

На правах рукописи



Ломов Петр Олегович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА УСТРОЙСТВА ОСНОВАНИЯ
ПУТЕМ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ НАБИВНЫМИ СВЯЯМИ
В РАСКАТАННЫХ СКВАЖИНАХ**

Специальность 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена на кафедре «Геотехника, тоннели и метрополитены» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Ланис Алексей Леонидович

Официальные оппоненты: **Луцкий Святослав Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II», кафедра «Проектирование и строительство железных дорог», профессор
Самарин Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Основания, фундаменты и испытания сооружений», доцент

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»**

Защита состоится 12 апреля 2017 г., в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 218.005.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Шавыкина
Марина Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии с социальной программой по улучшению жилищных условий граждан, объявленной Президентом Российской Федерации, в перспективе до 2020 г. планируется увеличение объемов жилищного строительства, а также создание доступного и надежного жилья.

Сдерживающим фактором на пути реализации программы является дефицит свободных площадок для нового строительства, сложенных грунтами, которые позволяют выдерживать передаваемые на основание нагрузки без сверхнормативных деформаций. При строительстве в стесненных условиях в окружении существующих зданий возникают трудности в использовании свайных фундаментов.

В этой связи актуальным становится вопрос использования прогрессивных технологий возведения оснований, обеспечивающих надежность и безопасность строящихся зданий и сооружений.

Одним из путей решения указанной проблемы является устройство усиленных оснований, которое позволяет существенно снизить материальные и трудовые затраты при нулевом цикле строительства. Среди существующих методов и способов устройства таких оснований следует выделить усиление грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, основанное на методе раскатки скважин.

Основным препятствием для широкого применения метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах является отсутствие расчетно-теоретической базы, позволяющей выполнить необходимый расчет увеличения физико-механических характеристик грунтового массива. Кроме того, отсутствует нормативно-техническая документация, содержащая требования по контролю качества.

Исследование должно быть направлено на совершенствование существующей методики проектирования усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, а также на разработку новых средств контроля технического состояния усиленного основания, что особенно важно и актуально для развития сферы строительства зданий и сооружений.

Выбранное направление исследования является актуальным и перспективным и согласуется с утвержденным перечнем приоритетных направлений развития науки Российской Федерации в части применения недорогих технологий возведения нулевого цикла, которые позволяют создавать более доступное жилье за счет снижения конечной стоимости объекта жилищного строительства.

Степень разработанности темы. Исследованию армирования грунтовых массивов посвятили труды Ю. М. Абелев, В. В. Аскалонов, Е. С. Ашпиз, С. Г. Богов, В. В. Виноградов, Д. В. Волоцкий, С. Д. Воронкевич, К. Д. Джоунс, Дж. П. Жиро, Г. Н. Жинкин, Л. Г. Ибадуллаева, А. Ф. Колос, М. Я. Крицкий, А. Л. Ланис, С. Я. Луцкий, А. Обсон, С. А. Овчинников, Г. С. Переселенков,

М. Н. Першин, А. И. Песов, Б. Г. Петров, П. Г. Пешков, В. М. Страмоу, А. Н. Токин, Ю. К. Фроловский, Ф. И. Целиков, А. А. Цернант, Н. М. Abuel-Naga, D. T. Bergado, P. V. Palmeira, N. Tupa, Paul T. и др.

Вопросами, связанными с глубинным уплотнением грунта, занимались А. А. Вайгандт, В. Г. Галицкий, Б. И. Дидух, В. А. Дубровский, К. В. Королев, В. Д. Лис, О. П. Минаев, Р. М. Нарбут, А. Н. Перменов, Ю. Е. Пономаренко, А. Н. Саурин, А. М. Силкин, З. Г. Тер-Мартirosян, В. М. Улицкий, В. Г. Федоровский, В. И. Феклин, В. В. Харченко, Н. Brandl, J. Grabe, V. Hamidi, E. Heins и др.

Объект исследования: грунтовые массивы, усиленные набивными сваями в раскатанных скважинах.

Предмет исследования: закономерности изменения деформационных свойств грунтовых массивов, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах.

Целью исследования является повышение эффективности устройства усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах грунтовых оснований путем совершенствования методик проектирования и контроля технического состояния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1) провести экспериментальные и теоретические исследования работы усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах грунтовых массивов и установить закономерности изменения диаметров раскатанных скважин и коэффициентов пористости грунтов;

2) установить закономерности изменения деформационных характеристик усиленного грунтового массива от шага расстановки раскатанных скважин и начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта;

3) разработать новый метод расчета увеличения деформационных характеристик усиленного грунтового массива и принцип конструирования основания, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах;

4) создать новую модификацию конструкции раскатывающего рабочего органа для усиления грунтов с повышенным показателем текучести;

5) разработать рекомендации по контролю технического состояния основания при его усилении набивными сваями в раскатанных скважинах.

Методология и методы исследования. Методологической основой для решения задач является системный подход, включающий проведение натурного и численного моделирования. Натурное моделирование проводилось на полномасштабных моделях усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах грунтовых массивов на строительных площадках г. Новосибирска. Расчет напряженно-деформированного состояния усиленных грунтовых массивов выполнен с использованием метода конечных элементов в программном комплексе *MIDAS*.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) установлены закономерности изменения диаметра раскатанной скважины, модуля деформации усиленного массива, коэффициента пористости уплотненного грунта при усилении глинистых грунтов с числами пластичности от 4 до 12, показателем текучести от 0 до 0,75 и коэффициентом пористости от 0,650 до 0,850 с использованием раскатывающего рабочего органа с неподвижными катками;

2) разработан новый метод расчета увеличения деформационных характеристик усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах грунтового массива, который содержит закономерности изменения физико-механических характеристик массива от шага раскатки скважин и начальных значений коэффициента пористости (в интервале от 0,650 до 0,850) и показателя текучести (в интервале от 0 до 0,75) грунта;

3) разработаны рекомендации по контролю технического состояния усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах основания;

4) разработана полезная модель раскатчика, позволяющего создавать набивные сваи в раскатанных скважинах в грунтах с повышенным показателем текучести за один рабочий цикл с меньшими трудовыми и энергетическими затратами и большей эффективностью, чем при использовании существующих аналогов.

Практическая значимость работы. Проведена модернизация существующей методики проектирования усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах основания, обеспечивающая более точный расчет увеличения деформационных характеристик усиленного массива, включающая алгоритм проектирования, обеспечившая получение новых результатов по теме диссертационной работы.

Результаты исследования отражены в методике, позволяющей выполнять проектирование и осуществление усиления грунтов основания, включающей рекомендации по инструментальному и технологическому контролю технического состояния усиленного основания. Разработана полезная модель устройства, позволяющая расширить границы применения метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах для создания усиленных оснований.

Совершенствованный метод усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах внедрен при проектировании и строительстве многоэтажных жилых домов в г. Новосибирске.

Положения, выносимые на защиту:

1) результаты натурного моделирования грунтовых массивов, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах, в виде закономерностей изменения их параметров;

2) результаты численного моделирования грунтовых оснований, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах;

3) совершенствованная методика проектирования усиления грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах, содержащая новый метод расчета увеличения деформационных характеристик усиленного массива и новый принцип конструирования основания, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах;

4) рекомендации по контролю технического состояния основания при усилении набивными сваями в раскатанных скважинах;

5) полезная модель раскатчика скважин, позволяющего создавать набивные сваи в раскатанных скважинах в грунтах с повышенным показателем текучести за один рабочий цикл.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов подтверждается:

- применением поверенного и сертифицированного оборудования и средств измерения при выполнении исследования;

- применением полевых методов определения деформационных характеристик грунтовых массивов;

- воспроизводимостью результатов, подтвержденных значительным объемом проведенных экспериментов;

- применением методики исследования, основанной на использовании современных средств обработки данных;

- результатами внедрения предложенных решений при проектировании на строительных площадках г. Новосибирска.

Положения диссертационной работы обсуждались на Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию образования кафедры Геотехники СПбГАСУ (механики грунтов, оснований и фундаментов ЛИСИ) и 290-летию российской науки «Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение» (Россия, Санкт-Петербург, 2014 г.), VIII Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» в рамках года науки Россия–ЕС по направлению «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (Россия, Новосибирск, 2014 г.); 71-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГАСУ с международным участием (Россия, Санкт-Петербург, 2015 г.); XIII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященной памяти профессора Г. М. Шахунянца (Россия, Москва, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «Транспорт–2016» (Россия, Ростов-на-Дону, 2016 г.); IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» по направлению «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (Россия, Новосибирск, 2016 г.).

Личный вклад автора состоит:

- в разработке и реализации программы экспериментальных и теоретических исследований;

- установлении закономерности изменения диаметра раскатанной скважины от начальных значений коэффициента пористости (в интервале от 0,650 до 0,850) и показателя текучести (в интервале от 0 до 0,75) для глинистых грунтов с числами пластичности от 4 до 12;

- установлении закономерности изменения модуля деформации усиленного грунтового массива от шага набивных свай в раскатанных скважинах и начальных значений коэффициента пористости (в интервале от 0,650 до 0,850) и показателя текучести (в интервале от 0 до 0,75) для глинистых грунтов с числами пластичности от 4 до 12;

- установлении закономерности изменения коэффициента пористости глинистого грунта с числами пластичности от 4 до 12 при его усилении набивными сваями в раскатанных скважинах;

- совершенствовании методики проектирования усиления грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах;

- разработке рекомендаций по контролю технического состояния основания при усилении грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах;

- научном обосновании и разработке полезной модели раскатчика скважин, позволяющего создавать набивные сваи в грунтах с повышенным показателем текучести за один рабочий цикл, защищенного патентом РФ в соавторстве с научным руководителем канд. техн. наук, доц. А. Л. Ланисом и старшим научным сотрудником НИЛ «Геология, основания и фундаменты» ФГБОУ ВО СГУПС В. Ф. Скоркиным.

Публикации и изобретения. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в восьми печатных работах общим объемом 6,56 печ. л. (в том числе авт. 4,85 печ. л.), среди них четыре работы объемом 4,06 печ. л. (в том числе авт. 2,98 печ. л.) – в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России. По результатам исследований получен патент РФ на полезную модель раскатчика скважин.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Работа изложена на 167 страницах, содержит 61 рисунок и 23 таблицы. Список литературы включает 134 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертационной работы выполнен обзор наиболее применяемых методов усиления грунтов основания зданий и сооружений в условиях городской застройки. Проведен анализ существующих способов усиления оснований, позволяющих уменьшить деформируемость грунтов, определены их пре-

имущества и недостатки. Наибольший интерес для исследования представляет метод раскатки скважин, который позволяет выполнять усиление грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах.

Скважины образуются с помощью специального рабочего органа (раскатчика скважин). Процесс образования скважины при раскатке происходит без выемки грунта на поверхность в отличие от шнекового бурения. Образованные методом раскатки скважины заполняются инертным материалом (бетоном, твердеющим раствором, песком, щебнем и т. п.).

Повышение деформационных и прочностных характеристик усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах грунтового массива происходит за счет армирования вертикальными более прочными и менее сжимаемыми (в сравнении с грунтом) элементами и глубинного уплотнения грунтов в околосвайном пространстве.

Вопросами, связанными с глубинным уплотнением грунта, занимались Б. И. Дидух, В. А. Дубровский, А. А. Вайгандт, В. Г. Галицкий, Э. К. Кузахметова, В. Д. Лис, Р. М. Нарбут, А. Н. Перменов, Ю. Е. Пономаренко, А. Н. Саурин, В. Г. Федоровский, В. И. Феклин, В. В. Харченко, V. Fernando, J. Grabe, G. T. Houlby, В. Namidi и др. В нашей стране вопросами армирования грунтов занимались Ю. М. Абелев, В. В. Аскалонов, Е. С. Ашпиз, С. Г. Богов, В. В. Виноградов, С. Д. Воронкевич, Г. Н. Жинкин, В. Ф. Калганов, А. Ф. Колос, С. Я. Луцкий, М. Н. Першин, Б. А. Ржаницин, А. Н. Токин, а за рубежом – А. Обсон, Л. Казагранде, Н. М. Abuel-Naga, D. T. Bergado, P. V. Palmeira, N. Tura, Paul T. и др.

Метод усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах позволяет выполнять работы по усилению без негативного влияния на расположенные поблизости здания и сооружения. Данный метод достаточно прост в исполнении, кроме того, он обладает низкой стоимостью производства работ в сравнении с устройством свайных фундаментов и инъекционными методами усиления.

Между тем, основным препятствием для широкого применения метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах является отсутствие расчетно-теоретической базы, позволяющей выполнять расчет изменения физико-механических характеристик усиленного грунтового массива за счет глубинного уплотнения грунта и работы набивных свай. Отсутствуют критерии оценки качества уплотнения грунтов в зависимости от конструкции рабочего органа, шага расстановки скважин, начальных значений физических характеристик грунта. Отсутствуют критерии выбора принципиального типа раскатчика скважин. Требуют уточнения методики расчета и контроля технического состояния усиленного основания с использованием технологии раскатки скважин.

Поиск ответов на перечисленные вопросы, направленных на повышение качества устройства оснований путем усиления грунтов набивными сваями в раска-

таных скважинах, важен и актуален для развития сферы строительства зданий и сооружений.

Учитывая специфику решаемых задач (определение деформационных характеристик усиленных грунтовых массивов), исследовательские работы проведены с использованием двух способов моделирования – натурального и численного. Натурные эксперименты позволили создать цифровую модель усиленного массива, используемую при дальнейшем численном моделировании. Корреляционный анализ позволил сделать вывод об адекватности разработанной цифровой модели и оценить достоверность полученных результатов численного моделирования.

Во второй главе представлены результаты полевых экспериментов, проведенных в ходе натурального моделирования. Состав работ, включающий три блока, представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Состав экспериментальных исследований

Проведение *первого блока* экспериментов направлено на выявление принципиальной конструкции раскатчика скважин, позволяющего выполнять работы по усилению грунтов с меньшими временными и, как результат, трудовыми затратами. Эксперименты выполнялись с применением двух типов раскатчиков – РС-250 и ГРО-250 (рисунок 2). Принципиальное отличие второго устройства от первого заключается в неподвижности его катков. Оценка эффективности применения каждого раскатывающего рабочего органа выполнялась путем сопоставления времени раскатки.

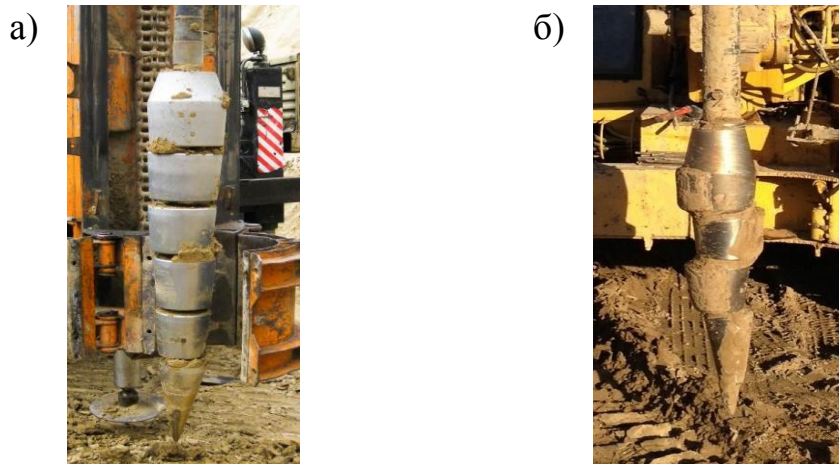


Рисунок 2 – Рабочие органы, используемые в экспериментах:
a – РС-250; *б* – ГРО-250

Результаты экспериментов, представленные на рисунке 3, позволили сделать вывод, что применение грунтоуплотняющего рабочего органа с неподвижными катками ГРО-250 позволяет выполнять работы по раскатке скважин в среднем в 4,5 раза быстрее, чем при использовании раскатчика скважин с подвижными катками РС-250. В связи с чем все дальнейшие исследования выполнялись с использованием ГРО-250.

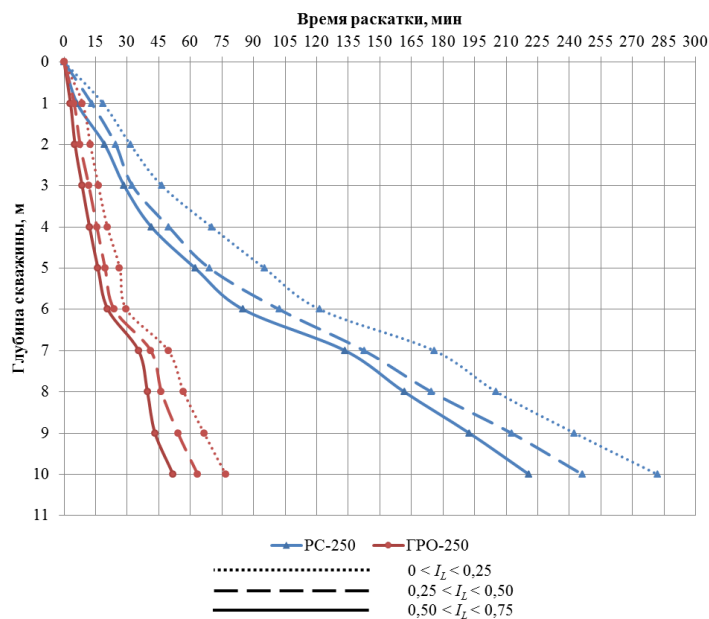


Рисунок 3 – Осредненный график, отражающий затраты времени на раскатку одной десятиметровой скважины с применением различных типов раскатывающих рабочих органов

Второй блок экспериментов основан на многофакторном анализе усиленных оснований и включает в себя серию экспериментов по определению влияния начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести глинистого грунта на геометрические параметры раскатанных скважин и деформационные характеристики усиленного грунтового массива. В качестве измеряемых величин приняты модуль деформации усиленного массива и диаметры раскатанных скважин.

Определение влияния грунтовых условий на диаметры образуемых раскатанных скважин выполнялось получением соответствующих закономерностей. Определение модуля деформации усиленных грунтовых массивов выполнялось с помощью полевых испытаний грунтов статическими нагрузками с помощью плоского штампа. Для испытаний был использован круглый штамп площадью $A = 5\ 000\ \text{см}^2$. Фото установки штампового испытания приведено на рисунке 4.



Рисунок 4 – Установка штампового испытания

Для повышения достоверности получаемых в ходе исследований результатов все испытания выполнялись на полномасштабных моделях в полевых условиях на строительных площадках города Новосибирска. Эксперименты проводились в глинистых грунтах от твердой до мягкопластичной консистенции с числами пластичности от 4 до 12. Схема экспериментов приведена на рисунке 5.

Код	e	Код Глубина, м	Код					
			1	2	3	4	5	
1	0,650	1	0...0,25					
		2	0,25...0,37			3	4	
		3	0,37...0,50	1				5
		4	0,50...0,63		2			
		5	0,63...0,75					
2	0,700	1	0...0,25					
		2	0,25...0,37		7			
		3	0,37...0,50			8	9	
		4	0,50...0,63	6				10
		5	0,63...0,75					
3	0,750	1	0...0,25					
		2	0,25...0,37	11	12			
		3	0,37...0,50			13	14	
		4	0,50...0,63					15
		5	0,63...0,75					
4	0,800	1	0...0,25					
		2	0,25...0,37	16				20
		3	0,37...0,50		17	18		
		4	0,50...0,63				19	
		5	0,63...0,75					
5	0,850	1	0...0,25					
		2	0,25...0,37					25
		3	0,37...0,50	21				
		4	0,50...0,63		22	23	24	
		5	0,63...0,75					

e – коэффициент пористости грунта (до раскатки); I_L – показатель текучести грунта;
глубина – глубина, на которой определена контролирующая величина

Рисунок 5 – Схема проведения экспериментальных исследований по блоку 2

Исследования выполнялись на основе трехфакторного дисперсионного анализа по методу латинских квадратов с использованием в качестве основы грунтовых массивов, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах. Графики, отражающие влияние исследуемых параметров на модуль деформации грунтовых массивов и диаметр раскатанных скважин приведены на рисунке 6.

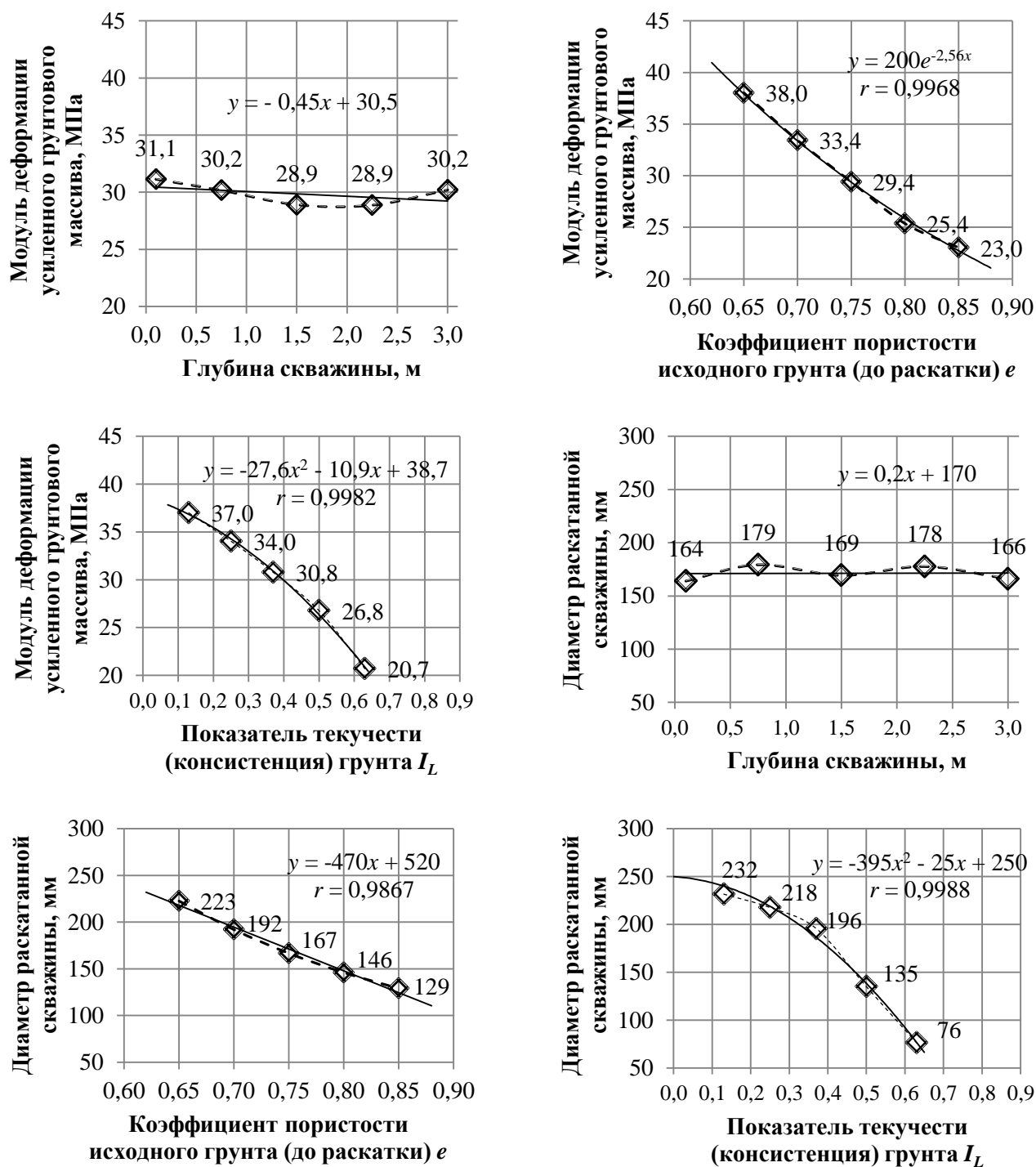


Рисунок 6 – Графики, отражающие влияние исследуемых параметров на модуль деформации усиленного грунтового массива и диаметр раскатанных скважин

Основное влияние на диаметр и модуль деформации оказывают два из трех исследуемых фактора. Изменение диаметров скважин и модулей деформации по глубине усиления при прочих равных факторах незначительно и носит шумовой

характер, в связи с чем можно сделать вывод, что при проектировании усиления основное внимание следует уделять равномерности изменения грунтовых условий в усиливаемой зоне, а не общей глубине усиления.

Результирующее влияние на деформационные характеристики оказывают грунтовые условия – коэффициент пористости и консистенция грунта, причем в большей степени негативное влияние на изменение диаметров скважин оказывает консистенция грунта. В глинистых грунтах от пластичной до мягкопластичной консистенции происходит значительное сужение диаметра скважин – до 70 %. Интенсивное уменьшение диаметров, начинается с показателя текучести $I_L = 0,5$. Это говорит о том, что в данных грунтовых слоях уменьшается поперечное сечение набивных свай, сопровождающееся перераспределением напряжений на окружающий уплотненный грунт. Это прослеживается на графике изменения модуля деформации. В данных грунтовых условиях за счет работы уплотненного грунта в массиве нет ярко выраженного снижения модуля деформации, однако общее его уменьшение достигает 45 %. Следовательно, в таких грунтах для снижения деформаций основания необходимо уменьшать шаг раскатки скважин.

Изменение диаметра раскатанных скважин в зависимости от коэффициента пористости уплотняемых грунтов может быть описано линейной функцией. В менее плотных грунтах происходит уменьшение диаметров раскатанных скважин почти в два раза, что сопровождается уменьшением поперечного сечения набивных свай. При этом уменьшение модуля деформации усиленного массива с увеличением коэффициента пористости исходных грунтов может быть описано экспоненциальной функцией, приближенной к естественной зависимости модуля деформации грунта от коэффициента пористости. Это говорит о том, что при столь существенном влиянии физических характеристик грунтов на фактические диаметры скважин, отдельное внимание следует уделить качеству выполняемых работ по раскатке.

Полученные значения модулей деформации усиленных оснований определены в границах упругопластической фазы деформирования грунта. Это значит, что при прогнозировании усиления на основе полученных зависимостей деформации грунта не перейдут в фазу сдвигов.

Третий блок экспериментов основан на статистической обработке материалов определения физико-механических характеристик уплотненных раскаткой грунтов с установлением соответствующих зависимостей, необходимых для решения вопроса, который связан с разработкой цифровой модели усиленного массива при численном моделировании, максимально полно отражающей внутренние процессы его работы.

Исследования по третьему блоку проводились в несколько этапов и заключались в следующем:

- 1) на каждом опытном участке производилась раскатка скважин глубиной до 4 м;
- 2) раскатанные скважины заполнялись грунтоцементным раствором с тщательным вибротрамбованием;
- 3) вскрытие шурфов глубиной 2,5 м с отбором монолитов уплотненных грунтов (рисунок 7);
- 4) исследование монолитов в лаборатории, где определялись плотности и влажность уплотненных грунтов.



Рисунок 7 – Шурф, вскрытый около набивных свай

В результате исследований глинистых грунтов от твердой до мягкопластичной консистенции с числами пластичности от 4 до 12 были определены плотности и коэффициенты пористости уплотненных грунтов на расстоянии от 20 до 50 см от оси набивной сваи.

Анализ полученных значений позволил выделить зоны с наибольшим, умеренным и минимальным эффектом уплотнения. Для супесей в зависимости от консистенции такие зоны распространены в интервалах 15...22, 22...30 и 30...50 см соответственно. Для суглинков аналогичные зоны расположены в интервалах 15...20, 20...25, 25...50 см. Влияние раскатки на расстоянии двух диаметров скважины от оси уже незначительно. Эффективность уплотнения напрямую зависит от консистенции грунта. С повышением содержания поровой воды (с увеличением показателя текучести) в грунтах эффективность их уплотнения снижается.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований по методу наименьших квадратов позволила получить аппроксимирующую функцию изменения коэффициента пористости уплотненного грунта.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты численного моделирования. Моделирование работы грунтов основания, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах, выполнялось в программном комплексе *MIDAS*. Задача численного моделирования состоит в определении закономерностей изменения деформационных характеристик усиленного массива от шага расстановки раскатанных скважин и начальных значений коэффициента пористости (в интервале от 0,650 до 0,850) и показателя текучести (в интервале от 0 до 0,75) глинистых грунтов. Решение данной задачи выполнялось в два этапа.

На первом этапе в программном комплексе моделировались усиленные грунтовые массивы с приложением статических нагрузок. На этом этапе моделировалось напряженно-деформированное состояние грунтов как при испытаниях статическими нагрузками плоским штампом, которые выполнялись при экспериментальных исследованиях по главе 2. Таким образом, в цифровой модели воссоздавались штамповые испытания. Далее выполнялась оценка достоверности полученных результатов и устанавливалась адекватность цифровой модели.

На втором этапе проводились исследования цифровой модели усиленного массива при различных шагах расстановки набивных свай (раскатанных скважин). К цифровой модели прикладывались нагрузки, а затем определялась осадка. Далее расчетным способом определялся модуль деформации усиленного массива и производился анализ результатов численного моделирования.

Этапы проведения численного моделирования приведены на рисунке 8.

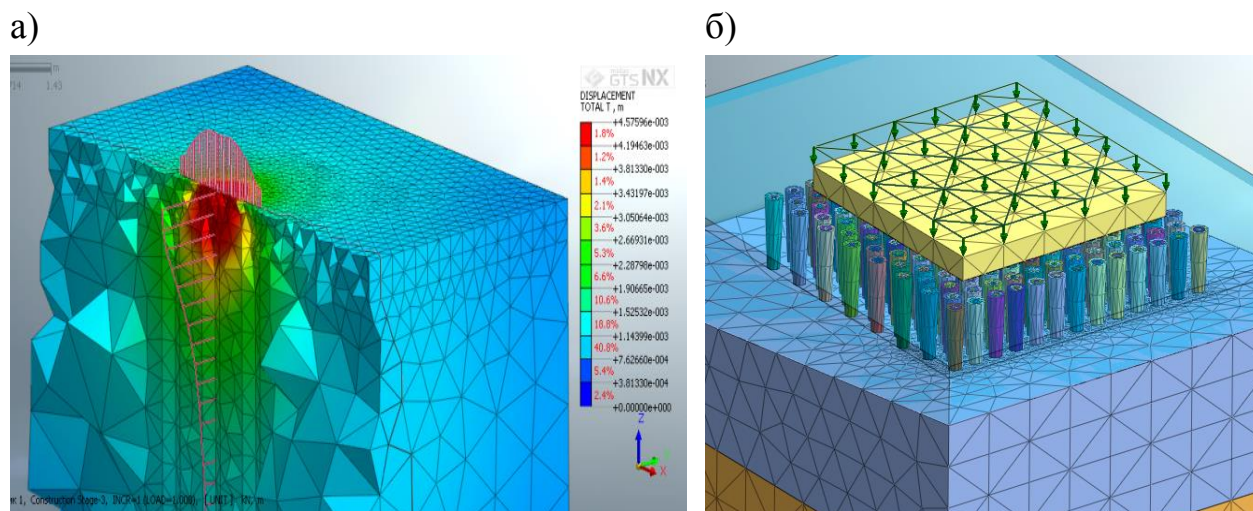


Рисунок 8 – Численное моделирование усиленного основания:

а – моделирование штамповых испытаний; *б* – моделирование работы усиленного основания при варьировании шага расстановки набивных свай

Оценка соответствия данных численного и натурного моделирования выполнена сравнением критерия Фишера, определенного соотношением дисперсий соответствующих выборок, с критическим значением данного критерия, определенным при доверительной вероятности 0,95. Значения критериев Фишера, а также полученные графические зависимости отображены на рисунке 9.

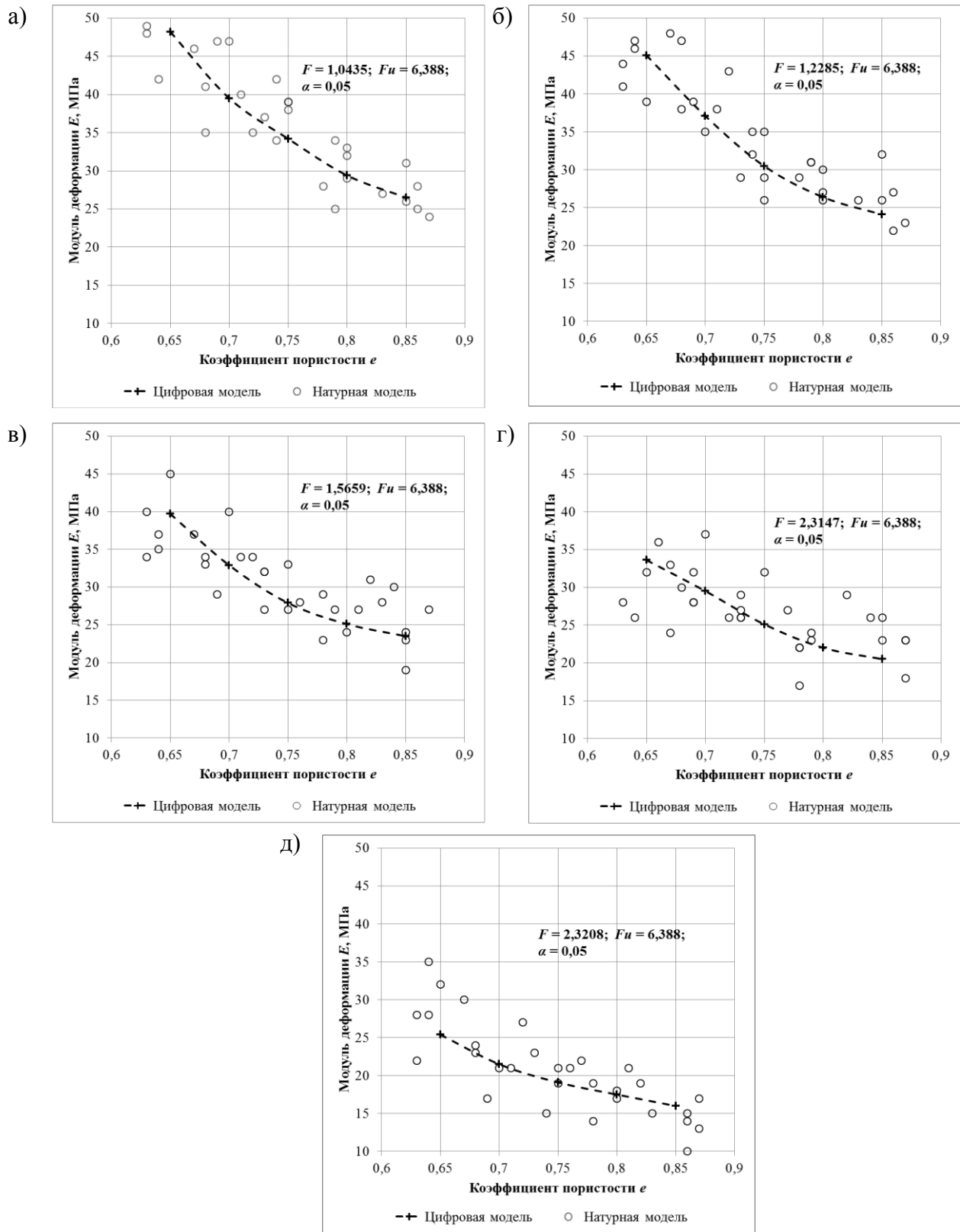


Рисунок 9 – Графики изменения модуля деформации усиленных грунтовых массивов в зависимости от коэффициента пористости исходного грунта:

а – в грунтах с показателем текучести $0 < I_L \leq 0,25$;

б – в грунтах с показателем текучести $0,25 < I_L \leq 0,37$;

в – в грунтах с показателем текучести $0,37 < I_L \leq 0,50$;

г – в грунтах с показателем текучести $0,50 < I_L \leq 0,63$;

д – в грунтах с показателем текучести $0,63 < I_L \leq 0,75$

Полученные закономерности отражают работу усиленного грунтового массива в глинистых грунтах. Уменьшение модуля деформации усиленного массива при увеличении коэффициента пористости грунта с показателем текучести от 0 до 0,5 может быть описано экспоненциальной функцией. При этом для грунтов с показателем текучести от 0,5 до 0,75 это уменьшение может быть описано уже линейной функцией. Это говорит о том, что для таких грунтов эффект от уплотнения раскаткой уменьшается с увеличением содержания поровой воды, а снижение деформативности массивов достигается за счет сгущения расстановки набивных свай в раскатанных скважинах.

Корреляционный анализ результатов натурного и численного моделирования показал, что общая тенденция нарастания деформаций усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах массива повторяется для обоих случаев. Наблюдается некоторое смещение графика цифровой модели в сторону увеличения деформаций, однако величина данного смещения находится в пределах 5 %, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной цифровой модели.

Для оценки влияния шага расстановки набивных свай (раскатанных скважин) на модуль деформации усиленного массива для глинистых грунтов с коэффициентом пористости от 0,650 до 0,850 и показателем текучести от 0 до 0,75 были построены соответствующие поверхности, которые представлены на рисунках 10 и 11.

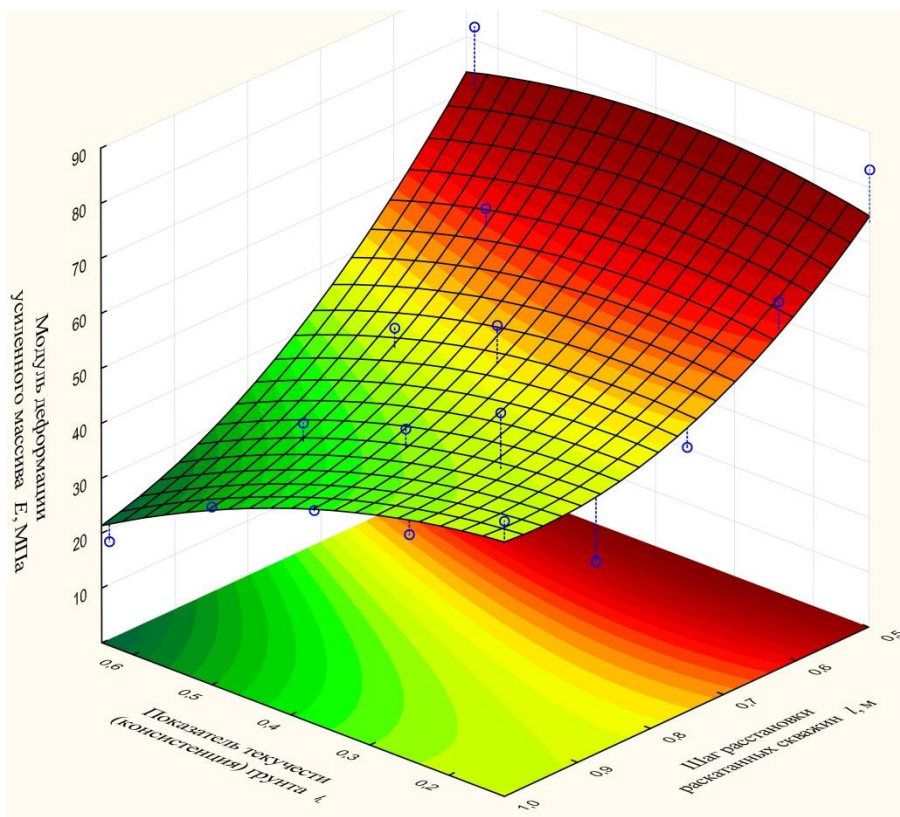


Рисунок 10 – Поверхность влияния шага расстановки раскатанных скважин на модуль деформации усиленного массива в зависимости от показателя текучести грунта

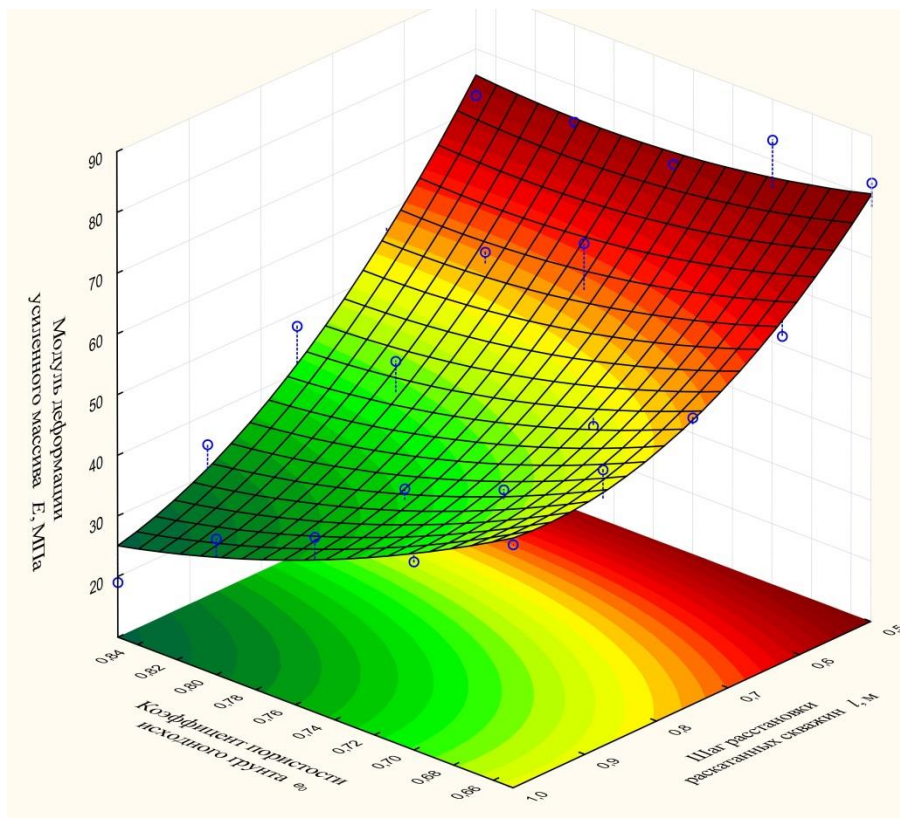


Рисунок 11 – Поверхность влияния шага расстановки раскатанных скважин на модуль деформации усиленного массива в зависимости от коэффициента пористости грунта

В ходе численного моделирования усиленного массива было установлено, что большую часть нагрузки воспринимают набивные сваи. Варьирование шагом расстановки набивных свай (раскатанных скважин) напрямую влияет на деформируемость усиленного основания и предельную осадку.

Статистическая обработка результатов моделирования позволила выявить зависимость изменения модуля деформации от шага раскатанных скважин, которая может быть описана степенной функцией. Варьирование таким параметром усиления, как шаг расстановки скважин, позволяет значительно повысить модуль деформации усиленного массива в сравнении с исходными значениями (с 39,5 до 82,3 МПа).

Полученные материалы позволяют выполнить расчет увеличения деформационных характеристик усиленных массивов в глинистых грунтах с числами пластичности от 4 до 12, показателем текучести от 0 до 0,75 и коэффициентом пористости от 0,650 до 0,850.

В четвертой главе диссертационной работы усовершенствована методика проектирования усиления грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах. Используя результаты, полученные при выполнении исследований, разработан алгоритм, позволяющий выполнять расчет увеличения деформационных характеристик усиленного грунтового массива. Алгоритм предполагает использование закономерностей изменения физико-механических характеристик

грунтов при их усилении набивными сваями в раскатанных скважинах. Учтено влияние диаметров раскатанных скважин, упругой работы грунта после его раскатки, шага расстановки набивных свай.

Поскольку все исследования проведены при упругопластической работе грунта (в линейной стадии деформирования), то расчет основания фундаментов сооружения должен выполняться по второй группе предельных состояний. В результате проведенного расчета определяются требуемые характеристики усиленного грунтового массива, при которых возможна эксплуатация сооружения без сверхнормативных деформаций основания и будут выполняться требования нормативных документов по проектированию оснований фундаментов.

Графическое изображение алгоритма проектирования усиления грунтов основания представлено на рисунке 12.



Рисунок 12 – Алгоритм проектирования усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах

Соблюдение параметров усиления позволяет добиться запроектированных результатов. Кроме того, поскольку работы по усилению грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах в большей степени являются скрытыми, то для обеспечения необходимого результата от усиления требуется выполнение контроля технического состояний основания, содержащего мероприятия по входному, операционному, приемочному контролю качества и геотехническому монито-

рингу. В рамках исследования разработаны рекомендации по контролю технического состояния основания при усилении грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах. Общая схема проведения входного, операционного, приемочного контроля и геотехнического мониторинга приведена на рисунке 13.

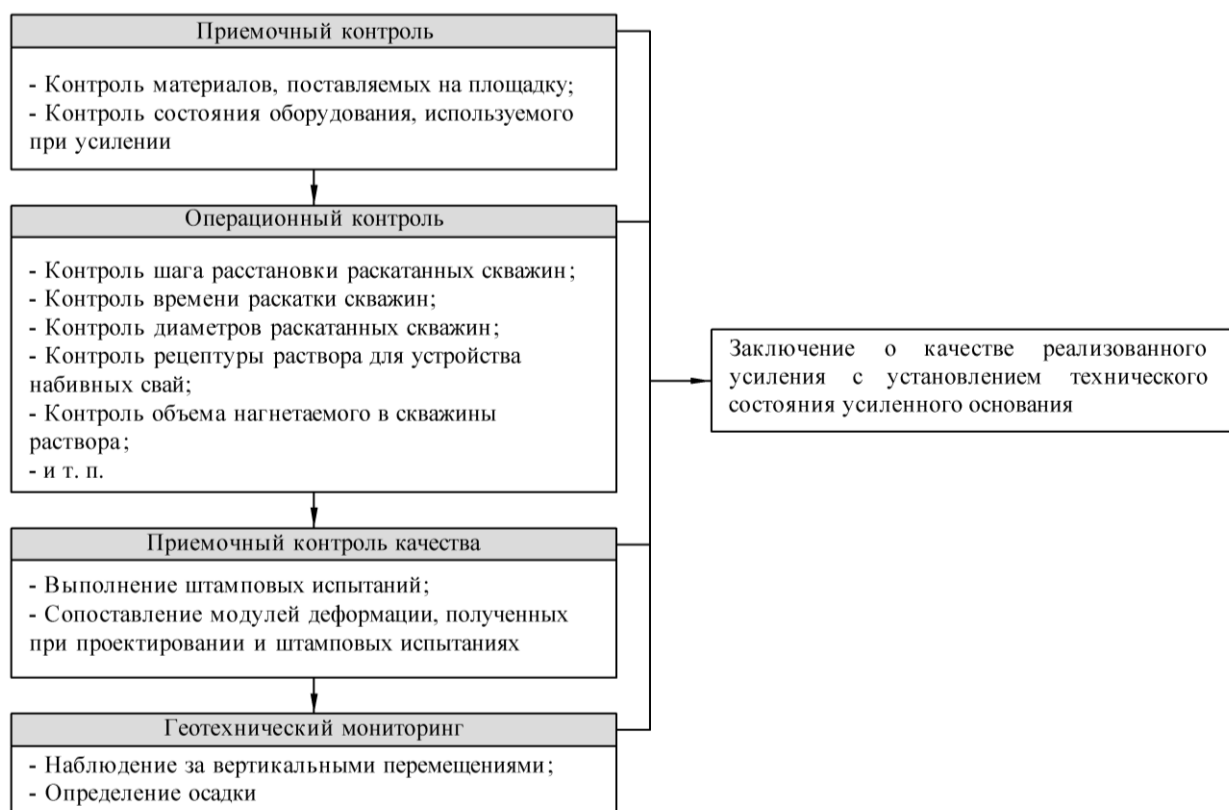


Рисунок 13 – Схема проведения входного, операционного, приемочного контроля и геотехнического мониторинга

В результате экспериментальных исследований по усилению глинистых грунтов мягкопластичной консистенции была разработана модификация раскатывающего рабочего органа. В новом устройстве, содержащем полый вал для подачи строительного раствора, предусмотрен теряемый наконечник (рисунок 14). Особенностью и главным преимуществом данного устройства является большее в сравнении с аналогами сечение выходного отверстия для подачи строительного раствора. Был получен патент РФ на полезную модель устройства.

В отличие от существующих аналогов строительный раствор под давлением в нагнетаемой системе поступает в скважину через полый вал по мере извлечения раскатчика из скважины, за счет увеличенного полезного сечения для подачи строительного раствора уменьшается время заполнения скважины.

Использование наконечника с теряемой головной частью при извлечении устройства из скважины и подаче строительного раствора позволяет за меньший срок создавать набивные сваи в раскатанных скважинах.

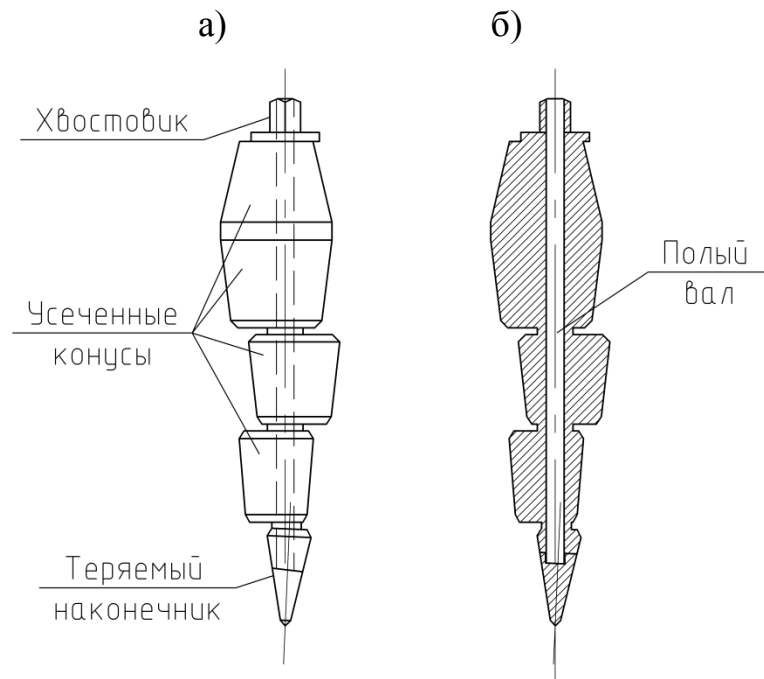


Рисунок 14 – Раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин:
а – общий вид; *б* – продольный разрез

Для оценки эффективности совершенствованной методики проектирования усиления выполнено технико-экономическое сравнение метода усиления грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах с наиболее близкими альтернативными методами устройства фундаментов (рисунок 15). В качестве альтернативных методов рассмотрены варианты устройства свайных фундаментов с различными способами погружения свай, обеспечивающие сопоставимую осадку сооружения. Технико-экономическое сравнение выполнено на примере 25-этажного жилого дома.

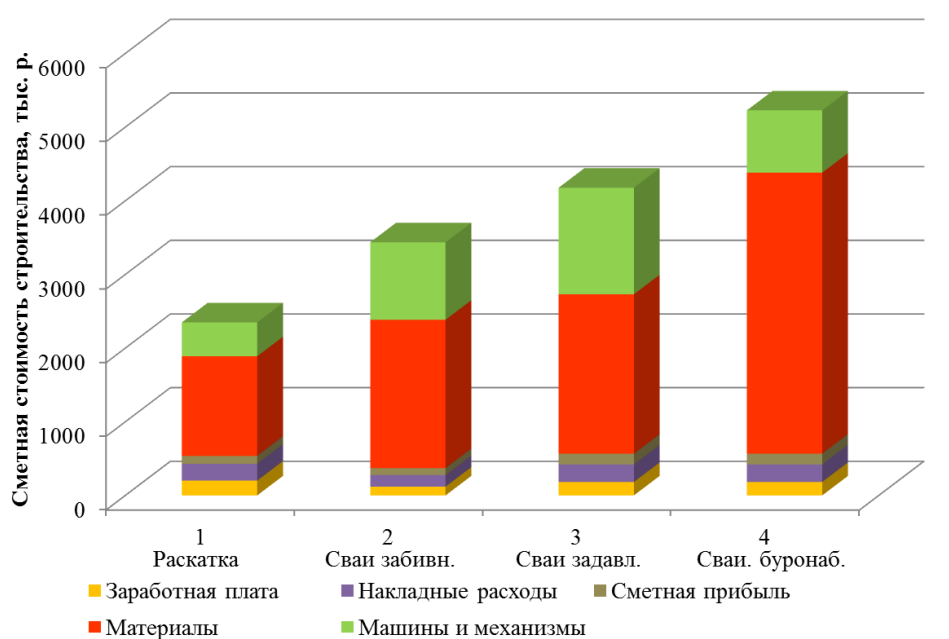


Рисунок 15 – Сметная стоимость различных вариантов устройства фундаментов

В результате выполненных расчетов сметной стоимости устройства основания и свайных фундаментов жилого дома можно увидеть, что вариант с применением метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах при возведении здания является наименее затратным и составил в базовом уровне цен 2 349 122,8 р. (без НДС). Из альтернативных вариантов устройства фундаментов многоэтажного жилого дома наиболее близким по стоимости оказался свайный фундамент с забивными сваями и составил в базовом уровне цен 3 435 532,1 р. (без НДС). Варианты с задавливанием свай или с применением буронабивных свай требуют еще больших экономических вложений. Стоимости строительно-монтажных работ этих вариантов в базовом уровне цен составляют 4 176 467,8 и 5 226 972,0 р. соответственно (без НДС). Экономия капитальных вложений при использовании метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах в сравнении с наиболее близким по стоимости альтернативным способом устройства фундаментов составляет 46 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы была достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Экспериментальные и теоретические исследования работы усиленных грунтовых массивов позволили выявить закономерности изменения их деформационных характеристик. Установлено, что усиление грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах позволяет повысить модуль деформации усиленного массива более чем в два раза – с 39,5 до 83,2 МПа.

2. Получены закономерности изменения коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его усилении набивными сваями в раскатанных скважинах. Согласно полученным закономерностям можно выделить зоны с наибольшим, умеренным и минимальным эффектом уплотнения. Для супесей в зависимости от консистенции такие зоны распространены в интервалах 15...22, 22...30 и 30...50 см от оси раскатанной скважины. Для суглинков аналогичные зоны расположены в интервалах 15...20, 20...25, 25...50 см.

3. Разработан новый метод расчета увеличения деформационных характеристик усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах массива для глинистых грунтов с числами пластичности от 4 до 12, показателем текучести от 0 до 0,75 и коэффициентом пористости от 0,650 до 0,850.

4. Усовершенствована методика проектирования усиления, включающая алгоритм, позволяющий выполнять расчет увеличения деформационных характеристик усиленного массива. По разработанному алгоритму приведен пример проектирования.

5. Разработана полезная модель раскатчика скважин, позволяющего создавать набивные сваи в раскатанных скважинах за один рабочий цикл с меньшими трудовыми и энергетическими затратами и большей эффективностью, чем при использовании существующих аналогов. Данная модификация относится к грун-

тоуплотняющим рабочим органам с неподвижными катками, которые, как показали исследования, позволяют выполнять раскатку скважин в 4,5 раза быстрее, чем раскатчики скважин с подвижными катками.

6. Разработаны рекомендации по контролю технического состояния основания при усилении набивными сваями в раскатанных скважинах.

7. Выполнено обоснование экономической эффективности метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах на примере 25-этажного жилого дома. Применение совершенствованной методики проектирования позволило получить экономию капитальных вложений в размере 46 % по сравнению с наиболее близким альтернативным методом устройства фундаментов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России

1. **Ломов, П. О.** Повышение качества проектирования усиления грунтового основания армированием набивными сваями в раскатанных скважинах [Электронный ресурс] / П. О. Ломов // Наукоедение : интернет-журнал. – 2014. – № 2 (21). – Режим доступа: <http://naukovede-nie.ru/PDF/132TVN214.pdf> (дата обращения 05.10.2014).

2. **Ломов, П. О.** Определение коэффициента пористости грунта, уплотненного методом раскатки скважин / П. О. Ломов // Вест. гражданских инженеров. – 2015. – № 6 (59). – С. 94–100.

3. **Ломов, П. О.** К вопросу определения грунтовых параметров, оказывающих влияние на диаметр раскатанной скважины / П. О. Ломов, А. Л. Ланис // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 92–97.

4. Ланис, А. Л. Сопряжение подходных насыпей с мостами и путепроводами / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, **П. О. Ломов** // Вест. Сиб. гос. автомобильно-дорожной акад. – 2016. – № 2 (48). – С. 110–120.

Публикации в журналах и научных сборниках

5. **Ломов, П. О.** Применение метода усиления грунтов армированием набивными сваями в раскатанных скважинах / П. О. Ломов // Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение : материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию образования каф. геотехники СПбГАСУ (механики грунтов, оснований и фундаментов ЛИСИ) и 290-летию рос. науки / СПбГАСУ. – СПб., 2014. – Ч. 2. – С. 274–279.

6. **Ломов, П. О.** Модификация метода раскатки скважин для слабых водонасыщенных грунтов / П. О. Ломов // Политранспортные системы : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2015. – С. 196–202.

7. Ланис, А. Л. Армирование грунтов раскаткой скважин / А. Л. Ланис, **П. О. Ломов**, О. В. Иванов // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе : материалы Междунар. науч.-прак. конф., посвящ. 80-летию Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2012. – Ч. 1. – С. 342–349.

8. Ланис, А. Л. Инженерная подготовка основания при реконструкции земляного полотна / А. Л. Ланис, А. С. Овчинников, **П. О. Ломов** // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : XIII науч.-техн. конф. с междунар. участием «Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца». – М., 2016. – С. 32–35.

Патенты

9. Патент на полезную модель RU 147223. Раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин / Ланис А. Л., **Ломов П. О.**, Скоркин В. Ф.; заявитель и патентообладатель Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Заявл. 25.04.2014; опубл. 29.09.2014. – 3 с.

Ломов Петр Олегович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА УСТРОЙСТВА ОСНОВАНИЯ ПУТЕМ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ НАБИВНЫМИ СВАЯМИ В РАСКАТАННЫХ СКВАЖИНАХ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения
(технические науки)

Подписано в печать «19» января 2017 г.

печ. л. Тираж экз. Заказ №

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191 тел. (383) 328-03-81. e-mail: bvuv@mail.ru
