования статических испытаний свай в составе фундаментов существующих зданий.

5. Усовершенствовать методику испытания свай в фундаментах существующих зданий и выполнить ее апробацию на объектах реконструкции.

**Объект исследования** – забивные железобетонные призматические сваи в составе фундаментов существующих зданий.

**Предмет исследований** – несущая способность забивных железобетонных свай, погруженных в ледниковые и морские отложения и длительное время находящихся под нагрузкой.

**Научная новизна исследований:**

1. Получены корреляционные зависимости одометрического модуля деформации ледниковых и морских суглинков в интервалах напряжений от 100 до 600 кПа от коэффициента пористости и показателя текучести.

2. Разработан алгоритм численного моделирования статических испытаний свай в ПК PLAXIS 3D, позволяющий получить графики «нагрузка–осадка» близкие к экспериментальным зависимостям, где исходными данными, кроме свойств грунтов основания, размеров свай и расстояния между ними, служат значение и продолжительность действия на них нагрузки.

3. Предложены способы испытаний свай в составе существующего фундамента, позволяющие минимизировать влияние смежных свай и фактора разгрузки сваи при проведении испытаний.

**Практическая значимость работы:**

Предложенный алгоритм численного моделирования статических испытаний позволяет существенно увеличить точность и достоверность расчетов несущей способности свай для любого периода времени, и тем самым повысить надежность реконструируемых сооружений. Результаты могут быть применены в ходе предпроектных работ по реконструкции зданий и сооружений.

Способы определения несущей способности свай в фундаментах зданий путем статических испытаний без снятия с них действующей нагрузки (патент РФ № 2557277, от 20.07.2015 г.) и с учетом влияния соседних свай (патент РФ № 2583806, от 10.05.2016 г.) могут быть использованы при проведении обследования перед реконструкцией.

**Методология и методы исследований:**

1. Изучение представленных в научной и нормативной литературе данных по оценке возможности увеличения нагрузки на сваи в условиях реконструкции зданий и сооружений.
2. Обобщение и анализ данных предшествующих и собственных экспериментальных исследований характеристик грунтов основания свайных фундаментов, испытаний свай статической нагрузкой, численного моделирования работы забивных железобетонных свай в инженерно–геологических условиях г.Архангельска.
3. Сопоставление результатов численного моделирования, с данными полевых исследований, как собственных, так и других авторов. Апробация результатов исследований автора по передаче дополнительной нагрузки на сваи реконструируемых зданий.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально выявленные значения физико–механических свойств грунтов основания свайных фундаментов в г.Архангельске, включая одометрический модуль деформации для широкого спектра напряжений.
2. Методика и результаты численного моделирования графиков «нагрузка–осадка» для забивных свай после «отдыха».
3. Методика и результаты прогноза резерва несущей способности забивных свай в фундаментах существующих зданий в г.Архангельске в любой период времени их эксплуатации.
4. Способы испытаний свай в составе фундаментов существующих зданий, позволяющие минимизировать влияние фактора разгрузки сваи при ее отделении от ростверка и учитывающие расположение смежных свай.

**Область исследований** соответствует паспорту специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункт 7 – «Разработка новых методов расчёта, конструирования и устройства оснований, фундаментов и подземных сооружений при реконструкции, усилении и ликвидации аварийных ситуаций».

**Степень достоверности результатов.** Достоверность приводимых в диссертации научных положений и выводов доказана сопоставлением результатов теоретических исследований с результатами натурных экспериментов. Надежность экспериментальных исследований достигнута применением современных поверенных приборов и оборудования, а также проведением полевых испытаний, в объеме достаточном для статистической обработки результатов.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждались на Всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства» (ПНИПУ, г.Пермь, 2014 г.); 71–й научно–технической конференции «Изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация оснований фундаментов зданий и

сооружений» (СПбГАСУ, г.Санкт–Петербург, 2015 г.); научной конференции профессорско–преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов «Развитие Северо–Арктического региона: проблемы и решения» (САФУ, г.Архангельск, 2015 г.); 19–й Международной межвузовской научно–практической конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (НИУ МГСУ, г.Москва 2016); Всероссийской научной–технической конференции по геотехнике (СПбГАСУ, г.Санкт–Петербург, 2017 г.); 19 международной конференции по механике грунтов и геотехнике (Сеул, Южная Корея 2017); и на межкафедральных семинарах САФУ (г.Архангельск, 2013–2018 гг.).

Результаты исследований были использованы: ЗАО «Строительн–монтажный трест №5» при реконструкции здания по адресу ул. Чумбарова – Лучинского 34 в г.Архангельске и ГАУ АО «Инвестсельстрой» при разработке проектной документации по реконструкции здания по адресу ул. Суворова 17, корп.2 в г.Архангельске. Разработанные проекты получили положительное решение государственной экспертизы и были реализованы.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, включая 4 публикаций в журналах из перечня ВАК и две в изданиях, входящих в базу SCOPUS, получено три патента РФ на изобретения.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 127 страниц, включая 50 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 166 наименования.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам кафедры «Инженерной геологии, оснований и фундаментов» САФУ имени М.В. Ломоносова (г.Архангельск) за помощь при проведении испытаний, советы, замечания и рекомендации по диссертационной работе.

Особая благодарность – главному инженеру АО «АрхангельскТИСИЗ» И.В. Богданову за предоставленные материалы по статическим испытаниям свай, выполненным в ходе инженерно–геологических изысканий в 70–80–х годах в г.Архангельске.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертации, определяется цель, формулируются научная новизна и практическая значимость, основные защищаемые положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации, структуре и объёме диссертации.

**В первой главе** дан обзор экспериментальных и теоретических исследований работы системы «забивная свая–грунт». Приведены данные по изменению напряженно–деформированного состояния околосвайного грунта во время погружения, «отдыха» и испытаний свай статической вдавливающей нагрузкой. Выполнен анализ изменения несущей способности ненагруженных и нагруженных свай в период «отдыха» и при эксплуатации

зданий, соответственно. Рассмотрены способы численного моделирования статических испытаний свай в программно–вычислительных комплексах, в том числе с учетом наличия и размеров зон деформирования околосвайного грунта.

В процессе погружения сваи происходит изменение напряжённо–деформированного состояния и, как следствие, физических и деформационно–прочностных свойств вмещающего их грунта. Изучению этих явлений посвящены работы Б.В. Бахолдина, А.А. Бартоломея, В.Н. Бронина, Н.М. Герсевича, В.Н. Голубкова, Б.И. Далматова, Н.М. Дорошкевича, А.Ж. Жусупбекова, Ф.К. Лапшина, А.А. Луги, Н.С. Несмелова, А.И. Полищука, Ю.Г. Трофименкова, Х.Р. Хакимова, А.Б. Фадеева, В.Г. Федорова, В.Г. Федоровского, L. Bjerrum, Н.М. Coyle, C. Reese, G. Koning, L. Koizumi, K. Ito, H.B. Seed, K. Terzaghi, V. Teheng, E. Franke, A. Vesic, T. Whitaker и др.

Несмотря на некоторые отличия в анализе физических процессов во вмещающем сваю грунте, в многочисленных публикациях названных ученых имеется ряд общепризнанных положений. В частности, о том, что радиус области деформирования грунта в горизонтальном направлении достигает  $(6...7)d$ , а под острием уплотненные зоны распространяются до глубины  $(3...3,5)d$ , где  $d$  – размер поперечного сечения сваи. Отличия в экспериментальных значениях изменения характеристик грунтов в указанных областях, выявленные различными исследователями, объясняются разнообразием грунтовых условий, отличиями в форме и размерах свай.

Изучением механизма увеличения несущей способности свай в глинистых грунтах в процессе непродолжительного «отдыха» занимались российские и зарубежные авторы: Б.В. Бахолдин, А.А. Бартоломей, В.Н. Бронин, Н.М. Герсевич, В.Н. Голубков, Б.И. Далматов, Е.Э. Девальтовский, Н.М. Дорошкевич, Ф.К. Лапшин, А.Ж. Жусупбеков, В.В. Знаменский, С.Я. Кушнир, А.А. Луга, Р.А. Мангушев, Р.М. Нарбут, Н.С. Несмелов, А.И. Осокин, В.Г. Офрихтер, А.В. Пилягин, А.Б. Пономарев, А.И. Полищук, А.В. Савинов, З.Г. Тер–Мартirosян, Ю.Г. Трофименков, Х.Р. Хакимов, А.Б. Фадеев, В.Г. Федоров, В.Г. Федоровский, А.Г. Шашкин, С.В. Ющубе, A.S. Azzouz, M.J. Morrison, S. Bensallam, L. Bahi, H. Ejjaouani, V. Shakhirev, K. RkhaChaham, M.Y. Fattah, K.T. Shlash, S.M. Al–SoudMadhat, K. Gavin, D. Gallagher, P. Doherty, B. McCabe, G.G. Meyerhof, M.F. Randolph, J.P. Carter, C.P. Wroth, M. Suzuki, T. Fujimoto, T. Taguchi и др. Данное явление, интенсивно протекающее примерно в течение первых 60 суток, объясняется рассеиванием избыточного порового давления и восстановлением нарушенных при забивке структурных связей в околосвайном грунте.

Исследования несущей способности свай, продолжительное время находившихся под нагрузкой в составе фундаментов существующих зданий, проводились М.Ю. Абелевым, Х.З. Бакеновым, А.А. Бартоломеем, Б.В. Бахолдиным, В.Н. Брониным, Б.И. Далматовым, Х.А. Джантимировым,

Л.В. Дураковой, Ф.К. Лапшиным, Г.Ф. Новожиловым, А.Е. Радугиным, А.И. Осокиным, А.В. Паталеевым, А.Б. Пономаревым, А.В. Савиновым, З.Г. Тер–Мартиросьяном, В.М. Улицким, Б.С. Юшковым, F.C. Chow, R.J. Jardine, J.F. Nauroy, F. Brucy, G. Mesri, T.W. Feng, J.M. Benak, I.F. Wardle, G. Price, T.J. Freeman, J.L. Jensen, A. Augustesen, C.S Sørensen и др. Большинство авторов пришло к выводу, что увеличение несущей способности происходит за счет уплотнения основания под нижним концом и роста сопротивления грунта на боковой поверхности свай. В связи с этим дополнительное нагружение свай при реконструкции производится, когда те взаимодействуют с грунтом с более высокими деформационно–прочностными характеристиками по сравнению с временем строительства.

Наиболее надежным способом оценки изменения напряженно–деформированного состояния вмещающего сваю грунта во времени является численное моделирование и, в частности, метод заданных перемещений, в котором предусматривается горизонтальное объемное расширение ствола сваи на размер ее поперечного сечения и последующее вертикальное перемещение получившегося элемента на экспериментально подобранную величину.

При работе над диссертацией были изучены способы испытания свай статической нагрузкой в фундаментах существующих зданий. Как оказалось, исследования влияния снятия нагрузки со свай перед испытаниями, по оценке воздействия соседних свай и безопасному проведению статических испытаний в случае, когда выводится из работы одна из свай в кусте, выполнялись лишь в небольших объемах.

На основании анализа состояния вопроса сформулирована цель исследований и поставлены задачи для её достижения.

**Во второй главе** приводятся результаты экспериментальных исследований физико–механических свойств грунтов оснований свайных фундаментов в г.Архангельске. Обосновывается выбор модели грунта для дальнейших расчетов.

В качестве несущего слоя свайных фундаментов в городе служат ледниковые и морские суглинки. Доля испытанных свай в этих отложениях составляет примерно 75% и 25%, соответственно. Для определения необходимых характеристик основных моделей грунтов проанализированы данные выполненных ранее исследований и проведены лабораторные испытания по определению недостающих характеристик названных отложений.

Для получения характеристик сжимаемости при напряжениях до 600 кПа автором выполнены компрессионные испытания 109 образцов ледниковых и 76 – морских суглинков, по результатам которых получены зависимости одометрического модуля деформации от коэффициента пористости  $e$  и показателя текучести  $I_L$  (таблица 1).



Таблица 1. Зависимости одометрического модуля деформации от коэффициента пористости  $e$  и показателя текучести  $I_L$  исследуемых грунтов

Интервал напряжений, кПа	$E_{\text{од}}, \text{ МПа}$	
	Ледниковые суглинки ( $g_{III}$ )	Морской суглинок ( $m_{III}$ )
100 – 200	$13,6 - 13,2e - 1,5I_L$	$11,7 - 8,2e - 1,1I_L$
200 – 300	$16,9 - 18,8e - 2,0I_L$	$16,5 - 12,4e - 0,9I_L$
300 – 400	$35,7 - 43,5e - 2,3I_L$	$23,2 - 19,0e - 2,0I_L$
400 – 500	$40,7 - 48,2e - 1,2I_L$	$31,9 - 28,7e - 1,1I_L$
500 – 600	$48,4 - 57,1e - 1,3I_L$	$36,3 - 32,0e - 1,2I_L$

Коэффициент Пуассона для ледниковых и морских суглинков определялся по результатам испытаний в приборе трехосного сжатия. Недостатком при их проведении является неравномерное распределение горизонтальных деформаций по высоте образца из-за наличия трения между пористой поверхностью штампов и грунтом. Численным моделированием трехосных испытаний определены размеры зон влияния сил трения на контакте торцов образца со штампами и скорректирована высота образцов на этапах нагружения. Зависимость коэффициента поперечной деформации  $\nu$  от показателя текучести глинистых грунтов  $I_L$  при значении девиатора напряжений 30–50% от максимального показана на рисунке 1. Экспериментально установлено, что коэффициент Пуассона при нагрузке–разгрузке  $\nu_{\text{вр}}$  находится в диапазоне 0,20–0,24 для ледниковых суглинков и 0,16–0,18 – для морских.

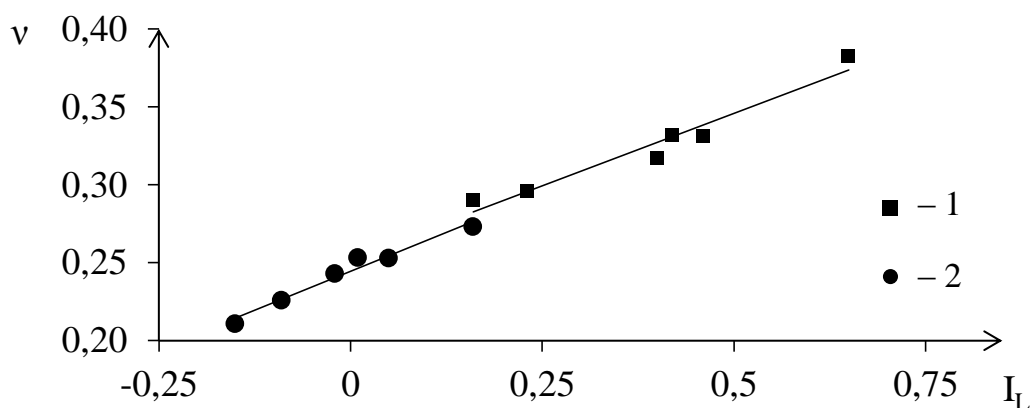


Рисунок 1. Зависимость коэффициента Пуассона,  $\nu$ , от показателя текучести,  $I_L$ , морских и ледниковых суглинков:

1 – ледниковые суглинки; 2 – морские суглинки

Для исследуемых грунтов в компрессионных приборах выполнено определение коэффициента переуплотнения до давлений 1500 кПа. Опыты показали, что грунты являются незначительно переуплотненными, среднее значение коэффициента для морских суглинков составило 1,17, для ледниковых – 1,56.

Испытаниями в приборе одноплоскостного среза с постоянной скоростью деформации подтверждены зависимости угла дилатансии от угла внутреннего трения, предложенные J.S. Stenfeit, P.A. Vermeer, R. De Borst. Угол дилатансии для рассматриваемых отложений может быть принят равным нулю.

При расчете для модели грунта Hardening soil коэффициента  $m$ , показывающего нелинейность компрессионной кривой, выявлена его существенная изменчивость по мере роста действующего давления.

В связи со сложностью назначения параметров этой модели при многостадийном расчете напряжений в массиве околосвайного грунта, было принято решение использовать более простую модель Мора–Кулона, а грунт, вмещающий сваю, делить на зоны в зависимости от напряженного состояния.

**В третьей главе** рассмотрен алгоритм расчета свай в ПК PLAXIS 3D, а именно моделирование напряженно–деформированного состояния слоев околосвайного грунта при погружении сваи, предложен способ учета изменения деформационных характеристик грунта в зонах различного напряженного состояния, позволяющий получить графики «нагрузка–осадка», схожие с экспериментальными графиками, полученными при статических испытаниях свай, в том числе в фундаментах существующих зданий с учетом времени эксплуатации сооружения и величины действующих нагрузок.

Одним способов определения несущей способности свай является метод, основанный на результатах численного моделирования. Однако, до настоящего времени такой подход для забивных железобетонных свай применялся, как правило, без учета зон деформирования околосвайного грунта и оценки изменения физико–механических свойств грунта в этих зонах.

Определение зон деформирования грунта при погружении сваи выполнялось с помощью программного комплекса PLAXIS 3D на трехмерной модели размером в плане 10x10 м. Слои грунта задавались с использованием модели Мора–Кулона, а свая – элементами Plate с абсолютно жесткими характеристиками. Для получения напряжений в околосвайном грунте четвертая часть ствола размещалась в углу модели. Расчет производился в три этапа: 1 – определение напряжений, создаваемых собственным весом грунта; 2 – расчет горизонтальных напряжений в околосвайном грунте; 3 – расчет вертикальных напряжений под концом сваи.

Горизонтальные напряжения получали путем «раздвижки» плоскостей боковой поверхности сваи на половину размера ее поперечного сечения. Вертикальные напряжения под концом сваи находили за счет перемещения ствола на 1 метр вниз, что составляет  $(2,85...3,33)d$  в зависимости от сечения сваи. Величина перемещения была подобрана исходя из условия наиболее тесного совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными различных авторов. Моделирование двух последних этапов велось с

опцией обновления сетки конечных элементов, то есть с корректировкой ее геометрии в процессе расчета.

С целью идеализации модели для последующего расчета через площади эпюр напряжений для каждого инженерно–геологического элемента были найдены размеры зон напряженного состояния у боковой поверхности. Под концом сваи рассчитывались средние напряжения в слое толщиной 0,2 м (рисунок 2). Такая толщина выбрана для корректного построения сетки конечных элементов в программном комплексе PLAXIS 3D.

Верификация определения численным методом несущей способности свай после непродолжительного «отдыха» выполнялась сопоставлением результатов расчета с данными испытаний 16 одиночных забивных свай статической нагрузкой. Длина свай 11–16 м, размеры поперечного сечения – 35×35 см. Испытания свай проводились через 20–30 дней после погружения. В качестве опорной конструкции для создания нагрузки служили анкерные сваи и система перекрестных балок. Перемещение сваи при испытаниях доводилось до 24 мм, что составляло 20% от предельно допустимой осадки основания.

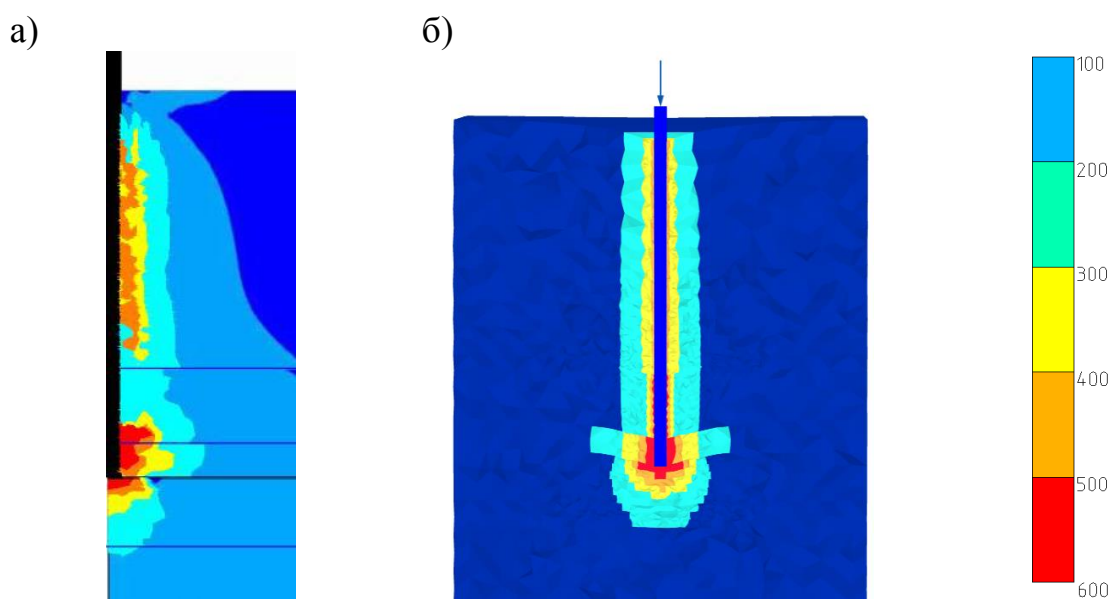


Рисунок 2. Определение зон деформирования околосвайного грунта:  
а – совмещенная эпюра горизонтальных напряжений от «раздвижки» плоскостей боковой поверхности и вертикальных напряжений от погружения сваи на 1 метр; б – идеализированная модель

Размеры трехмерной модели и свойства сваи для получения графиков «нагрузка–осадка» были аналогичны предыдущей задаче. Ствол сваи, с коэффициентом контакта «плита–грунт», равным 2/3, размещался по центру. Для глинистых грунтов задавалось недренированное состояние. Одометрический модуль деформации  $E_{\text{oad}}$  назначался переменным по мере удаления от сваи, исходя из радиусов зон напряженного состояния с использованием зависимостей, приведенных в таблице 1.

Для обеспечения сходимости результатов численного моделирования испытаний свай статической нагрузкой с данными полевых испытаний методом решения обратной задачи были подобраны поправочные коэффициенты  $m_k$  для основных несущих слоев грунтов оснований во всех требуемых интервалах напряжений (таблица 2). В интервале напряжений 100–200 кПа коэффициент  $m_k$  назначался по данным, полученным А.И. Агишевым.

Таблица 2. Значения коэффициента  $m_k$  для ледниковых и морских суглинков

Интервал напряжений, кПа	Коэффициент пористости грунта			
	менее 0,55	0,65	0,75	0,85
100 – 200	5	4,5	4	3
200 – 300	7	5,5	5	4
300 – 400	9	7	7	5
400 – 500	10	9	8	7
500 – 600	11	10	9	8

В таблице 3 сравниваются значения несущей способности свай, найденные расчетным методом и численным моделированием, с данными, полученными при испытаниях статической вдавливающей нагрузкой.

Таблица 3. Несущая способность свай

Длина свай, м	$I_L$	$F_1$ , кН	$F_2$ , кН	$F_3$ , кН	$F_2/F_1$	$F_3/F_1$
14	0,33	800	939	780	1,17	0,97
14	0,33	950	921	1001	0,97	1,05
15	0,20	1100	1467	1020	1,33	0,93
16	0,10	1100	1459	1042	1,33	0,95
11	0,38	800	568	799	0,71	1,00
16	0,20	1500	1698	1567	1,13	1,04
16	0,20	1400	1324	1522	0,95	1,09
13	0,20	1100	1288	1272	1,17	1,16
14	0,33	1100	1527	948	1,39	0,86
14	0,33	1050	1518	950	1,45	0,91
15	0,18	1050	1357	984	1,29	0,94
15	0,18	1050	1226	1094	1,17	1,04
14	0,30	1150	1074	1186	0,93	1,03
14	0,30	1000	1046	1063	1,05	1,06
14	-0,10	1100	1291	1182	1,17	1,07
14	0,10	950	1541	1003	1,62	1,06
Средние значения:					1,18	1,01

Примечание:  $I_L$  – показатель текучести суглинка под концом свай;  $F_1$  – несущая способность, полученная статическими испытаниями свай через 20–30 дней после забивки;  $F_2$  – несущая способность, найденная расчетным методом по СП 24.13330;  $F_3$  – несущая способность, полученная численным моделированием.

На рисунке 3 представлены характерные примеры графиков «нагрузка–осадка», полученные по результатам статических испытаний свай и численного моделирования.

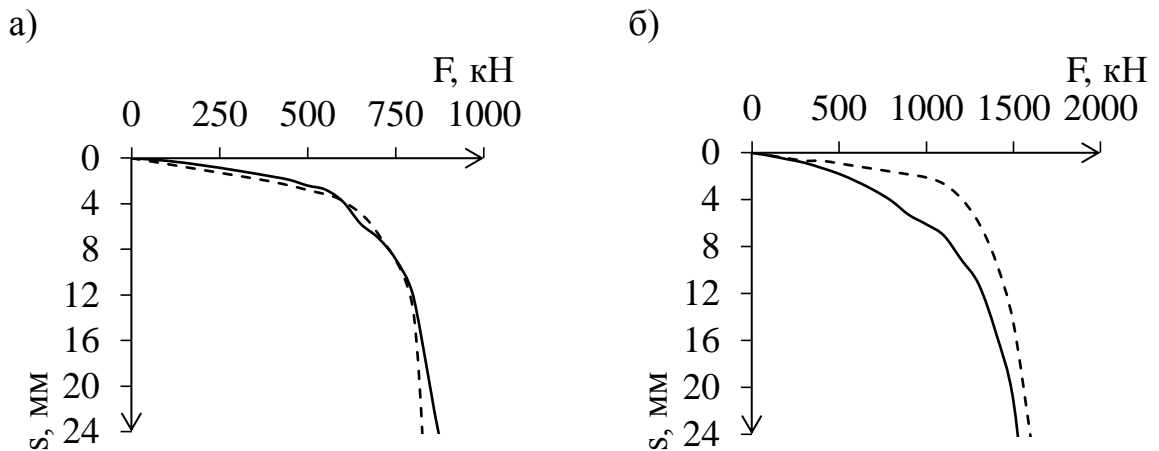


Рисунок 3. Графики «нагрузка–осадка» для свай после «отдыха»

— экспериментальные данные; ---- численное моделирование  
 а – свая длиной 14 м, под острием сваи ледниковый суглинок с  $I_L=0,33$ ;  
 б – свая длиной 16 м, под острием – морской суглинок с  $I_L=0,20$

Таким образом, численное моделирование с использованием простейшей модели грунта Мора–Кулона в ПБК PLAXIS 3D и представленного алгоритма расчета позволяет получить значение несущей способности свай, близкое к данным натурных испытаний статической нагрузкой, разброс значений допустимой нагрузки не превышает 14...16%, с коэффициентом вариации 7,7%.

При численном моделировании статических испытаний в фундаментах существующих зданий учитывалось взаимное расположение свай, время эксплуатации сооружения и величина действующих нагрузок.

Размеры зон напряженного состояния в околосвайном грунте (рисунок 4) задавались в зависимости от двух факторов: 1 – эффективных напряжений, вызванных забивкой испытуемой и смежных свай; 2 – эффективных напряжений, вызванных нагрузкой от здания.

Определение напряжений от забивки для испытуемой и соседних свай велось по алгоритму, представленному выше.

Эффективные напряжения, создаваемые нагрузкой от здания, были получены на основе консолидационного расчета в ПБК PLAXIS 3D.

Численные эксперименты показали, что при расстоянии между осями свай превышающем  $(4...4,2)d$ , где  $d$  – размер их поперечного сечения, влияние соседних свай друг на друга пренебрежимо мало и они работают как одиночные.

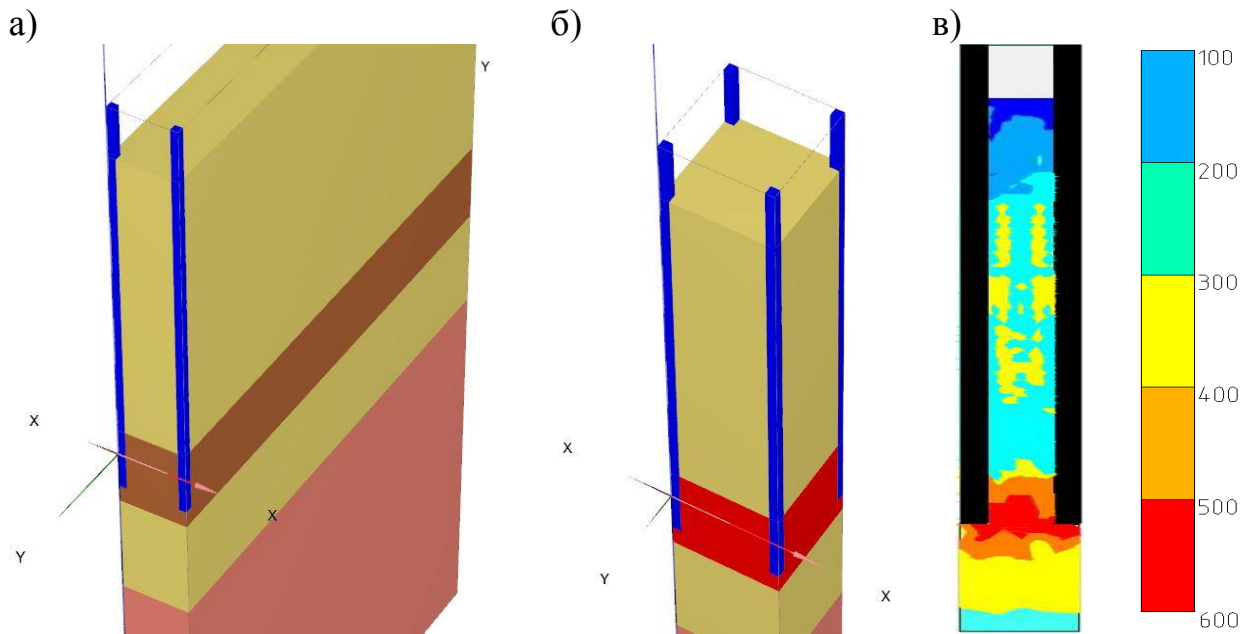


Рисунок 4. Определение зон деформирования околосвайного грунта:  
 а – модель для определения зон деформируемости при однорядном расположении свай; б – тоже для куста из четырех свай; в – совмещенная эпюра горизонтальных напряжений от «раздвижки» плоскостей боковой поверхности и вертикальных напряжений от погружения свай на 1 метр

В тех случаях, когда величина напряжений в грунте превышала 600 кПа, одометрический модуль деформации определялся с помощью энергетического метода Беккера. По данным компрессионных испытаний с максимальной ступенью нагружения 600 кПа строился график зависимости энергии, затраченной на деформирование, от приложенного давления. Указанная энергия вычислялась, как произведение давления на данной ступни на относительную деформацию. На шести контрольных образцах ледниковых и шести образцах морских суглинков было установлено, что график при давлении от 400 до 1500 кПа имеет линейный характер, поэтому для напряжений более 600 кПа одометрический модуль деформации находился методом экстраполяции прямой, проходящей через точки с напряжением 400...600 кПа.

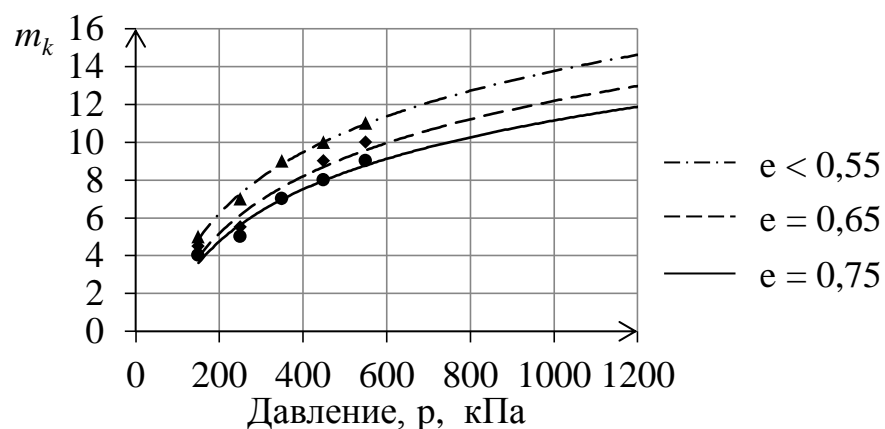


Рисунок 5. Зависимость коэффициентов  $m_k$  от давления для суглинков с различными значениями коэффициента пористости  $e$

Поправочные коэффициенты  $m_k$  для перехода от компрессионных к штамповым модулям деформации для давлений свыше 600 кПа назначались путем экстраполяции с помощью логарифмической кривой, построенной по начальным значениям (рисунок 5).

Верификация моделирования статических испытаний свай в фундаментах существующих зданий выполнялась сопоставлением результатов расчета с данными испытаний. Всего испытано 16 свай длиной 6...12 метров, сечением 30×30 или 35×35 см, погруженных в центральной части г.Архангельска на 10 объектах реконструкции. Исследуемые сваи находились в составе действующих фундаментов зданий в течение 2...39 лет. Их испытания выполнялись путем статического нагружения, для чего верхнюю часть свай срезали и между ними и ростверком устанавливали гидравлический домкрат.

Для обеспечения сходимости результатов численного моделирования с данными полевых опытов с учетом фактора времени методом решения обратной задачи были подобраны коэффициенты контакта ствола сваи с грунтом  $R_{inter} = f(t)$ , где  $t$  – время эксплуатации сооружения. Полученная зависимость  $R_{inter} = f(t)$  при  $t \geq 2$  лет имеет следующий вид (рисунок 6):

$$R_{inter} = 0,603 + 0,094 \cdot \ln t. \quad (1)$$

Как сказано выше, для свай после «отдыха» в течение 25–30 суток принимался коэффициент  $R_{inter}=2/3$ .

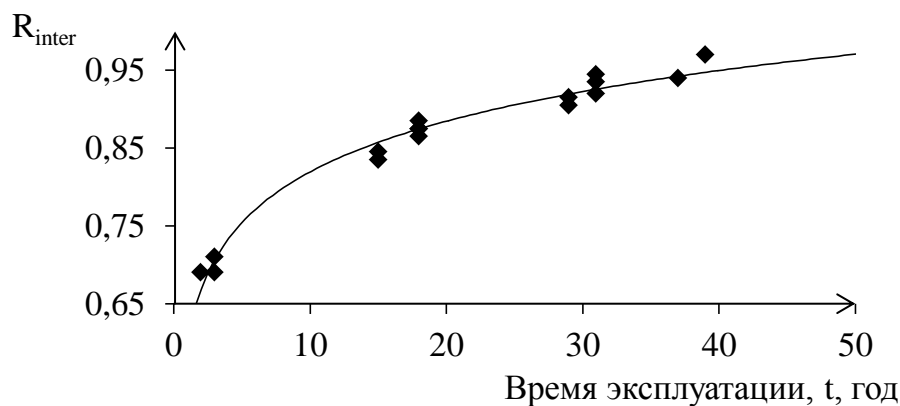


Рисунок 6. Значения коэффициента контакта ствола сваи с грунтом  $R_{inter}$

В таблице 4 сравниваются значения несущей способности свай, найденные численным моделированием, с данными, полученными путем испытания статической вдавливающей нагрузкой.

Разброс результатов определения допустимой нагрузки на сваю по предлагаемому алгоритму расчета от значений, полученных при статических испытаниях, составляет от -12 до +8%, при коэффициенте вариации – 5%.

На рисунке 7 представлены характерные примеры рассчитанных и экспериментальных графиков «нагрузка осадка».

Таблица 4. Несущая способность свай

Длина свай, м	$I_L$	t, годы	N, кН	$F_3$ , кН	$F_4$ , кН	$F_5$ , кН	$F_4/F_5$
11	0,12	2	145	1040	1000	1060	0,94
12	0,28	15	270	600	700	680	1,03
12	0,28	15	250	600	700	670	1,04
12	-0,28	37	330	1050	1200	1240	0,97
12	0,20	3	250	1260	1250	1300	0,96
12	0,20	3	250	1110	1000	1130	0,88
10	0,11	31	250	580	650	675	0,96
10	0,11	31	297	580	700	680	1,03
9	0,14	31	294	1000	1200	1220	0,98
12	0,27	18	185	650	700	725	0,97
12	0,27	18	215	650	750	735	1,02
6	0,25	39	303	425	550	510	1,08
9	0,22	18	273	840	950	980	0,97
8	0,22	18	207	810	900	940	0,96
10	0,17	29	267	700	850	830	1,02
10	0,17	29	267	720	850	870	0,98
Средние значения:							0,99

Примечание:  $I_L$  – показатель текучести суглинка под концом свай; t – время эксплуатации здания; N – действующая нагрузка на сваю;  $F_3$  – несущая способность через 20–30 дней после забивки, полученная численным моделированием;  $F_4$  – несущая способность, полученная путем статических испытаний свай в фундаментах существующих зданий;  $F_5$  – несущая способность свай в существующих зданиях, полученная численным моделированием.

Результаты определения допустимой нагрузки для забивных свай в эксплуатируемых зданиях по предложенному алгоритму численного моделирования сравнивались с данными, полученными по методике Осокина А.И., основывающейся на лабораторных лотковых экспериментах. Значения допустимой нагрузки на сваю  $P$ , показанные на рисунке 8, рассчитывались путем деления несущей способности на коэффициент надежности, который принимался равным 1,2 для статических испытаний свай и численного моделирования, 1,4 – для значений, полученных по методике Осокина А.И. Указанные величины, обозначены буквой  $P$  и имеют индексы аналогичные значениям  $N$ .

Отношение допустимой нагрузки на сваи в фундаментах существующих зданий  $P_6$  с учетом поправочных коэффициентов, предложенных Осокиным А.И., к допустимой нагрузке, полученной путем статических испытаний свай, дает разброс от -31 до +17%. Коэффициент вариации данного метода 17%.



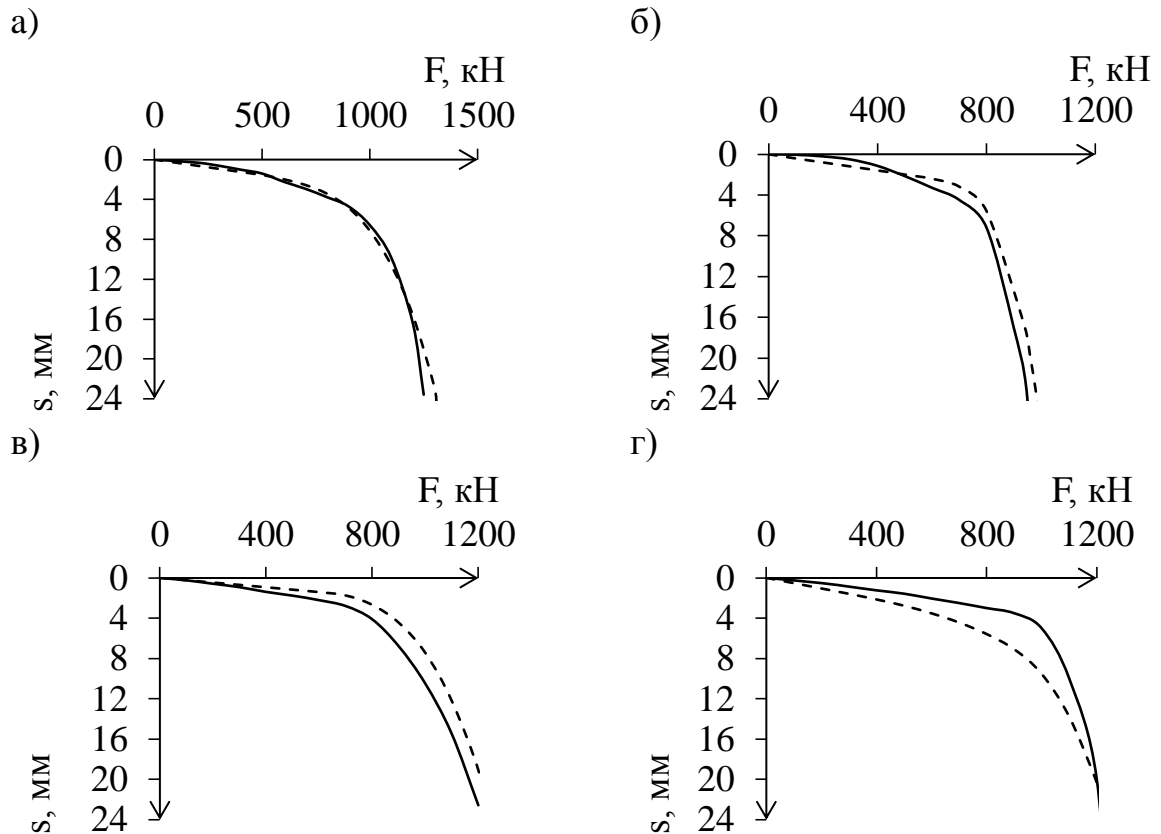


Рисунок 7. Характерные кривые «нагрузка – осадка»  
для свай в фундаментах существующих зданий

— — экспериментальные данные; - - - - численное моделирование  
а – свая  $0,35 \times 0,35$  м, длиной 12 м, под пятой – морской суглинок с  $I_L=0,20$ , время эксплуатации 3 года; б – свая  $0,30 \times 0,30$  м, длиной 9 м, под пятой – морской суглинок с  $I_L=0,22$ , время эксплуатации 3 года; в – свая  $0,35 \times 0,35$  м, длиной 9 м, под пятой – ледниковый суглинок с  $I_L=0,14$ , время эксплуатации 31 год; г – свая  $0,35 \times 0,35$  м, длиной 12 м, под пятой – морской суглинок с  $I_L=0,28$ , время эксплуатации 37 лет

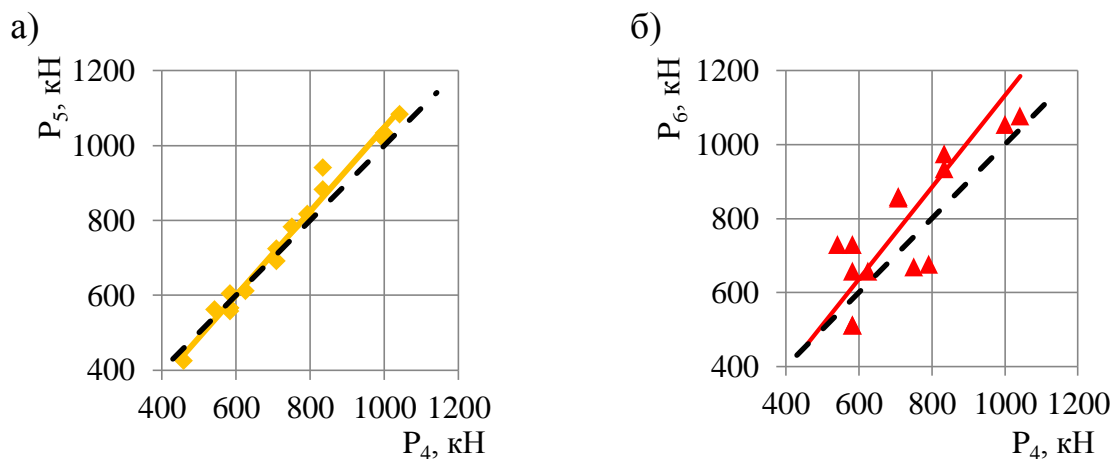


Рисунок 8. Значения допустимой нагрузки на сваю по:  
а – данным численного моделирования  $P_4$ ; б – методике Осокиным А.И.

Применение предложенных алгоритмов численного моделирования позволило выполнить анализ прироста во времени сопротивления грунта под нижним концом и на боковой поверхности сваи  $\Delta$  для наиболее характерных для г.Архангельска фундаментов и типов основания (рисунок 9).

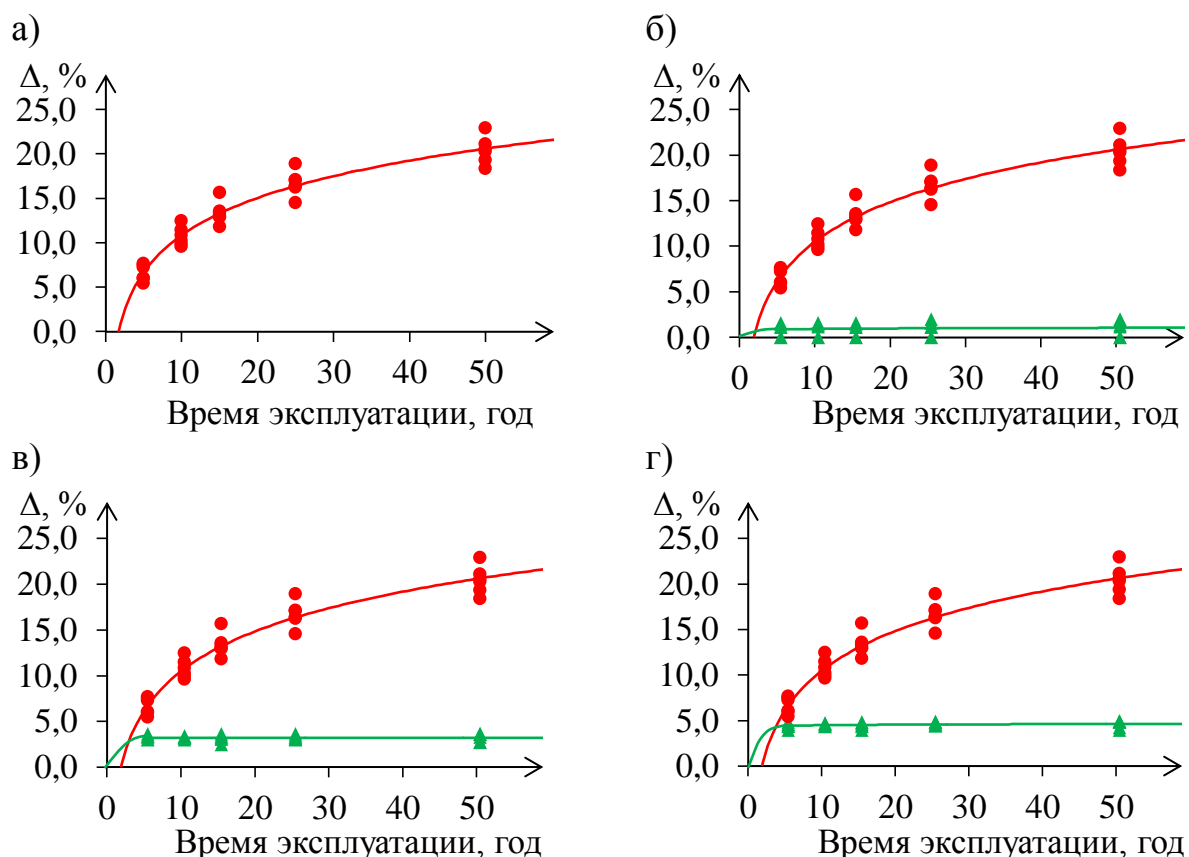


Рисунок 9. Анализ факторов времени и нагрузки от здания на несущую способность сваи:

а – незагруженная свая; б – свая под нагрузкой, равной 50% от допустимой;  
в – то же при 75%; г – то же при 100%

- ▲ – увеличение сопротивления грунта под нижним концом сваи;
- – увеличение сопротивления грунта на боковой поверхности сваи.

В результате дифференцированного анализа было выявлено следующее:

- наибольшее увеличение несущей способности сваи происходит за счет прироста сопротивления на боковой поверхности сваи;
- увеличение несущей способности грунта за счет сопротивления под нижним концом сваи происходит при внешней нагрузке превышающей сопротивление на боковой поверхности ствола сваи и не превышает 5% от несущей способности через 25–30 дней после погружения сваи.

Внедрение в практику предложенного алгоритма расчета позволит повысить надежность принимаемых проектных решений при реконструкции сооружений и может дать существенный экономический эффект.

**В четвертой главе** дано описание разработанных способов испытания свай в фундаментах существующих зданий и приводятся результаты натурных экспериментов по апробации одного из них. Намечены направления дальнейших исследований.

На основе накопленного опыта испытаний свай статической нагрузкой в фундаментах существующих зданий и анализа напряженно-деформированного состояния околобойного грунта предложены способы, позволяющие проводить испытания свай без снятия с них действующей нагрузки, а также с учетом возможного влияния смежных.

На предложенные способы получены патенты на изобретение № 2014121977 и № 2015112422.

При проведении испытаний по первому способу выполняются следующие операции:

- обнажение подошвы ростверка и головы испытываемой сваи;
- выполнение с одного из углов сваи прорези и установка в нее домкрата (рисунок 10 а);
- нагнетание рабочей жидкости в домкрат для обеспечения усилия распора, исключающего перемещение вверх сваи;
- выполнение второй прорези с противоположного угла с установкой в нее второго домкрата (рисунок 10 б);
- нагнетание рабочей жидкости во второй домкрат, для обеспечения распора, равного расчетной нагрузке на сваю;
- выполнение прорезей в двух других углах поперечного сечения сваи, с подрезкой рабочей арматуры (рисунок 10 в–г);
- нагнетание рабочей жидкости с помощью одной насосной станции в два домкрата одновременно, для разрыва бетона в ослабленном сечении ствола сваи (рисунок 10 д);
- наращивание ступенями нагрузки на сваю, с попутным измерением осадки.

Предлагаемый способ испытания свай статической нагрузкой позволяет определять несущую способность, не выключая испытываемую сваю из работы, не снижая нагрузку на нее и не допуская перемещений вверх, возникающих обычно при снятии нагрузки, что важно для обеспечения возможности испытания одной из трех свай в кусте. Напряженное состояние вмещающего сваю массива грунта, сформировавшееся за время эксплуатации фундамента, до начала испытаний остается неизменным, тем самым повышается достоверность определения несущей способности свай в фундаментах зданий.

Метод был применен в ходе выполнения предпроектных работ при реконструкции трех объектов в г.Архангельске (рисунок 11).

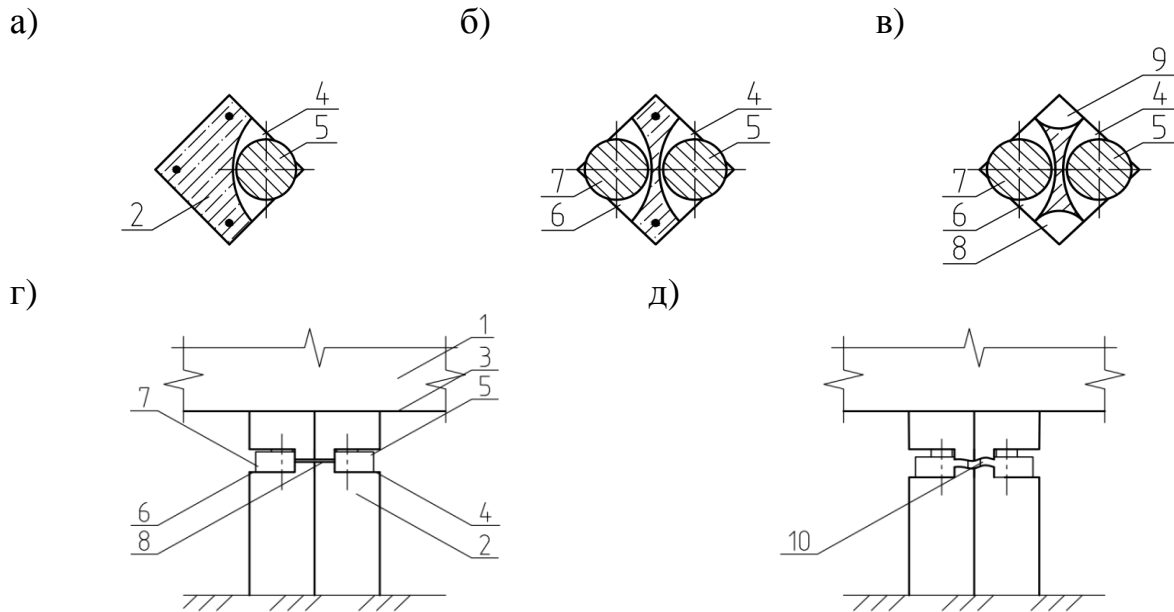


Рисунок 10. Схема испытаний свай:

а – поперечное сечение сваи после выполнения первой прорези и установки в нее домкрата; б – поперечное сечение сваи после выполнения второй прорези и установки в нее второго домкрата; в – поперечное сечение сваи после подрезки арматуры в углах; г – вид спереди до начала нагружения сваи; д – вид спереди в ходе нагружения  
 1 – ростверк; 2 – свая; 3 – низ ростверка; 4, 6, 8, 9 – прорези; 5, 7 – домкраты; 10 – ослабленное сечение ствола сваи

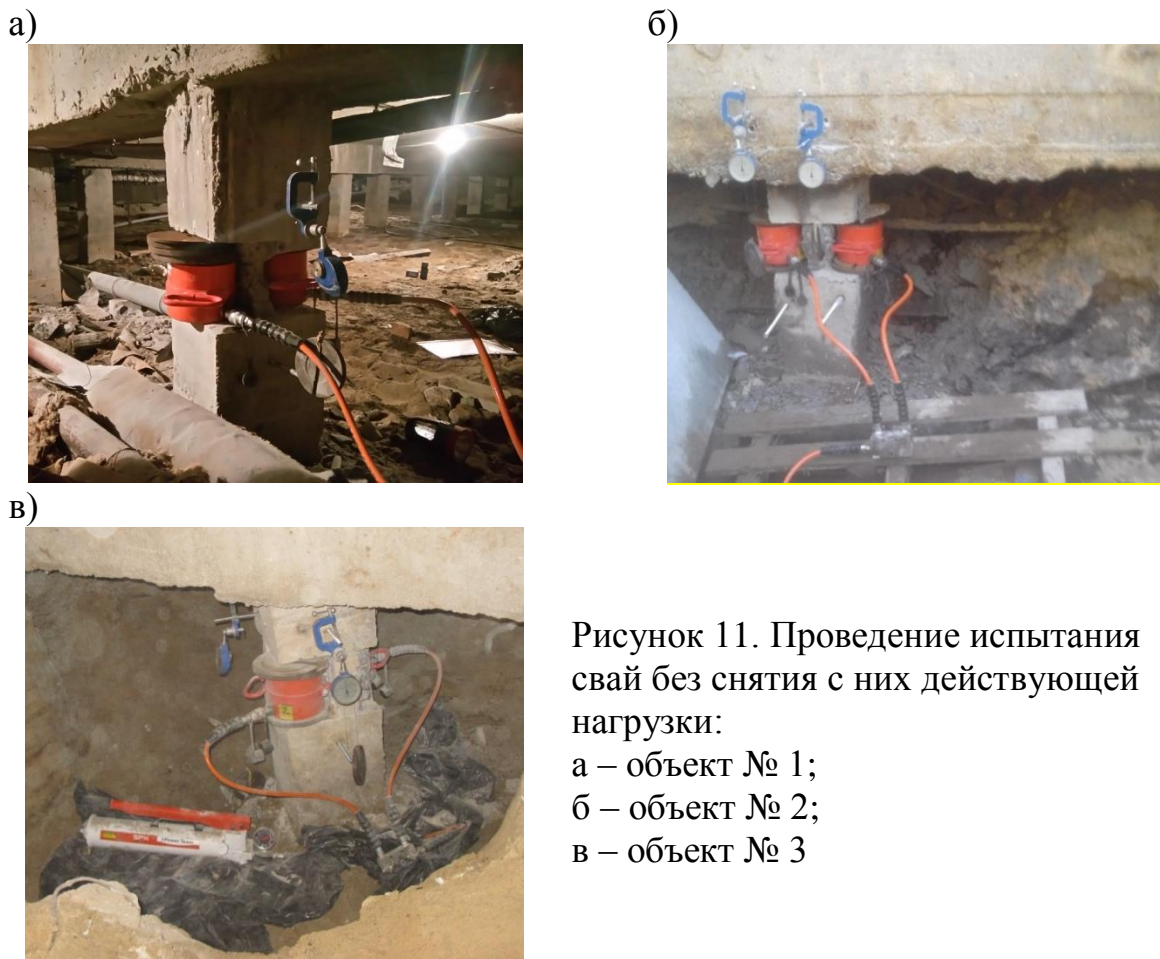
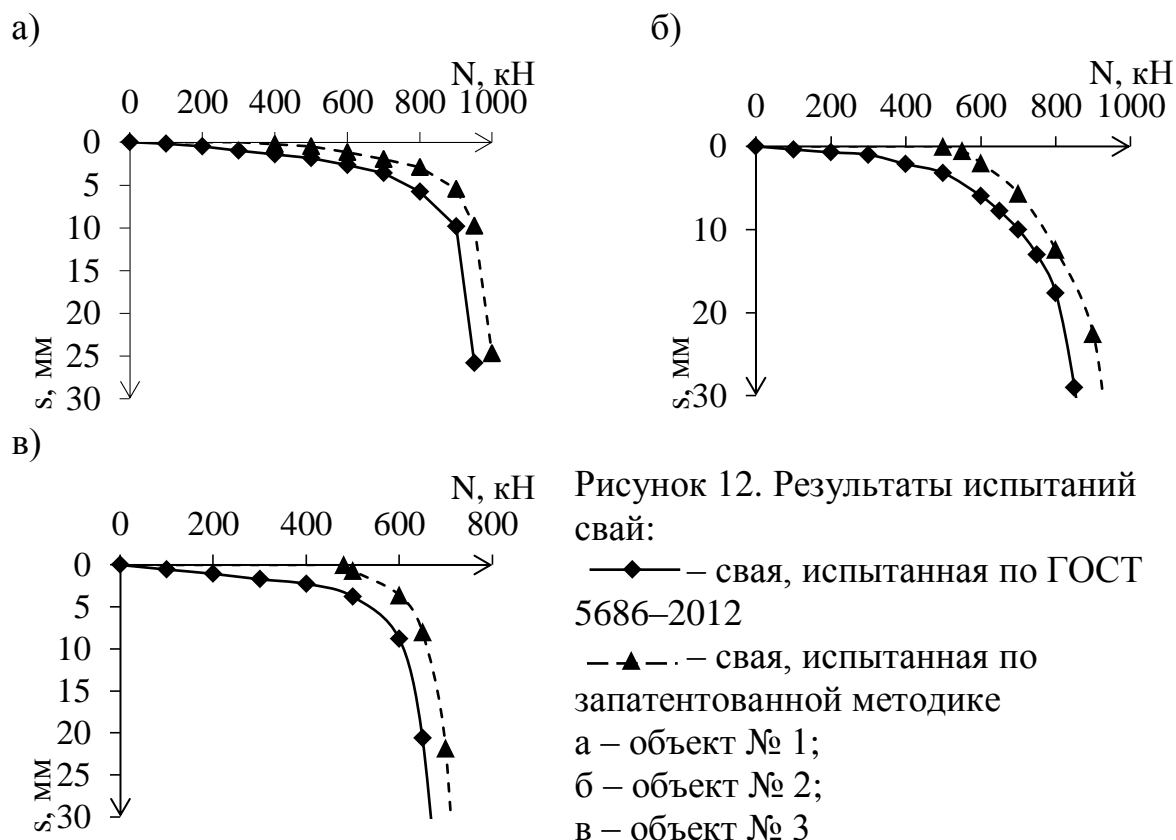


Рисунок 11. Проведение испытания свай без снятия с них действующей нагрузки:

а – объект № 1;  
 б – объект № 2;  
 в – объект № 3

В ходе испытаний предельное сопротивление свай, испытанной по предложенному способу оказалось от 5 до 7,1% больше, чем для свай, испытанных по ГОСТ 5686–2012 (рисунок 12).

Представленное в диссертационной работе численное моделирование этапов испытаний свай статической вдавливающей нагрузкой по ГОСТ 5686–2012 и по запатентованной методике в ПК PLAXIS 3D позволило теоретически обосновать экспериментальные зависимости, полученные в ходе полевых работ.



Эффект от применения предлагаемой методики выше в тех случаях, когда испытания свай проводят после длительного периода эксплуатации здания, так как за это время происходит значительный рост прочностных и деформационных свойств околосвайного грунта. Вероятно, что разгрузка свай и неконтролируемое перемещение ее вверх после отделения от ростверка снижает силы трения ствола свай с грунтом. В случаях, когда большая часть действующей нагрузки передается через нижний конец свай, после разгрузки происходит разуплотнение грунта, а, значит, повторное загрузку свай происходит в худших условиях, по сравнению со сформировавшимися за время эксплуатации фундамента.

Второй способ позволяет учесть возможное влияние на результаты испытаний смежных свай.

Способ реализуется следующим образом (рисунок 12):

- после отрывки грунта рядом с фундаментом, обнажаются подошва ростверка и верхние части стволов испытываемой и смежных свай;
- на испытываемой и смежных сваях крепятся приборы для измерения деформаций ствола – экстензометры;
- выполняется отделение верха испытываемой сваи от ростверка;
- в пространство между испытываемой свайей и подошвой ростверка устанавливается домкрат;
- регистрируя показания экстензометров и датчика перемещений, производят нагружение сваи домкратом до момента достижения исходного напряженного состояния, таким образом определяют фактическое усилие, действовавшее на нее до начала испытаний;
- ступенями наращивают нагрузку на испытываемую сваю, регистрируя осадку сваи и изменение напряжений в ее стволе, а также в стволах смежных свай.

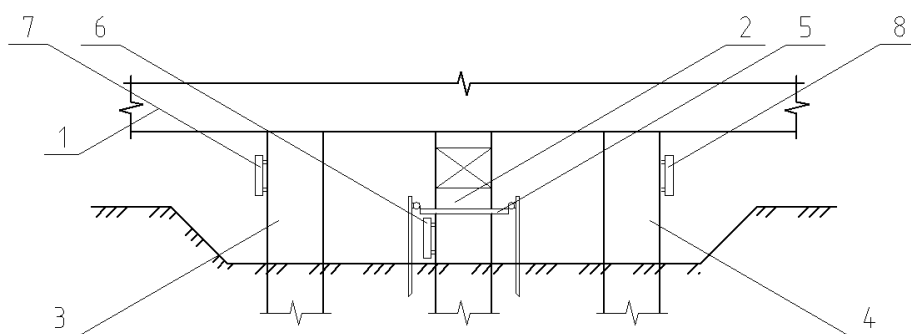


Рисунок 12. Схема испытаний сваи

1 – ростверк; 2 – испытываемая свая; 3,4 – смежные сваи; 5 – реперная система; 6,7,8 – экстензометры

По данным испытаний по графику «нагрузка–осадка» определяют несущую способность сваи с учетом влияния соседних свай и резерв несущей способности. Кроме того, в ходе испытаний определяется фактическая нагрузка, действующая на испытываемую сваю в составе фундамента, что является необходимым условием разработки проекта реконструкции сооружения.

По мере накопления данных испытаний предложенными способами возможна корректировка алгоритма численного моделирования для учета разгрузки сваи после отделения от ростверка и учета передачи нагрузки в ходе загрузки на соседние сваи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного диссертационного исследования сделаны следующие выводы:

1. Лабораторные исследования ледниковых и морских суглинков, используемых в качестве основания свайных фундаментов в г. Архангельске, позволили выявить корреляционные зависимости одометрического модуля

деформации для напряжений до 600 кПа и коэффициента Пуассона от показателя текучести грунтов и коэффициента пористости; использование указанных зависимостей делает возможным сократить продолжительность и стоимость инженерно–геологических изысканий при проектировании свайных фундаментов методом численного моделирования.

2. Экспериментально доказано, что грунты основания свайных фундаментов в г.Архангельске являются незначительно переуплотненными и при расчете их напряженно–деформированного состояния может использоваться модель Мора–Кулона, применение более сложных моделей, которые учитывают коэффициент переуплотнения, является необязательным.

3. Разработан и верифицирован алгоритм численного моделирования напряженно–деформированного состояния вмещающего сваю массива грунта, позволяющий получить зависимости «нагрузка–осадка», схожие с результатами натурных экспериментов по статическим испытаниям свай для свай через 25–30 дней после погружения; погрешность прогноза несущей способности свай не превышает  $\pm 15\%$ .

4. Разработан и верифицирован алгоритм численного моделирования статических испытаний свай в фундаментах существующих зданий, в котором кроме свойств грунтов основания, размеров свай и расстояния между ними, учитываются нагрузки на сваи и продолжительность их действия; верификация результатов моделирования производилась путем их сопоставления с данными испытаний свай, находящихся в составе действующих фундаментов зданий в течение 2...39 лет; погрешность прогноза несущей способности находится в интервале от -12 до +8%. Внедрение в практику предложенных алгоритмов расчета позволит получить для забивных свай зависимости «нагрузка–осадка», близкие к данным полевых исследований, повысить надежность реконструируемых сооружений и выполнить предварительную оценку увеличения несущей способности в любой период времени и с учетом нагрузки, действующей на сваю, например, при обосновании инвестиционной привлекательности проекта.

5. Численными экспериментами на основе апробированных алгоритмов установлено, что наибольшее увеличение несущей способности свай в фундаментах существующих зданий происходит за счет прироста сопротивления грунта на боковой поверхности, увеличение сопротивления грунта под нижним концом сваи происходит лишь при внешней нагрузке, превышающей сопротивление на боковой поверхности ствола сваи.

6. Разработан и апробирован способ испытания свай в составе существующего фундамента, позволяющий сохранить сформировавшееся за время эксплуатации здания напряженное состояние вмещающего сваю массива грунта и тем самым повысить достоверность определения несущей способности; эффективность применения предложенного способа испытаний подтверждена численным моделированием и натурными экспериментами. Разработан способ испытаний свай статической нагрузкой в фундаментах существующих зданий, позволяющий определять несущую способность с учетом влияния смежных свай.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

### Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах:

1. Саенко, Ю. В. Численное моделирование испытаний забивных свай статической нагрузкой / **Ю. В. Саенко**, А. Л. Невзоров // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №3. – С. 55–59.
2. Саенко, Ю. В. Оценка несущей способности забивных свай в фундаментах существующих зданий / **Ю. В. Саенко**, А. Л. Невзоров // Геотехника. – 2016. – №4. – С. 50–57.
3. Саенко, Ю. В. Оценка несущей способности забивных свай в фундаментах существующих зданий / **Ю. В. Саенко** // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – №2 (67). – С. 106–111.
4. Саенко, Ю. В. Способы испытаний свай в существующих фундаментах перед реконструкцией зданий / **Ю. В. Саенко** // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – №2. – С. 134–141.

### Публикации в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus:

5. Саенко, Ю. В. Деформационно–прочностные характеристики грунтов основания свайных фундаментов в г.Архангельске / **Ю. В. Саенко**, А. Л. Невзоров // Горный журнал. – 2015. – №5. – С. 17–21.
6. Saenko, Y. Evaluation of Pile Bearing Capacity in the Foundation of Existing Buildings / **Y. Saenko**, A. Nevzorov // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Seoul, 2017. – P. 2845–2848.

### В других изданиях:

7. Саенко, Ю. В. Исследование деформационных свойств ледниковых суглинков / **Ю. В. Саенко**, А. Л. Невзоров // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 119–128.
8. Дорошенко, С. П. Определение коэффициента Пуассона грунта на основе численного моделирования лабораторных испытаний / С. П. Дорошенко, **Ю. В. Саенко**, А. Л. Невзоров // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2016. – №2. – С. 60–68.
9. Саенко, Ю. В. Способы испытаний свай в существующих фундаментах перед реконструкцией зданий / **Ю. В. Саенко** // Строительство – формирование среды жизнедеятельности : сб. науч. тр. XIX междунар. межвузов. науч.–практ. конф. – НИУ МГСУ, 2016. – С. 1076–1079.

### Патенты РФ на изобретение:

10. Пат. 2557277 Российская Федерация, МПК E02D 33/00. Способ испытания свай статической нагрузкой / Невзоров А. Л., Саенко Ю. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО Север. (Аркт.) фед. ун–т им. М. В. Ломоносова. – № 2014121977/03; заявл. 29.05.14; опубл. 20.07.15, Бюл. № 20. – 6 с.
11. Пат. 2579538 Российская Федерация, МПК G01N 3/10. Стабилометр / Невзоров А. Л., Саенко Ю. В., Ворожцова Л. А.; заявитель и



патентообладатель ФГАОУ ВПО Север. (Аркт.) фед. ун–т им. М. В. Ломоносова. – № 2014152306; заявл. 23.12.14; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 7 с.

12. Пат. 2583806 Российская Федерация, МПК E02D 33/00. Способ испытания свай статической нагрузкой / Невзоров А. Л., Саенко Ю. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО Север. (Аркт.) фед. ун–т им. М. В. Ломоносова. – № 2015112422/03; заявл. 06.04.15; опубл. 10.05.16, Бюл. № 13. – 7 с.

Подписано в печать 26.09.2018. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
В Издательском доме им. В.Н. Булатова САФУ  
163060, г. Архангельск, ул. Урицкого, д. 56