

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

На правах рукописи



**Ломов Петр Олегович**

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

05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения»  
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент А. Л. Ланис

Новосибирск – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                           | 4  |
| Глава 1 Анализ существующих методов устройства усиленных оснований для снижения деформативности грунтов.....            | 11 |
| 1.1 Методы усиления грунтов основания фундаментов зданий и сооружений.....                                              | 11 |
| 1.2 Усиление грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах ..                                              | 22 |
| 1.3 Современные методы моделирования усиленных оснований .....                                                          | 28 |
| 1.3.1 Натурное моделирование .....                                                                                      | 29 |
| 1.3.2 Численное моделирование .....                                                                                     | 31 |
| 1.4 Формирование цели и задач исследования .....                                                                        | 33 |
| Глава 2 Натурное моделирование грунтовых массивов, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах.....              | 35 |
| 2.1 Описание методики проведения натурного моделирования.....                                                           | 35 |
| 2.2 Исследование работы раскатчиков скважин при устройстве усиленных оснований.....                                     | 52 |
| 2.3 Исследование влияния набивных свай в раскатанных скважинах на деформационные свойства грунтового массива.....       | 54 |
| 2.4 Исследование влияния раскатки скважин на физические характеристики уплотняемого грунта.....                         | 70 |
| Выводы по главе 2 .....                                                                                                 | 77 |
| Глава 3 Численное моделирование основания, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах.....                     | 79 |
| 3.1 Методика проведения моделирования.....                                                                              | 79 |
| 3.2 Исследование работы цифровой модели усиленного грунтового массива и корреляционный анализ.....                      | 87 |
| 3.3 Исследование влияния шага набивных свай в раскатанных скважинах на деформационные свойства усиленного массива ..... | 91 |
| Выводы по главе 3 .....                                                                                                 | 96 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Глава 4 Повышение эффективности устройства усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах грунтовых оснований.....             | 98  |
| 4.1 Особенности усиления грунтовых оснований .....                                                                                 | 98  |
| 4.2 Проектирование усиления грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах .....                                       | 100 |
| 4.2.1 Методика проектирования.....                                                                                                 | 100 |
| 4.2.2 Пример проектирования усиления .....                                                                                         | 105 |
| 4.3 Оборудование для усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах.....                                                | 120 |
| 4.4 Контроль технического состояния грунтовых оснований, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах.....                   | 123 |
| 4.5 Экономическая эффективность метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах после его совершенствования ..... | 127 |
| Выводы по главе 4.....                                                                                                             | 132 |
| Заключение.....                                                                                                                    | 134 |
| Список литературы.....                                                                                                             | 136 |
| Приложение 1.....                                                                                                                  | 151 |
| Приложение 2.....                                                                                                                  | 165 |

## ВВЕДЕНИЕ

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, которые сложены грунтами, позволяющими 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 со-



стояния 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. Тура, 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 города 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, а также 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 городе 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.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ УСТРОЙСТВА УСИЛЕННЫХ ОСНОВАНИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ГРУНТОВ

## 1.1 Методы усиления грунтов основания фундаментов зданий и сооружений

Возведение новых строительных объектов – промышленных, транспортных, гражданских зданий и сооружений – на территории городов и в их окрестностях зачастую требует проведения специальных мероприятий, направленных на повышение параметров прочности и деформируемости грунтов основания [48]. В настоящее время в условиях городской застройки для устройства усиленных оснований зданий и сооружений можно выделить несколько наиболее применяемых методов (рисунок 1.1):

- методы, основанные на изменении параметров грунтов при химическом воздействии;
- методы, основанные на изменении параметров грунтов при физическом (механическом) воздействии;
- методы, основанные на армировании грунтов.

При подробном рассмотрении представленных методов можно выделить основные способы усиления.



Рисунок 1.1 – Методы усиления грунтов основания  
в условиях городской застройки

**Методы усиления грунтов, основанные на изменении их параметров при химическом воздействии**, или химические методы усиления, заключаются в искусственном преобразовании грунтов путем их химической обработки различными реагентами. Результатом взаимодействия реагентов и усиливаемого грунта является массив с более высокими структурно-механическими свойствами (в сравнении с грунтом до усиления). В результате воздействия химических веществ грунт приобретает высокую плотность, прочность. Выбор метода усиления зависит от различных задач, определяющих соответствующую область применения усиленного грунта (дорожное строительство, гражданское строительство, горное дело, гидротехническое строительство и пр.).

Усиление осуществляется нагнетанием в грунт через специальные рабочие органы химических растворов, а также в некоторых случаях воздействием на массив электрического тока. Химические растворы после нагнетания с течением времени превращают грунт в камень. Основным критерием в выборе метода усиления является коэффициент фильтрации грунта. При меньших коэффициентах фильтрации, т. е. при худшей проницаемости грунта, сложнее осуществлять нагнетание химических растворов. Усилению химическими методами легче поддаются трещиноватые, несвязные грунты с достаточно высоким коэффициентом фильтрации в отличие от глин и илов, проницаемость которых значительно ниже.

При проектировании мероприятий по усилению грунтовых оснований химическими методами необходимо соблюдать соотношение между размерами частиц выбранного вещества (раствора) и усиливаемого грунта. Вещества с меньшим показателем вязкости легче пропитывают усиливаемые грунты. К наиболее распространенным способам химического усиления (или закрепления) относятся: силикатизация, битумизация, цементация.

Для закрепления песчаных грунтов применяется способ двухрастворной силикатизации, который основан на последовательном нагнетании растворов силиката натрия и хлористого кальция. В ходе химической реакции этих реагентов в порах песчаного грунта выделяется гель кремниевой кислоты, в результате чего грунт достаточно быстро закрепляется. Такое закрепление является долговечным,



поскольку грунт становится водонепроницаемым. Способ однорастворной силикатизации применим для мелкозернистых песчаных грунтов, коэффициент фильтрации у которых составляет от 0,5 до 5 м/сут. При этом может использоваться фосфорная, серная, кремнефтористоводородная кислота, сернокислый алюминий, алюминат натрия. Закрепление просадочных лессовых грунтов выполняется с помощью однорастворной силикатизации с использованием раствора силиката натрия. Закрепление песчаных и лессовых грунтов также возможно применением газовой силикатизации. Она может осуществляться как с предварительной обработкой грунта углекислым газом, так и без нее. Под воздействием углекислого газа раствор силиката натрия отверждается, и закрепляемый грунт приобретает необходимую прочность и водоустойчивость.

Способ смолизации основывается на использовании в качестве отвердителя карбамидной смолы и соляной кислоты. Данный способ применим для закрепления карбонатных песков и используется для гелеобразования растворов щавелевой и кремнефтористоводородной кислот, которые образуют на поверхности карбонатов защитные пленки.

Цементация заключается в скреплении частиц грунта цементным или цементно-грунтовым раствором, нагнетаемым через иньектор в поры грунта. Цементация позволяет преобразовать пористый грунт в сплошной монолитный массив. Цементация чаще всего применяется для закрепления трещиноватых скальных пород, а также гравелистых и песчаных грунтов, коэффициент фильтрации которых составляет от 50 до 200 м/сут.

Методы усиления, основанные на электроосмосе, применяются в глинистых грунтах. При вводе в грунтовые массивы химических растворов глинистый грунт приобретает необходимую водоустойчивость, при этом устраняются его пучинистые свойства. Такие методы применяются для повышения устойчивости откосов железнодорожных выемок (в глинистых грунтах).

У указанных выше методов усиления, основанных на химическом взаимодействии с грунтом, есть существенные недостатки, такие как высокая стоимость исходных реагентов и низкая эффективность в водонасыщенных грунтах. Кроме

того, все существующие методы химического усиления грунтов в той или иной мере на короткое или длительное время загрязняют окружающую среду, хотя это загрязнение носит преимущественно локальный характер и часто ограничивается объемом усиливаемого грунта. При содержании в инъекционных растворах кислот и щелочей очень высоких концентраций, а также токсичных компонентов возможно вредное воздействие этих веществ на окружающий неусиленный грунт и даже атмосферный воздух. Таким образом, в большинстве случаев более широкое распространение получили методы усиления, основанные на физическом взаимодействии с грунтом и армировании.

**Методы усиления грунтов, основанные на изменении их параметров при физическом (механическом) воздействии,** заключаются в уменьшении пористости грунтов, т. е. в их уплотнении. Такие методы уплотнения грунтов характеризуются принципом взаимодействия грунтоуплотняющих рабочих органов машин и уплотняемого грунта. Можно выделить несколько основных способов механического уплотнения грунтов: укатка, вибрирование, трамбование и глубинное уплотнение.

Уплотнение при укатке происходит под действием силы тяжести перекатываемых по поверхности грунта вальцов или колес. Уплотняемый слой грунта при этом приобретает остаточную деформацию. Стоит отметить, что способ укатки затруднен для применения в стесненных условиях из-за малой маневренности и больших габаритов уплотняющих механизмов.

Способ уплотнения грунта вибрированием основывается на передаче механических гармонических колебаний уплотняемым грунтам, при этом рабочий орган находится либо на поверхности уплотняемого грунтового слоя, либо внутри него. Данный способ применяют преимущественно к несвязным и малосвязным грунтам. Связные грунты могут быть уплотнены вибрированием только после их предварительного разрыхления и разрушения этих связей, что требует наличия дополнительного оборудования и значительно усложняет весь процесс уплотнения.

Способ уплотнения грунта трамбованием основывается на передаче грунту нагрузок ударного действия и осуществляется при сбрасывании с определенной высоты специальных рабочих органов трамбовочной машины. При достаточной скорости приложения нагрузки и большой массе рабочего органа обеспечивается уплотнение связных и несвязных грунтов на существенную глубину. Данный способ уплотнения применяется в промышленном строительстве при устройстве грунтовых подушек под основания фундаментов различного технологического оборудования, а также зданий и сооружений.

Методы глубинного уплотнения, известные также как уплотнение грунтовыми сваями, основаны на создании в грунтах вертикальных или наклонных скважин за счет вытеснения грунта в окружающее скважину пространство без его выемки на поверхность. Вопросами, связанными с глубинным уплотнением грунта, занимались Ю. М. Абелев [95], Б. И. Дидух [25], В. А. Дубровский [26], А. А. Вайгандт [16], В. Г. Галицкий [95], Э. К. Кузахметова [38], В. Д. Лис [44], Р. М. Нарбут [61], А. Н. Перменов [72], Ю. Е. Пономаренко [76], А. Н. Саурин [4, 83, 84, 85, 86], В. Г. Федоровский [101], В. И. Феклин [102], В. В. Харченко [104], Н. Brandl [111], E. Dembick [113], V. Fernando [117], J. Grabe [118], G. T. Houlby [122], B. Hamidi [120], E. Heins [118], C. Sagaseta [131], T. Tanaka [133], A. S. Vesic [134], и др.

Глубинное уплотнение производят в слабых грунтовых слоях или на всю глубину сжимаемой толщи оснований. Способы глубинного уплотнения чаще всего применяются при уплотнении рыхлых мелких и пылеватых песков, в том числе с прослойками и линзами связных пылевато-глинистых грунтов. Глубинное уплотнение также эффективно при ликвидации просадочных характеристик грунтов [95].

Глубинное уплотнение грунтов пробивкой заключается в создании в уплотняемом массиве скважины за счет пробивки ударным снарядом [76]. При этом под действием интенсивных динамических нагрузок происходит вытеснение грунта в стороны [104]. Наиболее уплотненная зона при данном способе расположена в забое скважины. Образованные скважины засыпаются местным грунтом, щебнем,

гравийно-песчаной смесью или любым другим инертным материалом с послойным уплотнением тем же снарядами. Шаг расстановки образованных набивных свай может достигать до пяти диаметров скважины [77]. Образованный грунтовой массив в результате уплотнения обладает повышенными прочностными и деформационными характеристиками. За счет частичного выпора грунта при пробивке скважин верхняя часть уплотненного массива, называемая буферным слоем, разуплотняется. После окончания работ по устройству набивных свай этот буферный слой снимают или доуплотняют. Пробивка скважин осуществляется при помощи пневмопробойников или иных аналогичных устройств, работающих по принципу передачи энергии на уплотняющий рабочий орган и его погружению в грунт. Применение пробивки скважин для глубинного уплотнения впервые было предложено Ю. М. Абелевым в первой половине XX в. для устранения просадочных свойств грунтов [95]. Технология глубинного уплотнения грунтов заключалась в забивке свай-сердечника с инвентарным башмаком. После достижения необходимой глубины при забивке сердечник извлекался, а образовавшаяся скважина заполнялась местным грунтом с послойным уплотнением. Диаметр таких пробивных скважин составлял от 30 до 35 см, при этом шаг таких скважин также составлял от 30 до 35 см.

В дальнейшем была разработана технология глубинного уплотнения, применяемая преимущественно для просадочных грунтов. Она заключается в использовании энергии взрывов для образования скважин. В результате взрыва зарядов, опущенных в предварительно пробитые скважины-шпурсы, происходит расширение их диаметра с 0,8 до 45 см.

Учитывая значительные динамические воздействия, высокий уровень шума, а также в отдельных случаях необходимость использования взрывчатых веществ, уплотнение грунтов перечисленными выше способами, несмотря на более высокую экологичность, не получает широкого распространения в условиях плотной городской застройки.

**Методы усиления грунтов, основанные на армировании,** позволяют создавать грунтовые массивы с повышенными прочностными и деформационными

характеристиками. Армирующие элементы обладают более высокими параметрами прочности и меньшими параметрами деформативности в сравнении с окружающим их грунтом. Вопросами армирования грунтов занимались такие ученые как: Ю. М. Абелев [95], Е. С. Ашпиз [3], Ю. А. Багдасаров [4], В. Ф. Барвашов [7], С. Г. Богов [12], В. А. Богомолов [13], В. В. Виноградов [79], М. Я. Крицкий [35], В. И. Крутов [36], А. Л. Ланис [42], Л. В. Нуждин [64], С. А. Овчинников [67], А. Н. Саурин [83], В. Ф. Фроловский [79], Н. М. Abuel-Naga, D. T. Bergado, P. V. Palmeira, N. Тура, Paul T. и др.

Устройство армированного массива может достигаться как путем погружения готовых армоэлементов, так и путем их создания в усиливаемых грунтах. Нагрузка на усиленный данным методом грунтовый массив передается через буферный распределительный слой. Армоэлементы, как правило, конструктивно не сопряжены с фундаментом сооружения. Армоэлементы меняют условия деформирования основания, взаимодействуя с грунтом.

В зависимости от совместной работы армоэлементов и окружающих грунтов, способа их создания в основании можно выделить несколько типов армирования, применяемых в практике гражданского строительства в условиях городской застройки:

- 1) забивные (задавливаемые) сваи;
- 2) буронабивные сваи;
- 3) струйная технология.

Также к перечисленным выше типам можно добавить комбинированные способы усиления, заключающиеся не только в армировании оснований, но и в уплотнении грунтов:

- 1) напорная инъекция;
- 2) раскатка скважин.

Армирование грунтов готовыми вертикальными малосжимаемыми элементами (сваями) является продвинутой и прогрессивной технологией устройства усиленных массивов. В практике строительства готовые сваи погружают в грунт с помощью сваебойных установок, вибропогружателей, вибромолотов под действи-

ем вдавливающей статической нагрузки или завинчиванием. Процессы, происходящие в грунтах от погружения свай, были исследованы такими учеными, как: П. А. Аббасов [1], В. А. Барвашов [6], А. А. Бартоломей [8, 9], А. Л. Бирюков [10], Л. М. Бобылев [11], С. Г. Богов [12], И. Л. Болондина [14], В. Н. Голубков [18], Б. В. Гончаров [20], Е. М. Грязнова [21], Б. И. Далматов [22], А. М. Дзагов [24], Б. И. Дидух [25], В. А. Кох [34], А. В. Кузнецов [39], С. В. Татаринев [91], В. М. Улицкий [94], В. И. Цой [105], Ямонше, Жюль Анше Саньон [108], F. Esu [116], C. R. Leemon [124], D. R. Levacher [125], V. Nishida [127], F. Randolph [129], M. L. C. Reese [130], I. Smith [132], и др.

Свая при погружении вытесняет некоторый объем грунта, в результате чего она формирует около себя уплотненную зону, при этом под нижним концом сваи также формируется уплотненная зона на глубину до четырех диаметров. Учитывая технологические особенности устройства свайных оснований при забивке свай, существуют ограничения по их применению. Несмотря на высокую эффективность армирования оснований сваями, в условиях плотной городской застройки существуют ограничения по применяемым технологиям погружения. Любые способы, основанные на погружении готовых свай, создают значительное динамическое воздействие на расположенные рядом строительные объекты. В результате этого применение подобных методов затруднено в условиях плотной городской застройки.

Широко распространен метод устройства оснований с использованием буронабивных свай. Сваи при этом изготавливаются непосредственно в грунте. Применение буронабивных свай при устройстве оснований фундаментов зданий и сооружений в лессовых просадочных грунтах I и II типов позволяет уменьшить деформации оснований за счет исключения просадок, а также позволяет обеспечить нормальную эксплуатацию сооружений в условиях аварийного замачивания. Буронабивные сваи используются также в сильносжимаемых водонасыщенных грунтах для снижения деформаций и обеспечения надежности зданий и сооружений. Для устройства буронабивных свай используется бетон и различные твердеющие растворы на основе портландцемента и иных вяжущих. Технология приме-

нения буронабивных свай имеет существенные недостатки: это низкая производительность и необходимость создания грунтовой пробки большой мощности (либо создания противодавления с помощью воды или глинистого раствора) во избежание выпора грунта в скважину.

К буронабивным сваям можно также отнести и песчаные сваи. Использование таких свай для усиления слабых грунтовых оснований приведено в работах [36, 37]. Песчаные сваи устраиваются в вертикальных скважинах из чистого крупного песка, а в некоторых случаях с использованием оболочки из геотекстиля. Длина таких песчаных свай устанавливается исходя из глубины залегания слабых грунтовых слоев. Технология изготовления сваи заключается в погружении в грунт стальной трубы буровым или виброспособом, устройстве в ней рукава из геотекстиля и заполнения его песком.

В практике строительства также известен способ изготовления свай по струйной технологии *Jet grouting*. Струйная технология основана на использовании высокоскоростной струи жидкости в качестве инструмента для создания усиленного грунтового массива [82]. Рассматриваемый способ позволяет создавать в грунтовой толще противофильтрационные тонкие завесы, закрепленные массивы, столбы, грунтоцементные сваи с помощью специального устройства, снабженного рабочим органом для получения высоконапорной (до 40 МПа) тонкой (диаметром от 0,3 до 0,4 мм) водовоздушной струи, разрыхляющей грунт, с одновременной подачей цементного молока. Еще в конце XX в. в нашей стране, а также в некоторых европейских и азиатских странах велись исследования по внедрению этой технологии при устройстве оснований фундаментов зданий и сооружений различного назначения [82].

Преимущества струйной технологии заключается в высокой производительности работ, возможности получения необходимой формы в плане и по высоте, возможности устройства усиленных массивов под существующими зданиями и сооружениями, возможности оснащения усиленных массивов армокаркасами.

К недостаткам струйной технологии можно отнести необходимость проверки и сопоставления с проектными значениями прочностных характеристик грун-

тоцементных массивов на каждом объекте строительства, что возможно только после выполнения опытно-производственных работ на этапе проектирования, а также значительный расход цемента при изготовлении усиленных грунтовых массивов, влекущий существенные экономические затраты.

Наиболее эффективными методами повышения прочностных и деформационных характеристик оснований является армирование и уплотнение грунтов.

Инъекционные методы усиления грунтов используются как при новом строительстве, так и при реконструкции для устройства ограждений котлованов, защитных экранов, усиления откосов, усиления оснований зданий и других сооружений, находящихся в зоне влияния строительства. Вопросами усиления грунтов инъекционными методами занимались такие ученые, как: Е. С. Ашпиз [3], В.А. Богомолов [13], А. Камбефор [29], А. Ф. Колос [32], М. Я. Крицкий [35], А. Л. Ланис [42], Л. В. Нуждин, С.А. Овчинников [67], Ю.К. Фроловский [79] и др. К усиливаемым инъекционными методами грунтам, согласно ГОСТ 25100–2011 «Грунты. Классификация», можно отнести грунты с высокой степенью водонасыщения, а также нарушенные скальные грунты.

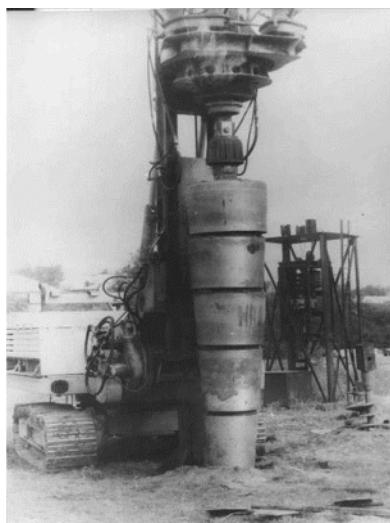
В современной практике строительства используются методы вертикального армирования оснований цементогрунтовыми растворами, нагнетаемыми в грунты под давлением. Подобное усиление выполняется для уплотнения и армирования, оперативного компенсационного изменения напряженно деформированного состояния грунтов и основано на инъекционном нагнетании цементно-песчано-глинистого раствора в грунтовую толщу через макропоры и разрывы в ослабленных зонах грунта. При твердении раствор придает массиву необходимую прочность и монолитность. В грунтах основания фундаментов создается армирующий каркас из линз и прослоев затвердевшего грунтоцементного раствора, при этом грунт, заключенный в пространственном каркасе, доуплотняется с отжимом поровой воды из зоны усиления, в результате чего увеличивается несущая способность грунтов основания. Эти методы имеют существенный недостаток, заключающийся в создании высокого давления при инъектировании раствора в усиливаемые грунты. При выполнении предпостроечного усиления существует



необходимость в создании пригруза основания во избежание выхода раствора на поверхность, а при использовании в качестве пригруза самого здания возникает множество вопросов технического и технологического характера. Кроме того, раствор при нагнетании распространяется по пути наименьшего сопротивления грунтовой среды в ослабленные зоны, в связи с чем, усиление относительно прочных слоев грунтов, где необходимо снизить деформируемость основания, затруднено [42].

В последние годы широкое развитие получил метод усиления грунтовых оснований с использованием раскатки скважин. Согласно нормативным документам технология раскатки относится к глубинным способам уплотнения грунтов (СП 50-01–2004). Скважины образуются за счет последовательной раскатки грунта от ее оси к периферии с помощью раскатывающего рабочего органа – раскатчика скважин (рисунок 1.2), а при заполнении таких скважин более прочными и менее деформируемыми материалами достигается эффект армирования.

а)



б)



Рисунок 1.2 – Раскатчик скважин:

*а* – образца 1967 г. (Институт горного дела СО РАН);

*б* – образца 2008 г. (СГУПС)

Принципиальная конструктивная схема раскатчика впервые была разработана в 1967 г. в Институте горного дела Сибирского отделения РАН [87]. Раскатчик скважин содержит эксцентрично установленные на приводном валу и развернутые относительно его оси конические катки (нарастающего диаметра), которые

при вращении приводного вала, спирально обкатываясь по соответствующему каждому катку забою, уплотняют грунт и формируют стенку скважины.

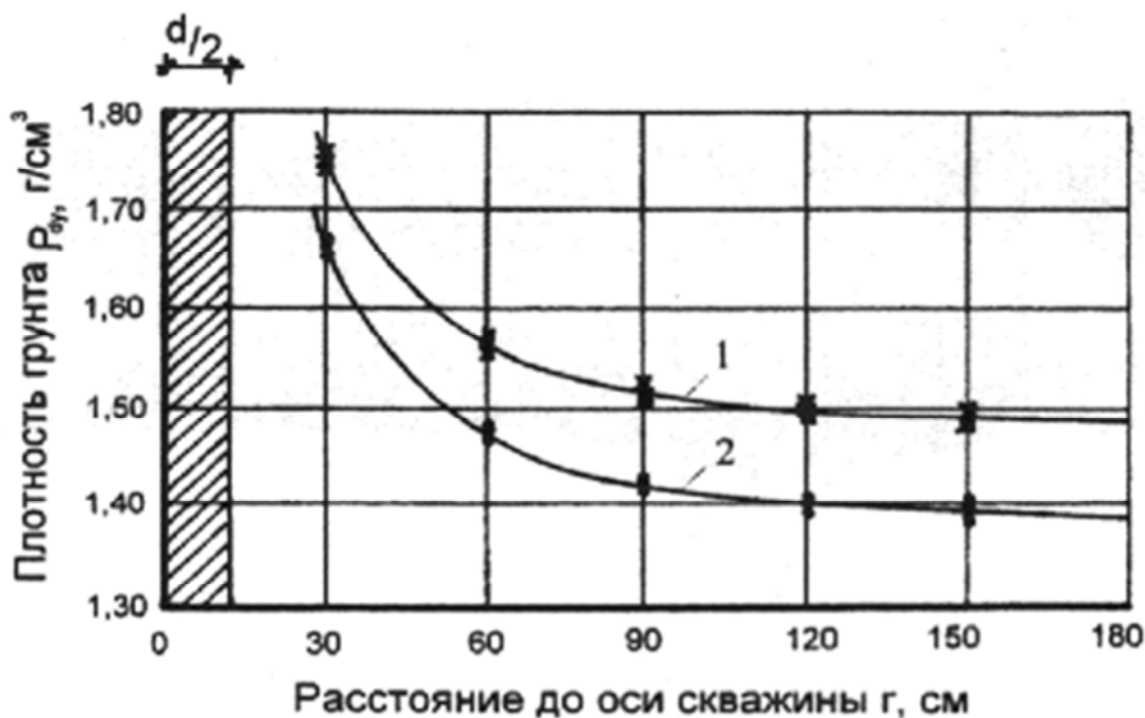
## **1.2 Усиление грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах**

В основе технологии усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах является метод раскатки скважин.

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 [86]. Технология устройства набивных свай в раскатанных скважинах позволяет устраивать в грунте вертикальные элементы, совместно работающие с грунтовым массивом и конструктивно не связанные с фундаментами сооружения. 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 (песком, щебнем и т. п.) с обязательным послойным уплотнением. Также для повышения надежности раскатанные скважины могут заполняться низкомарочными бетонными смесями, грунтово-цементными растворами, при этом упрощается технология уплотнения смесей, однако увеличиваются сроки перед их контрольным испытанием и эксплуатацией.

В результате вовлечения в работу основания уплотненного грунта в околосвайном пространстве несущая способность набивной сваи в раскатанной скважине превышает несущую способность обычной буронабивной сваи, обладающей аналогичными геометрическими параметрами, в три-пять раз и близка к несущей способности аналогичной забивной вишечной сваи [4, 5]. Зона уплотнения грунта, в значительной степени влияющая на деформируемость основания, распространя-

ется на расстояние до трех диаметров скважины. Уплотнение грунта в этой зоне происходит по нелинейной зависимости (рисунок 1.3) [83]. Граница распространения уплотненной зоны зависит: от вида, состояния и характеристик раскатываемого грунта; геометрических параметров раскатывающего рабочего органа; количества повторных проходов раскатчиком по заполняемой грунтом, щебнем или сухой смесью скважине; наличия или отсутствия лидерных буровых скважин; влияния близко расположенных свай, фундаментов и т. д. [83].



1 — суглинок; 2 — мелкий песок

Рисунок 1.3 – График зависимости плотности сухого грунта от расстояния до оси скважины [83]

Наиболее близкими аналогами устройств раскатки скважин по технологическому назначению являются пневматические машины ударного действия [73], однако раскатка скважин в сравнении с технологией образования скважин за счет использования пневмопробойников имеет целый ряд преимуществ, основными из которых являются отсутствие шума и высокочастотных вибраций, а также отсутствие динамических воздействий на близкорасположенные здания и сооружения. За последние 15 лет метод усиления грунтов раскаткой скважин активно внедряется при строительстве зданий и сооружений на площадках городов и районов

Новосибирской области, поскольку данный метод обладает рядом технико-экономических преимуществ. В настоящее время существует несколько различных модификаций раскатывающих рабочих органов и прочего навесного бурового оборудования для раскатки скважин.

В качестве основного оборудования при производстве работ по усилению грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах используются раскатчики двух типов.

К первому типу относятся раскатывающие рабочие органы (РС) с подвижными уплотняющими элементами – катками. Разворот катков такого раскатчика относительно оси приводного вала и вращение приводного вала обеспечивают собственную прямую осевую подачу (самопродвижение) рабочего органа (рисунок 1.4, *а, б*). Данный тип рабочего органа обладает некоторыми особенностями. Наличие подвижных уплотняющих элементов (катков) способствует тщательному уплотнению грунта, но при этом способствует и снижению скорости образования скважин и повышению затрат на ремонт раскатчика. Существенным недостатком раскатчиков с подвижными катками является необходимость частого технологического обслуживания. При раскатке скважин грунт забивается между катками, в результате чего снижается их подвижность. Если не выполнять своевременную прочистку, грунт забивается глубже в подвижном механизме и выводит из строя подшипники, уплотнительные кольца и т. п.

Ко второму типу раскатчиков относятся грунтоуплотняющие рабочие органы (ГРО), не имеющие собственной осевой подачи. Они содержат установленные на приводном валу и жестко соединенные между собой и с приводом неподвижные катки нарастающего диаметра (рисунок 1.4, *б, в*). Уплотнение грунта и формирование скважины осуществляется статическим вдавливанием вращающегося рабочего органа в грунт [102]. Такие рабочие органы просты и недороги в изготовлении, технологичны, не требуют больших затрат на ремонт и техническое обслуживание, надежны в эксплуатации.

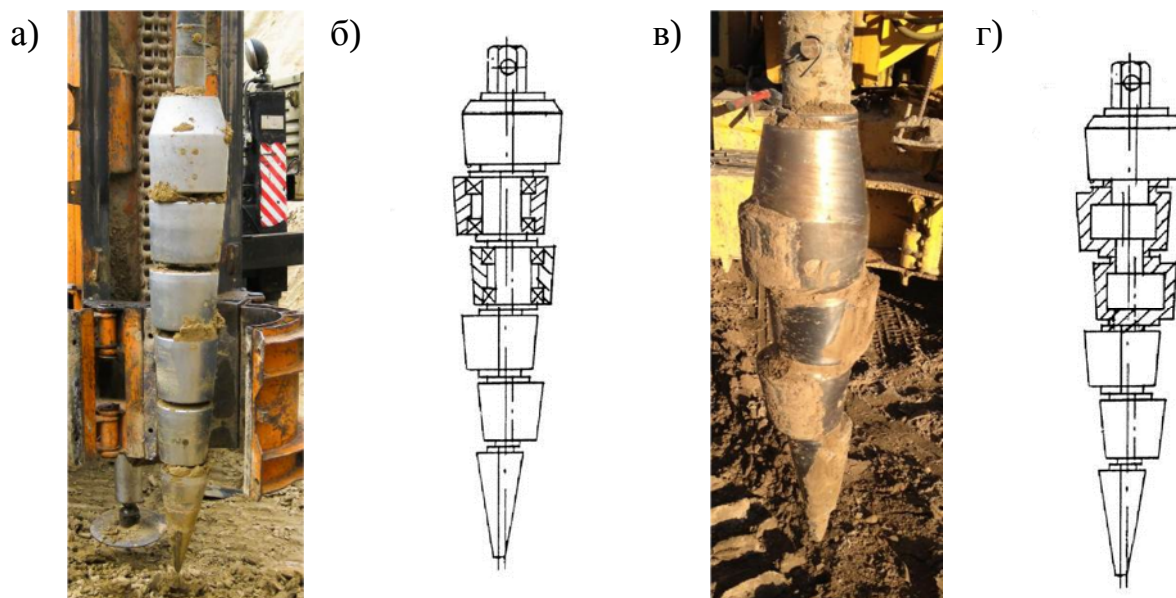


Рисунок 1.4 – Модели раскатчиков скважин:

*а* – РС-250 (с подвижными катками); *б* – продольное сечение по оси устройства РС-250; *в* – ГРО-250 (с неподвижными катками); *г* – продольное сечение по оси устройства ГРО-250

Недостатком этого типа раскатчиков является большая энергоемкость процесса, вызванная трением скольжения боковой поверхности неподвижных катков о грунт, что ведет к повышению их износа. Для снижения трения и охлаждения рабочего органа в процессе работы необходимо подливать в формируемую скважину воду. Наиболее эффективны раскатчики с неподвижными катками при их использовании в глинистых грунтах мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции [80].

Существующие способы расчета увеличения физико-механических характеристик уплотняемых грунтов применительны преимущественно к грунтам с пониженным показателем текучести. А определение увеличения прочностных и деформационных характеристик усиленных грунтовых массивов заключается только в проведении полевых испытаний статическими нагрузками.

Согласно [4] грунты, поддающиеся уплотнению раскаткой скважин можно разделить на следующие категории:

1) однородные по физико-механическим характеристикам глинистые грунты от твердой до мягкопластичной консистенции природного (естественного)

сложения с  $\rho_d \leq 1,55 \text{ г/см}^3$ , мощностью, равной или более требуемой глубины раскатки скважины;

2) глинистые грунты от твердой до мягкопластичной консистенции природного (естественного) сложения с  $1,55 < \rho_d < 1,60 \text{ г/см}^3$ , невыдержанные в плане и по глубине, с линзами и прослойками песка не выше средней плотности, толщиной не более 0,2 м;

3) глинистые грунты от твердой до тугопластичной консистенции с  $1,60 < \rho_d < 1,65 \text{ г/см}^3$ , песчаные грунты с  $\rho_d < 1,55 \text{ г/см}^3$  и степенью влажности  $S_r \leq 0,5$ ; насыпные грунты с наличием крупных включений диаметром  $1/3d$ , где  $d$  – диаметр формирующего катка раскатчика, не более 3 % по массе и степенью влажности  $S_r < 0,5$ ;

4) глинистые грунты с  $1,65 < \rho_d < 1,70 \text{ г/см}^3$ ; песчаные грунты  $1,55 < \rho_d < 1,60 \text{ г/см}^3$  и степенью влажности  $0,5 < S_r < 0,8$ ; насыпные грунты, мощностью до 5 м  $1,50 < \rho_d < 1,60 \text{ г/см}^3$  и наличием крупных включений диаметром  $1/3d$  не более 5 % по массе.

Согласно этой градации супеси, суглинки и глины сведены в одну категорию глинистых грунтов. При этом изменение физико-механических характеристик уплотняемого грунта в зависимости от его числа пластичности является существенным.

Таким образом, при расчете увеличения физико-механических характеристик грунтовых массивов, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах, необходимо разделять грунты и по числу пластичности. При этом, учитывая структурные особенности глинистых грунтов, больший интерес при усилении представляют супеси и легкие суглинки, поскольку плотность таких грунтов в большей степени влияет на их физико-механические характеристики.

В современной действующей нормативной литературе отсутствуют описания рассматриваемой технологии усиления. В соответствии с СП 50-102–2003 наиболее близкой к ней является технология устройства набивных бетонных и железобетонных свай путем укладки бетонной смеси в скважины, образованные в результате принудительного отжатия (вытеснения) грунта, позиционируется для

создания свайного фундамента, а не усиленного основания. Существующий способ определения физико-механических характеристик уплотненного грунта основан на равномерном уплотнении грунта вокруг скважины. Считается, что весь объем грунта при создании скважины вытесняется в межскважинное пространство. Плотность грунта при этом вычисляется по формуле:

$$\rho_{d1} = \frac{\rho_{d0}}{1 - \frac{0,95^2 \cdot d^2}{l^2}}, \quad (1.1)$$

где  $\rho_{d1}$  – плотность сухого грунта после уплотнения в межсвайном пространстве, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_{d0}$  – плотность сухого грунта до уплотнения, г/см<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр скважины, см;

$l$  – шаг расстановки скважин, см.

Формула (1.1) встречается в пособии к СНиП 2.02.01–83 [77] и служит для определения шага расстановки грунтовых свай при глубинном уплотнении. Эта формула может также использоваться и для метода раскатки скважин, однако она обладает существенными недостатками. Во-первых, предполагается, что уплотнение происходит равномерно как по глубине, так и в стороны. Во-вторых, не учитывается упругое сужение диаметров скважин после раскатки. В-третьих, никак не учитывается работа самой набивной сваи в скважине.

Нормативным документом, содержащим указания по расчетам, требования по производству работ и регламентирующим область применения свай вытеснения, являются Рекомендации по проектированию и устройству фундаментов из буронабивных свай и опор-колонн, разработанные в 1985 г. Украинским НИИ строительного производства [81]. В 2000 г. специалистами НИИОСП были разработаны Рекомендации по проектированию и устройству набивных свай в раскатанных скважинах, содержащие указания по технологии производства работ по устройству набивных свай в раскатанных скважинах, а также представлены расчетные методики [80].

Во всех вышеперечисленных документах набивные сваи в раскатанных скважинах рассматриваются как часть свайного фундамента. Как результат, в настоящее время отсутствует методика проектирования усиления, заключающегося в устройстве оснований путем усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах. Кроме того, отсутствуют и конкретные указания по контролю качества усиленных данным методом оснований. В связи с этим актуальной задачей является проведение исследований, направленных на разработку метода расчета увеличения физико-механических характеристик усиленного методом раскатки скважин грунтового массива.

Аналитическое обоснование параметров усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах по существующим зависимостям затруднено и неточно. Одним из вариантов решения возникшего вопроса является проведение экспериментальных исследований на масштабных моделях и опытных площадках, однако такой подход к каждому проектируемому объекту снижает экономическую эффективность, что мешает широкому распространению данного метода усиления.

Более точное прогнозирование изменения характеристик усиливаемого грунтового массива может быть достигнуто применением метода конечных элементов. Моделирование усиленных оснований в программных комплексах позволит более точно оценить эффективность усиления при варьировании такими технологическими параметрами, как шаг расстановки и диаметр скважин, и установить необходимые закономерности изменения характеристик массивов от начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта.

### **1.3 Современные методы моделирования усиленных оснований**

Перспективным способом определения параметров прочности и деформируемости усиленных грунтовых массивов является численное моделирование. Основным инструментом численного моделирования геотехнических задач в настоящее время является метод конечных элементов. Вопросами моделирования



армированных оснований и грунтовых массивов посвящены работы Е. С. Ашпиза [3, 79], В. Ф. Барвашова [7], В. В. Виноградова [17, 79], А.А. Зайцева [79], А. М. Караулова [30], Л. В. Нуждина [64–66], В.Н. Парамонова [69, 70], А. Н. Саурина [84], С. Б. Ухов [96], А. Б. Фадеев [97], В. И. Федорова [99, 100], Ю. К. Фроловского [79], Т. Benz [110], М. De Vos [112], С. S. Desai [114], R. Dobry [121], D. C. Drucker [115], B. N. Gupta [119], D. K. Jones [23], W. T. Kelvin [123], J. E. Mardsen [126], и др. В настоящее время еще не разработаны методы расчета, которые бы с достаточной точностью учитывали взаимодействие слабых грунтов с армирующими элементами. В связи с этим расчеты армированных оснований выполняются с использованием приближенных методов, основанных на учете сжимаемости различных материалов. Выбор схемы армирования грунтов зависит от прикладываемых к массиву нагрузок и от требуемых значений физико-механических характеристик [23].

Учитывая специфику решаемых задач (определение деформационных характеристик усиленных грунтовых массивов), исследовательские работы следует проводить с использованием двух способов моделирования – натурного и численного. Натурные эксперименты позволят создать базу данных для создания цифровой модели усиленного массива, используемой при дальнейшем численном моделировании. Корреляционный анализ позволит сделать вывод об адекватности разработанной цифровой модели и оценить достоверность полученных результатов численного моделирования.

### 1.3.1 Натурное моделирование

Анализ опыта подобных исследований [54, 107] показывает, что достоверные данные о работе изучаемых конструкций можно получить в ходе натурных испытаний. Однако, учитывая требуемое количество испытаний, которое определяется как  $n^k$  (где  $n$  – количество уровней определения фактора,  $k$  – количество факторов), их реализация в полном объеме не представляется возможным [103].

Данная проблема может быть решена в ходе планирования экспериментов и статистической обработке их результатов.

Наиболее достоверные данные о работе усиленных оснований можно получить натурными испытаниями на реальных строительных площадках. В соответствии с рекомендациями строительных норм к наиболее достоверным методам определения параметров деформируемости грунтов относятся полевые испытания статическими нагрузками [48]. Поэтому определение деформационных характеристик усиленных грунтовых массивов выполнялось посредством испытаний таких массивов плоским штампом площадью 5 000 см<sup>2</sup>.

Для совершенствования методик проектирования и контроля технического состояния грунтовых оснований, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах, результатов штамповых испытаний недостаточно. Необходимо установить взаимосвязь технологических параметров усиления (диаметра и шага расстановки набивных свай, глубины усиления) и напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Кроме того, необходимо установить закономерность изменения физических характеристик грунта при его уплотнении раскаткой скважин.

Для решения возникших вопросов необходимо выполнить серию дополнительных экспериментов. Дополнительные эксперименты необходимы для получения сведений:

- об изменении деформационных характеристик массива, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах;
- изменении диаметра раскатанной скважины при усилении глинистых грунтов с различными сочетаниями начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта;
- изменении физических характеристик грунтов, уплотненных раскаткой скважин.

Выполнение экспериментальных исследований позволит разработать цифровую модель усиленного грунтового массива и провести численное моделирование с установлением необходимых закономерностей.

Для исследования работы усиленного грунтового массива необходимо использовать метод моделирования, описанный в рекомендациях [55]. Метод моделирования позволит получить качественные и количественные данные о напряженно-деформированном состоянии усиленных грунтовых массивов, а статистическая обработка результатов моделирования позволит распространить результаты проведенных экспериментов на рассматриваемые грунтовые условия.

### 1.3.2 Численное моделирование

При расчете напряженно-деформированного состояния оснований широкое распространение получил метод численного моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ), при этом используется упругопластическая модель работы грунта. МКЭ в настоящее время применен во многих программно-вычислительных комплексах, таких как *Ansys*, *MIDAS*, *Plaxis* и др. Принципиальные отличия программных комплексов заключаются в наборах программных интерфейсов и структурных элементов. Поскольку перед численным моделированием ставятся задачи по выявлению закономерностей изменения характеристик усиленных массивов, состоящих из уплотненного грунта и армирующих элементов с конкретными геометрическими размерами, то решение этих задач необходимо проводить в трехмерной постановке. В связи с этим для проведения исследования выбран программно-вычислительный комплекс *MIDAS*, который содержит наиболее подходящий для этого набор структурных элементов.

Проведение численного моделирования в программно-вычислительном комплексе *MIDAS* подразумевает создание геометрической модели усиленных массивов, сетки конечных элементов, моделей грунтовой среды и набивных свай, введение граничных условий, формирование стадий нагружения, а также непосредственное выполнение самих расчетов.

Расчетная геометрическая модель усиленных грунтовых массивов состоит из точек, линий, плоскостей и объемов и содержит все грунтовые слои, структурные объекты, этапы приложения нагрузок. Построение расчетной схемы выпол-

няется в трехмерной модели, которая позволяет более корректно моделировать пространственное положение набивных свай в раскатанных скважинах и зон уплотненного грунта.

Применение численного моделирования позволяет оценить эффект от усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах при различном шаге расстановки набивных свай. При этом возможно получить сведения о влиянии начальных значений коэффициентов пористости и показателей текучести грунта на деформационные характеристики усиленного массива. Также численное моделирование позволяет получить количественные значения деформаций и напряжений в усиленном массиве [67].

При создании модели усиленного грунтового основания в программном комплексе не представляется возможным смоделировать сам процесс уплотнения грунта – необходимо задавать конечные параметры уплотненного раскаткой грунта. Применение закона уплотнения для определения коэффициента пористости как параметра, отражающего физико-механические свойства грунта, не представляется возможным. Существующая зависимость (уравнение компрессионной кривой) предполагает нагружение грунта без возможности его бокового расширения, кроме того, эта зависимость рассматривает уплотнение грунта по вертикали. При раскатке уплотнение грунта происходит преимущественно в радиальном направлении без возможности компрессионного сжатия. Также при создании расчетной модели основания необходимо указывать конкретные геометрические параметры набивных свай. При этом некоторые параметры будет некорректно указывать в качестве постоянных величин. Например, диаметр свай может неравномерно изменяться по их глубине в зависимости от разновидности грунта. Таким образом, корректность полученных данных существенно зависит от достоверности характеристик грунтов, вводимых в расчетную модель. В связи с этим, при численном моделировании необходимо использовать материалы, полученные в результате предшествующего натурного моделирования.

## 1.4 Формирование цели и задач исследования

Анализ существующих методов и способов усиления грунтовых оснований позволил выделить их преимущества и недостатки. Перспективным методом устройства оснований является усиление грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, поскольку он обладает следующими преимуществами:

- отсутствие динамического воздействия при производстве работ на рядом стоящие здания и сооружения (в отличие от устройства свайного фундамента);
- простота в исполнении (отсутствие сложных технологических процессов);
- высокая технологичность процесса (минимальное использование ручного труда);
- сравнительно низкая стоимость производства работ (в сравнении с устройством свайных фундаментов и инъекционными методами усиления).

Между тем основным препятствием для широкого внедрения метода устройства основания, путем усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах при строительстве зданий и сооружений является наличие определенных вопросов. Одно из основных ограничений – отсутствие расчетно-теоретической базы, позволяющей выполнять расчет увеличения физико-механических характеристик усиленного грунтового массива за счет глубинного уплотнения грунта и работы набивных свай в раскатанных скважинах. Также отсутствуют критерии оценки качества уплотнения грунтов в зависимости от конструкции рабочего органа, шага расстановки скважин, начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта, критерии выбора принципиального типа раскатчика скважин. Требуют уточнения методики расчета и контроля технического состояния усиленного основания.

Кроме того, учитывая наличие двух принципиальных типов раскатывающих рабочих органов, необходимо выявить тот, для которого будут проводиться дальнейшие исследования. Целесообразнее выполнять исследование для наиболее эффективного типа раскатывающего рабочего органа, позволяющего выполнять раскатку с меньшими временными и, как результат, трудовыми затратами. С этой целью необходимо провести исследования по сопоставлению затрат времени на

раскатку скважины при использовании раскатчика скважин с подвижными катками РС и грунтоуплотняющего рабочего органа ГРО.

Существующие методики расчета грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами, содержат в себе несколько допущений, влияющих на точность расчета. В расчетах принимается, что армирующие элементы по отношению к грунту являются несжимаемыми.

Поиск ответов на перечисленные вопросы, направленных на повышение качества устройства оснований путем усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, особенно важен и актуален для развития сферы строительства зданий и сооружений.

Исходя из этого, целью диссертационной работы является повышение эффективности устройства усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах оснований путем совершенствования методик проектирования и контроля технического состояния. Для достижения поставленной цели сформулированы 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.

## **ГЛАВА 2 НАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ, УСИЛЕННЫХ НАБИВНЫМИ СВАЯМИ В РАСКАТАННЫХ СКВАЖИНАХ**

### **2.1 Описание методики проведения натурального моделирования**

Натурное моделирование массивов грунтов, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах, реализовывалось в ходе экспериментальных исследований и выполнялось:

- 1) для выбора принципиальной конструкции раскатчика скважин, позволяющей выполнять работы по усилению грунтов с меньшими временными затратами, с использованием которой будут проводиться все дальнейшие исследования;
- 2) установления закономерности изменения деформационных свойств усиленных грунтовых массивов от начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести глинистых грунтов;
- 3) установления закономерностей изменения коэффициента пористости грунта при его уплотнении раскаткой.

Схема проведения экспериментальных исследований при выполнении натурального моделирования представлена на рисунке 2.1.

Проведение первого блока исследований направлено на определение принципиальной конструкции раскатчика скважин, используемого для усиления глинистых грунтов от твердой до мягкопластичной консистенции с наименьшими временными затратами. По результатам исследования будет определен тип раскатывающего рабочего органа, который будет использоваться для дальнейшей работы.

Второй блок исследований основан на многофакторном анализе усиленных грунтовых массивов и включает в себя серию экспериментов по определению влияния начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта на геометрические параметры раскатанных скважин и деформационные

характеристики массива. Результаты исследований послужат базой для последующего корреляционного анализа данных натурного и численного моделирования.

Третий блок исследований основан на статистической обработке результатов исследования по методу наименьших квадратов и включает в себя серию экспериментов по определению свойств грунтов при их уплотнении раскаткой. Результаты исследований по третьему блоку послужат базой для последующей разработки цифровой модели усиленного основания, используемой при численном моделировании.



Рисунок 2.1 – Схема проведения экспериментальных исследований

При выполнении **первого блока** экспериментальных исследований было рассмотрено два типа раскатчика – РС-250 и ГРО-250 (рисунок 2.2). Принципиальное отличие второго устройства от первого заключается в неподвижности его катков. При работе раскатывающего рабочего органа РС-250 образование скважин происходит за счет последовательной обкатки грунта вальцами, которые



вращаются как вокруг своей оси, так и вокруг оси устройства. При его работе уплотняемый грунт воспринимает силу трения-качения, в то время как при работе грунтоуплотняющего рабочего органа с неподвижными катками – трения-скольжения.

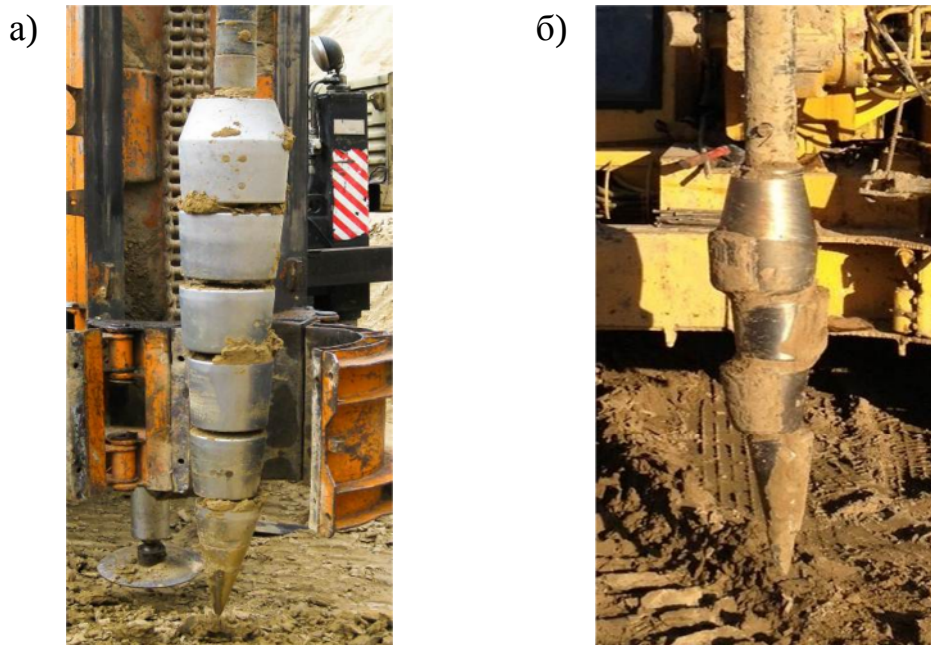


Рисунок 2.2 – Рабочие органы, используемые при выполнении первого блока экспериментальных исследований:

*a* – РС-250; *б* – ГРО-250

Оценка эффективности применения каждого раскатывающего рабочего органа выполнялась на основании технико-экономического расчета. Для этого на опытных участках фиксировалось время, необходимое для создания раскатанных скважин.

Для обеспечения достоверности полученных результатов и возможности сопоставления времени раскатки экспериментальные исследования выполнялись с соблюдением следующих требований:

1) раскатка скважин выполнялась с использованием одной буровой установки *Nippon Sharyo* и одним комплектом навесного оборудования (штанги, соединительные детали и т. п.);

2) при устройстве скважин обеспечивались идентичные грунтовые условия для рабочих органов. Раскатка выполнялась в глинистых грунтах с числами пластичности от 4 до 12 и показателем текучести от 0 до 0,75;

3) количество скважин и, соответственно, измерений времени раскатки на каждой площадке составляло не менее 10;

4) глубина раскатки каждой скважины составляла 10 м;

5) диаметр наибольшего (верхнего) катка каждого раскатывающего рабочего органа составляет 250 мм. Длина каждого раскатывающего органа составляет 1,0 м.

Экспериментальные исследования проводились на трех строительных площадках объектов гражданского строительства г. Новосибирска. Грунтовые условия площадок представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Грунтовые условия площадок

| Площадка | Тип грунта          | Число<br>пластичности<br>$I_p$ , % | Показатель текучести $I_L$ , д. е. | Влажность<br>$w$ , д. е. | Плотность<br>$\rho$ , г/см <sup>3</sup> (средн.) |
|----------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|
| 1        | Глинистые<br>грунты | 4...6                              | $0 < I_L \leq 0,25$                | 0,14...0,17              | 1,79                                             |
| 2        |                     | 7...10                             | $0,25 < I_L \leq 0,50$             | 0,16...0,19              | 1,82                                             |
| 3        |                     | 10...12                            | $0,50 < I_L \leq 0,75$             | 0,18...0,21              | 1,84                                             |

**Второй блок** экспериментальных исследований выполнялся на основе трехфакторного дисперсионного анализа по методу латинских квадратов с использованием в качестве основы усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах грунтовых массивов. Экспериментальные исследования выполнялись с различным сочетанием трех факторов, оказывающих влияние на деформационные характеристики усиленного массива. В качестве измеряемых величин приняты модуль деформации усиленного массива и диаметр раскатанной скважины.

Поскольку основной задачей экспериментальных исследований является совершенствование методики проектирования усиления, то в качестве влияющих факторов были выбраны грунтовые условия – коэффициент пористости исходного грунта и показатель текучести (консистенция) грунта. Для возможности оценки изменения контролируемых величин по глубине усиления, в качестве третьего фактора была выбрана глубина. Под этим фактором подразумевается отметка, на которой определяется соответствующая контролируемая величина.

Варьирование каждого фактора производилось в пяти уровнях. Области определения факторов назначались с учетом технической и экономической целесообразности:

- 1) коэффициент пористости грунта – от 0,650 до 0,850;
- 2) показатель текучести (консистенция) грунта – от 0 до 0,75 д.е.;
- 3) глубина – от 0 до 3 м.

Для повышения достоверности получаемых в ходе исследований результатов все испытания выполнялись на полномасштабных моделях в полевых условиях на строительных площадках г. Новосибирска. Эксперименты проводились в глинистых грунтах со следующими усредненными характеристиками:

- число пластичности  $I_p$  – от 4 до 12 %;
- влажность на границе текучести ( $w_L$ ) – от 18 до 26 %;
- влажность на границе раскатывания ( $w_p$ ) – от 14 до 16 %;
- природная влажность ( $w$ ) – от 13 до 19 %.

Планирование экспериментов в ходе натурного моделирования с последующей статистической обработкой полученных результатов выполнялись на базе программно-вычислительного комплекса *STATISTICA 10.0*. Схема проведения экспериментов показана на рисунке 2.3. С целью повышения достоверности результатов и формирования необходимой выборки для статистической обработки данных все опыты выполнялись не менее чем в шести повторностях.

| Код | Код   |               | 1  | 2    | 3   | 4    | 5   |
|-----|-------|---------------|----|------|-----|------|-----|
|     | e     | Глубина,<br>м | 0  | 0,75 | 1,5 | 2,25 | 3,0 |
|     |       | Код<br>$I_L$  |    |      |     |      |     |
| 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    |    | 7    |     |      |     |
|     |       | 2 0,25...0,37 |    |      | 8   | 9    |     |
|     |       | 3 0,37...0,50 |    |      |     |      |     |
|     |       | 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 2.3 – Схема проведения экспериментальных исследований по блоку 2

Экспериментальные исследования по второму блоку условно разделены на два этапа. На первом этапе на опытных площадках в соответствии со схемой экспериментов (см. рисунок 2.3) определялась работа грунта за счет упругих и пластических деформаций. Исследование выполнялось для определения влияния грунтовых условий на диаметры образуемых раскатанных скважин.

После раскатки производился замер диаметров образованных скважин с использованием плоских эталонов круглого сечения с диаметрами 250, 240, 230, 220, 210, 200, 190, 180, 170, 160, 150, 140, 130, 120, 110, 100 и 50 мм. Эталон представляет из себя жестко соединенный диск необходимого диаметра с металлическим стержнем. Данные эталоны с помощью троса поочередно опускались в скважины, после чего фиксировались глубины, на которых соответствующие эталоны застревали (рисунок 2.4).

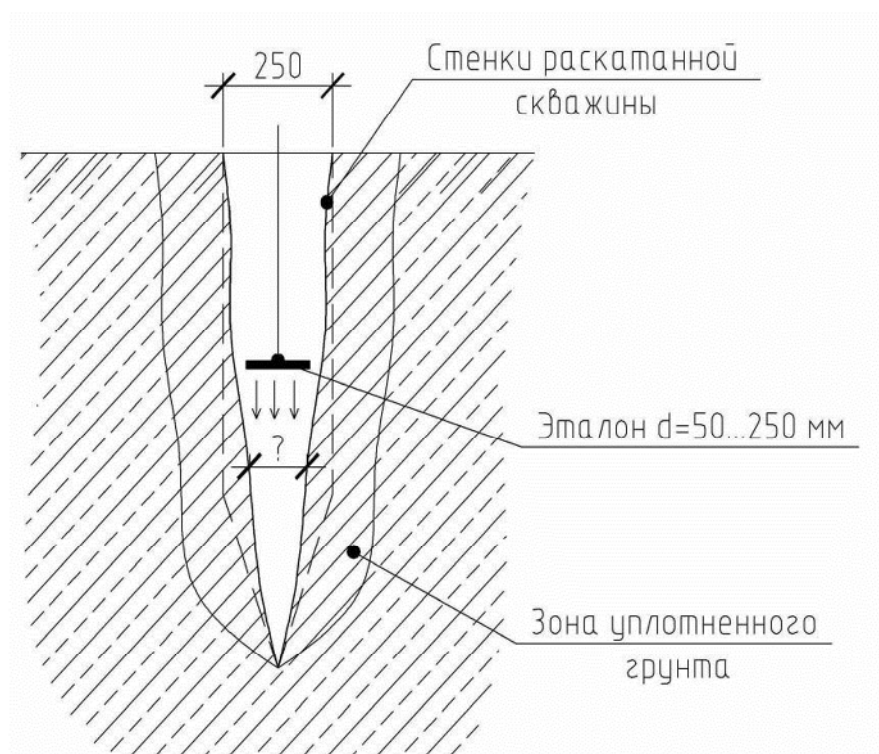


Рисунок 2.4 – Схематичный разрез скважины, диаметр которой определяется плоским эталоном

Исследования работы грунта при раскатке, помимо получения соответствующих зависимостей, позволили выделить граничные грунтовые условия, при которых возможно использование стандартного навесного оборудования и необходимо введение дополнительных модификаций.

Второй этап экспериментальных исследований по второму блоку заключался в определении модуля деформации усиленного массива и критической нагрузки, при которой еще сохранялась линейная зависимость изменения деформаций усиленного основания от напряжений в массиве.

Усиленные основания для исследования создавались на опытных площадках в соответствии со схемой экспериментов (см. рисунок 2.3). Формирование скважин выполнялось при помощи раскатчика, навешанного на буровую установку *Nippon Sharyo*. Глубина каждой скважины на каждом опытном участке составляла не менее 6 м.

Для создания набивных свай использовалась смесь глинистого грунта (сухость твердой консистенции) и цемента (марки 400). Рациональное соотношение компонентов раствора, а также водоцементное отношение устанавливались по результатам испытаний соответствующих образцов затвердевшего раствора. В процессе пробных замесов и испытаний образцов на одноосное сжатие и изгиб было выделено четыре варианта рецептуры материала набивных свай. Основным критерием по выбору рецептуры был модуль деформации образца и стоимость приготовления 1 м<sup>3</sup> раствора. Результаты испытаний приведены в таблице 2.2. Фото образцов материала набивных свай для испытания на одноосное сжатие представлено на рисунке 2.5.

Таблица 2.2 – Результаты испытаний затвердевшего раствора

| Состав раствора испытываемых образцов                            | Водоцементное отношение | Модуль деформации, МПа | Удельное сцепление, кПа | Сопротивление на сжатие, МПа |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Глинистый грунт – 1,3 кг;<br>цемент – 0,2 кг;<br>вода – 0,2 л    | 1/1                     | 165                    | 2,15                    | 4,10                         |
| Глинистый грунт – 1,25 кг;<br>цемент – 0,25 кг;<br>вода – 0,25 л | 1/1                     | 210                    | 2,52                    | 4,98                         |
| Глинистый грунт – 1,2 кг;<br>цемент – 0,3 кг;<br>вода – 0,3 л    | 1/1                     | 365                    | 4,81                    | 8,95                         |
| Глинистый грунт – 0,12 кг;<br>цемент – 0,35 кг;<br>вода – 0,35 л | 1/1                     | 575                    | 6,56                    | 11,75                        |



Рисунок 2.5 – Образцы материала набивных свай  
перед испытанием на одноосное сжатие

При выборе рациональной рецептуры раствора также учитывалась возможность его использования в случае оперативного заполнения скважин через полый раскатывающий рабочий орган. Учитывая конструктивные особенности таких рабочих органов, процесс заполнения скважин сопоставим с инъектированием раствора при упрочнении грунтов. Исходя из опыта проведения подобных работ, принимается соотношение грунта и цемента 5 : 1. При этом в случае необходимости оптимизации материальных и трудовых затрат, связанных с приготовлением и нагнетанием раствора при усилении, принятое соотношение может быть откорректировано при обосновании соответствующим расчетом.

Основным критерием выбора способа определения контролируемых величин являются требования нормативных документов. В соответствии СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» к наиболее достоверным способам определения параметров деформируемости грунтов относятся полевые испытания статическими нагрузками.

Для испытания усиленных грунтовых массивов был использован круглый штамп площадью  $A = 5\,000\text{ см}^2$  (рисунок 2.6). Основной задачей испытаний являлось изучение сжимаемости усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах основания, т. е. определение значения модуля деформации усиленного грунтового массива с одновременным установлением тех граничных нагрузок,



при которых сохраняется линейная зависимость между ними и осадками. Штамп устанавливался через выравнивающую песчано-гравийную подушку непосредственно над набивной сваей (соосно).



Рисунок 2.6 – Штамп площадью  $5\,000\text{ см}^2$ ,  
используемый при экспериментальных исследованиях

Максимальное давление по подошве штампа, с учетом возможных нагрузок от конструкций строящихся зданий и сооружений, принято 600 кПа. Учитывая площадь подошвы используемого в экспериментах штампа, максимальная осевая нагрузка при статических испытаниях составляла 30 т. В соответствии с рекомендациями нормативных документов при испытаниях обеспечивалась подача нагрузки ступенями не более 0,1 величины полного нагружения. Обеспечение устойчивого сохранения приложенной нагрузки до наступления условной стабилизации деформаций достигалось применением гидравлической установки, состоящей из гидравлического домкрата и гидравлической станции (в комплекте со шлангами высокого давления и манометром).



Для производства экспериментальных исследований использовался гидравлический домкрат ДГ-200, со следующими техническими характеристиками: габаритные размеры –  $360 \times 335 \times 290$  мм, масса – 110 кг, грузоподъемность – 200 т, давление рабочей жидкости – 50 МПа, высота подъема – 160 мм. Рабочее давление в домкрате создавалось при помощи гидравлической станции с механическим приводом.

Упор домкрата, установленного на конце патрубка штампа, произведен в рамную конструкцию, состоящую из двух поперечных, одной продольной (упорной) стальной балки и четырех анкерных элементов, воспринимающих реактивные усилия. Анкерные элементы выполнены стальными буровыми шнеками диаметром 180 мм, завинченными в грунт конвертом  $1,2 \times 2,2$  м по обе стороны от штампа до глубины 5 м. Фото установки представлено на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Установка штампового испытания

В соответствии с ГОСТ 20276–2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости», фиксация перемещения штампа должна выполняться оборудованием, обеспечивающим точность измерения не менее 0,01 мм. В связи с чем для фиксации вертикальных перемещений штампа использовались прогибомеры системы Аистова. В экспериментах применено три прогибомера, которые устанавливались на отдельную металлическую

рамную конструкцию (реперную систему), не воспринимающую деформации испытываемого массива. Принципиальная схема установки штампового испытания приведена на рисунке 2.8.

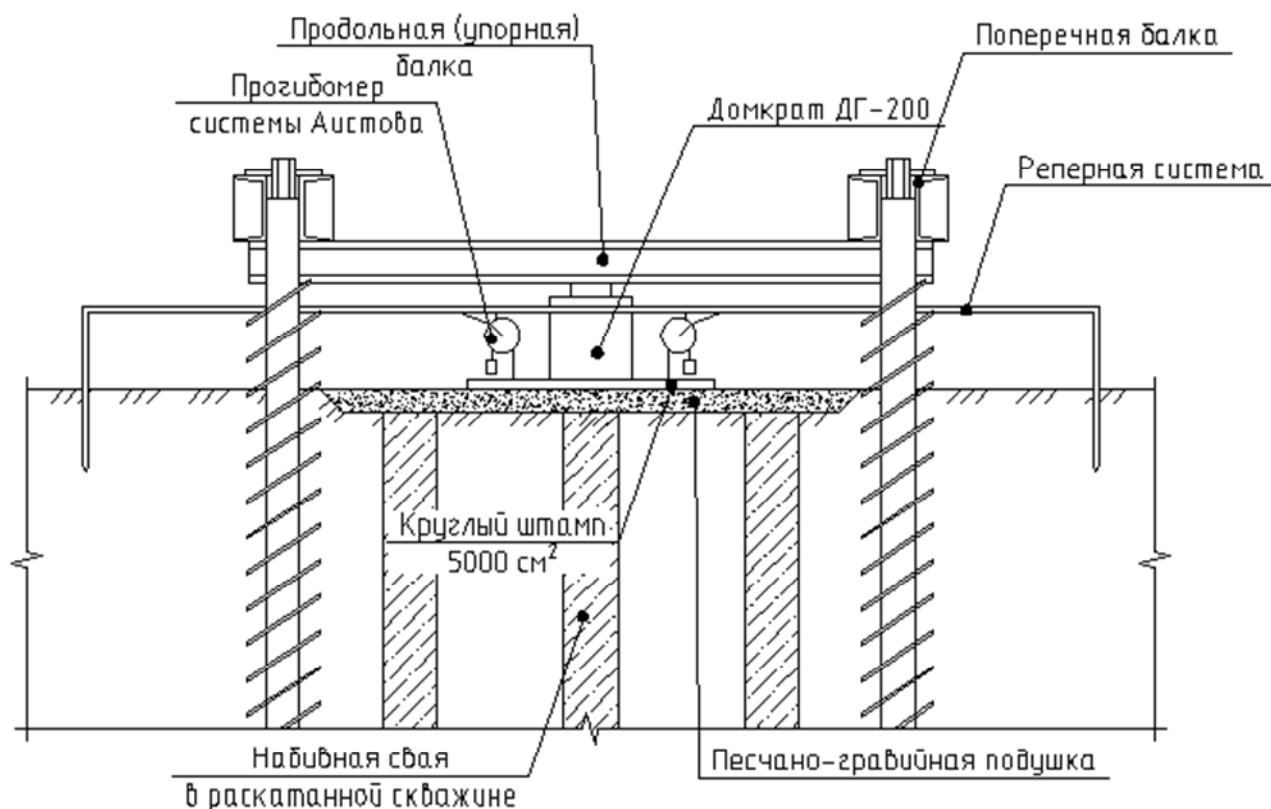


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема установки штампового испытания

Нагрузка на усиленные массивы передавалась ступенями, равными  $\Delta P_{\max} = 0,10$  МПа. Каждая ступень нагрузки выдерживалась до условной стабилизации осадки, приращение которой не превышала 0,1 мм за последний час наблюдения, тем самым учитывалась ползучесть испытываемых грунтов.

Испытания усиленного массива в соответствии со схемой экспериментов (см. рисунок 2.3) должны выполняться на различных глубинах (от 0 до 3,0 м). В связи с чем перед монтажом установки штампового испытания выполнялось бурение шурфов-дудок (либо вскрытие шурфов) до необходимых глубин (рисунок 2.9, 2.10). При этом на таких участках заполнение раствором раскатанных скважин выполнялось не до устья, а до соответствующих отметок.

а)



б)



в)



Рисунок 2.9 – Технологические операции проведения  
штамповых испытаний в шурфах (глубиной до 1,5 м):

*а* – устройство рамной конструкции; *б* – установка штампа над сваей  
с контролем его крена; *в* – упор домкрата, установленного на конце патрубка  
штампа, в рамную конструкцию

Важным требованием к проведению натурного моделирования является исключение системных ошибок при измерениях. Данное требование обеспечивается рандомизацией опытов, а также метрологическим обеспечением экспериментов [103].

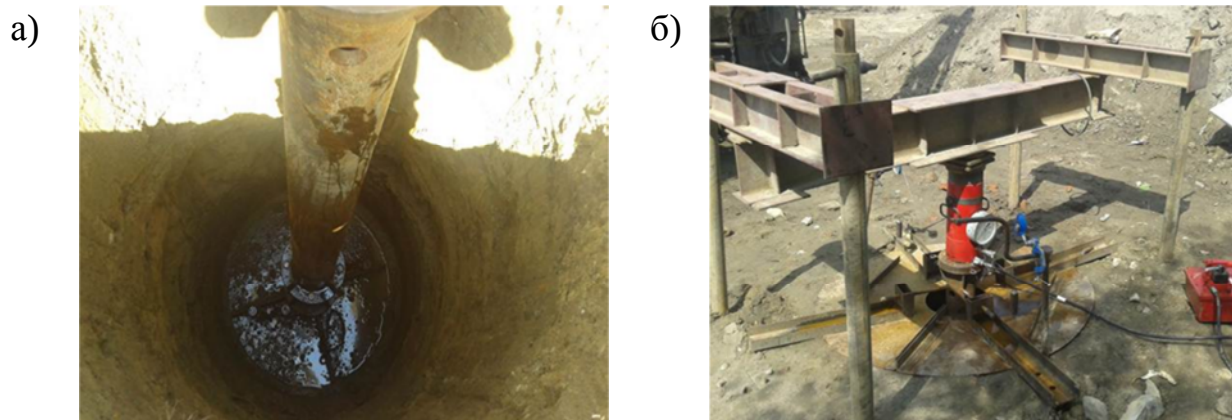


Рисунок 2.10 – Технологические операции проведения  
штамповых испытаний в шурфах-дудках (глубиной до 3,0 м):

*а* – установка штампа в шурфе-дудке; *б* – проведение штампового испытания

Поскольку определяемые в ходе экспериментов величины находятся в зависимости от деформаций и напряжений в усиленном грунтовом массиве, то требования допустимой погрешности измерений предъявлены в первую очередь к фиксирующим эти значения приборам. При этом суждения о деформациях усиленных грунтовых массивов основываются на значениях вертикальных перемещений штампа, а суждения о напряжениях в грунте – на значениях давления под подошвой штампа. Поэтому до начала проведения полевых экспериментов и после полного их завершения в сертифицированной метрологической лаборатории выполнена поверка задействованных средств измерений – прогибомеров системы Аистова и гидравлических манометров.

Измерения перемещений штампа проводились прогибомерами системы Аистова № 173, 171, 156, 155 класса точности 0,005. Таким образом, максимальная ожидаемая относительная погрешность измерений вертикальных перемещений штампа при единичной ступени нагружения не превышала 0,5 %.

Измерение давления под подошвой штампа осуществлялось манометром образцовым № 27588 класса точности 0,002 с предельным давлением 1 МПа. Следовательно, абсолютное значение погрешности измерения прибора составляло 1,7 кПа, а максимальная ожидаемая относительная погрешность измерения давления при единичной ступени нагружения не превышала 3,4 %.



Таким образом, при применении данных средств измерения максимальная ожидаемая погрешность в ходе определения значений модуля деформации усиленных грунтовых массивов не превышала 1,75 %. При заданной доверительной вероятности 0,95 данное значение погрешностей являются приемлемым.

Проведение **третьего блока** исследований направлено на получение закономерностей изменения физических характеристик уплотненного грунта при его усилении набивными сваями в раскатанных скважинах. Эти закономерности необходимы для решения вопроса, связанного с разработкой цифровой модели усиленного массива при численном моделировании, максимально полно отражающей внутренние процессы его работы.

В качестве параметра, отражающего изменение физических характеристик уплотненного грунта, был выбран коэффициент пористости. Исследования по выявлению зависимостей так же, как и при выполнении первого и второго блоков, проводились в глинистых грунтах (песчанистых супесях и легких суглинках). Как для супесей, так и для суглинков рассматривалось по девять площадок с различным сочетанием консистенции и коэффициентов пористости исходных (неуплотненных) грунтов. Перечень площадок и их инженерно-геологические условия при выполнении третьего блока экспериментальных исследований представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Перечень площадок и их инженерно-геологические условия при выполнении третьего блока экспериментальных исследований

| Площадка | Вид грунта | Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> (сред.) | Влажность на границе текучести $w_L$ , д.е. (сред.) | Влажность на границе раскатывания $w_P$ , д.е. (сред.) | Показатель текучести $I_L$ , д.е. | Начальное значение коэффициента пористости, $e_0$ |
|----------|------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1        | Супесь     | 2,69                                                         | 0,20                                                | 0,18                                                   | 0...0,25                          | 0,650...0,725                                     |
| 2        |            |                                                              |                                                     |                                                        |                                   | 0,725...0,800                                     |
| 3        |            |                                                              |                                                     |                                                        |                                   | 0,800...0,875                                     |
| 4        |            |                                                              |                                                     |                                                        | 0,25...0,50                       | 0,650...0,725                                     |
| 5        |            |                                                              |                                                     |                                                        |                                   | 0,725...0,800                                     |
| 6        |            |                                                              |                                                     |                                                        |                                   | 0,800...0,875                                     |
| 7        |            |                                                              |                                                     |                                                        | 0,50...0,75                       | 0,650...0,725                                     |
| 8        |            |                                                              |                                                     |                                                        |                                   | 0,725...0,800                                     |
| 9        |            |                                                              |                                                     |                                                        |                                   | 0,800...0,875                                     |

Продолжение таблицы 2.3

| Площадка | Вид<br>грунта      | Плотность<br>частиц<br>грунта<br>$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup><br>(сред.) | Влажность<br>на границе<br>текучести<br>$w_L$ , д.е.<br>(сред.) | Влажность на<br>границе рас-<br>катывания<br>$w_p$ , д.е.<br>(сред.) | Показатель<br>текучести<br>$I_L$ , д.е. | Начальное<br>значение ко-<br>эффициента<br>пористости, $e_0$ |
|----------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 10       | Суглинок<br>легкий | 2,70                                                                     | 0,30                                                            | 0,20                                                                 | 0...0,25                                | 0,650...0,725                                                |
| 11       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      |                                         | 0,725...0,800                                                |
| 12       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      |                                         | 0,800...0,875                                                |
| 13       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      | 0,25...0,50                             | 0,650...0,725                                                |
| 14       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      |                                         | 0,725...0,800                                                |
| 15       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      |                                         | 0,800...0,875                                                |
| 16       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      | 0,50...0,75                             | 0,650...0,725                                                |
| 17       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      |                                         | 0,725...0,800                                                |
| 18       |                    |                                                                          |                                                                 |                                                                      |                                         | 0,800...0,875                                                |

Исследования проводились с использованием грунтоуплотняющего рабочего органа с диаметром наибольшего (верхнего) катка 250 мм. Исследования по третьему блоку проводились в несколько этапов и заключались в следующем:

1. На каждом опытном участке производилась раскатка скважин глубиной до 4 м. Погружение рабочего органа в грунт осуществлялось при помощи буровой установки на гусеничном ходу *Nippon Sharyo*.

2. Раскатанные скважины заполнялись грунтоцементным раствором с тщательным вибротромбованием.

3. Через 20 суток после окончания заполнения раскатанных скважин производилось вскрытие шурфов глубиной 2,5 м с отбором образцов ненарушенной структуры уплотненных грунтов (методом режущего кольца). Отбор образцов производился в интервале глубин от 1,5 до 2,0 м, на расстояниях 15, 20, 25, 30, 40 и 50 см от оси раскатанной скважины (рисунок 2.11). Для повышения достоверности результатов исследований отбор каждого образца выполнялся в шести повторностях, что позволило сформировать выборку для последующей статистической обработки данных.

4) Отобранные образцы ненарушенной структуры уплотненного грунта исследовались в геотехнической лаборатории, где определялась их плотность и влажность. Далее расчетным способом определялся коэффициент пористости грунта.



Рисунок 2.11 – Шурф, вскрытый около набивных свай

В результате исследований были определены плотности и влажности, рассчитаны коэффициенты пористости уплотненных грунтов на расстоянии от 20 до 50 см от оси набивной сваи. При таком расположении точек определения плотности можно наиболее явно выявить границы зоны уплотнения грунта. Из шурфов также прослеживались геометрические параметры набивных свай и их качество (рисунок 2.12).

а)



б)



Рисунок 2.12 – Исследования, выполняемые в вскрытых шурфах:

*а* – отбор образцов уплотненного грунта методом режущего кольца; *б* – замер диаметра набивной сваи

## 2.2 Исследование работы раскатчиков скважин при устройстве усиленных оснований

Для определения наиболее эффективного раскатывающего рабочего органа проведены исследования работы двух типов навесного оборудования (РС-250 и ГРО-250) в идентичных грунтовых условиях.

Основные данные, полученные в ходе проведения первого блока экспериментальных исследований, сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Значение времени, необходимое на раскатку одной скважины глубиной 10 м

| Площадка                                                                                                      | Рабочий орган | Время раскатки каждого погонного метра скважины, мин<br>(с накопительным итогом), мин |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                               |               | 1                                                                                     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| 1                                                                                                             | РС-250        | 18,5                                                                                  | 31,5 | 46,5 | 70,1 | 95,2 | 121,5 | 175,8 | 205,4 | 242,5 | 281,8 |
|                                                                                                               | ГРО-250       | 8,8                                                                                   | 12,5 | 16,3 | 20,6 | 26,5 | 29,6  | 49,5  | 56,8  | 66,5  | 76,8  |
| 2                                                                                                             | РС-250        | 13,1                                                                                  | 24,5 | 32,5 | 49,8 | 69,1 | 102,2 | 142,5 | 174,5 | 212,5 | 246,1 |
|                                                                                                               | ГРО-250       | 4,8                                                                                   | 7,6  | 11,8 | 15,6 | 19,5 | 23,8  | 41,2  | 46,3  | 54,1  | 63,5  |
| 3                                                                                                             | РС-250        | 6,2                                                                                   | 19,3 | 28,6 | 41,5 | 62,3 | 85,1  | 133,5 | 161,6 | 192,5 | 220,8 |
|                                                                                                               | ГРО-250       | 3,1                                                                                   | 5,2  | 8,6  | 12,1 | 16,1 | 20,8  | 35,4  | 39,6  | 43,2  | 51,8  |
| Примечание – Значения, представленные в таблице, средние по результатам десяти измерений для каждой площадки. |               |                                                                                       |      |      |      |      |       |       |       |       |       |

Согласно проведенным исследованиям количество затраченного времени для образования скважины зависит от типа рабочего органа, а также от состояния грунтов. Для образования одной десятиметровой скважины рабочим органом с подвижными катками требуется примерно в четыре раза больше времени, чем для образования такой же скважины грунтоуплотняющим рабочим органом с неподвижными катками (рисунок 2.13).



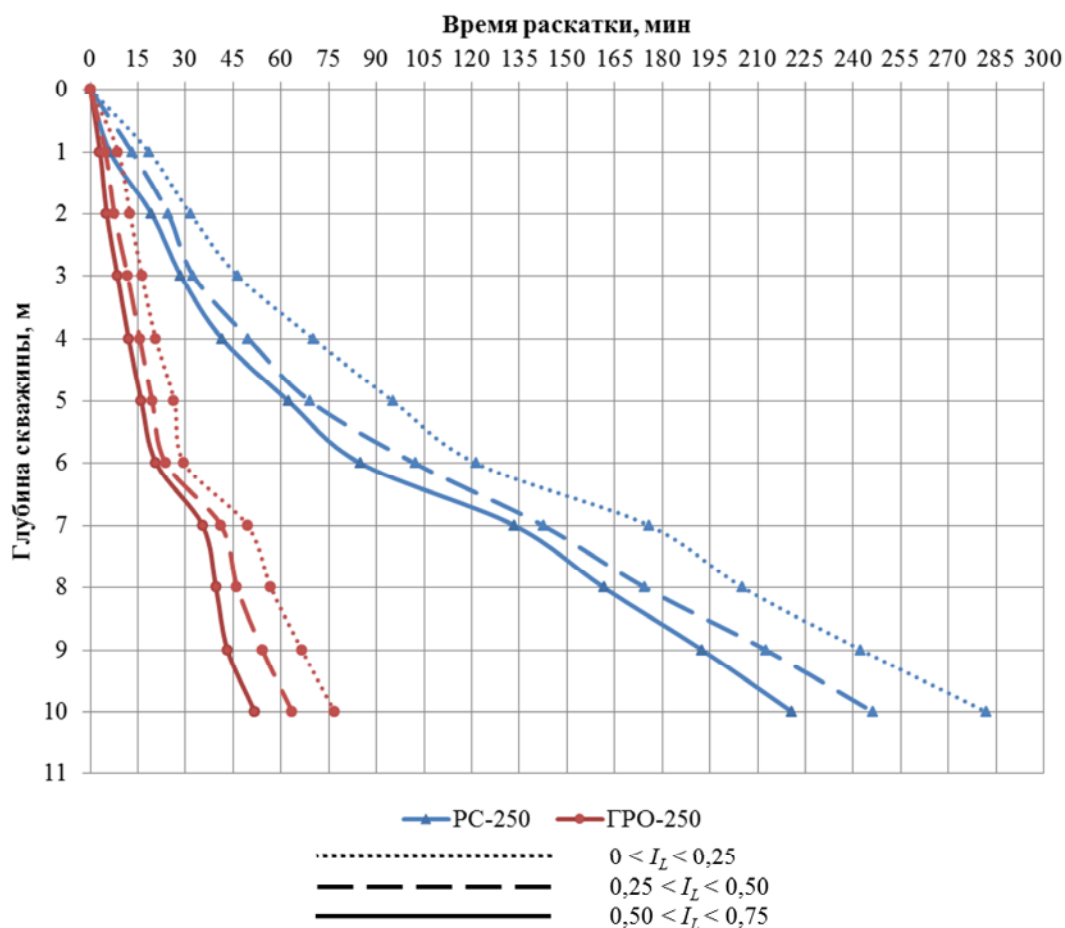


Рисунок 2.13 – Осредненный график, отражающий затраты времени на раскатку одной десятиметровой скважины с применением различных типов раскатывающих рабочих органов

На всех графиках прослеживается скачок затрачиваемого времени на раскатку в интервале глубин от 6 до 7 м. Это объясняется технологической необходимостью надставки дополнительной штанги, максимальная длина которой составляет 6 м. Затрачиваемое время на надставку в среднем составляет 10 минут.

Средняя скорость раскатки грунтов с показателем текучести  $0 < I_L < 0,25$ ,  $0,25 < I_L < 0,50$  и  $0,50 < I_L < 0,75$  с использованием РС-250 составляет 3,5, 4,1 и 4,5 см/мин соответственно. При этом средняя скорость раскатки таких же грунтов с использованием ГРО-250 составляет 13,1, 15,8 и 19,3 см/мин соответственно.

В случае реализации проектных решений по устройству основания плитного фундамента здания путем усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, при средних размерах в плане строящихся объектов  $20 \times 30$  м, общее число раскатанных скважин может достигать 1 000 шт. При средней глубине рас-

катки 10 м, общая длина раскатки скважин на объект может составлять 10 000 м. п. При данных объемах работ продолжительность усиления с учетом использования раскатывающего рабочего органа с подвижными катками (РС-250) может достигать 6,5 месяцев непрерывной работы, при использовании раскатывающего рабочего органа с неподвижными катками (ГРО-250) общий срок выполнения работ может снизиться до полутора месяцев. Данная разница во времени и скорости выполнения строительно-монтажных работ по усилению грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах позволяет явно выделить наиболее предпочтительную конструкцию рабочего органа для строительных организаций. В связи с чем дальнейшие исследования будут проводиться с использованием раскатчика скважин с неподвижными катками.

### 2.3 Исследование влияния набивных свай в раскатанных скважинах на деформационные свойства грунтового массива

Для получения возможности использования результатов работы на стадии проектирования проведены исследования, направленные на изучение сжимаемости усиленных грунтовых массивов. Результаты исследований изменения диаметров раскатанных скважин сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Значения диаметров скважин

| Схема | Сочетание факторов                                 | Диаметр скважины $d$ , мм,<br>в повторностях для шести скважин |     |     |     |     |     |
|-------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|       |                                                    | 1                                                              | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| 1     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,650; 0 < I_L < 0,25$       | 250                                                            | 240 | 260 | 250 | 240 | 250 |
| 2     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,650; 0,25 < I_L < 0,37$ | 250                                                            | 240 | 260 | 250 | 260 | 250 |
| 3     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,650; 0,37 < I_L < 0,50$  | 240                                                            | 220 | 240 | 220 | 230 | 230 |
| 4     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,650; 0,50 < I_L < 0,63$ | 220                                                            | 240 | 230 | 230 | 230 | 230 |
| 5     | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,650; 0,63 < I_L < 0,75$  | 160                                                            | 140 | 160 | 160 | 150 | 150 |
| 6     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,700; 0,25 < I_L < 0,37$    | 250                                                            | 240 | 250 | 230 | 250 | 240 |

Продолжение таблицы 2.5

| Схема | Сочетание факторов                                 | Диаметр скважины $d$ , мм,<br>в повторностях для шести скважин |     |     |     |     |     |
|-------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|       |                                                    | 1                                                              | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| 7     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,700; 0,37 < I_L < 0,50$ | 230                                                            | 240 | 230 | 220 | 230 | 220 |
| 8     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,700; 0,50 < I_L < 0,63$  | 170                                                            | 160 | 160 | 180 | 160 | 170 |
| 9     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,700; 0,63 < I_L < 0,75$ | 80                                                             | 90  | 80  | 80  | 70  | 80  |
| 10    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,700; 0 < I_L < 0,25$     | 230                                                            | 250 | 230 | 250 | 240 | 250 |
| 11    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,750; 0,37 < I_L < 0,50$    | 190                                                            | 200 | 210 | 200 | 190 | 200 |
| 12    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,750; 0,50 < I_L < 0,63$ | 140                                                            | 140 | 150 | 160 | 150 | 150 |
| 13    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,750; 0,63 < I_L < 0,75$  | 50                                                             | 50  | 50  | 40  | 50  | 50  |
| 14    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,750; 0 < I_L < 0,25$    | 220                                                            | 230 | 230 | 220 | 220 | 240 |
| 15    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,750; 0,25 < I_L < 0,37$  | 220                                                            | 200 | 220 | 200 | 220 | 210 |
| 16    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,800; 0,50 < I_L < 0,63$    | 80                                                             | 70  | 80  | 80  | 90  | 80  |
| 17    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,800; 0,63 < I_L < 0,75$ | 50                                                             | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
| 18    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,800; 0 < I_L < 0,25$     | 220                                                            | 220 | 220 | 220 | 230 | 230 |
| 19    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,800; 0,25 < I_L < 0,37$ | 200                                                            | 190 | 210 | 200 | 210 | 210 |
| 20    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,800; 0,37 < I_L < 0,50$  | 180                                                            | 180 | 160 | 170 | 170 | 180 |
| 21    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,850; 0,63 < I_L < 0,75$    | 50                                                             | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
| 22    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,850; 0 < I_L < 0,25$    | 220                                                            | 230 | 230 | 210 | 210 | 210 |
| 23    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,850; 0,25 < I_L < 0,37$  | 190                                                            | 170 | 180 | 180 | 170 | 180 |
| 24    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,850; 0,37 < I_L < 0,50$ | 140                                                            | 140 | 160 | 150 | 150 | 150 |
| 25    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,850; 0,50 < I_L < 0,63$  | 50                                                             | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |

Аналитическая обработка результатов полевых испытаний, представленных в виде зависимостей осадки штампа от передаваемой на него нагрузки, позволила выделить линейные участки графиков. Для таких участков графиков, характеризующихся линейной зависимостью деформаций от напряжений в усиленных грунтовых массивах, определены значения модуля деформации  $E$ . Результаты определения модулей деформации усиленных массивов сведены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Значения модулей деформации усиленных массивов

| Схема | Сочетание факторов                                 | Модуль деформации $E$ , МПа |                                       |    |    |    |    |    |
|-------|----------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|
|       |                                                    | исходно-<br>го грунта       | усиленного массива,<br>в повторностях |    |    |    |    |    |
|       |                                                    |                             | 1                                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| 1     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,650; 0 < I_L < 0,25$       | 30                          | 49                                    | 56 | 48 | 53 | 42 | 46 |
| 2     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,650; 0,25 < I_L < 0,37$ | 28                          | 44                                    | 39 | 41 | 46 | 47 | 48 |
| 3     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,650; 0,37 < I_L < 0,50$  | 25                          | 45                                    | 37 | 37 | 40 | 35 | 34 |
| 4     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,650; 0,50 < I_L < 0,63$ | 22                          | 32                                    | 33 | 36 | 28 | 24 | 26 |
| 5     | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,650; 0,63 < I_L < 0,75$  | 18                          | 22                                    | 28 | 30 | 35 | 32 | 28 |
| 6     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,700; 0,25 < I_L < 0,37$    | 26                          | 38                                    | 47 | 43 | 38 | 39 | 35 |
| 7     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,700; 0,37 < I_L < 0,50$ | 23                          | 34                                    | 40 | 33 | 34 | 34 | 29 |
| 8     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,700; 0,50 < I_L < 0,63$  | 21                          | 37                                    | 32 | 28 | 30 | 28 | 26 |
| 9     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,700; 0,63 < I_L < 0,75$ | 17                          | 17                                    | 21 | 21 | 27 | 23 | 24 |
| 10    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,700; 0 < I_L < 0,25$     | 29                          | 40                                    | 35 | 35 | 41 | 47 | 47 |
| 11    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,750; 0,37 < I_L < 0,50$    | 21                          | 27                                    | 32 | 33 | 32 | 28 | 27 |
| 12    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,750; 0,50 < I_L < 0,63$ | 20                          | 27                                    | 32 | 26 | 27 | 26 | 29 |
| 13    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,750; 0,63 < I_L < 0,75$  | 16                          | 23                                    | 21 | 15 | 21 | 19 | 22 |
| 14    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,750; 0 < I_L < 0,25$    | 27                          | 34                                    | 38 | 39 | 42 | 39 | 37 |
| 15    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,750; 0,25 < I_L < 0,37$  | 24                          | 35                                    | 29 | 35 | 32 | 26 | 29 |
| 16    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,800; 0,50 < I_L < 0,63$    | 18                          | 22                                    | 23 | 17 | 22 | 29 | 24 |
| 17    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,800; 0,63 < I_L < 0,75$ | 14                          | 19                                    | 21 | 19 | 18 | 17 | 14 |
| 18    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,800; 0 < I_L < 0,25$     | 24                          | 25                                    | 28 | 29 | 33 | 32 | 34 |
| 19    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,800; 0,25 < I_L < 0,37$ | 23                          | 31                                    | 29 | 26 | 30 | 27 | 31 |
| 20    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,800; 0,37 < I_L < 0,50$  | 20                          | 31                                    | 27 | 29 | 23 | 27 | 24 |
| 21    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,850; 0,63 < I_L < 0,75$    | 10                          | 13                                    | 17 | 14 | 15 | 10 | 15 |
| 22    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,850; 0 < I_L < 0,25$    | 21                          | 28                                    | 31 | 24 | 27 | 26 | 25 |
| 23    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,850; 0,25 < I_L < 0,37$  | 20                          | 22                                    | 26 | 23 | 26 | 32 | 27 |
| 24    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,850; 0,37 < I_L < 0,50$ | 19                          | 19                                    | 24 | 30 | 28 | 27 | 23 |
| 25    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,850; 0,50 < I_L < 0,63$  | 16                          | 23                                    | 18 | 23 | 26 | 23 | 26 |

Анализ выполненных исследований показывает, что грунтовые условия и глубина раскатки влияют на деформационные характеристики усиленного массива. При этом влияние каждого фактора оценивается различно.

Анализ представленного характера изменения диаметров скважин позволяет предположить, что рабочий орган с неподвижными катками образует полость скважины как за счет деформации грунта с изменением объема в радиальном направлении, так и за счет перемещения грунта без значительного изменения его объема вдоль оси скважины и в направлении вращения. При этом грунт, находящийся в зоне уплотнения, под действием сил трения скольжения, возникающих на контакте с боковой поверхностью раскатчика, частично увлекается рабочим органом в направлении проходки, а частично – в направлении вращения. При усилении грунтов мягкопластичной консистенции наблюдается интенсивное затягивание раскатанных скважин. Это приводит к уменьшению зоны вокруг скважины, в которой повышаются физические характеристики грунта. Уменьшение диаметров в таких грунтах еще говорит и о том, что набивные сваи, устраиваемые в таких скважинах, будут иметь неравномерную площадь поперечного сечения по глубине, что в конечном итоге отразится на деформируемости усиленного массива в целом.

Подобное уменьшение диаметров также осложняет процесс изготовления набивных свай. При заливке скважин мелкозернистым бетоном или грунтоцементным раствором под действием собственного веса материала заполнителя происходит дальнейшее затягивание скважин и, как следствие, разуплотнение грунта.

Для решения возникшей проблемы было принято решение использовать одну из существующих модификаций раскатывающего рабочего органа с полым валом и выходным отверстием в конусе (рисунок 2.14). Подобная конструкция раскатчика позволяет выполнять набивные сваи за один рабочий цикл при реверсивном (обратном) ходе устройства и позволяет снизить значительное «захлопывание» раскатанных скважин.

Подобная модификация использовалась при усилении грунтов с показателем текучести, находящимся в интервале от 0,5 до 0,75.

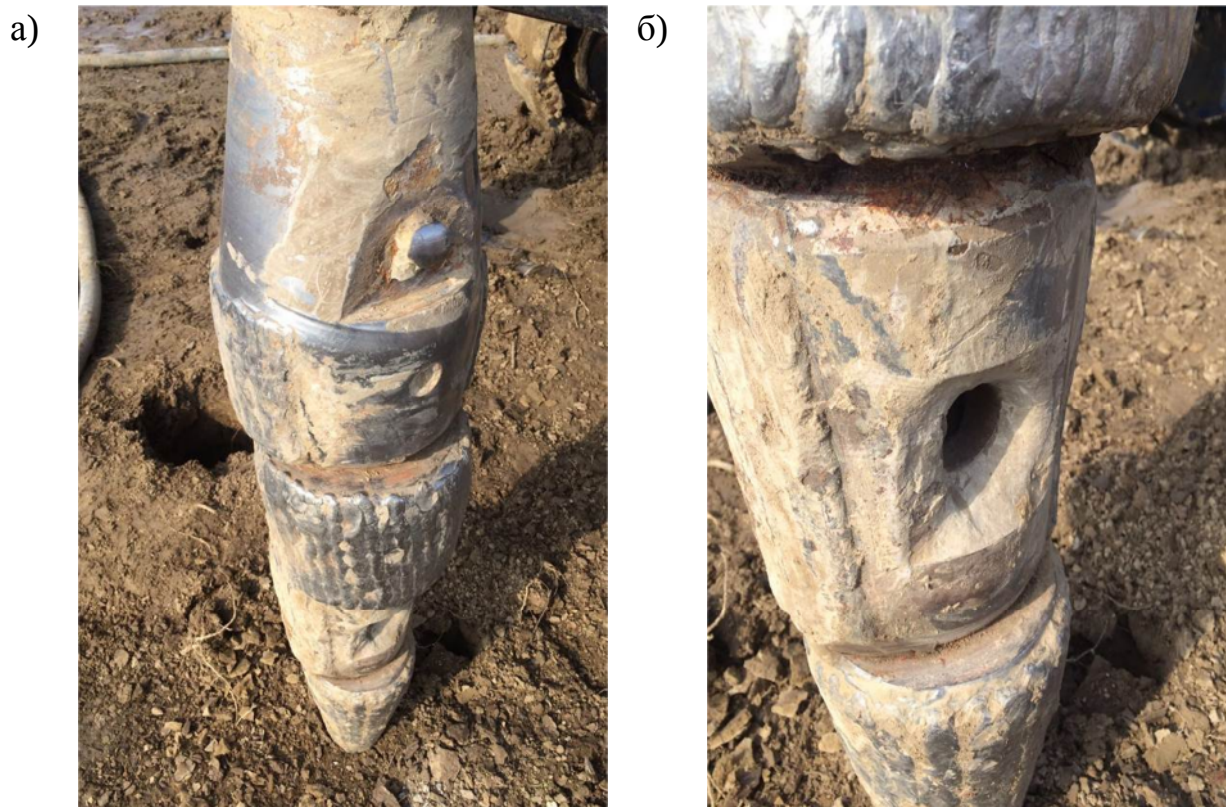


Рисунок 2.14 – Модификация раскатчика скважин с полым валом и выходным отверстием:

*а* – общий вид раскатчика; *б* – выходное отверстие для подачи раствора

Буровая установка при использовании полого раскатчика дополнительно оборудовалась раствором узлом и высоконапорными шлангами, через которые подавался грунтоцементный раствор описанной выше рецептуры. Подача раствора осуществлялась через расходомер, установленный на входе в систему. Кроме того, с помощью неподвижной анкерной системы замерялся уровень поверхности раствора в скважине непосредственно после изготовления набивной сваи и после отвердевания раствора. Данные замеры были выполнены для контрольной оценки диаметров скважин (посредством перерасчета объема) при усилении глинистых грунтов с показателем текучести от 0,5 до 0,75.

В ходе статистической обработки результатов экспериментальных исследований по второму блоку выявлялись значащие факторы (с условным обозначением *A*, *B* и *C*) использованной математической модели. Значимость факторов определялась по методике, описанной К. Хартманом, Э. Лецким и В. Шефером [103].

Для частных реализаций  $p^2$  выборок (с условным обозначением  $\ddot{y}_{ijk}$ ) результаты наблюдений представляются в виде [103]:

$$\ddot{y}_{ijk} = m + a_i + b_j + c_k + \overset{w}{e}_{ijk}, \quad (2.1)$$

где  $m, a_i, b_j, c_k$  – постоянные величины;

$\overset{w}{e}_{ijk}$  – независимые нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием 0 и одинаковой дисперсией  $\sigma^2$ .

При использовании условий репараметризации

$$\sum_{i=1}^p a_i = \sum_{j=1}^p b_j = \sum_{k=1}^p c_k = 0 \quad (2.2)$$

методом наименьших квадратов находятся параметры оценки модели  $\hat{m}, \hat{a}_i, \hat{b}_j, \hat{c}_k$ . В ходе дисперсионного анализа выполняется проверка равенства нулю параметров  $a_i, b_i$  и  $c_i$  путем проверки гипотез  $H_A$  (параметры  $a_i = 0, i = 1(1)p$ ),  $H_B$  (параметры  $b_j = 0, j = 1(1)p$ ) и  $H_C$  (параметры  $c_k = 0, k = 1(1)p$ ). Для этого используются значения выборочных средних:

$$\begin{aligned} \overset{w}{y}_{i..} &= \frac{1}{p} \sum_{j,k} \overset{w}{y}_{ijk}, \quad \overset{w}{y}_{.j.} = \frac{1}{p} \sum_{i,k} \overset{w}{y}_{ijk}, \\ \overset{w}{y}_{...k} &= \frac{1}{p} \sum_{i,j} \overset{w}{y}_{ijk}, \quad \overset{w}{y}_{...} = \frac{1}{p^2} \sum_{i,j,k \in L} \overset{w}{y}_{ijk}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $L$  – множество комбинаций индексов, включенных в план экспериментального исследования.

Обозначается далее

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i,j,k \in L} \left( \overset{w}{y}_{ijk} - \overset{w}{y}_{...} \right)^2, \quad S_A = p \sum_{i=1}^p \left( \overset{w}{y}_{i..} - \overset{w}{y}_{...} \right)^2, \\ S_B &= p \sum_{j=1}^p \left( \overset{w}{y}_{.j.} - \overset{w}{y}_{...} \right)^2, \quad S_C = p \sum_{k=1}^p \left( \overset{w}{y}_{...k} - \overset{w}{y}_{...} \right)^2, \\ S_R &= S - S_A - S_B - S_C, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$S_A^2 = \frac{S_A}{p-1}, \quad S_B^2 = \frac{S_B}{p-1}, \quad S_C^2 = \frac{S_C}{p-1}, \quad S_R^2 = \frac{S_R}{(p-1)(p-2)}.$$

Гипотезы  $H_A, H_B$  и  $H_C$  отвергаются при помощи величин  $S_A^2 / S_R^2, S_B^2 / S_R^2$  и  $S_C^2 / S_R^2$ , которые подчиняются  $F$ -распределению с числами степеней свободы

$\varphi_1 = p - 1$  и  $\varphi_2 = (p - 1)(p - 2)$ . Отвержение гипотез происходит в том случае, если вычисленные значения оказываются больше критического значения  $F$ -распределения [103]. Значение критического  $F$ -распределения для программы исследования, при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числах степеней свободы  $\varphi_1 = 4$  и  $\varphi_2 = 12$  составляет  $F = 3,2592$ .

Для принятой математической модели необходим ввод частных значений  $\bar{y}_{ijk}$ , определенных с достаточной степенью достоверности. Обеспечение достоверности выполнено путем дополнительных наблюдений значений  $\bar{y}_{ijk}$ . В соответствии с рекомендациями ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» наблюдение одного значения выполнялось не менее чем в шести повторностях. Используя распределение Стьюдента, для каждой полученной выборки выполнена оценка коэффициента вариации и среднеквадратического отклонения. Результаты этого этапа статистической обработки представлены в таблицах 2.7 и 2.8.

Таблица 2.7 – Статистическая обработка малых выборок диаметров раскатанных скважин

| Схема | Сочетание факторов                                 | Среднее значение диаметра, мм | Кол-во наблюдений | Средне-квадратическое отклонение $S$ | Коэффициент вариации, $v$ |
|-------|----------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,650; 0 < I_L < 0,25$       | 248,3                         | 6                 | 7,53                                 | 0,03                      |
| 2     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,650; 0,25 < I_L < 0,37$ | 251,7                         | 6                 | 7,53                                 | 0,03                      |
| 3     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,650; 0,37 < I_L < 0,50$  | 230,0                         | 6                 | 8,94                                 | 0,04                      |
| 4     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,650; 0,50 < I_L < 0,63$ | 230,0                         | 6                 | 6,32                                 | 0,03                      |
| 5     | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,650; 0,63 < I_L < 0,75$  | 153,3                         | 6                 | 8,16                                 | 0,05                      |
| 6     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,700; 0,25 < I_L < 0,37$    | 243,3                         | 6                 | 8,16                                 | 0,03                      |
| 7     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,700; 0,37 < I_L < 0,50$ | 228,3                         | 6                 | 7,53                                 | 0,03                      |
| 8     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,700; 0,50 < I_L < 0,63$  | 166,7                         | 6                 | 8,16                                 | 0,05                      |
| 9     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,700; 0,63 < I_L < 0,75$ | 80,0                          | 6                 | 6,32                                 | 0,08                      |
| 10    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,700; 0 < I_L < 0,25$     | 241,7                         | 6                 | 9,83                                 | 0,04                      |
| 11    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,750; 0,37 < I_L < 0,50$    | 198,3                         | 6                 | 7,53                                 | 0,04                      |
| 12    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,750; 0,50 < I_L < 0,63$ | 148,3                         | 6                 | 7,53                                 | 0,05                      |
| 13    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,750; 0,63 < I_L < 0,75$  | 48,3                          | 6                 | 4,08                                 | 0,08                      |



Продолжение таблицы 2.7

| Схема | Сочетание факторов                                 | Среднее значение диаметра, мм | Кол-во наблюдений | Средне-квадратическое отклонение $S$ | Коэффициент вариации, $v$ |
|-------|----------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 14    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,750; 0 < I_L < 0,25$    | 226,7                         | 6                 | 8,16                                 | 0,04                      |
| 15    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,750; 0,25 < I_L < 0,37$  | 211,7                         | 6                 | 9,83                                 | 0,05                      |
| 16    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,800; 0,50 < I_L < 0,63$    | 80,0                          | 6                 | 6,32                                 | 0,08                      |
| 17    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,800; 0,63 < I_L < 0,75$ | 50,0                          | 6                 | 0,00                                 | 0,00                      |
| 18    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,800; 0 < I_L < 0,25$     | 223,3                         | 6                 | 5,16                                 | 0,02                      |
| 19    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,800; 0,25 < I_L < 0,37$ | 203,3                         | 6                 | 8,16                                 | 0,04                      |
| 20    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,800; 0,37 < I_L < 0,50$  | 173,3                         | 6                 | 8,16                                 | 0,05                      |
| 21    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,850; 0,63 < I_L < 0,75$    | 50,0                          | 6                 | 0,00                                 | 0,00                      |
| 22    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,850; 0 < I_L < 0,25$    | 218,3                         | 6                 | 9,83                                 | 0,05                      |
| 23    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,850; 0,25 < I_L < 0,37$  | 178,3                         | 6                 | 7,53                                 | 0,04                      |
| 24    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,850; 0,37 < I_L < 0,50$ | 148,3                         | 6                 | 7,53                                 | 0,05                      |
| 25    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,850; 0,50 < I_L < 0,63$  | 50,0                          | 6                 | 0,00                                 | 0,00                      |

Таблица 2.8 – Статистическая обработка малых выборок модулей деформации усиленных массивов

| Схема | Сочетание факторов                                 | Среднее значение модуля деформации, МПа | Кол-во наблюдений | Средне-квадратическое отклонение $S$ | Коэффициент вариации, $v$ |
|-------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 1     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,650; 0 < I_L < 0,25$       | 49,0                                    | 6                 | 4,98                                 | 0,10                      |
| 2     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,650; 0,25 < I_L < 0,37$ | 44,2                                    | 6                 | 3,54                                 | 0,08                      |
| 3     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,650; 0,37 < I_L < 0,50$  | 38,0                                    | 6                 | 4,00                                 | 0,11                      |
| 4     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,650; 0,50 < I_L < 0,63$ | 29,8                                    | 6                 | 4,58                                 | 0,15                      |
| 5     | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,650; 0,63 < I_L < 0,75$  | 29,2                                    | 6                 | 4,40                                 | 0,15                      |
| 6     | $h = 0 \text{ м}; e = 0,700; 0,25 < I_L < 0,37$    | 40,0                                    | 6                 | 4,29                                 | 0,11                      |
| 7     | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,700; 0,37 < I_L < 0,50$ | 34,0                                    | 6                 | 3,52                                 | 0,10                      |
| 8     | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,700; 0,50 < I_L < 0,63$  | 30,2                                    | 6                 | 3,92                                 | 0,13                      |
| 9     | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,700; 0,63 < I_L < 0,75$ | 22,2                                    | 6                 | 3,37                                 | 0,15                      |
| 10    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,700; 0 < I_L < 0,25$     | 40,8                                    | 6                 | 5,38                                 | 0,13                      |
| 11    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,750; 0,37 < I_L < 0,50$    | 29,8                                    | 6                 | 2,79                                 | 0,09                      |

Продолжение таблицы 2.8

| Схема | Сочетание факторов                                 | Среднее значение модуля деформации, МПа | Кол-во наблюдений | Средне-квадратическое отклонение $S$ | Коэффициент вариации, $v$ |
|-------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 12    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,750; 0,50 < I_L < 0,63$ | 27,8                                    | 6                 | 2,32                                 | 0,08                      |
| 13    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,750; 0,63 < I_L < 0,75$  | 20,2                                    | 6                 | 2,86                                 | 0,14                      |
| 14    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,750; 0 < I_L < 0,25$    | 38,2                                    | 6                 | 2,64                                 | 0,07                      |
| 15    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,750; 0,25 < I_L < 0,37$  | 31,0                                    | 6                 | 3,63                                 | 0,12                      |
| 16    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,800; 0,50 < I_L < 0,63$    | 22,8                                    | 6                 | 3,87                                 | 0,17                      |
| 17    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,800; 0,63 < I_L < 0,75$ | 18,0                                    | 6                 | 2,37                                 | 0,13                      |
| 18    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,800; 0 < I_L < 0,25$     | 30,2                                    | 6                 | 3,43                                 | 0,11                      |
| 19    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,800; 0,25 < I_L < 0,37$ | 29,0                                    | 6                 | 2,10                                 | 0,07                      |
| 20    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,800; 0,37 < I_L < 0,50$  | 26,8                                    | 6                 | 2,99                                 | 0,11                      |
| 21    | $h = 0 \text{ м}; e = 0,850; 0,63 < I_L < 0,75$    | 14,0                                    | 6                 | 2,37                                 | 0,17                      |
| 22    | $h = 0,75 \text{ м}; e = 0,850; 0 < I_L < 0,25$    | 26,8                                    | 6                 | 2,48                                 | 0,09                      |
| 23    | $h = 1,5 \text{ м}; e = 0,850; 0,25 < I_L < 0,37$  | 26,0                                    | 6                 | 3,52                                 | 0,14                      |
| 24    | $h = 2,25 \text{ м}; e = 0,850; 0,37 < I_L < 0,50$ | 25,2                                    | 6                 | 3,97                                 | 0,16                      |
| 25    | $h = 3,0 \text{ м}; e = 0,850; 0,50 < I_L < 0,63$  | 23,2                                    | 6                 | 2,93                                 | 0,13                      |

Полученные коэффициенты вариации не превышают 0,17 для модулей деформации и 0,10 для диаметров скважин при предельно допустимом значении 0,30. Следовательно, среднеарифметические значения наблюдаемых параметров в достаточной степени приближены к истинным значениям. Оценка измеренных значений по критерию Стьюдента позволила сделать вывод об однородности проводимых наблюдений. Выполненный анализ позволил подтвердить достаточную степень достоверности полученных значений  $\bar{y}_{ijk}$ .

В соответствии с изложенным выше алгоритмом оценивалось влияние факторов на деформационные параметры усиленных массивов с установлением соответствующих закономерностей. Выявление значащих факторов и установление закономерностей реализовано в программно-вычислительном комплексе *STATISTICA 10.0* с использованием встроенного модуля *Design of Experiments*.

Графическое отображение результатов экспериментов приведено на рисунках 2.15–2.20.

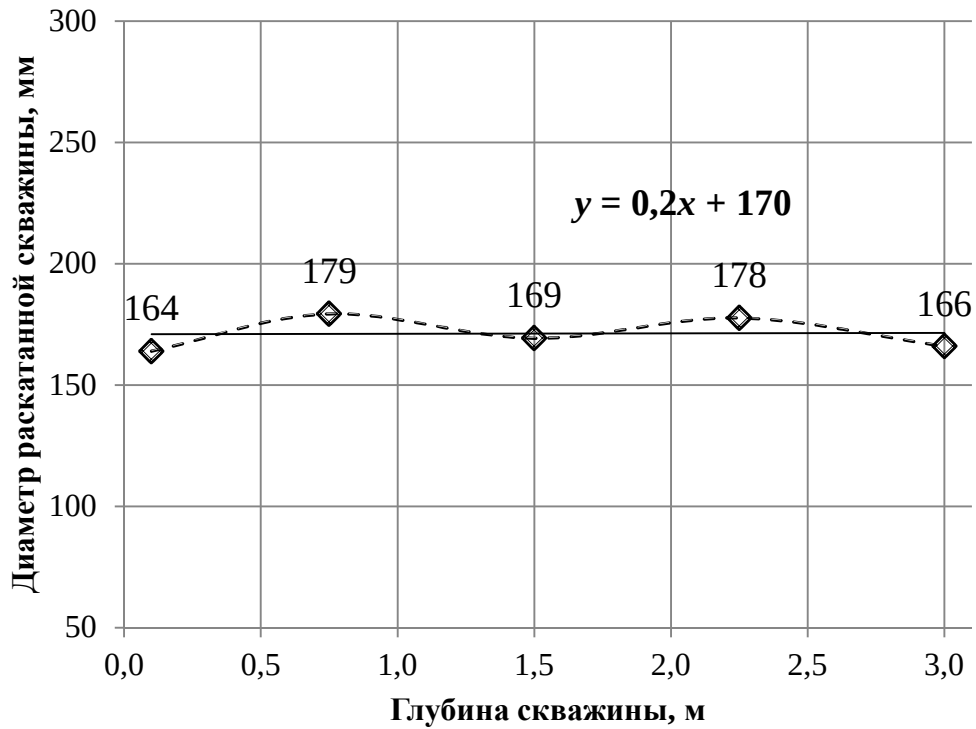


Рисунок 2.15 – График изменения диаметра скважины по глубине

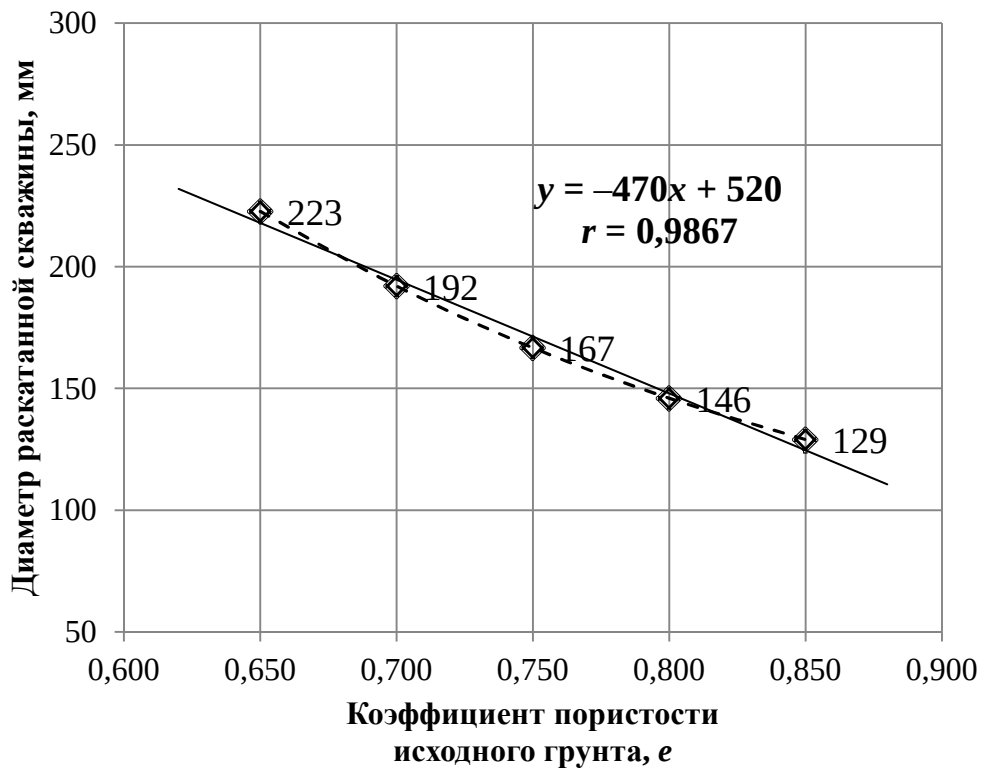


Рисунок 2.16 – Зависимость диаметра скважины от коэффициента пористости исходного грунта

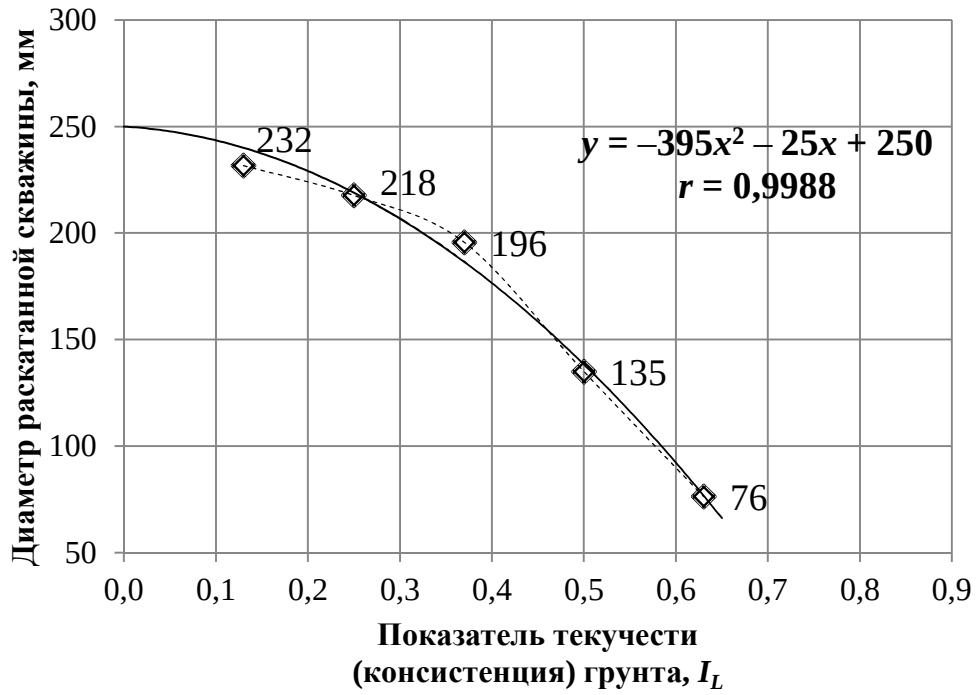


Рисунок 2.17 – Зависимость диаметра скважины от показателя текучести грунта

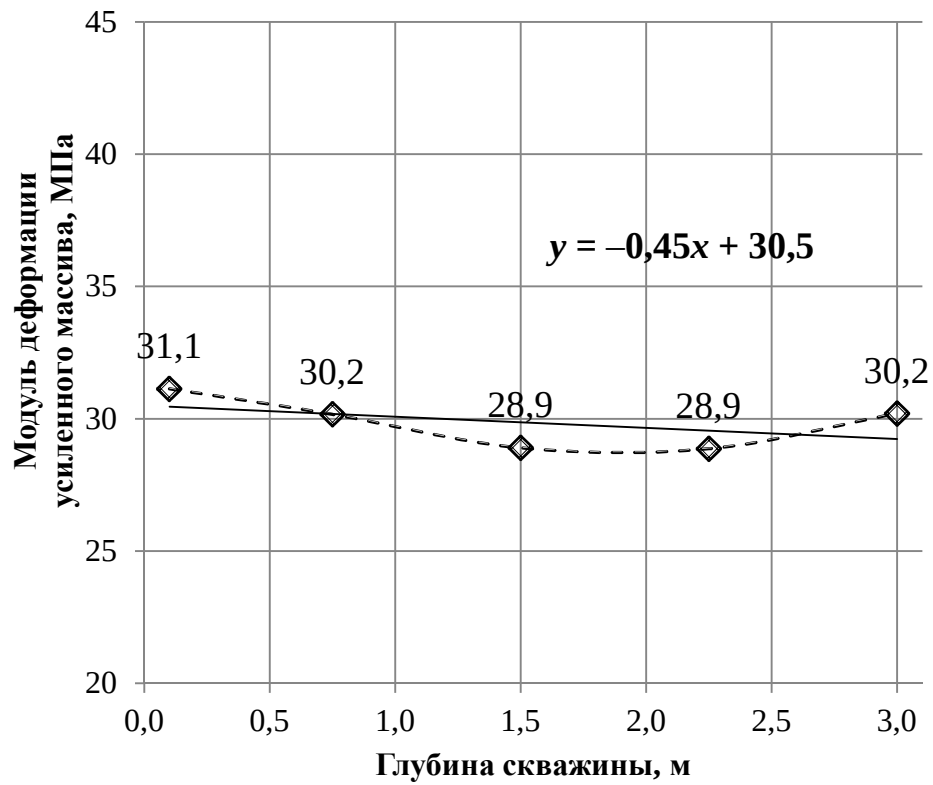


Рисунок 2.18 – График изменения модуля деформации усиленного массива по глубине

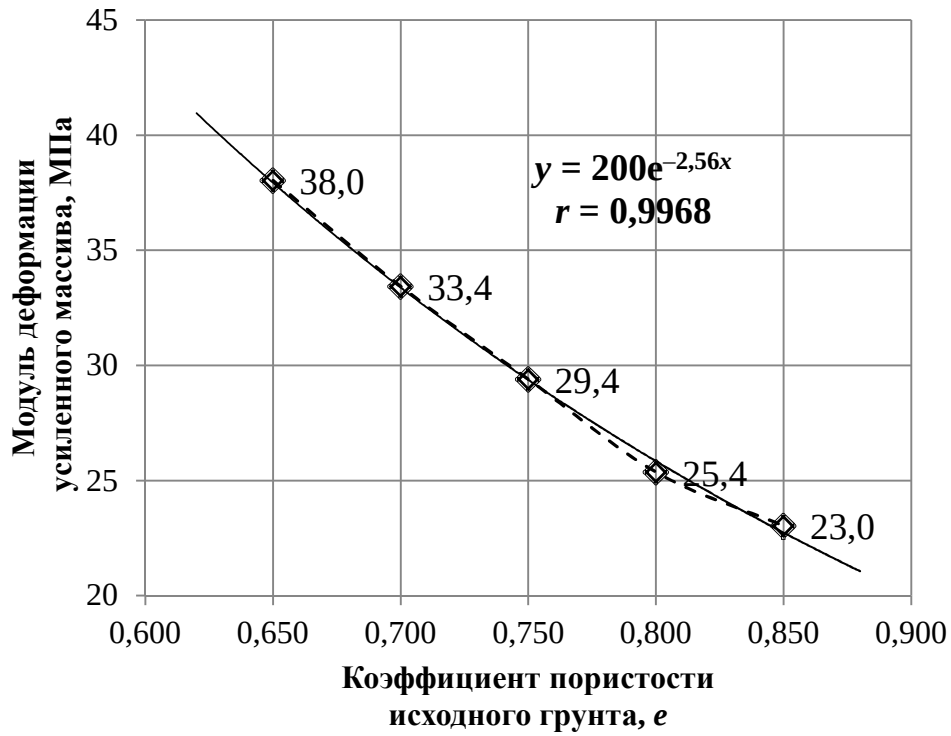


Рисунок 2.19 – Зависимость модуля деформации усиленного массива от коэффициента пористости исходного грунта

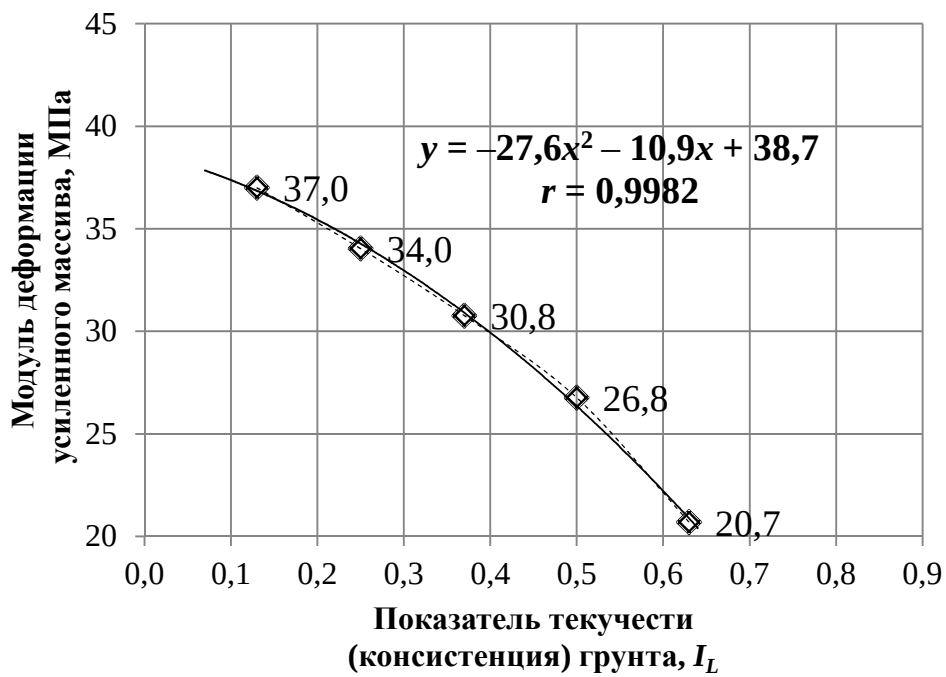


Рисунок 2.20 – Зависимость модуля деформации усиленного массива от показателя текучести грунта

Значения  $F$ -критериев Фишера приведены в таблице 2.9. Полученные значения следует интерпретировать следующим образом [103]: факторы, значения критериев которых превышают критическое значение ( $F = 3,2592$ ), не коррелируют со средней генеральной функцией выборки и являются значимыми для исследуемой математической модели.

Таблица 2.9 – Значения критериев Фишера

| Исследуемый фактор                                                                                                                       | Значения критерия Фишера        |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|
|                                                                                                                                          | для контролируемых ве-<br>личин | критическое |
| Глубина                                                                                                                                  | $\frac{0,3081}{0,6741}$         | 3,2592      |
| Коэффициент пористости                                                                                                                   | $\frac{8,9342}{26,4268}$        |             |
| Показатель текучести                                                                                                                     | $\frac{27,0683}{29,3323}$       |             |
| Примечание – Значения критерия Фишера представлены в виде дроби, в числи-<br>теле – для диаметра, в знаменателе – для модуля деформации. |                                 |             |

В результате анализа полученных закономерностей было установлено, что основное влияние на диаметры и модули 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. Кроме того, при разработке программы контроля качества проверку деформационных характеристик усиленного основания достаточно назначать в уровне кровли грунтовых слоев.

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 %, а эффективность уплотнения таких грунтов без возможности отвода грунтовой во-

ды уменьшается. Интенсивное уменьшение диаметров, которое прослеживается на графике (см. рисунок 2.16), 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 (см. рисунок 2.20). В данных инженерно-геологических 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 варьировать шагом раскатки скважин. Решение этой задачи может быть выполнено применением численного моделирования с использованием полученных в данной главе результатов.

Изменение диаметра раскатанных скважин в зависимости от коэффициента пористости уплотняемых грунтов может быть описана линейной функцией (см. рисунок 2.16). 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 со снижением коэффициента пористости исходных грунтов носит экспоненциальный характер, приближенный к естественной зависимости модуля деформации исходного грунта от коэффициента пористости (см. рисунок 2.19). Это говорит о том, что при столь существенном влиянии грунтовых условий на фактические диаметры скважин отдельное внимание следует уделить качеству выполняемых работ по раскатке.

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

Основные сочетания грунтовых параметров и их влияние на модуль деформации и диаметр раскатанной скважин отражены на рисунках 2.21, 2.22.

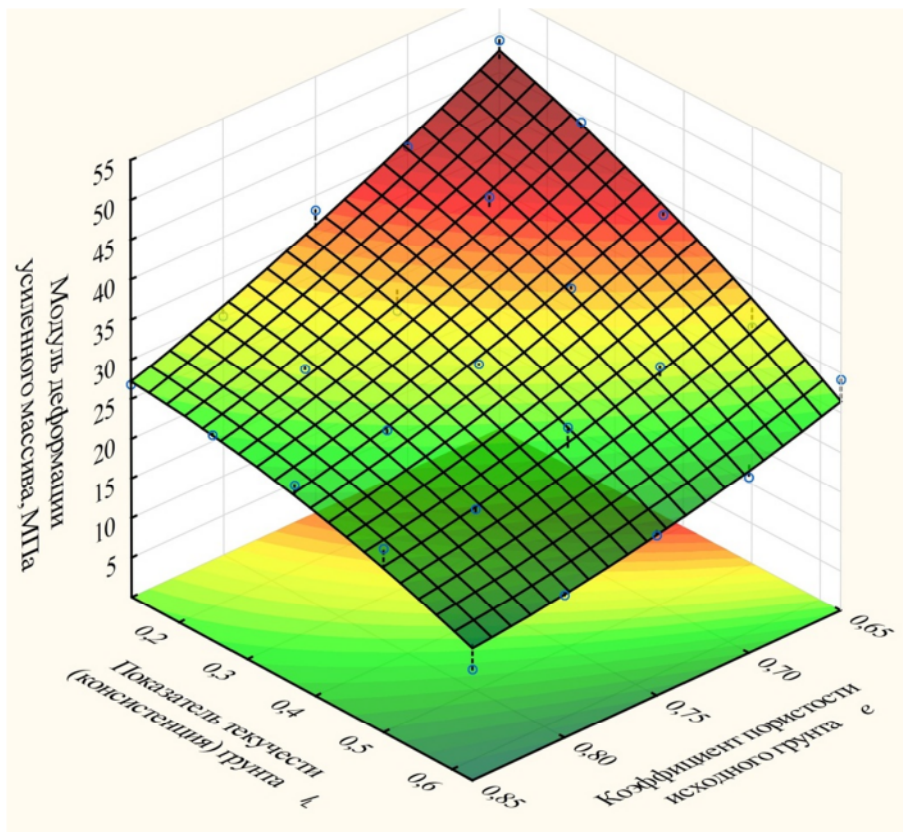


Рисунок 2.21 – Поверхность влияния грунтовых условий на модуль деформации усиленного массива

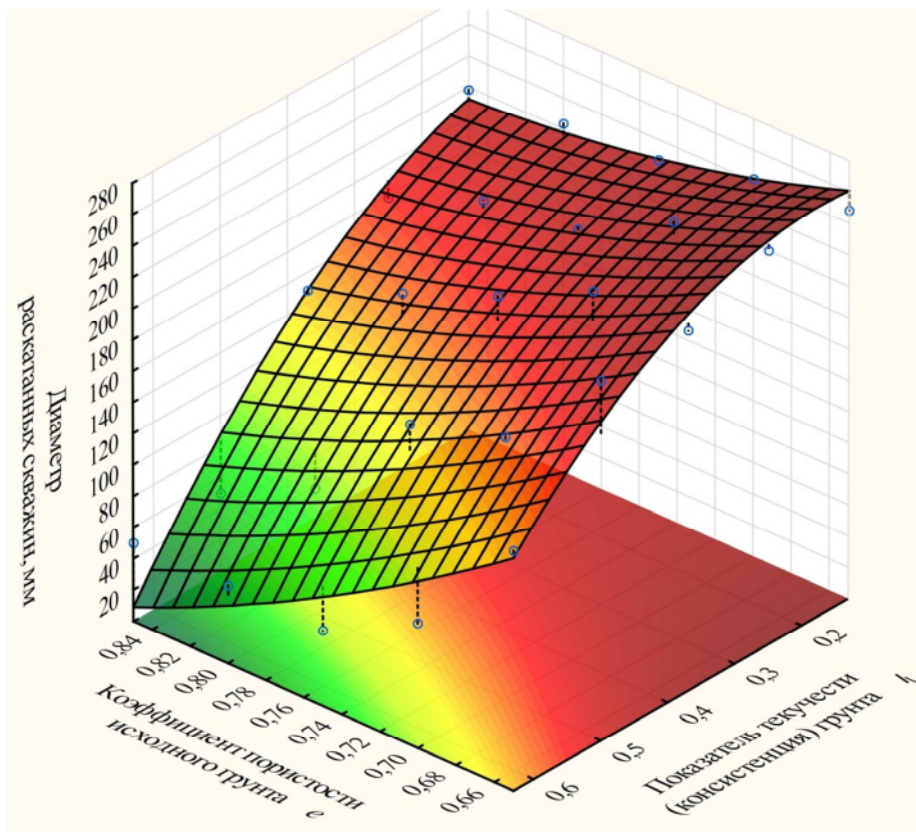


Рисунок 2.22 – Поверхность влияния грунтовых условий на диаметр раскатанной скважины



При усилении важную роль играет качество выполненных работ. Ведь технологические параметры усиления, такие как соблюдение диаметров скважин и шага расстановки, напрямую влияют на деформационные характеристики усиленного массива. Для оценки влияния диаметра скважины на модуль деформации усиленного массива была выполнена статистическая обработка средних значений (для каждого фактора) соответствующих параметров. Результат статистической обработки значений представлен в виде графика на рисунке 2.23.

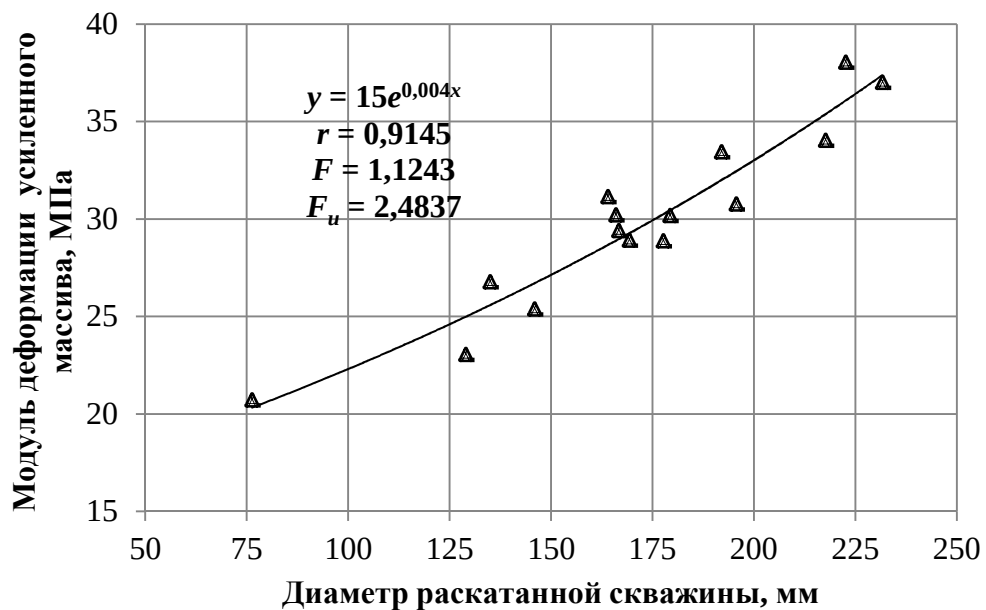


Рисунок 2.23 – Графическая интерпретация зависимости модуля деформации усиленного массива от диаметра раскатанной скважины

Анализ статистической обработки результатов экспериментов по критерию Фишера позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели регрессии (см. рисунок 2.23), что свидетельствует о принципиальной возможности ее применения при оценке эффективности усиления на стадии опытных работ и контроля качества.

Полученные результаты экспериментальных исследований в виде поверхностей влияния и графиков позволяют выполнить оценку эффективности усиления набивными сваями в раскатанных скважинах 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. В то же время данные результаты позволяют выпол-

нять расчет увеличения деформационных характеристик массивов и диаметров скважин только в случае использования раскатчика с неподвижными катками с диаметром большего (верхнего) катка 250 мм и шага расстановки набивных свай 1,0 м. Решение этой проблемы достигается численным моделированием, по результатам которого можно оценить эффективность усиления для различных шагов раскатки скважин.

Для возможности создания цифровой модели усиленных оснований был выполнен дополнительный комплекс экспериментальных исследований, направленных на получение зависимостей изменения коэффициента пористости грунта при его уплотнении раскаткой скважин. Результаты исследований приведены в параграфе 2.4.

#### **2.4 Исследование влияния раскатки скважин на физические характеристики уплотняемого грунта**

Для возможности создания цифровой модели усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах основания был выполнен комплекс дополнительных экспериментальных исследований уплотненного грунта. В результате чего был получен массив значений физических характеристик уплотненного грунта на различных расстояниях от раскатанной скважины при различном сочетании начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта. Для возможности дальнейшей статистической обработки полученных данных была выполнена проверка достоверности определения соответствующих значений. Поскольку количество определений физических характеристик для каждого сочетания грунтовых условий и расстояния от раскатанной скважины составляло не менее шести, то в соответствии с ГОСТ 20522–2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» выполнялась оценка среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации с использованием распределения Стьюдента.

В результате оценки полученных данных по критерию Стьюдента было установлено, что среднеарифметические значения малых выборок физическо-механических характеристик уплотненного грунта в достаточной степени приближены к истинным значениям определяемых величин, поскольку полученные коэффициенты вариации не превысили 0,30. Для среднеарифметических значений плотности и влажности были рассчитаны коэффициенты пористости уплотненного грунта. Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей на рисунках 2.24– 2.29.

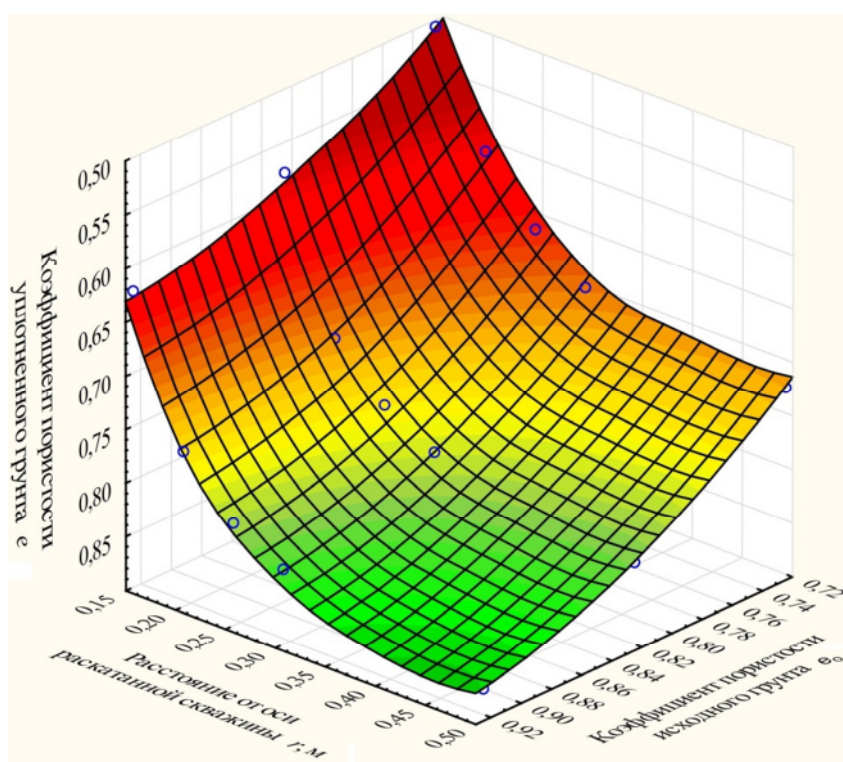


Рисунок 2.24 – Поверхность, отражающая изменение коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его уплотнении в супесях с показателем текучести  $0 < I_L \leq 0,25$

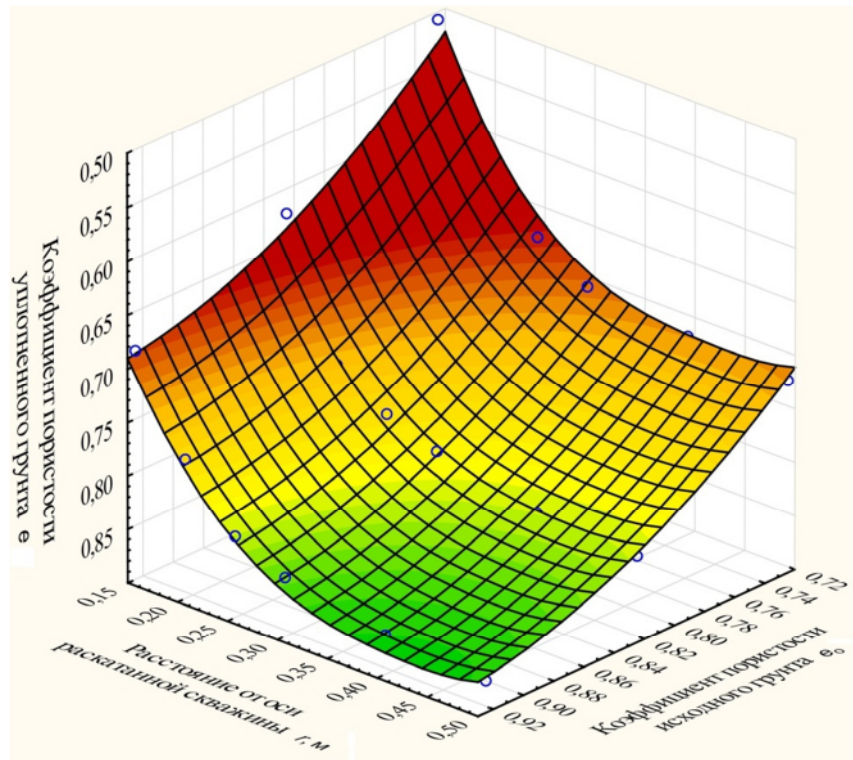


Рисунок 2.25 – Поверхность, отражающая изменение коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его уплотнении в супесях с показателем текучести  $0,25 < I_L \leq 0,50$

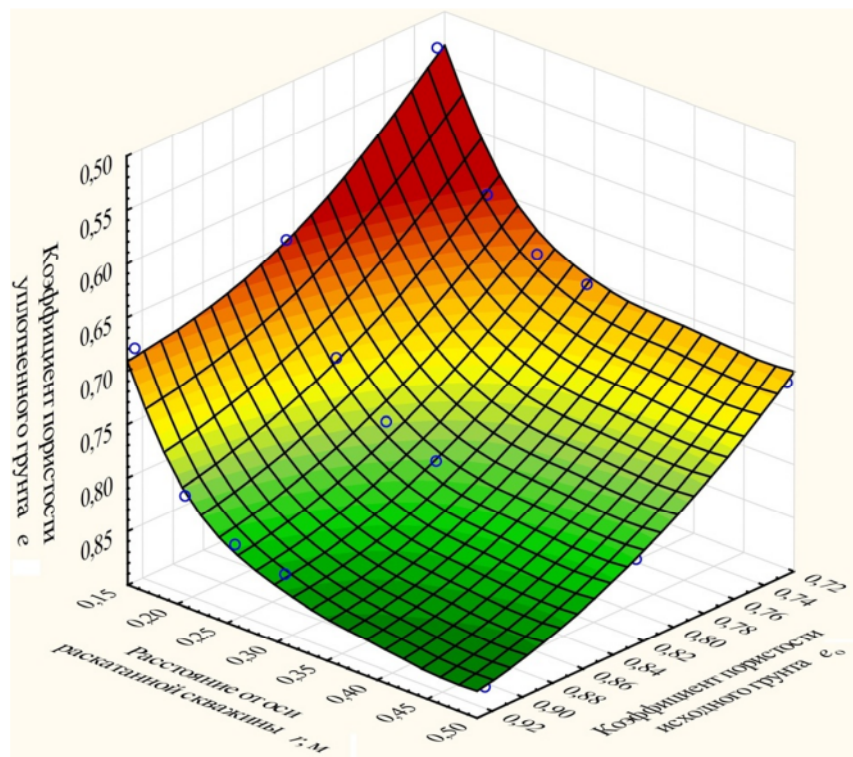


Рисунок 2.26 – Поверхность, отражающая изменение коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его уплотнении в супесях с показателем текучести  $0,50 < I_L \leq 0,75$



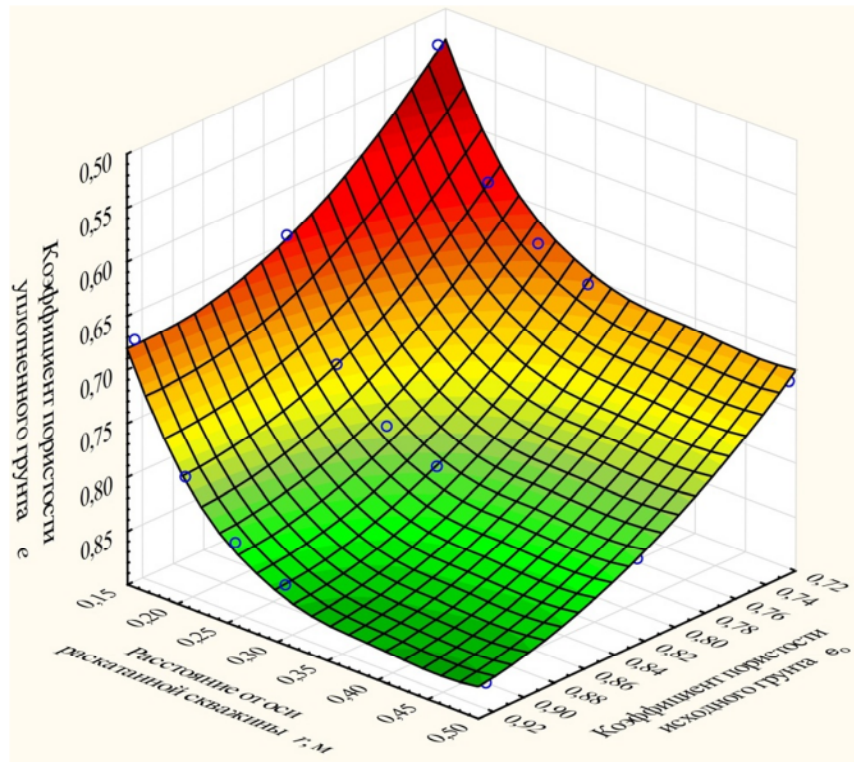


Рисунок 2.27 – Поверхность, отражающая изменение коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его уплотнении в суглинках с показателем текучести  $0 < I_L \leq 0,25$

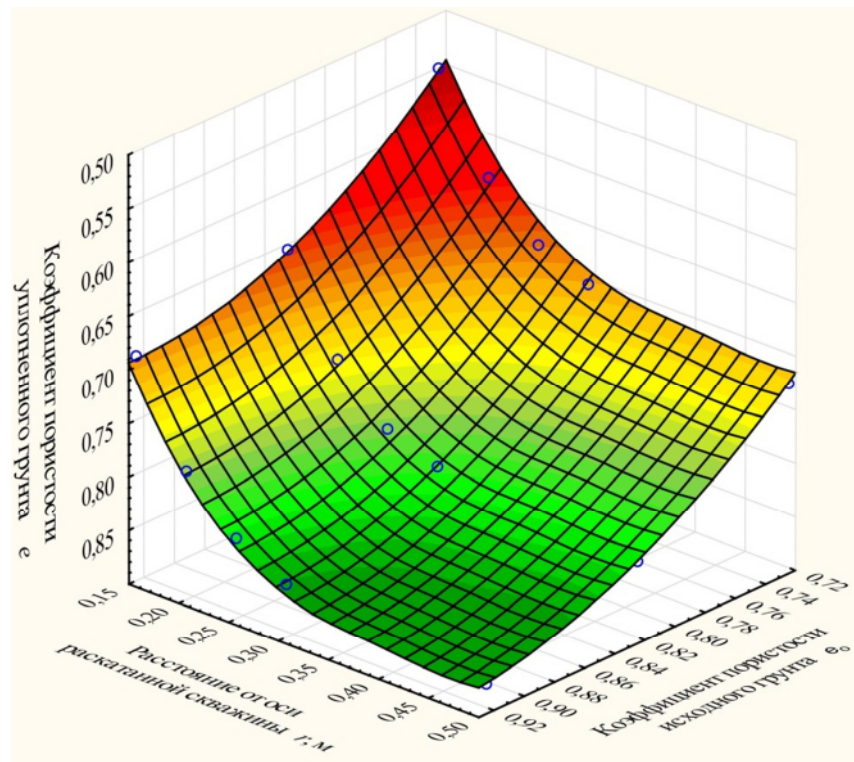


Рисунок 2.28 – Поверхность, отражающая изменение коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его уплотнении в суглинках с показателем текучести  $0,25 < I_L \leq 0,50$

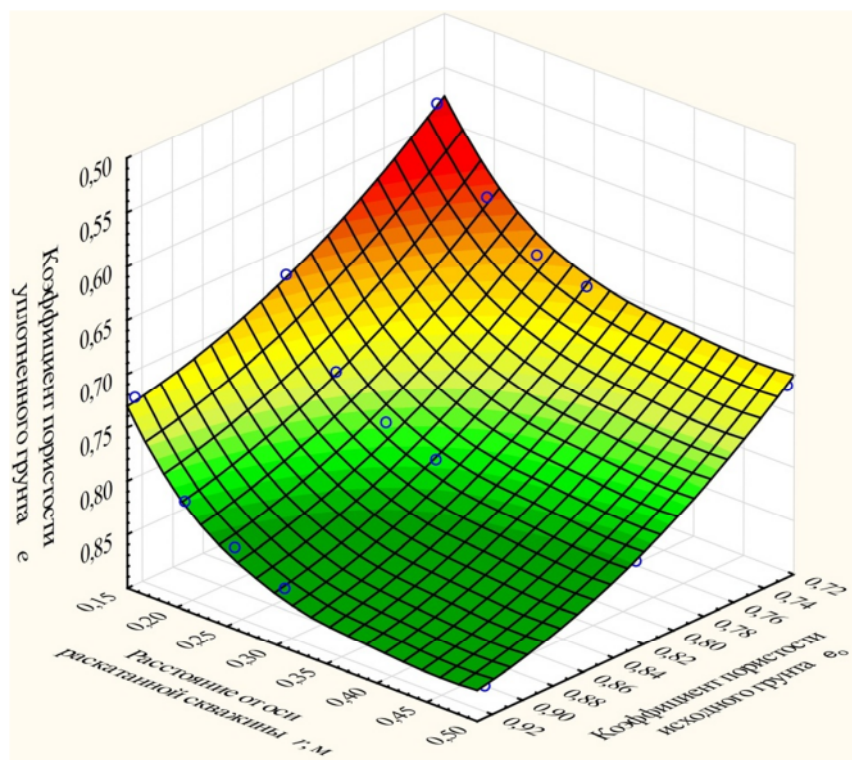


Рисунок 2.29 – Поверхность, отражающая изменение коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его уплотнении в суглинках с показателем текучести  $0,50 < I_L \leq 0,75$

Анализируя полученные зависимости, 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 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 несущественно. Эффективность уплотнения напрямую зависит от консистенции грунта. С повышением содержания поровой воды в грунтах (с увеличением показателя текучести) эффективность их уплотнения снижается.

Задачей исследований являлось получение зависимости коэффициента пористости грунта от расстояния до оси раскатанной скважины. Поэтому была выполнена статистическая обработка результатов экспериментальных исследований с получением аппроксимирующей функции изменения коэффициента пористости уплотненного грунта. Массив значений коэффициента пористости, используемый при статистической обработке приведен в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Массив среднеарифметических значений коэффициента пористости уплотненного гранта, используемых при статистической обработке

| Площадка | Значение коэффициента пористости уплотненного грунта в зависимости от расстояния от оси раскатанной скважины |       |       |       |       |       |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 15 см                                                                                                        | 20 см | 25 см | 30 см | 40 см | 50 см |
| Супесь   |                                                                                                              |       |       |       |       |       |
| 1        | 0,506                                                                                                        | 0,605 | 0,660 | 0,697 | 0,714 | 0,720 |
| 2        | 0,578                                                                                                        | 0,715 | 0,760 | 0,786 | 0,810 | 0,818 |
| 3        | 0,624                                                                                                        | 0,756 | 0,805 | 0,830 | 0,865 | 0,870 |
| 4        | 0,507                                                                                                        | 0,653 | 0,674 | 0,703 | 0,714 | 0,720 |
| 5        | 0,623                                                                                                        | 0,746 | 0,775 | 0,792 | 0,814 | 0,819 |
| 6        | 0,686                                                                                                        | 0,770 | 0,824 | 0,845 | 0,863 | 0,870 |
| 7        | 0,530                                                                                                        | 0,650 | 0,688 | 0,699 | 0,713 | 0,720 |
| 8        | 0,645                                                                                                        | 0,738 | 0,780 | 0,799 | 0,814 | 0,820 |
| 9        | 0,682                                                                                                        | 0,802 | 0,830 | 0,840 | 0,864 | 0,874 |
| Суглинок |                                                                                                              |       |       |       |       |       |
| 10       | 0,530                                                                                                        | 0,640 | 0,680 | 0,700 | 0,714 | 0,720 |
| 11       | 0,643                                                                                                        | 0,745 | 0,785 | 0,805 | 0,817 | 0,820 |
| 12       | 0,675                                                                                                        | 0,785 | 0,828 | 0,850 | 0,866 | 0,870 |
| 13       | 0,550                                                                                                        | 0,635 | 0,680 | 0,700 | 0,715 | 0,722 |
| 14       | 0,655                                                                                                        | 0,740 | 0,788 | 0,805 | 0,817 | 0,823 |
| 15       | 0,690                                                                                                        | 0,780 | 0,825 | 0,850 | 0,865 | 0,872 |
| 16       | 0,580                                                                                                        | 0,650 | 0,686 | 0,698 | 0,715 | 0,720 |
| 17       | 0,675                                                                                                        | 0,748 | 0,778 | 0,795 | 0,810 | 0,819 |
| 18       | 0,725                                                                                                        | 0,804 | 0,830 | 0,850 | 0,865 | 0,870 |

Аппроксимирующая функция представлена в следующем виде:

$$e = e_0 - \frac{T}{1 + K \left( \frac{r - r_{CB}}{r_{CB}} \right)^n}, \quad (2.5)$$

где  $e_0$  – коэффициент пористости грунта до уплотнения раскаткой;

$T$  – коэффициент, зависящий от значения коэффициента пористости  $e_0$ ;

$K$  – коэффициент, зависящий от консистенции грунта;

$r$  – расстояние от оси набивной сваи до точки определения коэффициента пористости уплотненного грунта, м;

$r_{CB}$  – радиус сваи, м;

$n$  – коэффициент, который характеризует кривизну функции (зависимости);

В ходе обработки результатов экспериментальных исследований решалась задача по определению коэффициентов  $T$ ,  $K$ ,  $n$ . Для удобства статистической об-

работки уравнение аппроксимирующей функции преобразуется в линейное следующим образом:

$$e_0 - e = \frac{T}{1 + K \left( \frac{r - r_{CB}}{r_{CB}} \right)^n}, \frac{1}{e - e_0} = \frac{1}{T} + \frac{K}{T} \cdot \left( \frac{r - r_{CB}}{r_{CB}} \right)^n \quad (2.6)$$

Далее производится переход к линейной зависимости вида  $y = A + Bx$ .

Статистический анализ данных экспериментов (см. таблицу 2.10) позволил определить оптимальные значения  $n$ , которые назначались перебором до минимального значения среднего квадратичного отклонения. Для песчанистых супесей данный параметр составил  $n = 4$ , для легких суглинков  $n = 5$ .

Поскольку количество точек определения коэффициента пористости грунта на каждой площадке было больше двух, поиск параметров  $A$  и  $B$  линейного уравнения выполнялся способом наименьших квадратов согласно методическому руководству [56]. Обратный переход линейного уравнения к аппроксимирующей функции сопровождался оценкой тесноты линейной связи определением линейного коэффициента корреляции  $R$  в соответствии с тем же руководством [56].

Выполнив статистическую обработку результатов экспериментов и получив параметры  $A$  и  $B$  линейного уравнения были получены коэффициенты  $T$  и  $K$ . Полученные коэффициенты были распределены по группам в зависимости от исходных грунтовых условий и сведены в таблицы 2.11 и 2.12.

Таблица 2.11 – Значения коэффициентов  $K$  и  $T$  для супесей

| Консистенция<br>грунта | Коэффициент<br>пористости грунта до<br>уплотнения раскаткой | Коэффициент |       |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------|-------|
|                        |                                                             | $T$         | $K$   |
| $0 < I_L \leq 0,25$    | 0,650...0,725                                               | 0,745       | 0,667 |
|                        | 0,725...0,800                                               | 0,741       | 0,636 |
|                        | 0,800...0,875                                               | 0,736       | 0,614 |
| $0,25 < I_L \leq 0,50$ | 0,650...0,725                                               | 0,789       | 0,724 |
|                        | 0,725...0,800                                               | 0,784       | 0,638 |
|                        | 0,800...0,875                                               | 0,780       | 0,583 |
| $0,50 < I_L \leq 0,75$ | 0,650...0,725                                               | 0,726       | 0,661 |
|                        | 0,725...0,800                                               | 0,723       | 0,633 |
|                        | 0,800...0,875                                               | 0,719       | 0,615 |



Таблица 2.12 – Значения коэффициентов  $K$  и  $T$  для суглинков

| Консистенция<br>грунта | Коэффициент<br>пористости грунта до<br>уплотнения раскаткой | Коэффициент |       |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------|-------|
|                        |                                                             | $T$         | $K$   |
| $0 < I_L \leq 0,25$    | 0,650...0,725                                               | 0,740       | 0,388 |
|                        | 0,725...0,800                                               | 0,743       | 0,435 |
|                        | 0,800...0,875                                               | 0,746       | 0,376 |
| $0,25 < I_L \leq 0,50$ | 0,650...0,725                                               | 0,762       | 0,450 |
|                        | 0,725...0,800                                               | 0,753       | 0,446 |
|                        | 0,800...0,875                                               | 0,767       | 0,438 |
| $0,50 < I_L \leq 0,75$ | 0,650...0,725                                               | 0,725       | 0,400 |
|                        | 0,725...0,800                                               | 0,729       | 0,387 |
|                        | 0,800...0,875                                               | 0,733       | 0,425 |

### Выводы по главе 2

1. Обоснован выбор принципиальной конструкции раскатывающего рабочего органа, позволяющей создавать скважины диаметром от 250 мм при усилении грунтов основания. Применение раскатывающего рабочего органа с неподвижными катками (ГРО-250) позволяет выполнять работы по усилению грунтов в 4,5 раза быстрее, чем при использовании аналога (РС-250). Дальнейшее совершенствование метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, способов расчета увеличения характеристик массива и методик контроля качества будет проводиться с учетом применения модификаций раскатчиков скважин с неподвижными катками.

2. Экспериментальные исследования работы грунта при его раскатке позволили выявить, что наиболее негативное влияние на изменение диаметров скважин оказывает консистенция грунта. Выявлено, что в глинистых грунтах с показателем текучести  $I_L = 0,5$  и выше происходит значительное сужение диаметра скважин до 70 %. В таких грунтах необходимо использовать модификации раскатчика и навесное оборудование, позволяющие оперативно заполнять раскатанные скважины при реверсивном ходе рабочего органа (за один рабочий цикл). Также в та-

ких грунтах с целью повышения эффективности работы усиленного массива необходимо варьировать шаг расстановки набивных свай.

3. В результате проведенного многофакторного анализа установлено, что применение метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах позволяет повысить модуль деформации массива более чем в 1,5 раза (до 49 МПа) в сравнении с исходными значениями. Данный эффект может быть достигнут при шаге расстановке скважин 1 м и номинальном диаметре 250 мм.

4. Получены графики и поверхности влияния (см. рисунки 2.15–2.23), отражающие работу усиленных грунтовых массивов. Данные материалы позволили выполнить оценку эффективности усиления 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 и легли в основу методики проектирования и контроля технического состояния оснований. Кроме того, полученные зависимости являются базой для последующего корреляционного анализа результатов натурного и численного моделирования.

5. Получена зависимость изменения коэффициента пористости грунта (с увеличением расстояния от раскатанной скважины) при его уплотнении раскаткой скважин. Согласно полученной зависимости 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 скважин. Для суглинков аналогичные зоны расположены в интервалах 15...20, 20...25, 25...50 см. Полученная зависимость позволит разработать цифровую модель усиленного грунтового массива.

### **ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВАНИЯ, УСИЛЕННОГО НАБИВНЫМИ СВАЯМИ В РАСКАТАННЫХ СКВАЖИНАХ**

#### **3.1 Методика проведения моделирования**

Исследование работы основания, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах, выполнено с использованием численного моделирования в программном комплексе *MIDAS*. Задача исследования, решаемая в ходе численного моделирования, состоит в определении закономерностей изменения деформационных характеристик усиленного грунтового массива в зависимости от шага расстановки раскатанных скважин, начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта. Для решения поставленной задачи сформулированы и решены следующие вопросы:

1. Численное моделирование работы усиленного грунтового массива с последующим корреляционным анализом полученных результатов и результатов натурного моделирования, дающих возможность использования результатов расчетного аппарата *MIDAS* при совершенствовании методики проектирования.

2. Получение качественной и количественной картины работы усиленного основания при различных шагах расстановки набивных свай в раскатанных скважинах.

Для получения достоверных результатов моделирования, позволяющих в дальнейшем использовать их на стадии проектирования усиления, необходимо разработать цифровую модель усиленного грунтового массива, максимально полно отражающую внутренние процессы его работы. В связи с этим исследования проводились в два этапа.

На первом этапе в программном комплексе создавалась цифровая модель фрагмента усиленного основания. Далее, путем приложения нагрузки моделировалось напряженно-деформированное состояние усиленного массива, как при испытании грунтов статическими нагрузками плоским штампом, которые выполня-

лись в рамках экспериментальных исследований, описанных в главе 2. Таким образом, в цифровой модели воссоздавались штамповые испытания с различным сочетанием грунтовых параметров. Далее выполнялась оценка достоверности полученных результатов и возможности применения полученной цифровой модели ко всему основанию.

На втором этапе проводились исследования цифровой модели усиленного массива при варьировании шага расстановки набивных свай в раскатанных скважинах. К цифровой модели прикладывались нагрузки, а затем вычислялась осадка. Далее расчетным способом определялся модуль деформации усиленного массива и производился анализ результатов численного моделирования с определением области применения метода усиления.

Моделирование работы основания, усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах, выполнялось с применением стандартных модулей программы. Для этого в графическом трехмерном редакторе программной среды *MIDAS* создавалась геометрическая модель усиленного основания. Затем полученной геометрической модели структурного каркаса придавался объем, а также создавалась сетка конечных элементов с использованием стандартных модулей программы для объемных структур, при этом проводился операционный контроль связности генерированных элементов.

При построении системы армирующих элементов каждая набивная свая моделировалась как отдельно расположенный перевернутый усеченный конус. Построение грунтовой среды и набивных свай выполнялось на базе модели идеально-пластичной среды Кулона–Мора, использующей основные параметры пластичности, – удельное сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , модуль деформации  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ .

Важным аспектом моделирования усиленного основания является описание работы массивов уплотненного грунта и набивных свай. Опираясь на результаты исследований, полученные в главе 2, следует учитывать, что диаметры раскатанных скважин непостоянны по глубине и зависят от вида и типа уплотняемых грунтов. Также следует учитывать, что эффективная зона уплотнения грунта во-

круг раскатанных свай достигает полутора диаметров сважины. Таким образом, конечное очертание набивных свай следует принять как перевернутый вытянутый конус высотой, равной глубине раскатки, и диаметром основания 25 см. Значения физико-механических характеристик уплотненного грунта и набивных свай приняты согласно материалам исследований, приведенным в главе 2. Исследования выполнялись с привязкой к реальным инженерно-геологическим условиям. Поэтому исходные грунтовые параметры при моделировании фрагментов усиленных оснований принимались такими же, как и при натурных испытаниях. В качестве исходных грунтов рассматривались супеси и суглинки с коэффициентом пористости от 0,650 до 0,850 и показателем текучести от 0 до 0,75.

Принципиальная схема фрагмента усиленного основания приведена на рисунке 3.1 (*а* – пространственная схема, *б* – поперечный разрез).

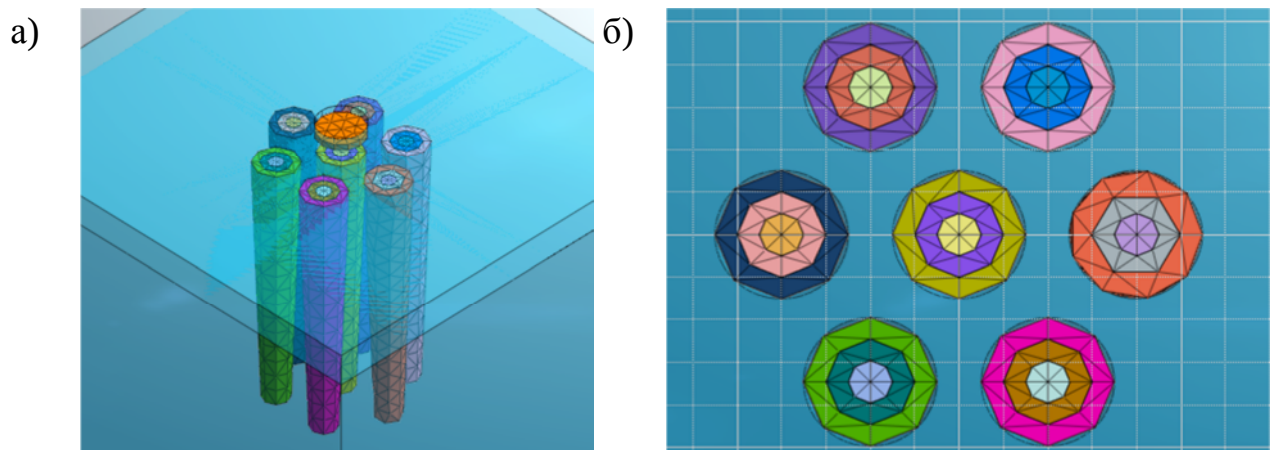


Рисунок 3.1 – Схема фрагмента усиленного основания:

*а* – пространственная схема (свай, зоны уплотненного грунта, исходный грунт, штамп); *б* – поперечный разрез (свай и зоны уплотненного грунта)

В общей сложности было смоделировано 25 фрагментов усиленного основания. Каждый фрагмент состоял из семи набивных свай (в раскатанных скважинах), зон уплотненного и исходного грунта. С использованием полученных в главе 2 поверхностей влияния для каждого фрагмента усиленного основания уточнялись диаметры набивных свай, зависящие от исходного грунта. В таблице 3.1 приведены грунтовые параметры, которые использовались при формировании грунтовой среды в моделях фрагментов усиленных оснований.

Таблица 3.1 – Грунтовые параметры, используемые при формировании грунтовой среды в моделях фрагментов усиленных оснований

| Схема | Сочетание грунтовых параметров | Влажность грунта $w$ , д. е. | Плотность $\rho$ , кг/см <sup>3</sup> | Модуль деформации $E$ , МПа | Угол внутреннего трения, $\varphi$ , град. | Удельное сцепление, $C$ , кПа |
|-------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| 1     | $e = 0,650; 0 < I_L < 0,25$    | 0,13                         | 1,85                                  | 30                          | 26                                         | 45                            |
| 2     | $e = 0,650; 0,25 < I_L < 0,37$ | 0,16                         | 1,90                                  | 28                          | 25                                         | 43                            |
| 3     | $e = 0,650; 0,37 < I_L < 0,50$ | 0,17                         | 1,91                                  | 25                          | 25                                         | 42                            |
| 4     | $e = 0,650; 0,50 < I_L < 0,63$ | 0,18                         | 1,93                                  | 22                          | 24                                         | 41                            |
| 5     | $e = 0,650; 0,63 < I_L < 0,75$ | 0,19                         | 1,95                                  | 18                          | 22                                         | 40                            |
| 6     | $e = 0,700; 0,25 < I_L < 0,37$ | 0,16                         | 1,84                                  | 26                          | 25                                         | 42                            |
| 7     | $e = 0,700; 0,37 < I_L < 0,50$ | 0,17                         | 1,86                                  | 23                          | 24                                         | 41                            |
| 8     | $e = 0,700; 0,50 < I_L < 0,63$ | 0,18                         | 1,87                                  | 21                          | 23                                         | 40                            |
| 9     | $e = 0,700; 0,63 < I_L < 0,75$ | 0,19                         | 1,89                                  | 17                          | 21                                         | 39                            |
| 10    | $e = 0,700; 0 < I_L < 0,25$    | 0,13                         | 1,79                                  | 29                          | 26                                         | 44                            |
| 11    | $e = 0,750; 0,37 < I_L < 0,50$ | 0,17                         | 1,80                                  | 21                          | 23                                         | 40                            |
| 12    | $e = 0,750; 0,50 < I_L < 0,63$ | 0,18                         | 1,82                                  | 20                          | 22                                         | 39                            |
| 13    | $e = 0,750; 0,63 < I_L < 0,75$ | 0,19                         | 1,84                                  | 16                          | 20                                         | 38                            |
| 14    | $e = 0,750; 0 < I_L < 0,25$    | 0,13                         | 1,74                                  | 27                          | 26                                         | 42                            |
| 15    | $e = 0,750; 0,25 < I_L < 0,37$ | 0,16                         | 1,79                                  | 24                          | 24                                         | 40                            |
| 16    | $e = 0,800; 0,50 < I_L < 0,63$ | 0,18                         | 1,77                                  | 18                          | 21                                         | 38                            |
| 17    | $e = 0,800; 0,63 < I_L < 0,75$ | 0,19                         | 1,79                                  | 14                          | 19                                         | 37                            |
| 18    | $e = 0,800; 0 < I_L < 0,25$    | 0,13                         | 1,69                                  | 24                          | 25                                         | 41                            |
| 19    | $e = 0,800; 0,25 < I_L < 0,37$ | 0,16                         | 1,74                                  | 23                          | 24                                         | 39                            |
| 20    | $e = 0,800; 0,37 < I_L < 0,50$ | 0,17                         | 1,76                                  | 20                          | 22                                         | 39                            |
| 21    | $e = 0,850; 0,63 < I_L < 0,75$ | 0,19                         | 1,74                                  | 10                          | 19                                         | 36                            |
| 22    | $e = 0,850; 0 < I_L < 0,25$    | 0,13                         | 1,65                                  | 21                          | 25                                         | 40                            |
| 23    | $e = 0,850; 0,25 < I_L < 0,37$ | 0,16                         | 1,69                                  | 20                          | 24                                         | 38                            |
| 24    | $e = 0,850; 0,37 < I_L < 0,50$ | 0,17                         | 1,71                                  | 19                          | 22                                         | 38                            |
| 25    | $e = 0,850; 0,50 < I_L < 0,63$ | 0,18                         | 1,72                                  | 16                          | 20                                         | 37                            |

Моделирование штампового испытания выполнялось следующим образом: над сваями моделировалась песчано-гравийная подушка, мощностью 100 мм, на которой располагался штамп круглого сечения площадью 5 000 см<sup>2</sup>. Нагружение

штампа выполнялось ступенями при помощи сосредоточенной силы, приложенной по вертикали по оси симметрии штампа (см. рисунок 3.2). Максимальное давление под штампом при моделировании испытаний составляло 600 кПа.

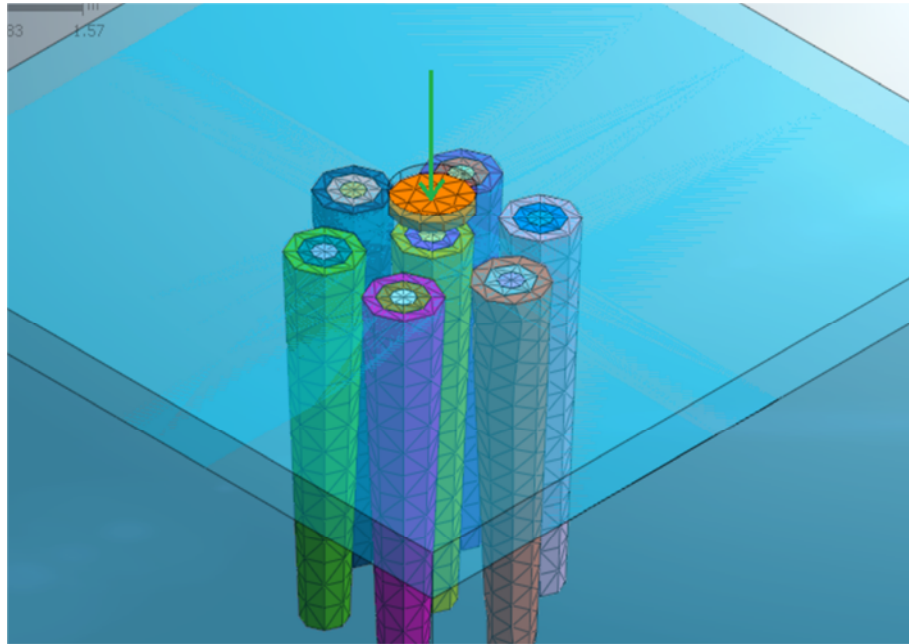


Рисунок 3.2 – Модель штампового испытания в программной среде *MIDAS*

Последующая обработка и статистический анализ полученных результатов численного моделирования по критерию Фишера позволят сделать вывод об адекватности полученных моделей фрагментов усиленного основания.

Следующим этапом исследования является определение влияния шага расстановки набивных свай в раскатанных скважинах на деформационные характеристики усиленного массива.

Планирование экспериментов в ходе натурного моделирования с последующей статистической обработкой полученных результатов выполнялись на базе программно-вычислительного комплекса *STATISTICA 10.0*. Схема проведения экспериментов отражена на рисунке 3.3. Модели усиленных массивов приведены на рисунке 3.4.

| Код | e     | Код    |             | 1  | 2    | 3  | 4    | 5  |
|-----|-------|--------|-------------|----|------|----|------|----|
|     |       | Шаг, м |             |    |      |    |      |    |
|     |       | Код    | $I_L$       | 4d | 3,5d | 3d | 2,5d | 2d |
| 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;

шаг – шаг расстановки раскатанных скважин

Рисунок 3.3 – Схема проведения моделирования



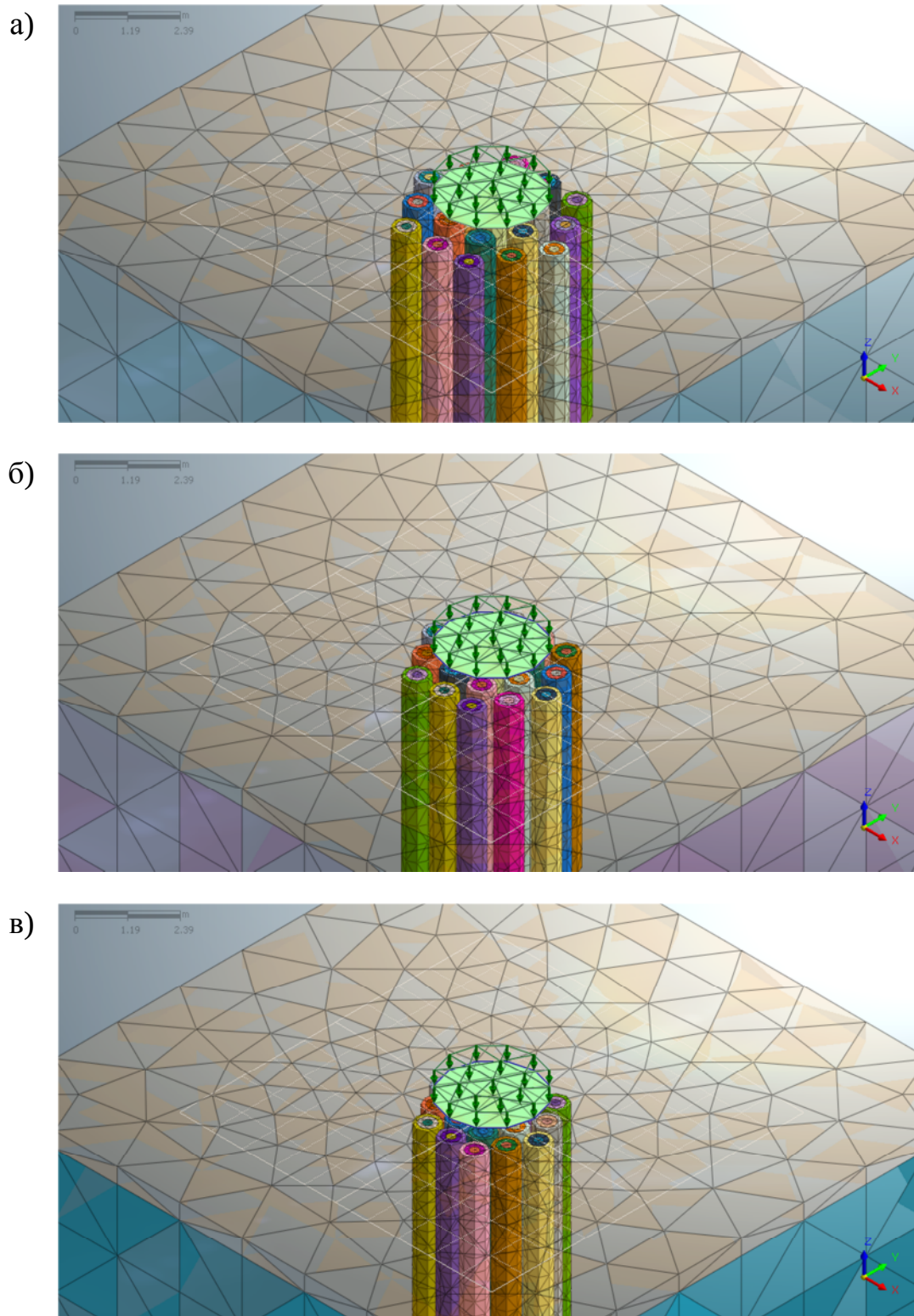
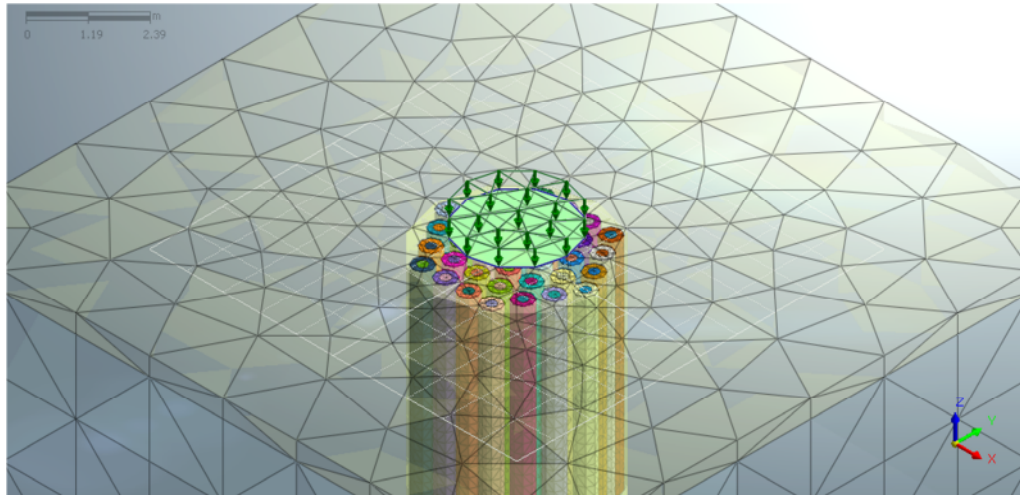


Рисунок 3.4 – Модели усиленного массива (начало):

*a* – шаг расстановки скважин  $4d$ ; *б* – шаг расстановки скважин  $3,5d$ ;

*в* – шаг расстановки скважин  $3d$

г)



д)

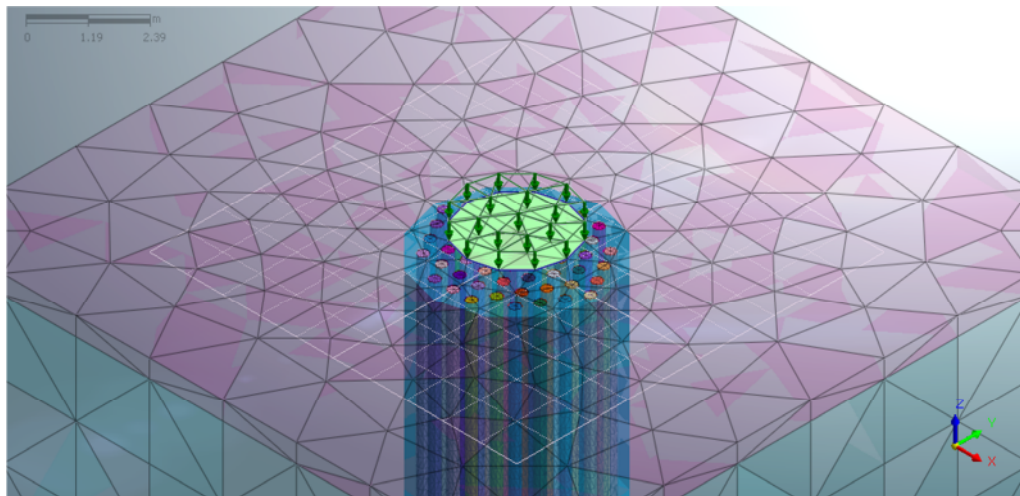


Рисунок 3.4 – Модели усиленного массива (окончание):

$\varepsilon$  – шаг расстановки скважин  $2,5d$ ;  $\partial$  – шаг расстановки скважин  $2d$

Моделирование различных стадий загрузки усиленных массивов позволяет решить задачу по определению влияния диаметров и шага расстановки раскатанных скважин на модуль деформации этого массива. Определение степени влияния таких параметров усиления, как диаметр и шаг расстановки раскатанных скважин, на полную осадку усиленного массива и, как следствие, на его модуль деформации реализовано в программном комплексе *STATISTICA 10.0*.

### 3.2 Исследование работы цифровой модели усиленного грунтового массива и корреляционный анализ

Результаты расчетов фрагментов усиленных оснований в программном комплексе показали, что большую часть напряжений от штампа воспринимают набивные сваи. Характер развития напряжений и осадки в усиленных массивах для всех расчетных участков оказался типовым. Как видно из рисунка 3.5, перераспределение напряжений происходит в песчано-гравийной подушке. Интенсивное затухание напряжений происходит на глубине от 1,5 до 2,0 м от подошвы штампа.

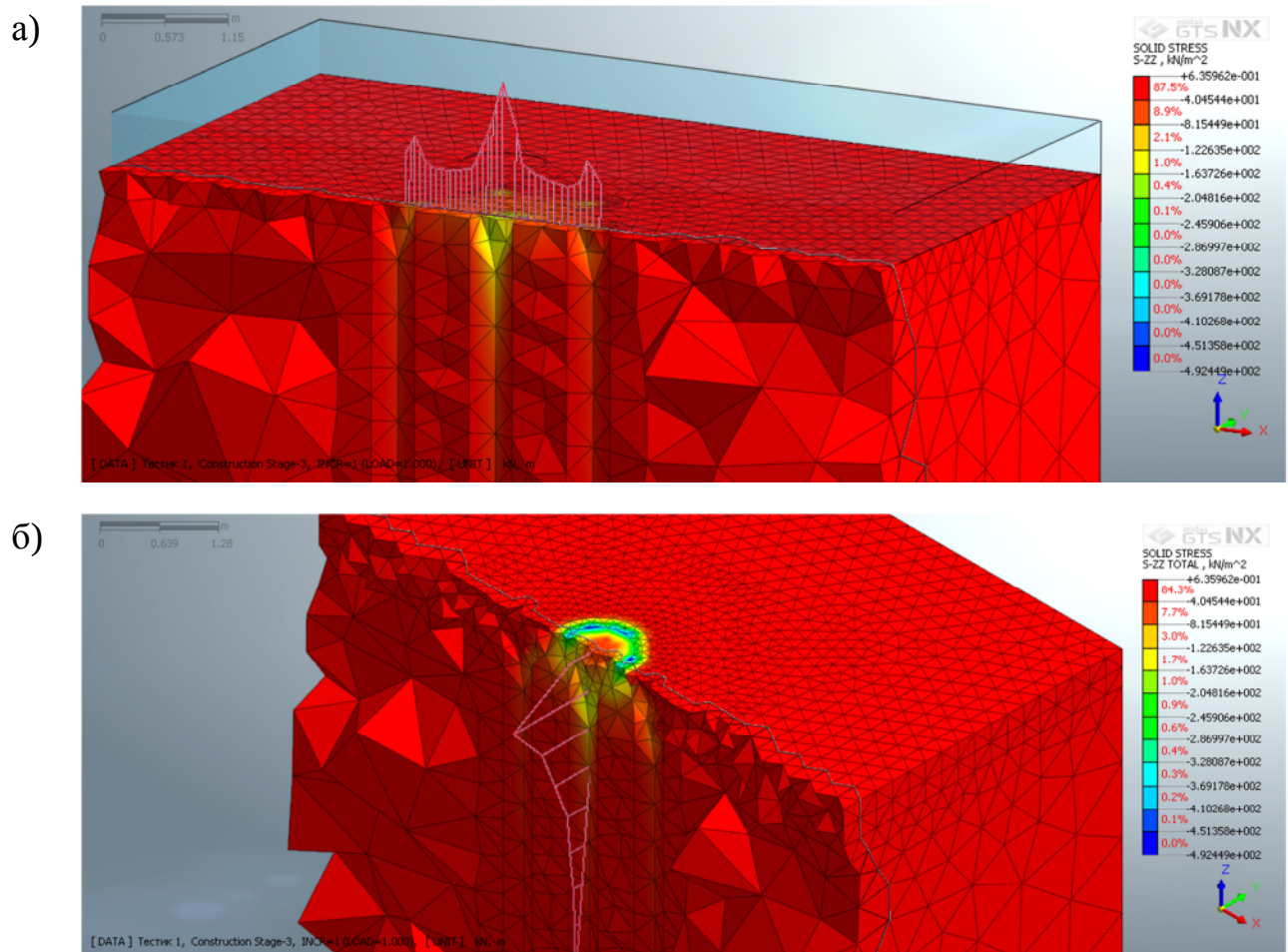


Рисунок 3.5 – Распределение вертикальных напряжений  
в усиленном массиве (в разрезе):

*а* – напряжения, приходящиеся на набивные сваи и уплотненный грунт;

*б* – напряжения, воспринимаемые центральной набивной сваей



Определение осадки усиленного массива определялось по контрольным точкам (по глубине), с использованием эпюр распределения вертикальных перемещений (рисунок 3.6).

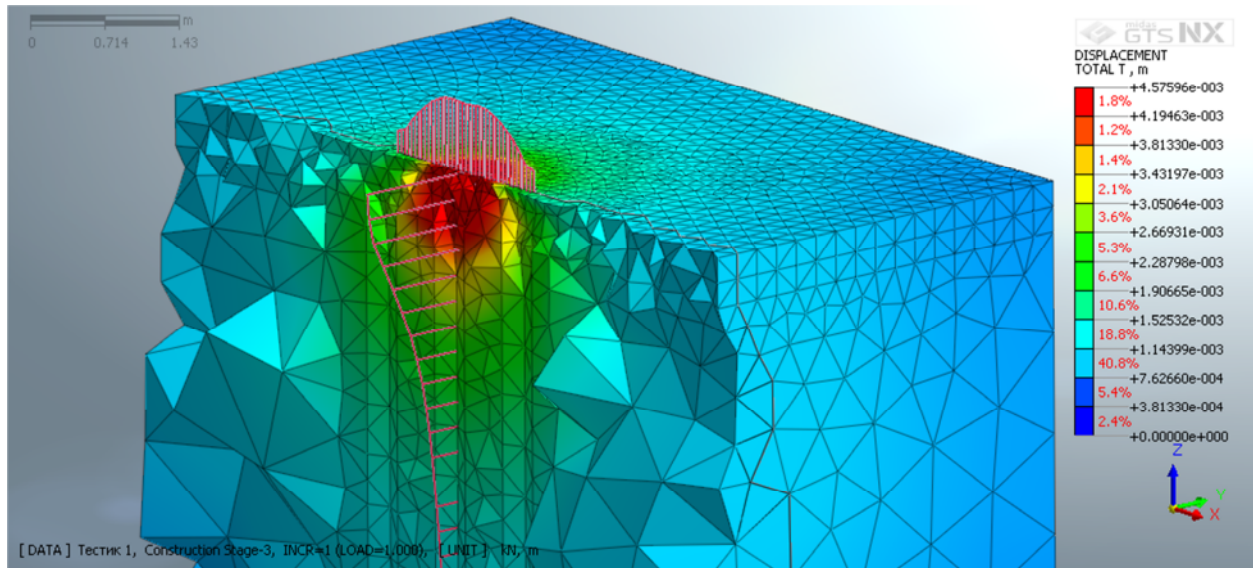


Рисунок 3.6 – Распределение вертикальных перемещений усиленного массива (в разрезе) под действием нагрузки от штампа

Полученные значения вертикальных перемещений фрагментов усиленных оснований были использованы для расчета модуля деформации соответствующих массивов. Результаты расчета модулей деформации (и сопоставление их со значениями, полученными в главе 2) сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчета модулей деформации

| Схема | Коэффициент грунта до уплотнения раскаткой $e$ | Показатель текучести исходного грунта $I_L$ | Модуль деформации усиленного массива в фрагменте основания $E$ , МПа |                                                    |    |    |    |    |    |
|-------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----|----|----|----|----|
|       |                                                |                                             | по результатам расчета                                               | по результатам штамповых испытаний, в повторностях |    |    |    |    |    |
|       |                                                |                                             |                                                                      | 1                                                  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| 1     | 0,650                                          | $0 < I_L < 0,25$                            | 48,2                                                                 | 49                                                 | 56 | 48 | 53 | 42 | 46 |
| 2     |                                                | $0,25 < I_L < 0,37$                         | 45,1                                                                 | 44                                                 | 39 | 41 | 46 | 47 | 48 |
| 3     |                                                | $0,37 < I_L < 0,50$                         | 39,7                                                                 | 45                                                 | 37 | 37 | 40 | 35 | 34 |
| 4     |                                                | $0,50 < I_L < 0,63$                         | 33,6                                                                 | 32                                                 | 33 | 36 | 28 | 24 | 26 |
| 5     |                                                | $0,63 < I_L < 0,75$                         | 25,4                                                                 | 22                                                 | 28 | 30 | 35 | 32 | 28 |
| 6     | 0,700                                          | $0,25 < I_L < 0,37$                         | 37,1                                                                 | 38                                                 | 47 | 43 | 38 | 39 | 35 |
| 7     |                                                | $0,37 < I_L < 0,50$                         | 32,9                                                                 | 34                                                 | 40 | 33 | 34 | 34 | 29 |
| 8     |                                                | $0,50 < I_L < 0,63$                         | 29,5                                                                 | 37                                                 | 32 | 28 | 30 | 28 | 26 |
| 9     |                                                | $0,63 < I_L < 0,75$                         | 21,5                                                                 | 17                                                 | 21 | 21 | 27 | 23 | 24 |
| 10    |                                                | $0 < I_L < 0,25$                            | 39,5                                                                 | 40                                                 | 35 | 35 | 41 | 47 | 47 |

Продолжение таблицы 3.2

| Схема | Коэффициент<br>грунта до уплот-<br>нения раскаткой $e$ | Показатель те-<br>кучести исход-<br>ного грунта $I_L$ | Модуль деформации усиленного массива в<br>фрагменте основания $E$ , МПа |                                                       |    |    |    |    |    |
|-------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|
|       |                                                        |                                                       | по<br>результатам<br>расчета                                            | по результатам штамповых<br>испытаний, в повторностях |    |    |    |    |    |
|       |                                                        |                                                       |                                                                         | 1                                                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
| 11    | 0,750                                                  | $0,37 < I_L < 0,50$                                   | 27,9                                                                    | 27                                                    | 32 | 33 | 32 | 28 | 27 |
| 12    |                                                        | $0,50 < I_L < 0,63$                                   | 25,1                                                                    | 27                                                    | 32 | 26 | 27 | 26 | 29 |
| 13    |                                                        | $0,63 < I_L < 0,75$                                   | 19,1                                                                    | 23                                                    | 21 | 15 | 21 | 19 | 22 |
| 14    |                                                        | $0 < I_L < 0,25$                                      | 34,2                                                                    | 34                                                    | 38 | 39 | 42 | 39 | 37 |
| 15    |                                                        | $0,25 < I_L < 0,37$                                   | 30,5                                                                    | 35                                                    | 29 | 35 | 32 | 26 | 29 |
| 16    | 0,800                                                  | $0,50 < I_L < 0,63$                                   | 22,0                                                                    | 22                                                    | 23 | 17 | 22 | 29 | 24 |
| 17    |                                                        | $0,63 < I_L < 0,75$                                   | 17,5                                                                    | 19                                                    | 21 | 19 | 18 | 17 | 14 |
| 18    |                                                        | $0 < I_L < 0,25$                                      | 29,4                                                                    | 25                                                    | 28 | 29 | 33 | 32 | 34 |
| 19    |                                                        | $0,25 < I_L < 0,37$                                   | 26,4                                                                    | 31                                                    | 29 | 26 | 30 | 27 | 31 |
| 20    |                                                        | $0,37 < I_L < 0,50$                                   | 25,1                                                                    | 31                                                    | 27 | 29 | 23 | 27 | 24 |
| 21    | 0,850                                                  | $0,63 < I_L < 0,75$                                   | 16,0                                                                    | 13                                                    | 17 | 14 | 15 | 10 | 15 |
| 22    |                                                        | $0 < I_L < 0,25$                                      | 26,5                                                                    | 28                                                    | 31 | 24 | 27 | 26 | 25 |
| 23    |                                                        | $0,25 < I_L < 0,37$                                   | 24,1                                                                    | 22                                                    | 26 | 23 | 26 | 32 | 27 |
| 24    |                                                        | $0,37 < I_L < 0,50$                                   | 23,5                                                                    | 19                                                    | 24 | 30 | 28 | 27 | 23 |
| 25    |                                                        | $0,50 < I_L < 0,63$                                   | 20,5                                                                    | 23                                                    | 18 | 23 | 26 | 23 | 26 |

Оценка соответствия данных численного моделирования и материалов натурных экспериментов выполнена сравнением критерия Фишера, определенного соотношением дисперсий соответствующих выборок, с критическим значением данного критерия, установленным при доверительной вероятности 0,95. Значения критериев Фишера, а также полученные графические зависимости отображены на рисунке 3.7.

Значение полученного критерия Фишера для каждой зависимости ниже критического, что указывает на 95%-ю адекватность разработанной цифровой модели. Следовательно, разработанную цифровую модель допускается использовать при моделировании и расчетах усиленных оснований в целом.

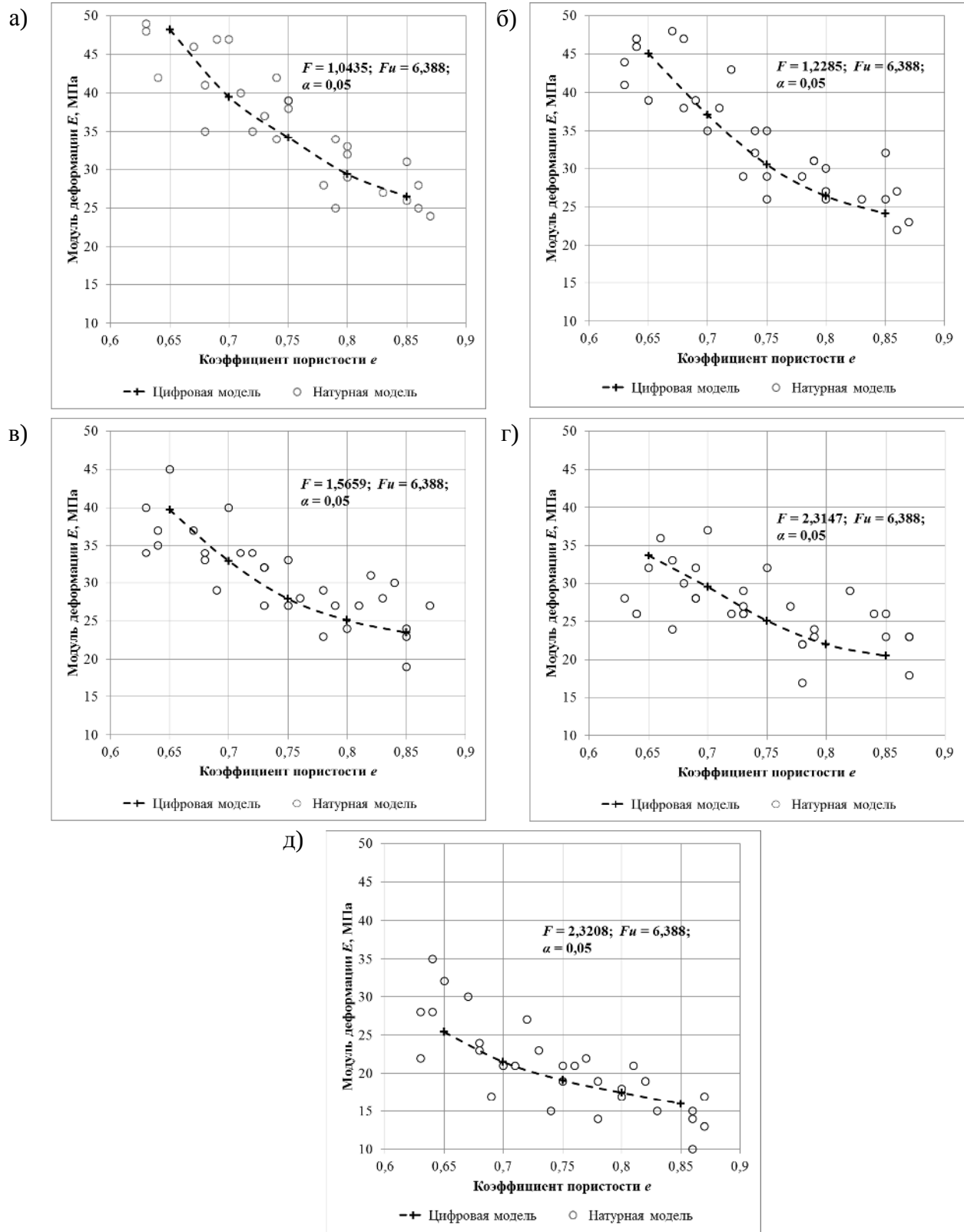


Рисунок 3.7 – Графики изменения модуля деформации усиленного массива в фрагменте основания в зависимости от коэффициента пористости исходного грунта:

*а* – при  $0 < I_L \leq 0,25$ ; *б* – при  $0,25 < I_L \leq 0,37$ ; *в* – при  $0,37 < I_L \leq 0,50$ ;

*г* – при  $0,50 < I_L \leq 0,63$ ; *д* – при  $0,63 < I_L \leq 0,75$

### 3.3 Исследование влияния шага набивных свай в раскатанных скважинах на деформационные свойства усиленного массива

Результаты моделирования усиленного основания при варьировании шага расстановки свай оказались сопоставимы с результатами моделирования грунтовых массивов. Как видно из рисунка 3.8, на котором приведены в качестве примера результаты расчета основания по участку 3, большую часть нагрузки воспринимают набивные сваи. Варьирование шага расстановки набивных свай (раскатанных скважин) напрямую влияет на деформируемость усиленного основания и предельную осадку.

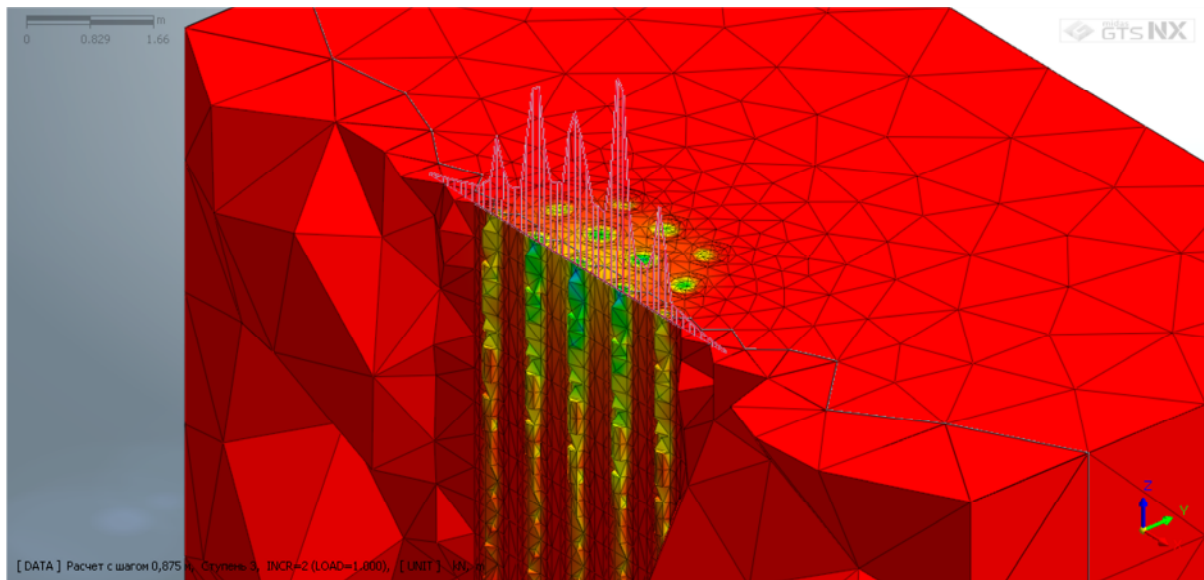


Рисунок 3.8 – Перераспределение вертикальных напряжений  
в усиленном массиве

Аналитическая обработка полученных зависимостей осадки усиленного массива от ступеней нагружения позволила определить значения модуля деформации  $E$ .

Основные результаты, полученные при выполнении расчетов усиленных массивов, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения модулей деформации усиленных массивов

| Схема | Сочетание грунтовых параметров и шага скважин |                            |                                         | Значение модуля деформации усиленного массива $E$ , МПа |
|-------|-----------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|       | Коэффициент пористости, $e$                   | Показатель текучести $I_L$ | Шаг расстановки раскатанных скважин $l$ |                                                         |
| 1     | 0,650                                         | $0 < I_L < 0,25$           | 4d                                      | 50,0                                                    |
| 2     |                                               | $0,25 < I_L < 0,37$        | 3,5d                                    | 55,5                                                    |
| 3     |                                               | $0,37 < I_L < 0,50$        | 3d                                      | 57,2                                                    |
| 4     |                                               | $0,50 < I_L < 0,63$        | 2,5d                                    | 63,8                                                    |
| 5     |                                               | $0,63 < I_L < 0,75$        | 2d                                      | 82,3                                                    |
| 6     | 0,700                                         | $0,25 < I_L < 0,37$        | 4d                                      | 41,0                                                    |
| 7     |                                               | $0,37 < I_L < 0,50$        | 3,5d                                    | 46,0                                                    |
| 8     |                                               | $0,50 < I_L < 0,63$        | 3d                                      | 49,7                                                    |
| 9     |                                               | $0,63 < I_L < 0,75$        | 2,5d                                    | 50,9                                                    |
| 10    |                                               | $0 < I_L < 0,25$           | 2d                                      | 83,2                                                    |
| 11    | 0,750                                         | $0,37 < I_L < 0,50$        | 4d                                      | 38,8                                                    |
| 12    |                                               | $0,50 < I_L < 0,63$        | 3,5d                                    | 40,0                                                    |
| 13    |                                               | $0,63 < I_L < 0,75$        | 3d                                      | 36,7                                                    |
| 14    |                                               | $0 < I_L < 0,25$           | 2,5d                                    | 66,8                                                    |
| 15    |                                               | $0,25 < I_L < 0,37$        | 2d                                      | 73,2                                                    |
| 16    | 0,800                                         | $0,50 < I_L < 0,63$        | 4d                                      | 32,4                                                    |
| 17    |                                               | $0,63 < I_L < 0,75$        | 3,5d                                    | 26,0                                                    |
| 18    |                                               | $0 < I_L < 0,25$           | 3d                                      | 48,1                                                    |
| 19    |                                               | $0,25 < I_L < 0,37$        | 2,5d                                    | 59,3                                                    |
| 20    |                                               | $0,37 < I_L < 0,50$        | 2d                                      | 74,0                                                    |
| 21    | 0,850                                         | $0,63 < I_L < 0,75$        | 4d                                      | 19,0                                                    |
| 22    |                                               | $0 < I_L < 0,25$           | 3,5d                                    | 34,9                                                    |
| 23    |                                               | $0,25 < I_L < 0,37$        | 3d                                      | 47,7                                                    |
| 24    |                                               | $0,37 < I_L < 0,50$        | 2,5d                                    | 54,0                                                    |
| 25    |                                               | $0,50 < I_L < 0,63$        | 2d                                      | 72,3                                                    |

Анализ выполненных исследований показывает, что эффективность усиления напрямую зависит от грунтовых параметров и шага расстановки раскатанных скважин. С использованием полученных данных оценено влияние грунтовых параметров, а также шага расстановки скважин на работу усиленного основания. Оценка влияния, так же как и во второй главе, реализована в программно-вычислительном комплексе *STATISTICA 10.0* с использованием модуля *Design of Experiments*.



В грунтах тугопластичной и мягкопластичной консистенции наибольший эффект при усилении достигается за счет сгущения расстановки набивных свай (раскатанных скважин). Графическое отображение результатов представлено на рисунках 3.9–3.11.

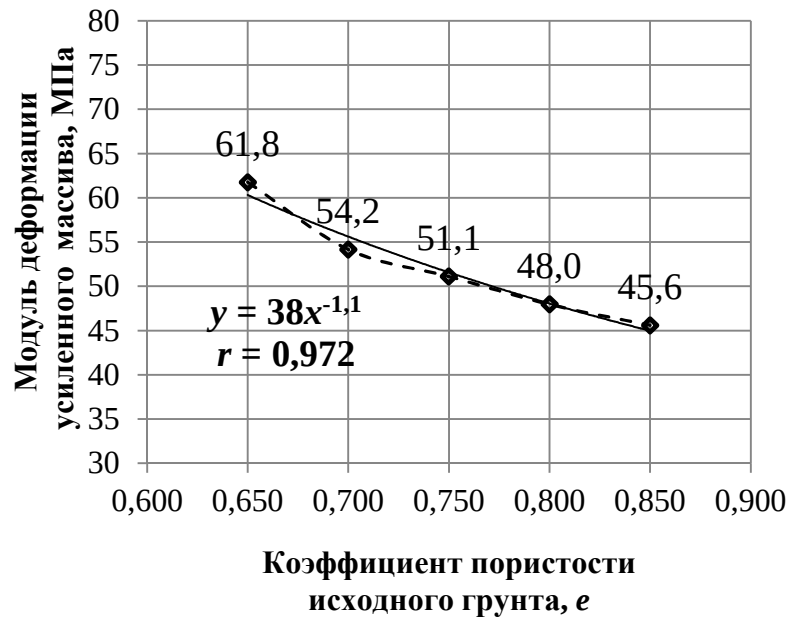


Рисунок 3.9 – Зависимость модуля деформации усиленного массива от коэффициента пористости исходного грунта, определенная при численном моделировании

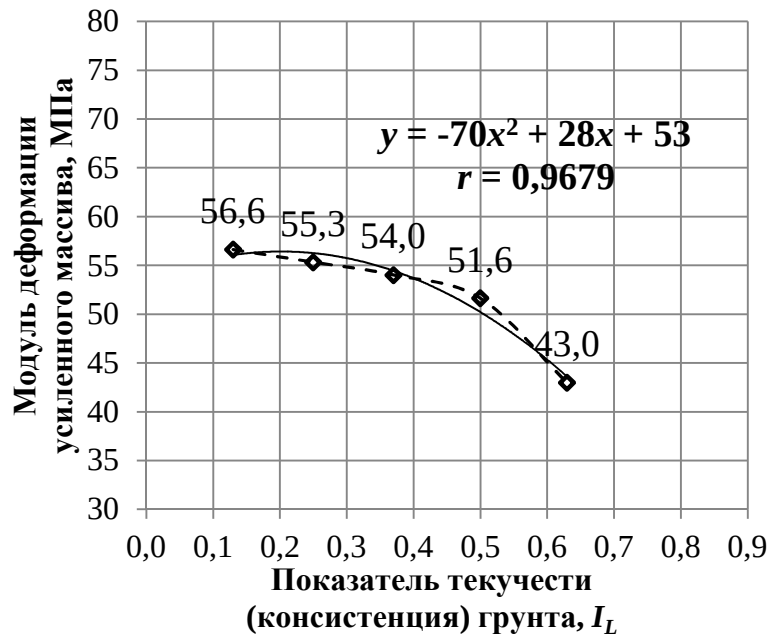


Рисунок 3.10 – Зависимость модуля деформации усиленного массива от показателя текучести исходного грунта, определенная при численном моделировании

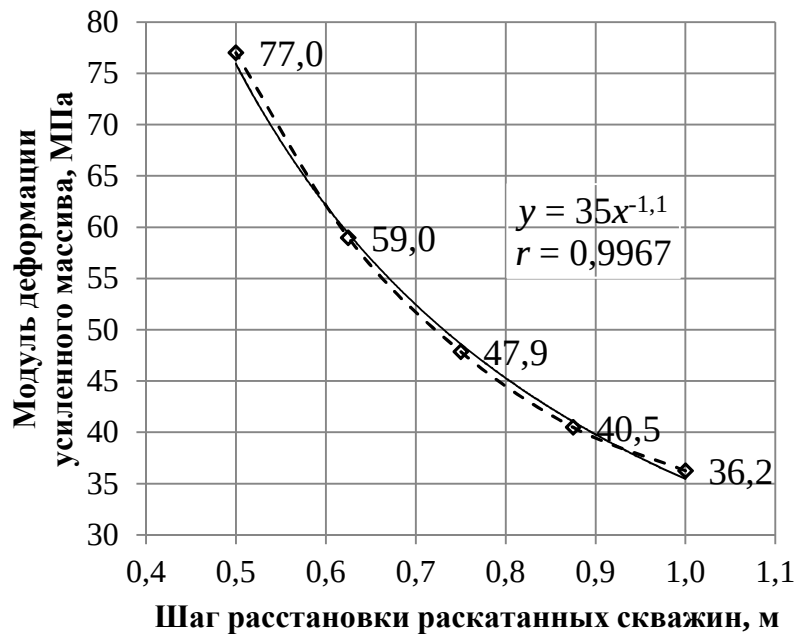


Рисунок 3.11 – Зависимость модуля деформации усиленного массива от шага расстановки раскатанных скважин, определенная при численном моделировании

Статистическая обработка результатов моделирования позволила выявить зависимость изменения модуля деформации от шага раскатанных скважин (см. рисунок 3.11), которая носит степенной характер. Анализируя графики на рисунках 3.9–3.11 можно заметить, что при варьировании шага расстановки раскатанных скважин грунтовые условия (коэффициент пористости и консистенция грунта) в меньшей степени влияют на деформируемость усиленного основания. При этом эффективность усиления в грунтах с показателем текучести  $I_L > 0,5$  заметно ниже. В таких грунтах наибольший эффект от усиления достигается за счет сгущения набивных свай (раскатанных скважин).

Для возможности расчета увеличения деформационных характеристик усиленного массива от варьирования шага расстановки набивных свай (в раскатанных скважинах) были построены поверхности влияния (рисунки 3.12 и 3.13).

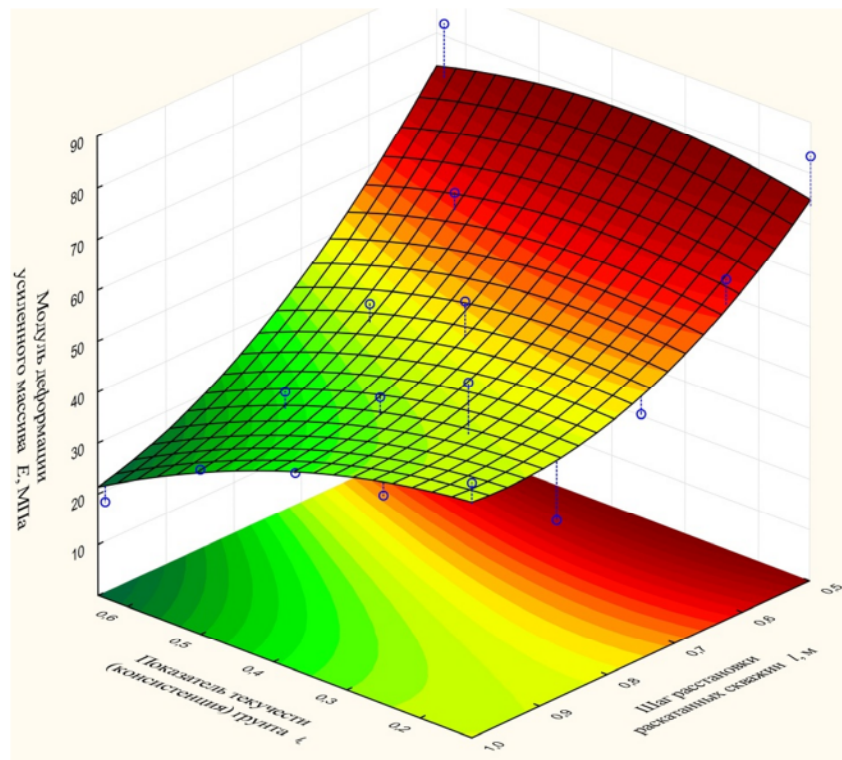


Рисунок 3.12 – Поверхность влияния шага расстановки раскатанных скважин на модуль деформации усиленного массива в зависимости от показателя текучести грунта

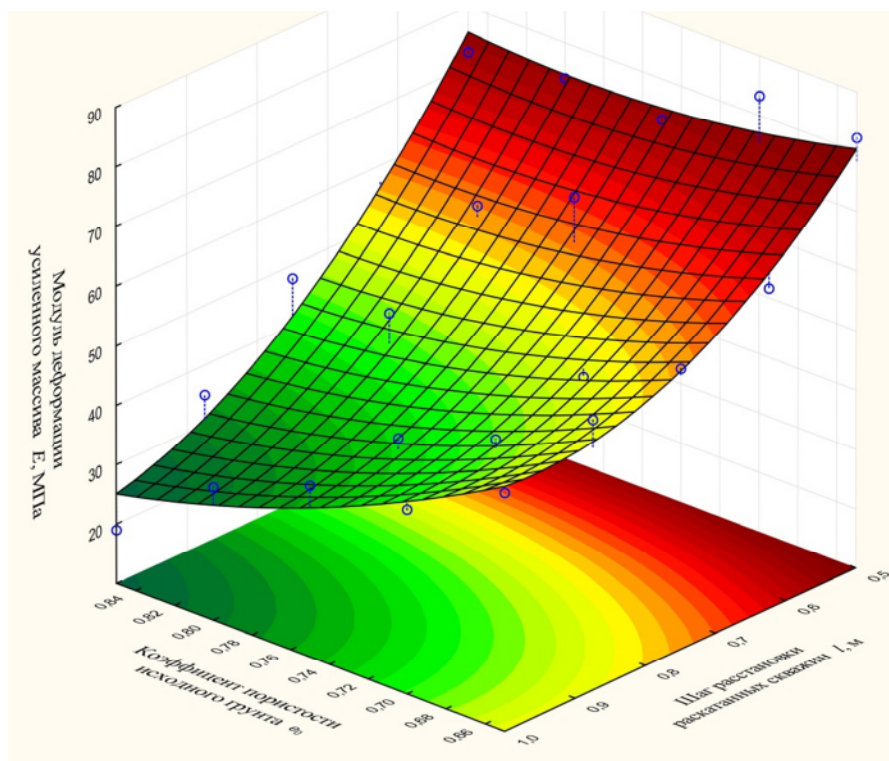


Рисунок 3.13 – Поверхность влияния шага расстановки раскатанных скважин на модуль деформации усиленного массива в зависимости от коэффициента пористости грунта

Средняя генеральная линия полученных графиков (см. рисунки 3.12, 3.13) позволяет выделить рациональный шаг расстановки набивных свай в раскатанных скважинах в зависимости от начальных значений коэффициента пористости и показателя текучести грунта.

Данные, полученные в ходе численного моделирования, легли в основу усовершенствованной методики проектирования усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах и позволили разработать новый метод расчета увеличения деформационных характеристик усиленного массива.

### Выводы по главе 3

Исследование работы усиленного основания с использованием методов численного моделирования в программном комплексе *MIDAS* позволило сформировать качественную и количественную картину работы усиленного массива в глинистых грунтах с числом пластичности от 4 до 12, коэффициентом пористости от 0,650 до 0,850 и показателем текучести от 0,0 до 0,75. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Корреляционный анализ результатов натурного и численного моделирования показал, что общая тенденция нарастания деформаций усиленного набивными сваями в раскатанных скважинах грунтового массива повторяется для обоих случаев. Наблюдается некоторое смещение графика цифровой модели в сторону увеличения деформаций, средняя величина данного смещения находится в пределах 5 %, что позволяет не учитывать его в расчетах, а принимать в запас прочности.

2. В результате проведенного численного моделирования установлено, что варьирование такого параметра, как шаг расстановки набивных свай (раскатанных скважин), позволяет значительно повысить модуль деформации грунтового массива в сравнении с исходными значениями (до 82,3 МПа).

3. Получены графики и поверхности влияния (см. рисунки 3.9–3.13), отражающие работу усиленных грунтовых массивов при различном шаге расстановки

набивных свай в раскатанных скважинах. Данные материалы позволяют выполнить расчет увеличения деформационных характеристик усиленного массива в глинистых грунтах с числом пластичности от 4 до 12, показателем текучести от 0 до 0,75 и коэффициентом пористости от 0,650 до 0,850, они легли в основу методики проектирования и контроля технического состояния основания.

## ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА УСИЛЕННЫХ НАБИВНЫМИ СВАЯМИ В РАСКАТАННЫХ СКВАЖИНАХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

### 4.1 Особенности усиления грунтовых оснований

Использование прогрессивных строительных технологий при устройстве грунтовых массивов и оснований фундаментов позволяет повысить надежность и безопасность строящихся зданий и сооружений. Применение конкретных конструкторско-технологических решений и строительных технологий при устройстве оснований зависит от инженерно-геологических условий и результатов поверочных расчетов. Обеспечение качества устраиваемых оснований достигается за счет применения высокоэффективных расчетно-теоретических методов проектирования и контроля состояния грунтовых массивов в процессе реализации работ. Процесс устройства основания можно представить в виде схемы, приведенной на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Схема устройства усиленных грунтовых оснований

Конструкторско-технологическое проектирование усиления основания состоит из нескольких этапов. На первом этапе выполняется выбор и обоснование метода усиления с учетом инженерно-геологических особенностей площадки объекта, конструктивных особенностей проектируемого сооружения, отдельных требований к возводимому объекту. Также выполняется объектив-

ная оценка затрат трудовых и материальных ресурсов при устройстве грунтового основания. На следующем этапе выполняется серия расчетов грунтов по предельным состояниям с учетом всех конструктивных особенностей здания и назначаются параметры усиления. Проект по усилению грунтов должен содержать параметры усиленного грунтового основания, параметры элементов усиления, схему расстановки элементов усиления. С использованием материалов инженерно-геологических изысканий, выполняются совмещенные разрезы фундаментов здания, усиленного основания (с расстановкой элементов усиления) и грунтовых слоев, попадающих в зону усиления. Кроме того при проектировании прорабатываются мероприятия по контролю качества, указываются состав и вид работ, а также контролируемые характеристики.

В ходе реализации усиления и по его завершении выполняется контроль качества, который включает в себя проверку как реализованных, так и запроектированных решений по усилению. Несмотря на то, что контроль качества выполняется на заключительной стадии работ, он напрямую связан с первоочередными работами – с инженерными изысканиями. Оценка эффективности реализованного усиления осуществляется путем сравнения фактических характеристик усиленного грунта, полученных на этапе контроля качества, с исходными характеристиками, полученными при инженерно-геологических изысканиях.

Таким образом, повышение эффективности метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, обеспечивающее надежность и безопасность усиливаемых грунтовых оснований, заключается в разработке:

- методики проектирования усиления, включающей прогнозирование увеличения деформационных характеристик усиленного основания в зависимости от инженерно-геологических условий;
- требований по применяемому оборудованию, которое позволит реализовать запроектированные решения;
- методики и алгоритма контроля качества усиления, применяемых на всех этапах его реализации.

## **4.2 Проектирование усиления грунтов основания набивными сваями в раскатанных скважинах**

### **4.2.1 Методика проектирования**

Процесс усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах заключается в формировании в грунтах основания набивных свай, конструктивно не связанных с фундаментом строящегося здания. При формировании свай также происходит уплотнение грунта. За счет совместной работы уплотненного грунта и набивных свай происходит повышение прочностных и деформационных характеристик усиливаемого массива.

Эффективность этого метода зависит от соблюдения параметров усиления. Как показали исследования, представленные в главе 2, использование одинакового навесного и бурового оборудования в различных грунтовых условиях не гарантирует получения идентичных результатов. Параметры усиления, в зависимости от исходных данных, назначаются в процессе проектирования.

Поскольку все исследования метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах проведены при упругопластической работе грунта (в линейной стадии деформирования), то расчет основания фундамента сооружения должен выполняться по второй группе предельных состояний. В результате проведенного расчета определяются требуемые характеристики грунтов, 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 набивными сваями в раскатанных скважинах представлено на рисунке 4.2.

Исходные данные для проектирования должны быть представлены в объеме, соответствующем требованиям по проектированию оснований фундаментов зданий и сооружений.



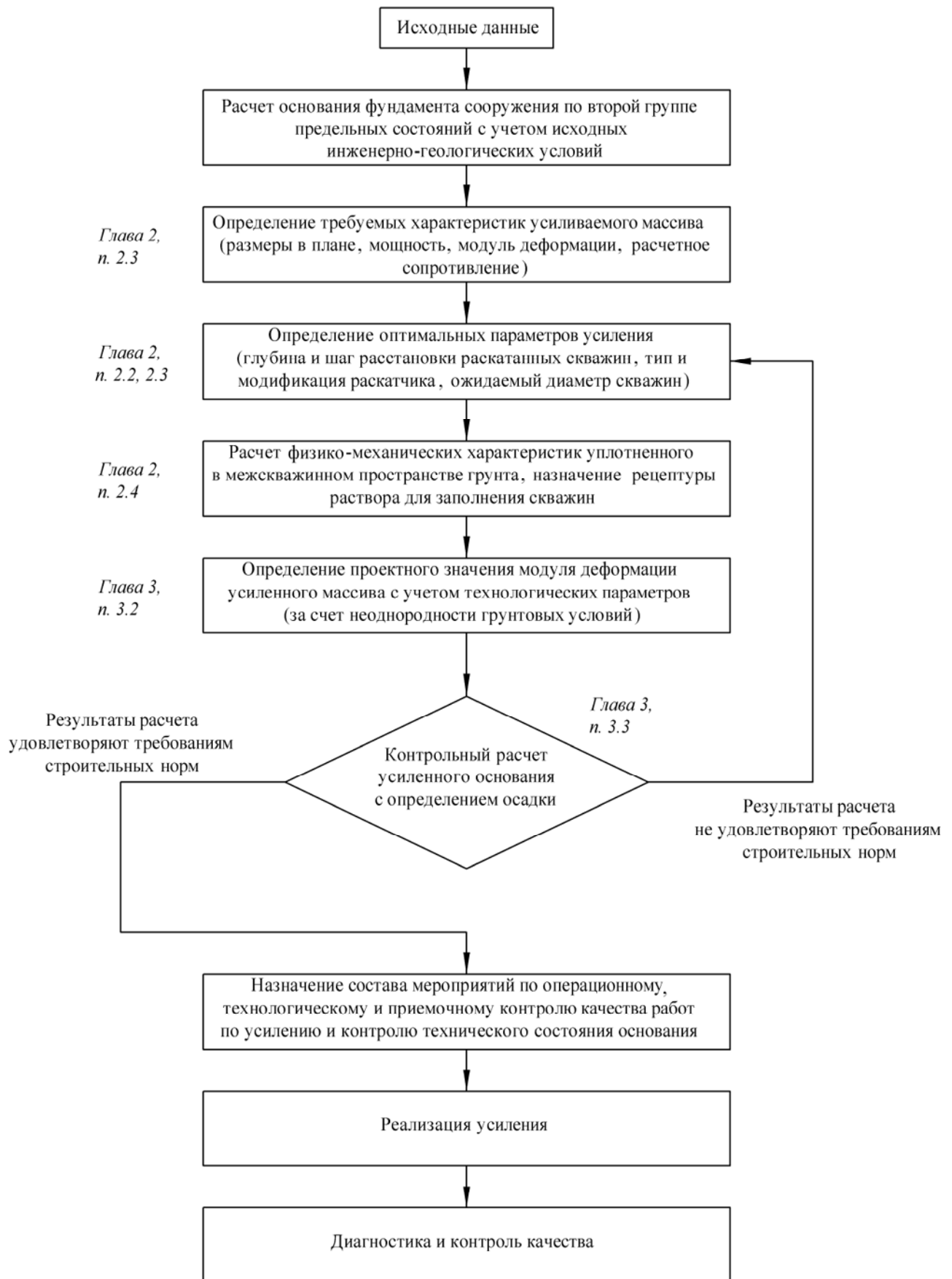


Рисунок 4.2 – Алгоритм проектирования усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах

После анализа инженерно-геологических условий площадки и результатов предварительного расчета определяются габариты зоны усиления и модуль деформации усиленного массива, при котором расчетная осадка здания не будет превышать предельно допустимой, регламентированной СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений». Грунтовое основание при этом разбивается на отдельные слои с классификацией по коэффициенту пористости и показателю текучести грунта.

Следующим этапом проектирования является анализ грунтовых слоев и результатов предварительного расчета.

С использованием полученных эмпирических зависимостей (в виде поверхностей влияния), представленных на рисунках 2.21, 3.12, 3.13, определяется шаг расстановки раскатанных скважин, при котором модуль деформации усиленных грунтовых слоев будет соответствовать значению, установленному в результате предварительного расчета.

Кроме того, в зависимости от консистенции усиливаемых грунтов определяется тип и модификация раскатчика скважин. В случае усиления грунтов с показателем текучести  $I_L \leq 0,50$  используется раскатчик скважин с неподвижными катками диаметром 250 мм. При усилении грунтов с показателем текучести  $0,5 < I_L \leq 0,75$  следует использовать грунтоуплотняющий рабочий орган диаметром 250 мм, позволяющий создавать набивные сваи в раскатанных скважинах за один рабочий цикл (при реверсивном ходе раскатчика, после образования скважины).

С использованием эмпирических зависимостей, отражающих работу грунта при его уплотнении раскаткой скважин (см. рисунок 2.22), определяются ожидаемые диаметры раскатанных скважин для соответствующих грунтовых слоев.

В итоге определены такие параметры усиления, как шаг расстановки раскатанных скважин, ожидаемые диаметры раскатанных скважин, тип раскатчика.

Следующим этапом является расчет увеличения физико-механических характеристик уплотненного грунта, а также назначение рецептуры твердеющего раствора для заполнения раскатанных скважин. Для этого используются материалы главы 2. Поскольку изменение физико-механических характеристик грунта зависит от коэффициента пористости, то используется закономерность изменения коэффициента пористости грунта при его уплотнении раскаткой скважин от расстояния до набивной сваи (раскатанной скважины) (2.5).

Для каждого грунтового слоя определяются коэффициенты пористости уплотненного в межскважинном пространстве грунта.

При выборе рецептуры раствора необходимо учитывать возможность его использования в случае оперативного заполнения скважин через полый раскатывающий рабочий орган. С учетом конструктивных особенностей таких рабочих органов процесс заполнения скважин сопоставим с инъектированием раствора при упрочнении грунтов. Исходя из опыта проведения подобных работ рекомендуется принимать соотношение грунта и цемента 5 : 1 (супесь 1 250 кг, цемент 250 кг, вода 250 л). Основным критерием для назначения рецептуры раствора является его модуль деформации. Модуль деформации раствора с указанной рецептурой должен быть не ниже 210 МПа. Для оптимизации параметров усиления принятое соотношение может быть снижено при обосновании соответствующим расчетом.

Определение коэффициента пористости уплотненного грунта и рецептуры твердеющего раствора необходимо для дальнейшего назначения мероприятий по операционному, технологическому и приемочному контролю качества работ по усилению грунтов основания.

Следующим этапом проектирования является расчет усиленного основания по деформациям. Расчет осадки усиленного основания выполняется по стандартной методике с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства методом послойного суммирования.

Осадка усиленного основания определяется в соответствии с требованиями СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений»:

1. Среднее давление под подошвой фундамента определяется по формуле:

$$p = \frac{N_{\phi}}{A} + \frac{M}{W}, \quad (4.1)$$

где  $N_{\phi}$  – расчетная вертикальная нагрузка на подошву фундамента, кН;

$M$  – расчетный момент на подошву фундамента, кН\*м;

$A$  – площадь подошвы фундамента, м<sup>2</sup>;

$W$  – момент сопротивления подошвы фундамента, м<sup>3</sup>;

2. Толща усиленного грунта разбивается на отдельные слои толщиной 1 м.

3. Напряжения от собственного веса грунта на границах выделенных слоев под центром тяжести подошвы фундамента:

$$\sigma_{zg} = \gamma'_{\Pi} d_n + \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i, \quad (4.2)$$

где  $\gamma'_{\Pi}$  – удельный вес грунта, расположенного выше подошвы фундамента, кН/м<sup>3</sup>;

$d_n$  – глубина заложения фундамента от поверхности природного рельефа, м;

$n$  – число слоев;

$\gamma_i$  – удельный вес  $i$ -го слоя грунта, кН/м<sup>3</sup>;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта, м.

Удельный вес усиленного грунта определяется по формуле:

$$\gamma_{yc} = \frac{\gamma_{св} \cdot V_{св} + \gamma_{гр} \cdot V_{гр}}{V_{св} + V_{гр}}, \quad (4.3)$$

где  $\gamma_{св}$  – удельный вес материала набивной сваи (раствора), кН/м;

$V_{св}$  – объем фрагментов набивных свай, попадающих в  $i$ -й слой усиленного грунтового массива, рассчитываемый с использованием фактических диаметров

свай (скважин), определенных по поверхности влияния, в зависимости от консистенции и коэффициента пористости уплотняемого грунта (см. рисунок 2.21);

$\gamma_{св}$  – удельный вес уплотненного грунта в  $i$ -м слое, кН/м;

$V_{гр}$  – объем уплотненного грунта, попадающего в  $i$ -й слой усиленного грунтового массива.

4. Определяется  $\sigma_{zp}$  – вертикальные дополнительные напряжения от внешней нагрузки на глубине  $z_i$  от подошвы фундамента, кПа:

$$s_{zp} = a \cdot p, \quad (4.4)$$

где  $a$  – коэффициент рассеивания напряжений в зависимости от величин  $\eta = l / b$  ( $l$  – длина фундамента;  $b$  – ширина подошвы фундамента) и  $\xi = 2z / b$ ;

$p$  – вертикальное давление на основание, кПа.

5. Осадка для каждого выделенного слоя определяется по формуле:

$$S = 0,8 \sum_{i=1}^n \sigma_{zpi}^{cp} h_i / E_i, \quad (4.5)$$

где  $s_{zpi}^{cp}$  – среднее значение напряжения  $\sigma_{zpi}$  в  $i$ -м слое, равное полусумме указанных напряжений на верхней и нижней границах слоя по вертикали, проходящей через центр фундамента;

$E_i$  – модуль деформации грунта  $i$ -го расчетного слоя грунта (для слоев, попадающих в усиленную зону, модуль деформации определяется по зависимостям, отраженным на рисунках 2.21, 3.12, 3.13).

#### 4.2.2 Пример проектирования усиления

В соответствии с предлагаемой методикой приводится пример проектирования основания путем усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах. Зданием, для которого выполняется проектирование усиленного основания, является 25-этажный жилой дом по ул. Фрунзе в Центральном районе города Новосибирска.

Первым этапом проектирования является изучение исходных данных.

На рассматриваемой площадке предусматривается строительство 25-этажного жилого дома на плитном фундаменте. Конструктивная схема здания – каркасная. Материал каркаса – монолитный железобетон. Пространственная жесткость сооружения обеспечивается за счет монолитных перекрытий и вертикальных диафрагм жесткости. Наружные и внутренние стены – кирпичные. Отделка наружных стен предусматривается навесными вентилируемыми фасадами. Толщина фундаментной плиты – 1,5 м. Среднее напряжение под подошвой фундаментной плиты: нормативное – 470 кПа, расчетное – 540 кПа. Отметка дна котлована 150,20 м. Предельно допустимая осадка основания здания в соответствии с требованиями нормативных документов не должна превышать 15 см.

Площадка строительства жилого дома представлена глинистыми грунтами. До глубины 30,0 м выделено пять инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

**ИГЭ-2атг.** Насыпной слой: супесь твердая, с включением гравия и щебня битого кирпича бетон.

**ИГЭ-2а.** Супесь песчанистая твердой консистенции практически непучинистая. Грунты ИГЭ-2а имеют следующие физические характеристики:  $w = 0,14$  д. е.,  $\rho_s = 2,68$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho = 1,73$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_d = 1,52$  г/см<sup>3</sup>,  $e = 0,763$ ,  $I_L < 0$ .

**ИГЭ-1а.** Суглинок легкий пылеватый полутвердой консистенции. Грунты ИГЭ-1а имеют следующие физические характеристики:  $w = 0,22$  д. е.,  $\rho_s = 2,70$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho = 1,84$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_d = 1,51$  г/см<sup>3</sup>,  $e = 0,788$ ,  $I_L = 0,20$ .

**ИГЭ-2ап.** Супесь песчанистая твердой консистенции. Грунты ИГЭ-2ап имеют следующие физические характеристики:  $w = 0,09$  д. е.,  $\rho_s = 2,68$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho = 1,82$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_d = 1,67$  г/см<sup>3</sup>,  $e = 0,604$ ,  $I_L < 0$ .

**ИГЭ-2б.** Супесь песчанистая пластичной консистенции. Грунты ИГЭ-2б имеют следующие физические характеристики:  $w = 0,18$  д. е.,  $\rho_s = 2,68$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho = 2,01$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_d = 1,68$  г/см<sup>3</sup>,  $e = 0,595$ ,  $I_L = 0,70$ .

В таблице 4.1 приведены расчетные значения физико-механических характеристик грунтов, залегающих в основании жилого дома.

Таблица 4.1 – Расчетные значения физико-механических характеристик грунтов, залегающих в основании жилого дома

| Слой                                                                                                                                             | Номенклатурный вид<br>грунта                               | Удельный вес,<br>кН/ м <sup>3</sup> |                 | Угол внут-<br>реннего тре-<br>ния, град |                 | Удельное<br>сцепление,<br>кПа |                 | Модуль<br>деформа-<br>ции, МПа |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|
|                                                                                                                                                  |                                                            | γ <sub>I</sub>                      | γ <sub>II</sub> | φ <sub>I</sub>                          | φ <sub>II</sub> | C <sub>I</sub>                | C <sub>II</sub> | E                              |
| ИГЭ-2а                                                                                                                                           | Супесь песчанистая<br>твердой консистенции                 | <u>17,2</u>                         | <u>17,2</u>     | <u>25</u>                               | <u>25</u>       | <u>12</u>                     | <u>13</u>       | <u>18,0</u>                    |
|                                                                                                                                                  |                                                            | 19,5                                | 19,5            | 24                                      | 24              | 10                            | 11              | 16,0                           |
| ИГЭ-1а                                                                                                                                           | Суглинок легкий пы-<br>леватый полутвердой<br>консистенции | <u>18,3</u>                         | <u>18,4</u>     | <u>23</u>                               | <u>24</u>       | <u>17</u>                     | <u>18</u>       | <u>14,0</u>                    |
|                                                                                                                                                  |                                                            | 19,0                                | 19,1            | 23                                      | 24              | 14                            | 15              | 12,0                           |
| ИГЭ-2ап                                                                                                                                          | Супесь песчанистая<br>твердой консистенции                 | <u>17,9</u>                         | <u>18,0</u>     | <u>27</u>                               | <u>27</u>       | <u>14</u>                     | <u>15</u>       | <u>23,0</u>                    |
|                                                                                                                                                  |                                                            | 20,0                                | 19,4            | 26                                      | 26              | 11                            | 12              | 26,5                           |
| ИГЭ-2б                                                                                                                                           | Супесь песчанистая<br>пластичной консистен-<br>ции         | <u>17,9</u>                         | <u>18,0</u>     | <u>27</u>                               | <u>27</u>       | <u>14</u>                     | <u>15</u>       | <u>24,0</u>                    |
|                                                                                                                                                  |                                                            | 20,0                                | 20,1            | 26                                      | 26              | 11                            | 12              | -                              |
| Примечание – Характеристики представлены в виде дроби, где в числителе значение при природной влажности, в знаменателе при полном водонасыщении. |                                                            |                                     |                 |                                         |                 |                               |                 |                                |

Инженерно-геологический разрез площадки строительства жилого дома приведен на рисунке 4.3.

Конфигурация фундамента здания представлена на рисунке 4.4.

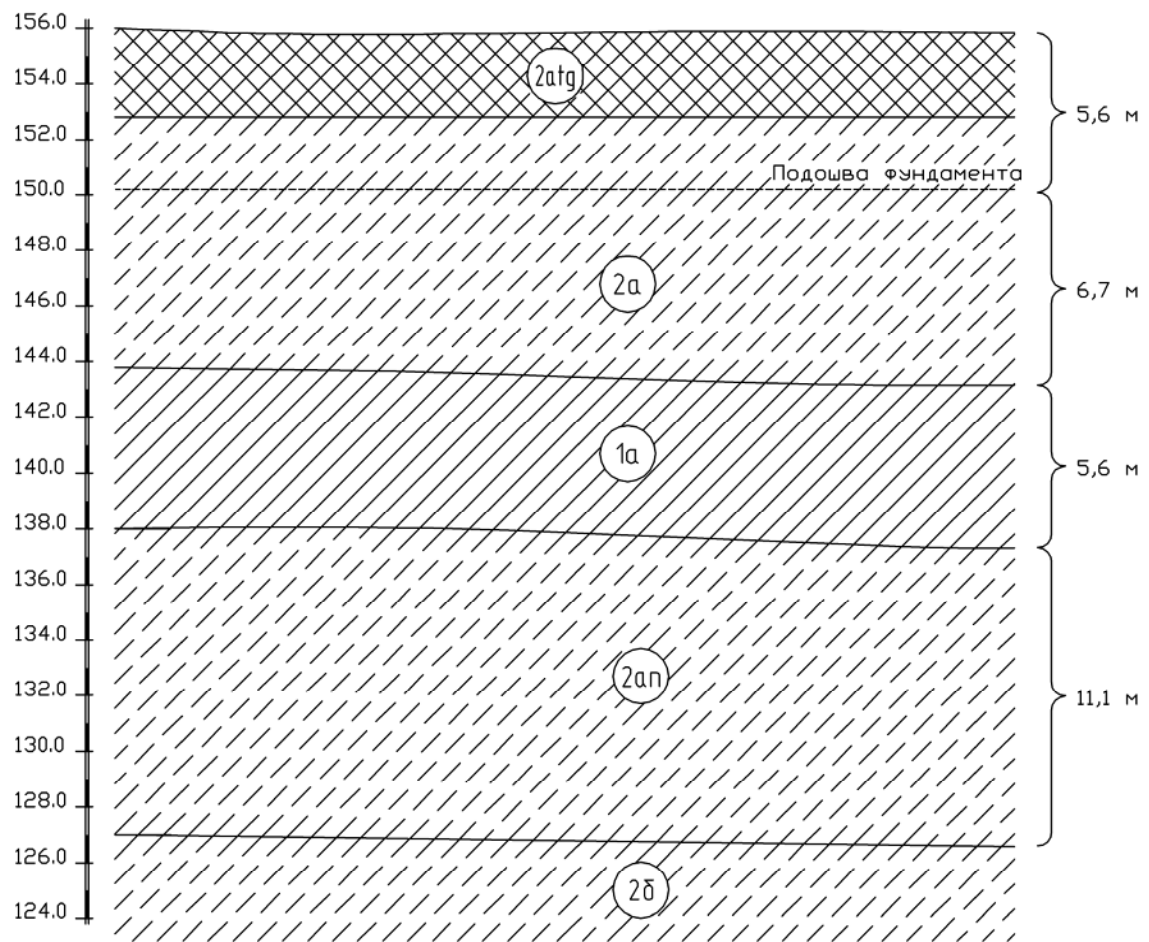


Рисунок 4.3 – Инженерно-геологический разрез площадки

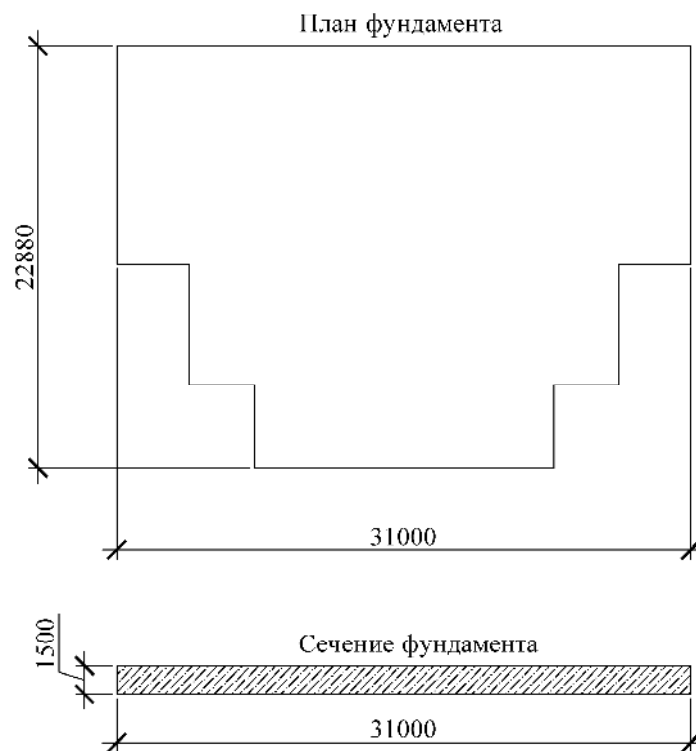


Рисунок 4.4 – Конфигурация фундамента



Фундамент жилого дома монолитный, железобетонный, толщиной 1,5 м. Ширина и длина в плане составляет 22,88 и 31,00 м. Площадь подошвы фундамента 591,68 м<sup>2</sup>. Глубина заложения фундамента от уровня дневной поверхности 4,5 м. Нагрузка, передаваемая на подошву фундамента 278 МН. Давление под подошвой 470 кПа.

На начальном этапе проектирования выполняется расчет грунтов основания по второй группе предельных состояний. В таблице 4.2 приведены результаты определения расчетного сопротивления грунтов, залегающих в основании фундамента (ИГЭ-2а).

Таблица 4.2 – Результаты определения расчетного сопротивления грунтов, залегающих в основании фундамента (ИГЭ-2а)

| Слой   | $j_{п}$<br>град | $C_{п}$<br>кПа | Коэффициенты |       |       | b, м  | $k_z$ | $d_1$ , м | $g_{п}$<br>кН/м <sup>3</sup> | $g'_{п}$<br>кН/м <sup>3</sup> | R, кПа |
|--------|-----------------|----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------|------------------------------|-------------------------------|--------|
|        |                 |                | $M_g$        | $M_q$ | $M_c$ |       |       |           |                              |                               |        |
| ИГЭ-2а | 24              | 11             | 0,72         | 3,87  | 6,45  | 22,88 | 0,55  | 4,5       | 17,2                         | 17,2                          | 657    |

Анализируя таблицу 4.2, можно увидеть, что значение расчетного сопротивления грунтов основания фундамента 25-этажного жилого дома составляет 657 кПа, что выше нормативного значения давления под подошвой фундамента. Следовательно, необходимость в проверке несущей способности грунтов отсутствует.

На следующем этапе выполняется расчет осадки грунтов основания. Осадка основания определяется в соответствии с требованиями СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства методом послойного суммирования. Результаты определения осадки основания фундамента 25-этажного жилого дома представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты определения осадки основания фундаментов  
25-этажного жилого дома

| Абс.<br>отм., м | z <sub>i</sub> ,<br>м | z+d,<br>м | γ <sub>g</sub><br>кН/м3 | E <sub>i</sub> ,<br>МПа | σ <sub>zg i</sub> ,<br>кПа | Σσ <sub>zg i</sub> ,<br>кПа | ζ     | α     | σ <sub>zp i</sub> , кПа | S, мм |
|-----------------|-----------------------|-----------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|
| 150,20          | 0,0                   | 5,6       | 17,2                    | 16,0                    | 96,3                       | 96,3                        | —     | 1,000 | 469,851                 | 11,75 |
| 149,70          | 0,5                   | 6,1       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 104,9                       | 0,044 | 1,000 | 469,826                 | 11,75 |
| 149,20          | 1,0                   | 6,6       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 113,5                       | 0,087 | 1,000 | 469,653                 | 11,74 |
| 148,70          | 1,5                   | 7,1       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 122,1                       | 0,131 | 0,999 | 469,190                 | 11,73 |
| 148,20          | 2,0                   | 7,6       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 130,7                       | 0,175 | 0,997 | 468,307                 | 11,71 |
| 147,70          | 2,5                   | 8,1       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 139,3                       | 0,219 | 0,994 | 466,895                 | 11,67 |
| 147,20          | 3,0                   | 8,6       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 147,9                       | 0,262 | 0,989 | 464,861                 | 11,62 |
| 146,70          | 3,5                   | 9,1       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 156,5                       | 0,306 | 0,984 | 462,140                 | 11,55 |
| 146,20          | 4,0                   | 9,6       | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 165,1                       | 0,350 | 0,976 | 458,690                 | 11,47 |
| 145,70          | 4,5                   | 10,1      | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 173,7                       | 0,393 | 0,967 | 454,493                 | 11,36 |
| 145,20          | 5,0                   | 10,6      | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 182,3                       | 0,437 | 0,957 | 449,553                 | 11,24 |
| 144,70          | 5,5                   | 11,1      | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 190,9                       | 0,481 | 0,945 | 443,892                 | 11,10 |
| 144,20          | 6,0                   | 11,6      | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 199,5                       | 0,524 | 0,931 | 437,552                 | 10,94 |
| 143,70          | 6,5                   | 12,1      | 17,2                    | 16,0                    | 8,6                        | 208,1                       | 0,568 | 0,916 | 430,583                 | 4,31  |
| 143,20          | 6,7                   | 12,3      | 18,4                    | 12,0                    | 3,7                        | 211,8                       | 0,586 | 0,910 | 427,634                 | 8,55  |
| 142,70          | 7,0                   | 12,6      | 18,4                    | 12,0                    | 5,5                        | 217,3                       | 0,612 | 0,900 | 423,049                 | 14,10 |
| 142,20          | 7,5                   | 13,1      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 226,5                       | 0,656 | 0,883 | 415,018                 | 13,83 |
| 141,70          | 8,0                   | 13,6      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 235,7                       | 0,699 | 0,865 | 406,560                 | 13,55 |
| 141,20          | 8,5                   | 14,1      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 244,9                       | 0,743 | 0,847 | 397,748                 | 13,26 |
| 140,70          | 9,0                   | 14,6      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 254,1                       | 0,787 | 0,827 | 388,653                 | 12,96 |
| 140,20          | 9,5                   | 15,1      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 263,3                       | 0,830 | 0,807 | 379,344                 | 12,64 |
| 139,70          | 10,0                  | 15,6      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 272,5                       | 0,874 | 0,787 | 369,883                 | 12,33 |
| 139,20          | 10,5                  | 16,1      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 281,7                       | 0,918 | 0,767 | 360,330                 | 12,01 |
| 138,70          | 11,0                  | 16,6      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 290,9                       | 0,962 | 0,746 | 350,740                 | 11,69 |
| 138,20          | 11,5                  | 17,1      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 300,1                       | 1,005 | 0,726 | 341,159                 | 11,37 |
| 137,70          | 12,0                  | 17,6      | 18,4                    | 12,0                    | 9,2                        | 309,3                       | 1,049 | 0,706 | 331,632                 | 17,69 |
| 137,20          | 12,8                  | 18,4      | 18,0                    | 26,5                    | 14,4                       | 323,7                       | 1,119 | 0,674 | 316,588                 | 1,91  |
| 136,70          | 13,0                  | 13,0      | 18,0                    | 26,5                    | 3,6                        | 327,3                       | 1,136 | 0,666 | 312,878                 | 4,72  |
| 136,20          | 13,5                  | 19,1      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 336,3                       | 1,180 | 0,646 | 303,627                 | 4,58  |
| 135,70          | 14,0                  | 19,6      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 345,3                       | 1,224 | 0,626 | 293,937                 | 4,44  |
| 135,20          | 14,5                  | 20,1      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 354,3                       | 1,267 | 0,605 | 284,485                 | 4,29  |
| 134,70          | 15,0                  | 20,6      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 363,3                       | 1,311 | 0,586 | 275,272                 | 4,16  |
| 134,20          | 15,5                  | 21,1      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 372,3                       | 1,355 | 0,567 | 266,292                 | 4,02  |
| 133,70          | 16,0                  | 21,6      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 381,3                       | 1,399 | 0,548 | 257,536                 | 3,89  |
| 133,20          | 16,5                  | 22,1      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 390,3                       | 1,442 | 0,530 | 248,991                 | 3,76  |
| 132,70          | 17,0                  | 22,6      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 399,3                       | 1,486 | 0,512 | 240,641                 | 3,63  |
| 132,20          | 17,5                  | 23,1      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 408,3                       | 1,530 | 0,495 | 232,472                 | 3,51  |
| 131,70          | 18,0                  | 23,6      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 417,3                       | 1,573 | 0,478 | 224,473                 | 3,39  |
| 131,20          | 18,5                  | 24,1      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 426,3                       | 1,617 | 0,461 | 216,632                 | 3,27  |
| 130,70          | 19,0                  | 24,6      | 18,0                    | 26,5                    | 9,0                        | 435,3                       | 1,661 | 0,445 | 0,000                   | 0,00  |
| Общая осадка:   |                       |           |                         |                         |                            |                             |       |       |                         | 357,5 |

Анализируя таблицу 4.3, можно увидеть, что глубина сжимаемой толщи составляет 19 м, общая осадка – 35,7 см. Согласно требованиям нормативных документов максимальная осадка для данного типа здания не должна превышать 15 см. Следовательно, требуется усиление.

Далее на основе анализа грунтовых условий определяются возможные параметры усиления – глубина усиления, модуль деформации усиленного основания.

Сжимаемая толща основания фундаментов жилого дома составляет 19 м. В нее попадают три инженерно-геологических элемента:

- 1) ИГЭ-2а – супесь песчанистая твердой консистенции практически непучинистая;
- 2) ИГЭ-1а – суглинок легкий пылеватый полутвердой консистенции;
- 3) ИГЭ-2ап – супесь песчанистая твердой консистенции.

Анализ физико-механических характеристик данных грунтов и результатов расчета осадки основания позволяет сделать вывод, что на деформативность основания в большей степени влияют грунты ИГЭ-2а и ИГЭ-1а. Вертикальная осадка расчетных слоев ИГЭ-2ап в три раза меньше чем тот же показатель у вышележащих грунтов.

Таким образом, при проектировании усиления необходимо повысить деформационные характеристики основания на глубину, соответствующую мощности ИГЭ-2а и ИГЭ-1а, 12,7 м.

На следующем этапе выполняется определение модуля деформации усиленного основания. Используя поверхности влияния, полученные в главе 2, выполняется расчет увеличения модуля деформации усиленного массива. Определение модулей деформации усиливаемых грунтовых массивов с использованием поверхности влияния, приведено на рисунке 4.5.

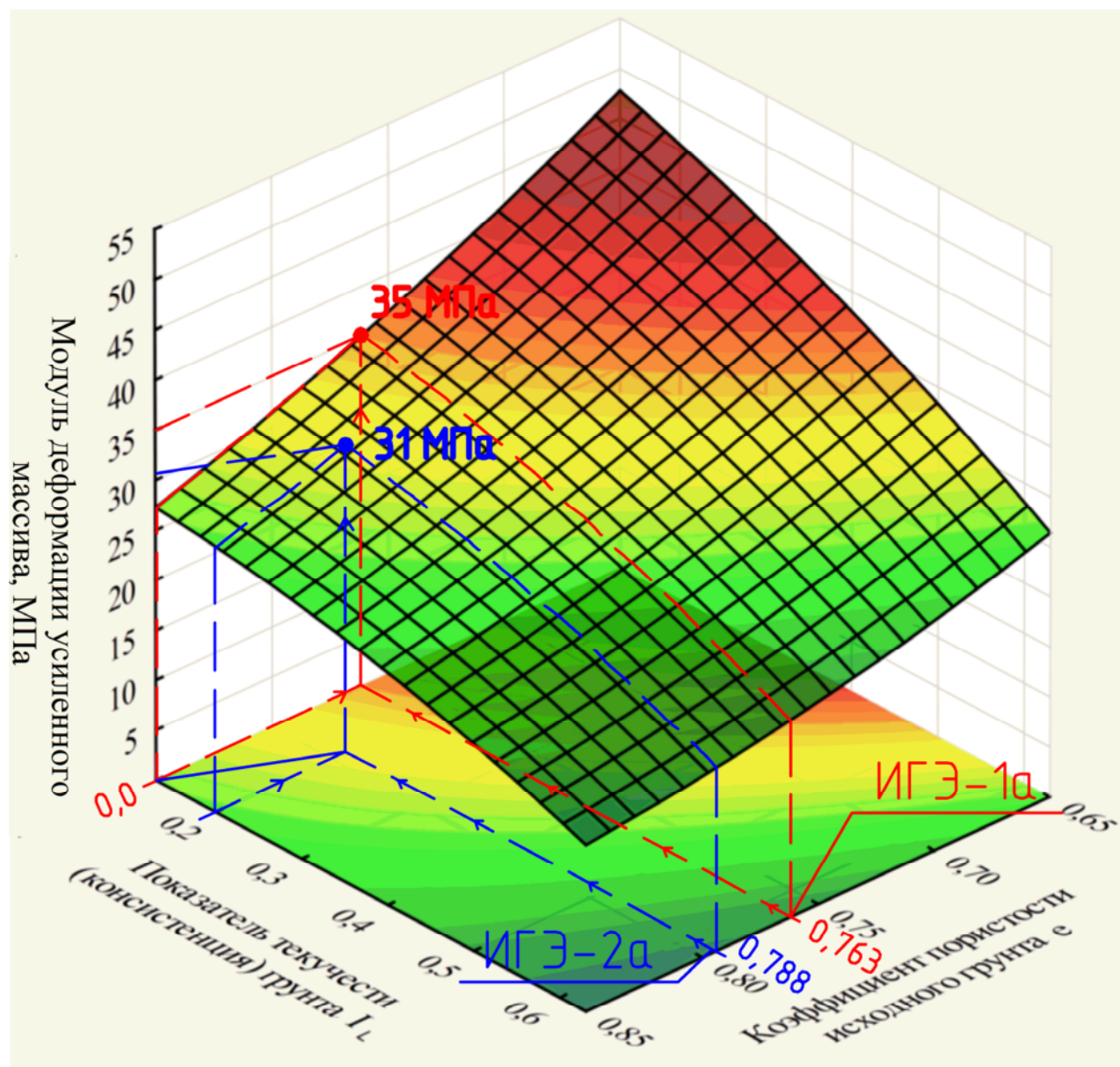


Рисунок 4.5 – Определение модулей деформации ИГЭ-1а и ИГЭ-2ап после усиления с использованием поверхности влияния

По рисунку 4.5 видно, что в рассматриваемых грунтовых условиях при усилении грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах модули деформации усиленного массива составят: 35 МПа для ИГЭ-2а, 31 МПа для грунтов ИГЭ-1а. Достижение данных значений модулей деформации возможно при шаге расстановки раскатанных скважин, равном 1,0 м. На последующих этапах проектирования будет выполнено уточнение шага.

Раскатывающий рабочий орган выполнен в виде конуса высотой 1,0 м и диаметром основания 250 мм. В связи с этим, длина раскатанных скважин при

выполнении усиления с учетом конусности рабочего органа принимается равной  $H_c = 12,7 + 1,0 = 13,7$  м относительно дна котлована (рисунок 4.6).

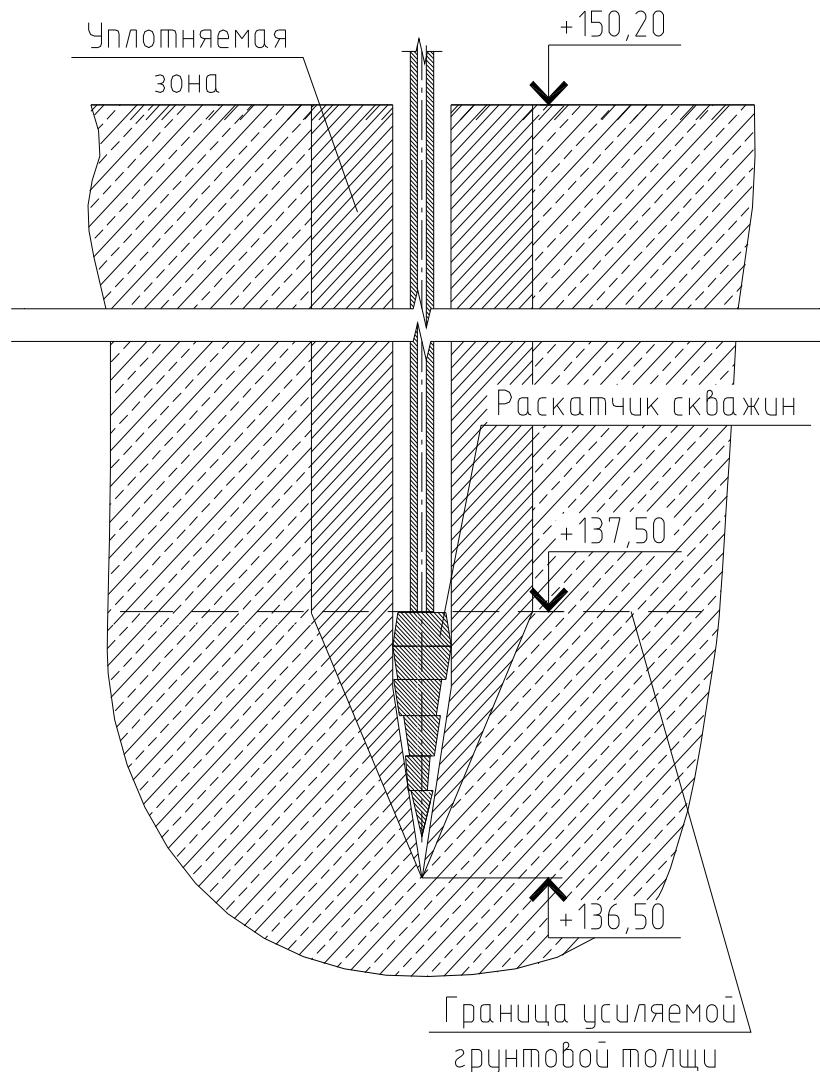


Рисунок 4.6 – Схематичный разрез раскатанной скважины

Далее выполняется определение диаметров раскатанных скважин при усилении грунтов. Для этой цели используется поверхность влияния, представленная на рисунке 2.21. Расчет диаметров раскатанных скважин приведен на рисунке 4.7.

По рисунку 4.7 видно, что в рассматриваемых грунтовых условиях диаметры раскатанных скважин при реализации усиления составят: 210 мм для ИГЭ-2а, 223 мм для грунтов ИГЭ-1а.

Полученные значения диаметров скважин будут использоваться для назначения параметров операционного контроля качества.

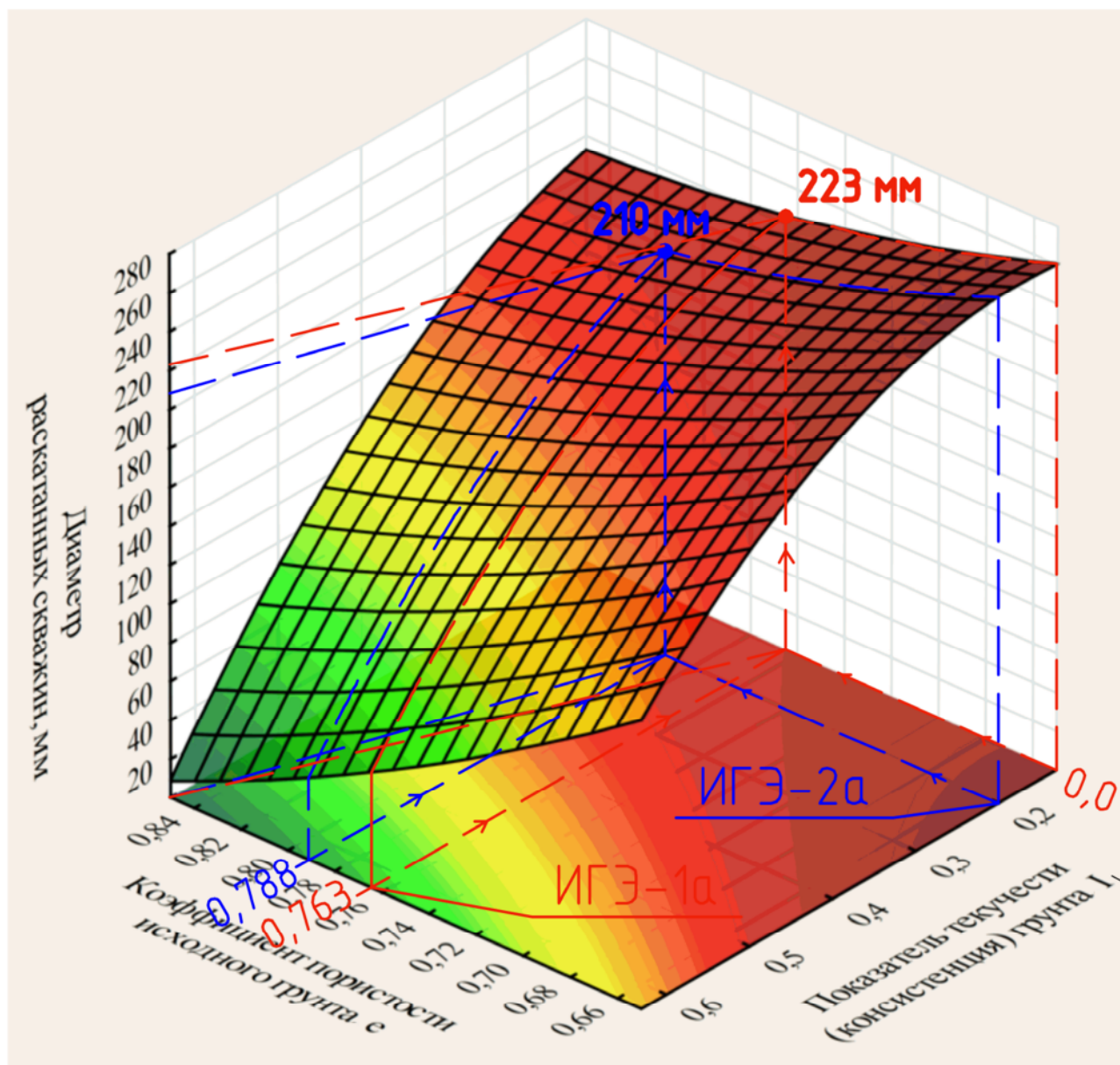


Рисунок 4.7 – Определение диаметров раскатанных скважин при усилении грунтов ИГЭ-1а и ИГЭ-2а, используя поверхность влияния

Определение физико-механических характеристик уплотненных в межскважинном пространстве грунтов выполняется через коэффициент пористости. С использованием формулы, полученной в главе 2, вычисляются значения коэффициентов пористости уплотненных грунтов. Поскольку уплотнение грунтов под действием раскатки происходит в радиальном направлении, то эффект от уплотнения будет снижаться с увеличением расстояния от скважины.

Результаты расчета коэффициентов пористости уплотняемых грунтов ИГЭ-2а и ИГЭ-1а приведены в виде графиков на рисунках 4.8 и 4.9.



Рисунок 4.8 – Расчет изменения коэффициента пористости грунтов ИГЭ-2а при их уплотнении раскаткой скважин



Рисунок 4.9 – Расчет изменения коэффициента пористости грунтов ИГЭ-1а при их уплотнении раскаткой

Полученные значения коэффициентов пористости будут использоваться для назначения параметров приемочного контроля качества.

Механические параметры грунтов – угол внутреннего трения и удельное сцепление могут назначаться в зависимости от коэффициента пористости

уплотненного грунта с использованием таблиц, приведенных в СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».

Следующим этапом проектирования является назначение материала заполнения скважин. Учитывая, что рассчитанные диаметры раскатанных скважин будут меньше исходных не более чем на 16 %, материал назначается из конструктивных и экономических соображений. Для заполнения скважин назначается грунтоцементный раствор. Соотношение грунта и цемента рекомендуется принимать 5 : 1 (супесь 1250 кг, цемент 250 кг, вода 250 л). Основным критерием для назначения рецептуры раствора является его модуль деформации. Модуль деформации раствора с указанной рецептурой должен быть не менее 210 МПа.

Следующим этапом проектирования является контрольный расчет усиленного основания с определением осадки. Параметры усиленного основания, используемые в расчете, указаны в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Параметры усиленного основания, используемые при контрольном расчете осадки

| Грунтовый слой | Мощность слоя, м | Модуль деформации, МПа | Примечание |
|----------------|------------------|------------------------|------------|
| ИГЭ-2а         | 6,7              | 35                     | Усиленный  |
| ИГЭ-1а         | 5,6              | 31                     | Усиленный  |
| ИГЭ-2ап        | 6,7              | 26                     | Исходный   |

Результаты контрольного расчета осадки основания после усиления приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты контрольного расчета осадки основания после усиления

| Абс. отм., м | $z_i$ , м | $z+d$ , м | $\gamma_g$ , кН/м <sup>3</sup> | $E_i$ , МПа | $\sigma_{zg\ i}$ , кПа | $\Sigma\sigma_{zg\ i}$ , кПа | $\zeta$ | $\alpha$ | $\sigma_{zp\ i}$ , кПа | $S$ , мм |
|--------------|-----------|-----------|--------------------------------|-------------|------------------------|------------------------------|---------|----------|------------------------|----------|
| 150,20       | 0,0       | 5,6       | 17,2                           | 35,0        | 96,3                   | 96,3                         | –       | 1,000    | 469,851                | 5,37     |
| 149,70       | 0,5       | 6,1       | 17,2                           | 35,0        | 8,6                    | 104,9                        | 0,044   | 1,000    | 469,826                | 5,37     |
| 149,20       | 1,0       | 6,6       | 17,2                           | 35,0        | 8,6                    | 113,5                        | 0,087   | 1,000    | 469,653                | 5,37     |
| 148,70       | 1,5       | 7,1       | 17,2                           | 35,0        | 8,6                    | 122,1                        | 0,131   | 0,999    | 469,190                | 5,36     |



Продолжение таблицы 4.5

| Абс.<br>отм., м | $z_i$ ,<br>м | $z+d$ ,<br>м | $\gamma_g$ ,<br>кН/м <sup>3</sup> | $E_i$ ,<br>МПа | $\sigma_{zg\ i}$ ,<br>кПа | $\Sigma\sigma_{zg\ i}$ ,<br>кПа | $\zeta$ | $\alpha$ | $\sigma_{zp\ i}$ ,<br>кПа | $S$ , мм |
|-----------------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------|---------|----------|---------------------------|----------|
| 148,20          | 2,0          | 7,6          | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 130,7                           | 0,175   | 0,997    | 468,307                   | 5,35     |
| 147,70          | 2,5          | 8,1          | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 139,3                           | 0,219   | 0,994    | 466,895                   | 5,34     |
| 147,20          | 3,0          | 8,6          | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 147,9                           | 0,262   | 0,989    | 464,861                   | 5,31     |
| 146,70          | 3,5          | 9,1          | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 156,5                           | 0,306   | 0,984    | 462,140                   | 5,28     |
| 146,20          | 4,0          | 9,6          | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 165,1                           | 0,350   | 0,976    | 458,690                   | 5,24     |
| 145,70          | 4,5          | 10,1         | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 173,7                           | 0,393   | 0,967    | 454,493                   | 5,19     |
| 145,20          | 5,0          | 10,6         | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 182,3                           | 0,437   | 0,957    | 449,553                   | 5,14     |
| 144,70          | 5,5          | 11,1         | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 190,9                           | 0,481   | 0,945    | 443,892                   | 5,07     |
| 144,20          | 6,0          | 11,6         | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 199,5                           | 0,524   | 0,931    | 437,552                   | 5,00     |
| 143,70          | 6,5          | 12,1         | 17,2                              | 35,0           | 8,6                       | 208,1                           | 0,568   | 0,916    | 430,583                   | 1,97     |
| 143,20          | 6,7          | 12,3         | 18,4                              | 31,0           | 3,7                       | 211,8                           | 0,586   | 0,910    | 427,634                   | 3,31     |
| 142,70          | 7,0          | 12,6         | 18,4                              | 31,0           | 5,5                       | 217,3                           | 0,612   | 0,900    | 423,049                   | 5,46     |
| 142,20          | 7,5          | 13,1         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 226,5                           | 0,656   | 0,883    | 415,018                   | 5,36     |
| 141,70          | 8,0          | 13,6         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 235,7                           | 0,699   | 0,865    | 406,560                   | 5,25     |
| 141,20          | 8,5          | 14,1         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 244,9                           | 0,743   | 0,847    | 397,748                   | 5,13     |
| 140,70          | 9,0          | 14,6         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 254,1                           | 0,787   | 0,827    | 388,653                   | 5,01     |
| 140,20          | 9,5          | 15,1         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 263,3                           | 0,830   | 0,807    | 379,344                   | 4,89     |
| 139,70          | 10,0         | 15,6         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 272,5                           | 0,874   | 0,787    | 369,883                   | 4,77     |
| 139,20          | 10,5         | 16,1         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 281,7                           | 0,918   | 0,767    | 360,330                   | 4,65     |
| 138,70          | 11,0         | 16,6         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 290,9                           | 0,962   | 0,746    | 350,740                   | 4,53     |
| 138,20          | 11,5         | 17,1         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 300,1                           | 1,005   | 0,726    | 341,159                   | 4,40     |
| 137,70          | 12,0         | 17,6         | 18,4                              | 31,0           | 9,2                       | 309,3                           | 1,049   | 0,706    | 331,632                   | 6,85     |
| 137,20          | 12,8         | 18,4         | 18,0                              | 26,5           | 14,4                      | 323,7                           | 1,119   | 0,674    | 316,588                   | 1,91     |
| 136,70          | 13,0         | 13           | 18,0                              | 26,5           | 3,6                       | 327,3                           | 1,136   | 0,666    | 312,878                   | 4,72     |
| 136,20          | 13,5         | 19,1         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 336,3                           | 1,180   | 0,646    | 303,627                   | 4,58     |
| 135,70          | 14,0         | 19,6         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 345,3                           | 1,224   | 0,626    | 293,937                   | 4,44     |
| 135,20          | 14,5         | 20,1         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 354,3                           | 1,267   | 0,605    | 284,485                   | 4,29     |
| 134,70          | 15,0         | 20,6         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 363,3                           | 1,311   | 0,586    | 275,272                   | 4,16     |
| 134,20          | 15,5         | 21,1         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 372,3                           | 1,355   | 0,567    | 266,292                   | 4,02     |
| 133,70          | 16,0         | 21,6         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 381,3                           | 1,399   | 0,548    | 257,536                   | 3,89     |
| 133,20          | 16,5         | 22,1         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 390,3                           | 1,442   | 0,530    | 248,991                   | 3,76     |
| 132,70          | 17,0         | 22,6         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 399,3                           | 1,486   | 0,512    | 240,641                   | 3,63     |
| 132,20          | 17,5         | 23,1         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 408,3                           | 1,530   | 0,495    | 232,472                   | 3,51     |
| 131,70          | 18           | 23,6         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 417,3                           | 1,573   | 0,478    | 224,473                   | 3,39     |
| 131,20          | 18,5         | 24,1         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 426,3                           | 1,617   | 0,461    | 216,632                   | 3,27     |
| 130,70          | 19           | 24,6         | 18,0                              | 26,5           | 9,0                       | 435,3                           | 1,661   | 0,445    | 208,943                   | 0,00     |
| Общая осадка:   |              |              |                                   |                |                           |                                 |         |          |                           | 179,5    |

Результаты контрольного расчета показали, что осадка основания после усиления составила 17,9 см. Данное значения превышает предельно допустимое – 15 см. Следовательно, требуется корректировка технологических параметров усиления.

Повышение модуля деформации возможно с увеличением шага расстановки раскатанных скважин. С использованием поверхности влияния, отражающей изменение модуля деформации усиленного грунтового массива с уменьшением шага расстановки раскатанных скважин (см. рисунок 3.13), выполняется корректировка шага.

Корректировка шага расстановки раскатанных скважин приведена на рисунке 4.0.

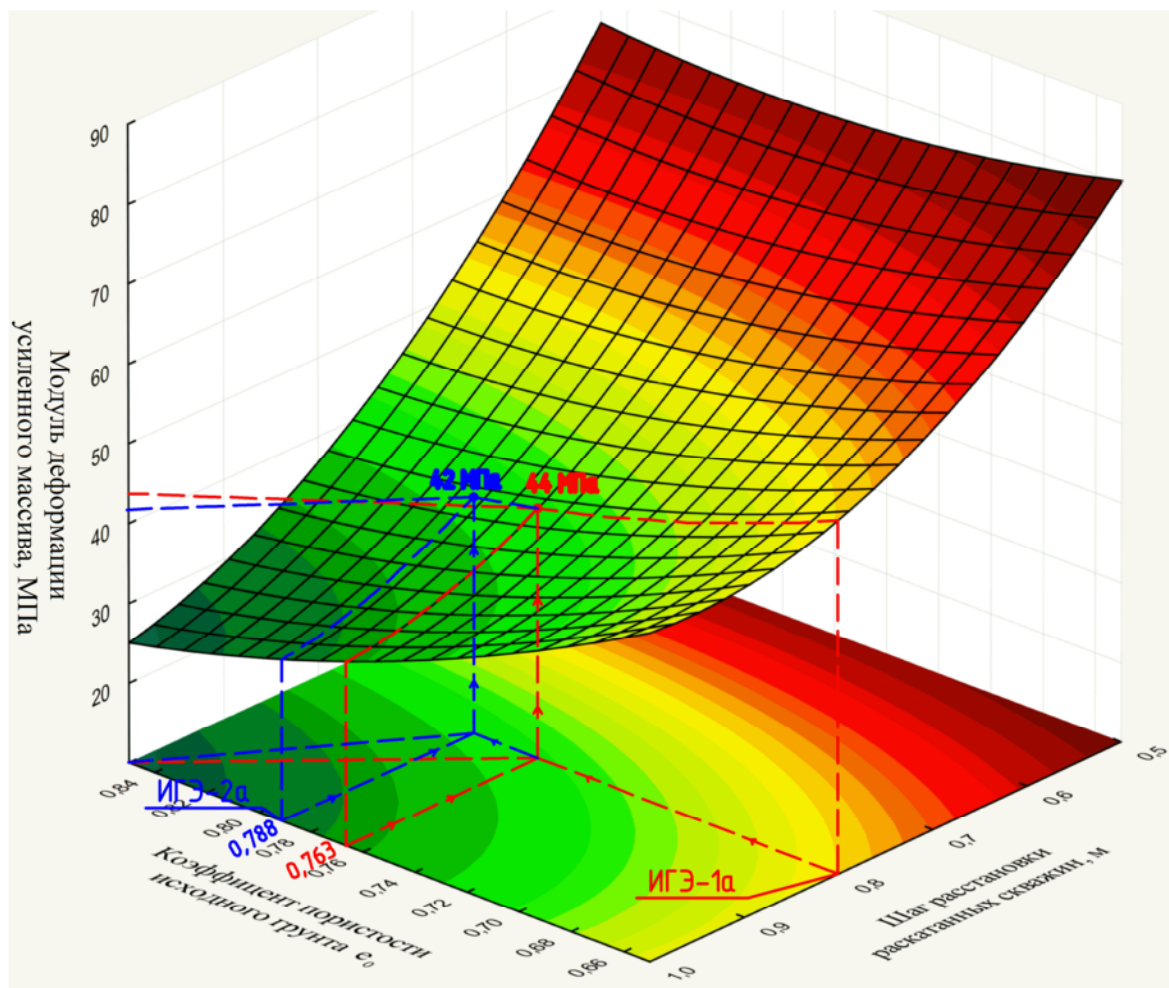


Рисунок 4.10 – Корректировка шага расстановки раскатанных скважин

В результате корректировки проектных решений было установлено, что при уменьшении шага расстановки раскатанных скважин с 1,0 до 0,8 м значения модулей деформации усиленных грунтов составят: 44 МПа для ИГЭ-2а, 42 МПа для грунтов ИГЭ-1а. Используя новые параметры усиления, выполняется расчет осадки основания 25-этажного жилого дома, результаты представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты расчета осадки основания жилого дома после корректировки проектных решений

| Абс. отм.,<br>м | z <sub>i</sub> ,<br>м | z+d,<br>м | γ <sub>g</sub> ,<br>кН/м3 | E <sub>i</sub> ,<br>МПа | σ <sub>z<sub>g</sub> i</sub> ,<br>кПа | Σσ <sub>z<sub>g</sub> i</sub> ,<br>кПа | ζ     | α     | σ <sub>z<sub>p</sub> i</sub> ,<br>кПа | S,<br>мм |
|-----------------|-----------------------|-----------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------|----------|
| 150,20          | 0,0                   | 5,6       | 17,2                      | 44,0                    | 96,3                                  | 96,3                                   | —     | 1,000 | 469,851                               | 4,27     |
| 149,70          | 0,5                   | 6,1       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 104,9                                  | 0,044 | 1,000 | 469,826                               | 4,27     |
| 149,20          | 1,0                   | 6,6       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 113,5                                  | 0,087 | 1,000 | 469,653                               | 4,27     |
| 148,70          | 1,5                   | 7,1       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 122,1                                  | 0,131 | 0,999 | 469,190                               | 4,27     |
| 148,20          | 2,0                   | 7,6       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 130,7                                  | 0,175 | 0,997 | 468,307                               | 4,26     |
| 147,70          | 2,5                   | 8,1       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 139,3                                  | 0,219 | 0,994 | 466,895                               | 4,24     |
| 147,20          | 3,0                   | 8,6       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 147,9                                  | 0,262 | 0,989 | 464,861                               | 4,23     |
| 146,70          | 3,5                   | 9,1       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 156,5                                  | 0,306 | 0,984 | 462,140                               | 4,20     |
| 146,20          | 4,0                   | 9,6       | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 165,1                                  | 0,350 | 0,976 | 458,690                               | 4,17     |
| 145,70          | 4,5                   | 10,1      | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 173,7                                  | 0,393 | 0,967 | 454,493                               | 4,13     |
| 145,20          | 5,0                   | 10,6      | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 182,3                                  | 0,437 | 0,957 | 449,553                               | 4,09     |
| 144,70          | 5,5                   | 11,1      | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 190,9                                  | 0,481 | 0,945 | 443,892                               | 4,04     |
| 144,20          | 6,0                   | 11,6      | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 199,5                                  | 0,524 | 0,931 | 437,552                               | 3,98     |
| 143,70          | 6,5                   | 12,1      | 17,2                      | 44,0                    | 8,6                                   | 208,1                                  | 0,568 | 0,916 | 430,583                               | 1,57     |
| 143,20          | 6,7                   | 12,3      | 18,4                      | 42,0                    | 3,7                                   | 211,8                                  | 0,586 | 0,910 | 427,634                               | 2,44     |
| 142,70          | 7,0                   | 12,6      | 18,4                      | 42,0                    | 5,5                                   | 217,3                                  | 0,612 | 0,900 | 423,049                               | 4,03     |
| 142,20          | 7,5                   | 13,1      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 226,5                                  | 0,656 | 0,883 | 415,018                               | 3,95     |
| 141,70          | 8,0                   | 13,6      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 235,7                                  | 0,699 | 0,865 | 406,560                               | 3,87     |
| 141,20          | 8,5                   | 14,1      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 244,9                                  | 0,743 | 0,847 | 397,748                               | 3,79     |
| 140,70          | 9,0                   | 14,6      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 254,1                                  | 0,787 | 0,827 | 388,653                               | 3,70     |
| 140,20          | 9,5                   | 15,1      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 263,3                                  | 0,830 | 0,807 | 379,344                               | 3,61     |
| 139,70          | 10,0                  | 15,6      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 272,5                                  | 0,874 | 0,787 | 369,883                               | 3,52     |
| 139,20          | 10,5                  | 16,1      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 281,7                                  | 0,918 | 0,767 | 360,330                               | 3,43     |
| 138,70          | 11,0                  | 16,6      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 290,9                                  | 0,962 | 0,746 | 350,740                               | 3,34     |
| 138,20          | 11,5                  | 17,1      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 300,1                                  | 1,005 | 0,726 | 341,159                               | 3,25     |
| 137,70          | 12,0                  | 17,6      | 18,4                      | 42,0                    | 9,2                                   | 309,3                                  | 1,049 | 0,706 | 331,632                               | 5,05     |
| 137,20          | 12,8                  | 18,4      | 18,0                      | 26,5                    | 14,4                                  | 323,7                                  | 1,119 | 0,674 | 316,588                               | 1,91     |
| 136,70          | 13,0                  | 13        | 18,0                      | 26,5                    | 3,6                                   | 327,3                                  | 1,136 | 0,666 | 312,878                               | 4,72     |
| 136,20          | 13,5                  | 19,1      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 336,3                                  | 1,180 | 0,646 | 303,627                               | 4,58     |
| 135,70          | 14,0                  | 19,6      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 345,3                                  | 1,224 | 0,626 | 293,937                               | 4,44     |
| 135,20          | 14,5                  | 20,1      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 354,3                                  | 1,267 | 0,605 | 284,485                               | 4,29     |
| 134,70          | 15,0                  | 20,6      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 363,3                                  | 1,311 | 0,586 | 275,272                               | 4,16     |
| 134,20          | 15,5                  | 21,1      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 372,3                                  | 1,355 | 0,567 | 266,292                               | 4,02     |
| 133,70          | 16,0                  | 21,6      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 381,3                                  | 1,399 | 0,548 | 257,536                               | 3,89     |
| 133,20          | 16,5                  | 22,1      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 390,3                                  | 1,442 | 0,530 | 248,991                               | 3,76     |
| 132,70          | 17,0                  | 22,6      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 399,3                                  | 1,486 | 0,512 | 240,641                               | 3,63     |
| 132,20          | 17,5                  | 23,1      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 408,3                                  | 1,530 | 0,495 | 232,472                               | 3,51     |
| 131,70          | 18                    | 23,6      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 417,3                                  | 1,573 | 0,478 | 224,473                               | 3,39     |
| 131,20          | 18,5                  | 24,1      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 426,3                                  | 1,617 | 0,461 | 216,632                               | 3,27     |
| 130,70          | 19                    | 24,6      | 18,0                      | 26,5                    | 9,0                                   | 435,3                                  | 1,661 | 0,445 | 208,943                               | 0,00     |
| Общая осадка:   |                       |           |                           |                         |                                       |                                        |       |       |                                       | 149,5    |

Результат расчета осадки основания фундаментов жилого дома после корректировки проектных решений показал, что осадка усиленного основания в случае выполнения шага расстановки раскатанных скважин 0,8 м составит 14,9 см, что меньше предельно допустимой осадки – 15,0 см.

Окончательные параметры усиления принимаются следующими:

- глубина раскатки скважин: 13,7 м;
- мощность усиления: 12,7 м;
- шаг раскатки скважин: 0,8 м;
- тип рабочего органа: раскатывающий рабочий орган с неподвижными катками;
- усиливаемые грунты: ИГЭ-2а и ИГЭ-1а;
- диаметры раскатанных скважин: 210 мм для ИГЭ-2а и 223 мм для ИГЭ-1а;
- модули деформации усиленных грунтов: 44 МПа для ИГЭ-1а и 42 МПа для ИГЭ-2а;
- материал заполнения раскатанных скважин: грунтоцементный раствор. Соотношение грунта и цемента 5:1 (супесь 1250 кг, цемент 250 кг, вода 250 л);
- модуль деформации грунтоцементного раствора: 210 МПа;
- расчетная осадка: 14,9 см.

#### **4.3 Оборудование для усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах**

Важным технологическим параметром при усилении грунтов является раскатывающий рабочий орган. Для раскатки скважин рекомендуется использовать конструкцию раскатывающего рабочего органа с неподвижными катками. В случае наличия в зоне усиления грунтов с повышенным показателем текучести  $0,50 < I_L$  необходимо использовать раскатчик скважин с полым валом, позволяющий создавать набивные сваи за один рабочий цикл.

Применение существующей конструкции раскатывающего устройства с подвижными катками технологически неэффективно, поскольку она обладает следующими недостатками:

- сложность, трудоемкость и дороговизна обслуживания устройства из-за наличия цилиндрических и конических катков (сложная конструкция);
- высокая трудоемкость в эксплуатации из-за подверженности плотной закупорке раскатываемым грунтом кольцевой проточки для выпуска строительного раствора;
- подверженность устройства попаданию между вращающимися катками частиц грунта, влаги, а также строительного раствора, что приводит к выходу из строя раскатывающего устройства.

Таким образом, главным недостатком устройства является сложность его конструкции.

При использовании более простых устройств также есть ряд сложностей и недостатков. При раскатке обводненных грунтов или грунтов с высокой степенью водонасыщения возникает проблема с подачей раствора в скважину, поскольку использование стандартного оборудования не позволяет производить оперативное заполнение скважин. Использование существующих устройств с выходными отверстиями позволяет решить эту проблему, однако при их использовании возникают дополнительные сложности.

Так, существующая конструкция имеет малое полезное сечение для подачи строительного раствора в скважину. Кроме того, происходит закупорка выходного отверстия для подачи строительного раствора при раскатке тугопластичных и мягкопластичных грунтов из-за его перпендикулярного расположения относительно стенки скважины.

Данные недостатки резко снижают производительность и повышают трудоемкость работ по производству набивных свай в раскатанных скважинах.

В ходе выполнения исследований по главе 2 была разработана новая конструкция раскатывающего рабочего органа. В новом устройстве, содержащем полый вал для подачи строительного раствора, предусмотрен теряемый нако-

нечник. Особенностью и главным преимуществом данного устройства является большее (в сравнении с аналогами) сечение выходного отверстия для подачи строительного раствора.

Сущность технического решения поясняется рисунком 4.11.

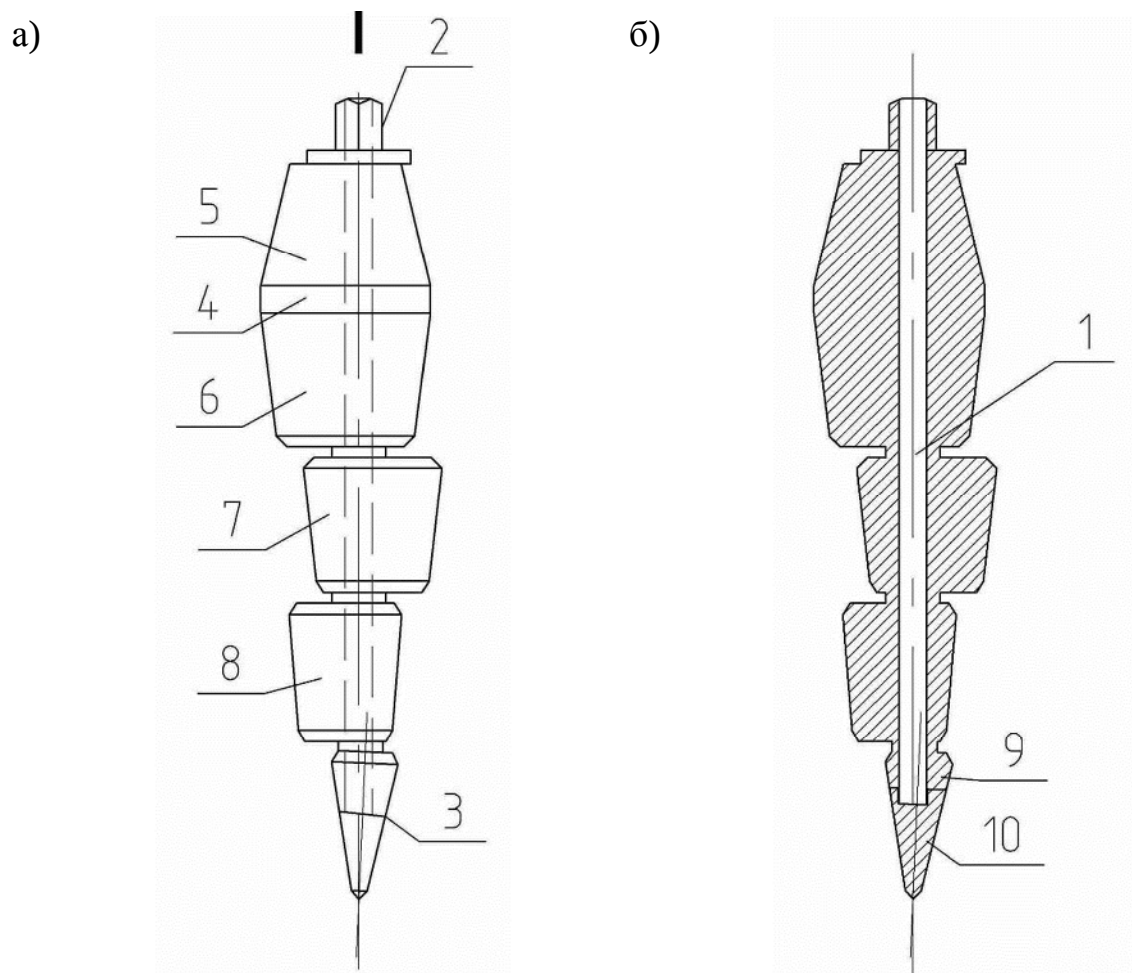


Рисунок 4.11 – Раскатчик для изготовления

вертикальных и наклонных скважин:

*а* – общий вид; *б* – продольный разрез

Раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин состоит из полого вала *1* для подачи строительного раствора с хвостовиком *2* и соосно расположенным с ним составным наконечником *3*, между которыми расположены последовательно развернутые вокруг продольной оси вала эксцентриковые рабочие элементы в виде цилиндра *4* и усеченных конусов *5*, *6*, *7*, *8*, продольные оси симметрии которых смещены параллельно продольной оси вала *1*,

усеченные конусы 6, 7, 8 выполнены с равномерно увеличивающимся диаметром в направлении от наконечника 3 к цилиндру 4. Наконечник 3 выполнен из закрепленных на валу 1 хвостовой 9 и головной 10 частей с переменным эксцентриситетом, увеличивающимся от вершины к основанию, причем эксцентриситет у вершины равен нулю. Вал 1 выполнен полым на участке, ограниченном хвостовой частью 9 наконечника 3.

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. Кроме того, ввиду наличия обратного усеченного конуса 5 облегчается извлечение раскатчика из скважины, сохраняется целостность ее стенок и не возникает необходимости прочистки выходного отверстия устройства при раскатке тугопластичных и мягкопластичных грунтов.

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. Перечисленные преимущества позволяют повысить эффективность изготовления набивных свай из-за снижения сроков изготовления, а также снизить трудоемкость из-за отсутствия необходимости прочистки закупоренного выходного отверстия.

#### **4.4 Контроль технического состояния грунтовых оснований, усиленных набивными сваями в раскатанных скважинах**

Реализация усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах должна сопровождаться входным и операционным контролем качества. Кроме того, после реализации усиления необходимо выполнить приемочный контроль качества со сравнением фактических значений физико-механических характеристик усиленного массива с расчетными. После завершения работ по усилению требуется выполнять наблюдения за вертикальными деформациями

усиленного основания. Такие мероприятия позволяют подтвердить правильность реализованных работ по усилению и выявить техническое состояние усиленного основания. Входной контроль комплектующих изделий и материалов должен проводиться в соответствии с ГОСТ 24297–2013 «Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля» и включать приемку от поставщиков комплектующих конструкций, цемента, грунта, бетона и добавок по паспортам, сертификатам и материалам контрольных испытаний образцов.

Общая схема проведения входного, операционного, приемочного контроля и геотехнического мониторинга приведена на рисунке 4.12.

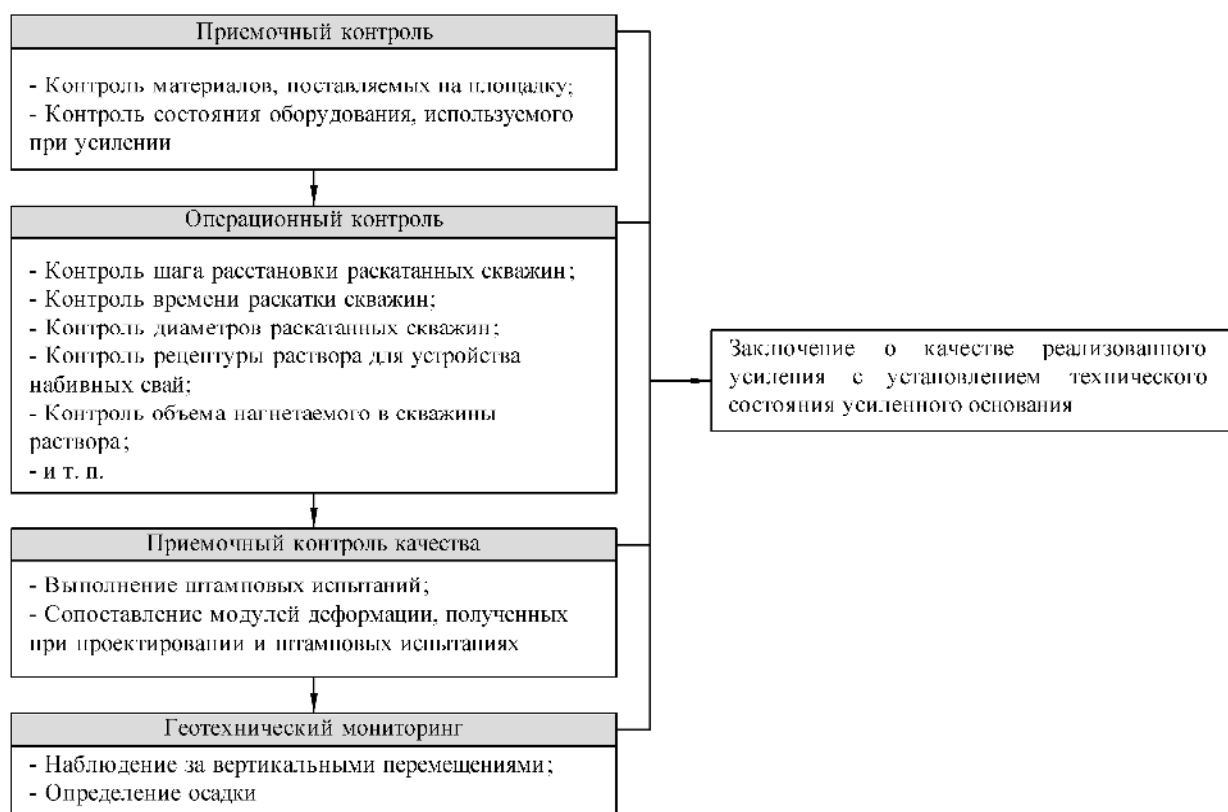


Рисунок 4.12 – Схема проведения входного, операционного, приемочного контроля и геотехнического мониторинга

Соблюдение технологических 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 требуется выполнение мероприятий по операционному контролю.



В ходе операционного контроля выполняется замеры геометрических параметров скважин – их положения в плане, глубины, диаметров. Также, при раскатке выполняется фиксация времени проходки каждой скважины. При заполнении скважин фиксируется фактический объем нагнетаемого раствора.

Данные контролирующие операции могут корректироваться в зависимости от конкретных условий усиления.

В таблице 4.7 представлены технологические параметры, обеспечивающие качественное усиление основания.

Таблица 4.7 – Технологические параметры, обеспечивающие качественное усиление основания

| Контролируемые параметры                  | Рекомендации                                                   | Технологические операции                                                                     |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Диаметр раскатанных скважин            | Значение диаметра должно соответствовать требованиям проекта   | Контроль эталоном по глубине скважины                                                        |
| 2. Шаг расстановки скважин                | Погрешность от требуемого шага по проекту не более 3 %         | Измерять рулеткой по месту                                                                   |
| 3. Глубина раскатанных скважин            | Погрешность от требуемой глубины по проекту не более 5 %       | То же                                                                                        |
| 4. Время раскатки одной скважины          | Не более 10 мин на 10 м. п. скважины                           | Производить лидерное бурение с последующим контролем диаметров скважин и плотности грунтов   |
| 5. Зона уплотнения грунта                 | В интервале $2...3d$ в зависимости от типа уплотняемых грунтов | Контроль плотности в плане через каждые 10 см от скважины методом динамического зондирования |
| 6. Плотность грунта                       | Погрешность от требуемой плотности по проекту не более 5 %     | То же                                                                                        |
| 7. Рецепт раствора для заполнения скважин | Погрешность от требуемой рецептуры по проекту не более 5 %     | Изготовление кубиков для каждой партии раствора, контроль прочности                          |
| 8. Модуль деформации усиленного массива   | Определение в интервале глубин 0...3 м                         | Выполнение испытаний грунтов плоским штампом площадью 5 000 см <sup>2</sup>                  |
| 9. Осадка усиленного основания            | Выполнение геотехнического мониторинга                         | Наблюдения за вертикальными перемещениями здания                                             |

Проверка правильности заложенных в проектную документацию расчетных параметров усиленного основания осуществляется посредством выполнения мероприятий по приемочному контролю качества и контролю технического состояния усиленных оснований.

Приемочный контроль качества выполняется посредством испытаний грунтов статическими нагрузками с использованием плоских штампов площадью 5 000 см<sup>2</sup>. Общая методика проведения штамповых испытаний должна соответствовать требованиям нормативных документов. При этом штампы необходимо устанавливать так, чтобы в пятно штампа попадали одна или несколько набивных свай (в зависимости от шага расстановки свай). В результате штамповых испытаний выявляются модули деформации усиленных массивов, которые сравниваются с проектными значениями.

Общая оценка качества выполненных работ осуществляется только на основании анализа всех этапов контроля – входящего, операционного и приемочного. Если в ходе приемочного и операционного контролей не было выявлено отклонений от запроектированной технологии усиления и от параметров усиления (диаметры, шаг, глубина, рецептура раствора и т.п.), а также штамповые испытания подтвердили проектные значения модулей деформации, то на основании полученных материалов делается вывод о качестве реализованных работ.

Оценка технического состояния основания выполняется как при контроле качества, так и при геотехническом мониторинге. После реализации работ по усилению и при последующем возведении здания выполняются наблюдения за вертикальными перемещениями. Фактически определенные значения осадок сравниваются с расчетными.

#### **4.5 Экономическая эффективность метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах после его совершенствования**

Оценка экономической эффективности метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах ведется технико-экономическим сравнением его с альтернативными методами устройства фундаментов, в качестве которых рассмотрены варианты устройства свайных фундаментов с различными способами погружения свай, обеспечивающие сопоставимую осадку сооружения.

Расчеты выполнены в программном комплексе «Гранд-смета». В качестве сравниваемых показателей выбраны сметная стоимость строительных работ, в том числе прямые затраты (материалы, машины и механизмы, фонд оплаты труда), накладные расходы, сметная прибыль.

В качестве объекта, для которого выполняется расчет затрат материальных и трудовых ресурсов, рассмотрен 25-этажный жилой дом по ул. Фрунзе в Центральном районе города Новосибирска. Для этого объекта ранее приводился пример проектирования усиления. На площадке предусматривается строительство 25-этажного жилого дома на плитном фундаменте. Конструктивная схема здания – каркасная. Материал каркаса – монолитный железобетон. Пространственная жесткость сооружения обеспечивается за счет монолитных перекрытий и вертикальных диафрагм жесткости. Наружные и внутренние стены – кирпичные. Отделка наружных стен предусматривается навесными вентилируемыми фасадами. Толщина фундаментной плиты 1,5 м. Нормативное напряжение под подошвой фундаментной плиты 470 кПа. Отметка дна котлована 150,20 м. Нагрузка, передаваемая на основание в уровне подошвы фундаментной плиты, составляет 278 МН.

Инженерно-геологические условия площадки представлены в п. 4.2.2.

Ниже представлены четыре варианта устройства фундамента здания, для которых рассчитываются затраты трудовых и материальных ресурсов.

**Вариант 1.** Устройство плитного фундамента на усиленном основании.

Приняты следующие параметры усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах:

- глубина раскатки скважин: 13,7 м;
- мощность усиления: 12,7 м;
- шаг раскатки скважин: 0,8 м;
- тип рабочего органа: раскатывающий рабочий орган с неподвижными катками;
- общее количество скважин: 1 292 шт. / 17 700 м. п.;
- материал заполнения раскатанных скважин: грунтоцементный раствор с соотношением грунта и цемента 5:1 (супесь 1250 кг, цемент 250 кг, вода 250 л);
- расчетная осадка: 14,9 см.

**Вариант 2.** Устройство свайного фундамента с монолитным плитным ростверком. Сваи – забивные.

В случае устройства свайного фундамента с монолитным плитным ростверком, приняты следующие параметры свайных фундаментов:

- сваи призматического сечения 400 × 400 мм;
- тип свай: висячие, железобетонные, составные;
- длина свай: 20 м;
- общее количество свай: 261 шт.;
- способ погружения свай: забивка;
- расчетная осадка: 13,8 см.

**Вариант 3.** Устройство свайного фундамента с монолитным плитным ростверком. Сваи – задавливаемые.

В случае устройства свайного фундамента с монолитным плитным ростверком, приняты следующие параметры свайных фундаментов:

- сваи призматического сечения 400 × 400 мм;
- тип свай: висячие, железобетонные, составные;
- длина свай: 20 м;
- общее количество свай: 261 шт.;



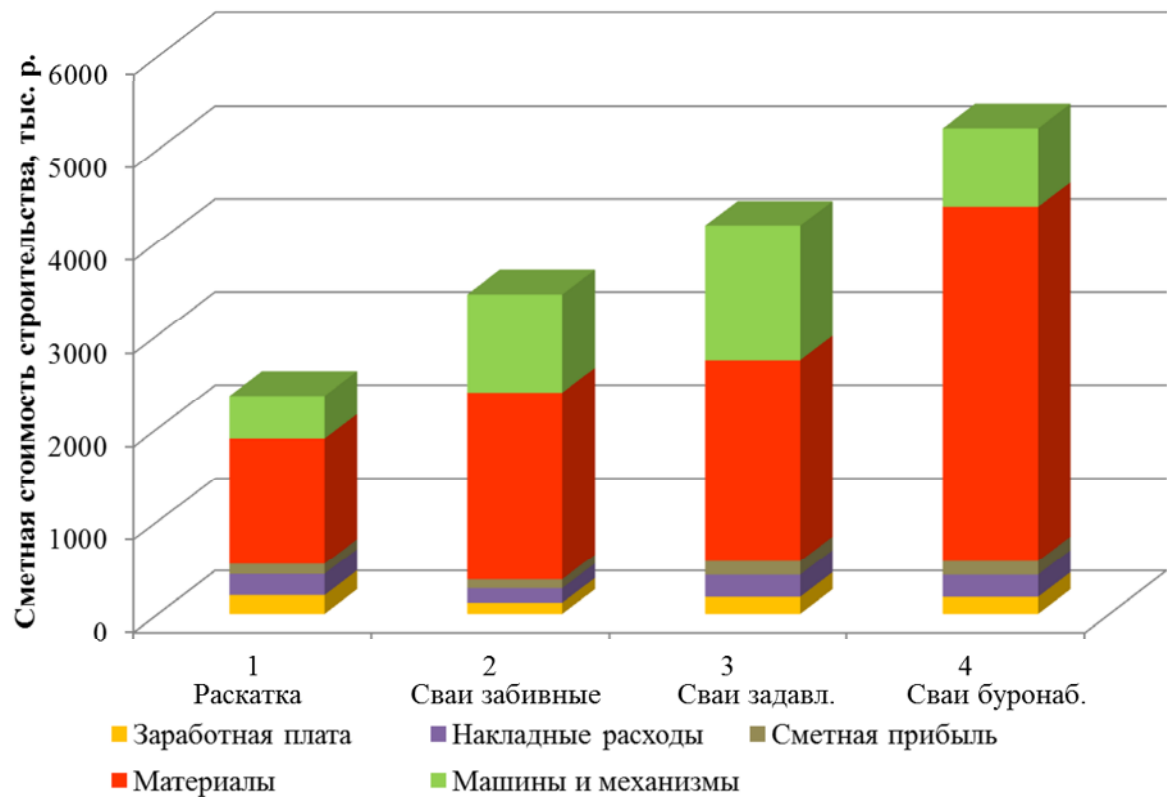


Рисунок 4.13 – Диаграмма элементов сметной стоимости  
четырёх вариантов устройства фундаментов

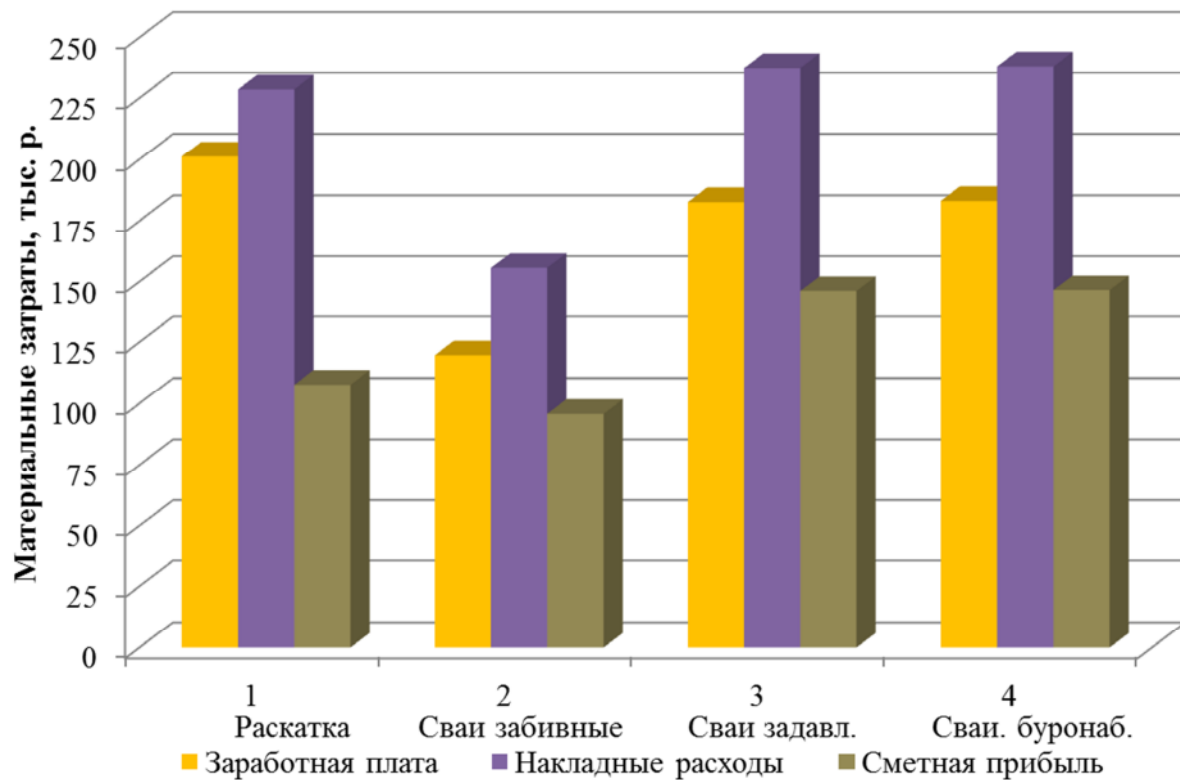


Рисунок 4.14 – Сравнение заработной платы накладных расходов  
и сметной прибыли четырёх вариантов устройства фундаментов

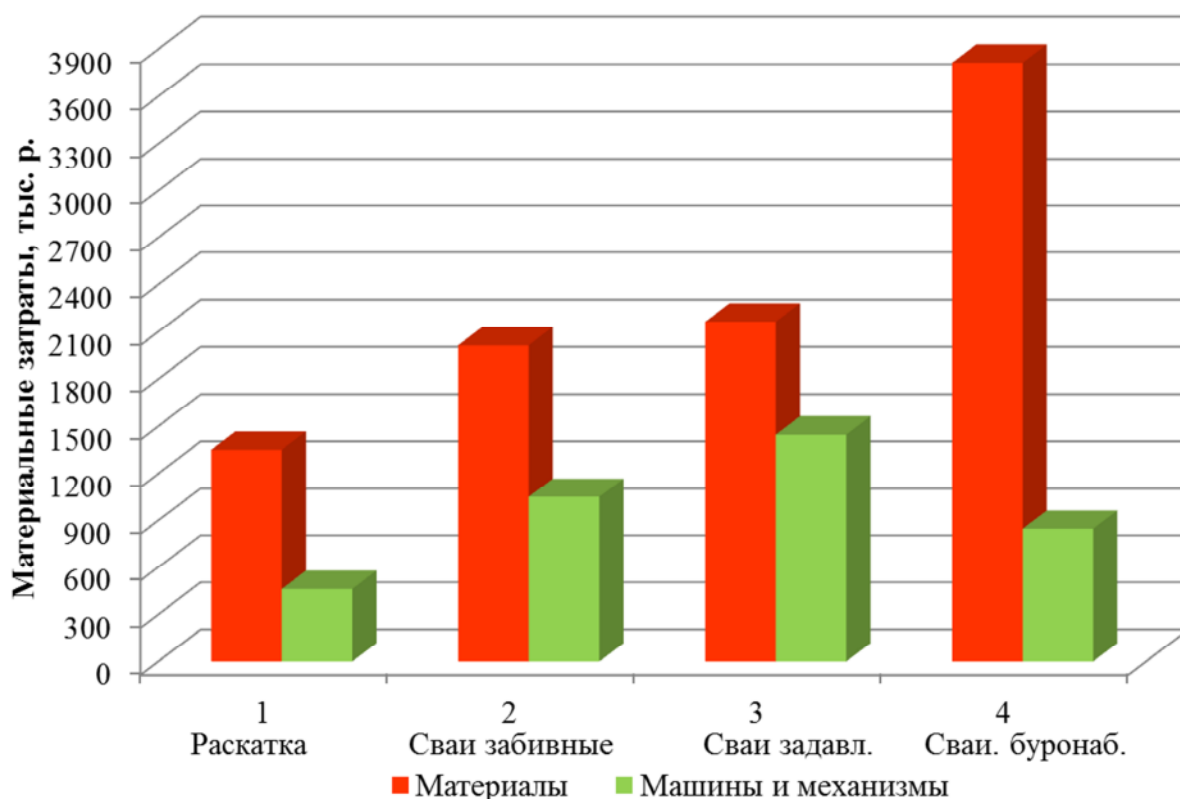


Рисунок 4.15 – Сравнение стоимости материалов, эксплуатации машин и механизмов четырех вариантов устройства фундаментов

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, его стоимость составляет 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 вариантов 3 и 4 в базовом уровне цен составляют 4 176 467,8 и 5 226 972,0 р. (без НДС) соответственно. 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 %.

Из диаграмм, приведенных на рисунках 4,13–4,15, становится понятно, что основным элементом, формирующим стоимость строительно-монтажных работ, является стоимость материалов. При применении метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах основным материалом является раствор для заполнения скважин, затраты на который в базовом уровне цен составляют 1 350 952,6 р. В то время как затраты на сваи и прочие расходные материалы в случае устройства свайных фундаментов достигают 2 013 378,2 и 2 163 797,9 р. для вариантов 2 и 3 соответственно. Наиболее высоким показателем стоимости материалов обладает вариант 4. В случае изготовления буронабивных свай затраты на бетон, арматуру, закладные детали и прочие материалы составляют 3 813 191,9 р. Экономия на материалах в случае применения метода усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах составляет 49 % по сравнению с этим видом затрат для варианта с забивными сваями, 60 % – для варианта с задавливаемыми сваями и 182 % – для варианта с буронабивными сваями.

Заработная плата, а также оплата работы машин и механизмов в меньшей степени влияют на конечную стоимость строительства, однако они отражают соотношение трудовых затрат для каждого из вариантов устройства фундаментов.

#### **Выводы по главе 4**

1. Усовершенствована методика проектирования усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах путем разработки алгоритма, включающего новый метод расчета увеличения деформационных характеристик усиленного 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.



2. Приведен пример проектирования усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах по разработанному алгоритму для 25-этажного жилого дома, расположенного в Центральном районе города Новосибирска.

3. Разработана полезная модель раскатчика скважин, позволяющего создавать набивные сваи в раскатанных скважинах в глинистых грунтах с показателем текучести  $I_L > 0,5$  за один рабочий цикл с меньшими трудовыми и энергетическими затратами и большей эффективностью, чем при использовании существующих аналогов. Данная модификация относится к грунтоуплотняющим рабочим органам с неподвижными катками. На разработанную полезную модель получен патент РФ 147223 «Раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин».

4. Разработаны рекомендации по контролю технического состояния основания при усилении грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах, заключающемуся во входном, операционном, приемочном контроле качества и геотехническом мониторинге.

5. 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.

6. Усовершенствованный метод устройства основания путем усиления грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах внедрен при проектировании и строительстве многоэтажных жилых домов в г. Новосибирске. Копии актов внедрения результатов исследования приведены в приложении 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

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 грунтоуплотняющим рабочим органам с неподвижными катками, кото-

рые, 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббасов, П. А. Влияние уплотнения забоя скважины на несущую способность буронабивных свай / П. А. Аббасов, Н. В. Лифар // Перспективы развития и опыт внедрения новых строит. материалов и конструкций на Дальнем Востоке. – Владивосток, 1981. – С. 13–14.
2. Абелев, М. Ю. Эффективность уплотнения насыпных песчаных грунтов гладким вибрационным катком / М. Ю. Абелев, И. В. Аверин, А. А. Устинов, Т. А. Вашаломидзе // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 1. – С. 160–163.
3. Ашпиз, Е. С. Пути усиления основной площадки земляного полотна / Е. С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 6. – С. 55–56.
4. Багдасаров, Ю. А. Армирование оснований фундаментов грунтовыми сваями в раскатанных скважинах / Ю. А. Багдасаров, А.Н. Саурин // Реконструкции исторических городов и геотехническое строительство. – СПб.; М., 2003. – Т. 2 – С. 29–33.
5. Багдасаров, Ю. А. Определение сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай по результатам статического зондирования / Ю. А. Багдасаров, А. З. Гистер // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 6. – С. 14–16.
6. Барвашов, В. А. Методы оценки несущей способности свай при действии вертикальной нагрузки / В. А. Барвашов, Н. Б. Экимян // Инж.-теорет. основы стр-ва : обзор / ВНИИИС. – М., 1986. – Вып. 2. – С. 68.
7. Барвашов, В. Ф. Сооружения из армированного грунта : обзор / В. Ф. Барвашов, Д. А. Воронель. – М. : ВПИИИС, 1984. – 68 с.
8. Бартоломей, А. А. Определение зон деформаций, возникающих в грунте от забивки свай / А. А. Бартоломей, Н. Е. Рукавишникова, Б. С. Юшков // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала. – Пермь, 1984. – С. 3–6.

9. Бартоломей, А. А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак, Б. С. Юшков. – М. : Стройиздат, 1994. – 384 с.
10. Бирюков, А. Л. Деформации в грунтах при погружении свай / А. Л. Бирюков. – М. : Стройиздат, 1967. – 247 с.
11. Бобылев, Л. М. Набивные сваи / Л. М. Бобылев // Строит. газ. – 1998. – № 42. – С. 8.
12. Богов, С. Г. Проблемы устройства свайных оснований в городской застройке в условиях слабых грунтов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2004. – № 8. – С. 119–128.
13. Богомолов, В. А. Метод высоконапорной инъекции связных грунтов при устройстве и усилении оснований и фундаментов : дис. ... канд. техн. наук / Богомолов В. А. – Екатеринбург, 2002. – 120 с.
14. Болондина, И. Л. Определение несущей способности свайных фундаментов с помощью номограмм / И. Л. Болондина, Б. С. Юшков // Повышение эффективности и качества устройства оснований и фундаментов в условиях Нечерноземной зоны РСФСР : Студ. науч. конф. : тез. докл. – Владимир, 1986. – С. 61–62.
15. Бордуковский, А. И. Раскатывающие и спиралевидные снаряды / А. И. Бордуковский, Я. А. Гойхман // Строительные и дорожные машины. – 1990. – № 8. – С. 5–6.
16. Вайгандт, А. А. Применение набивных свай в раскатанных скважинах / А. Вайгандт, Е. Торонцова // Организация и технология строительного производства : экспресс-информ. / Минпромстрой СССР, ЦБНТИ. – 1988. – Вып. 3. – С. 14–17.
17. Виноградов, В. В. Комплексная оценка работоспособности насыпей / В. В. Виноградов, В. В. Наумов // Мир транспорта. – 2012. – Т. 40. – № 2. – С. 56–61.
18. Голубков, В. Н. Несущая способность свайных оснований / В. Н. Голубков. – М. : Машгиз. – 1950. – 144 с.

19. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов: основные компоненты грунта и их взаимодействие / М. Н. Гольдштейн. – М. : Стройиздат, 1973. – 374 с.
20. Гончаров, Б. В. О сопротивлении грунта при вдавливании свай / Б. В. Гончаров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – № 6.
21. Грязнова, Е. М. Разработка методов расчета свайных фундаментов с учетом прочностных свойств грунтов и взаимодействия свай : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Грязнова Елена Михайловна. – М., 1989. – 16 с.
22. Далматов, Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин. – Л. : Стройиздат, 1975. – 240 с.
23. Джоунс, Д. К. Сооружения из армированного грунта / Д. К. Джоунс; пер. с англ. – М. : Стройиздат, 1989. – 280 с.
24. Дзагов, А. М. К расчету сопротивления грунта по боковой поверхности буронабивных свай / А. М. Дзагов // Современные проблемы фундаментостроения : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 2001 г. – Волгоград : Изд-во ВолгАСН, 2001. – С. 91–92.
25. Дидух, Б. И. Изменение напряженно-деформированного состояния грунта при внедрении свай / Б. И. Дидух, Ж. А. Ямонше // 18 Междунар. конф. «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов», посвящ. 90-летию со дня рождения акад. В. В. Новожилова, СПб, 16–20 мая 2000 г. – СПб. : Изд-во СПбГУ. 2000. – Т. 1. – С. 41.
26. Дубровский, В. А. Разработка конструкции набивных свай в пробитых скважинах в просадочных грунтах и методики расчета их несущей способности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Дубровский Владимир Александрович. – М., 1992. – 22 с.
27. Ермошкин, П. М. Способы проходки скважин под набивные сваи без выемки грунта / П. М. Ермошкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1976. – № 4. – С. 14–16.

28. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.
29. Камбефор, А. Инъекция грунтов. Принципы и методы / А. Камбефор. – М. : Энергия, 1971. – 336 с.
30. Караулов, А. М. Методика расчета вертикально армированного основания плитного фундамента / А. М. Караулов // Актуальные проблемы усиления оснований и фундаментов аварийных зданий и сооружений : материалы междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В. С. Глухова. – Пенза : ПГАСА, 2002. – С. 66–69.
31. Карлович, В. Основания и фундаменты / В. Карлович. – СПб., 1869. – 168 с.
32. Колос, А. Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного земляного полотна путем цементации грунтов основной площадки : дис. ... канд. техн. наук. / Колос Алексей Федорович. – СПб., 2000. – 163 с.
33. Королёв, К. В. Начальная несущая способность медленно уплотняющегося водонасыщенного основания ленточных фундаментов / К. В. Королёв // Из-во вузов. Строительство. – 2011. – № 4. – С. 38–93.
34. Кох, В. А. Создание навесного оборудования для устройства набивных свай в водонасыщенных грунтах методом уплотнения : дис. ... канд. техн. наук / Кох Виктор Александрович. – Новосибирск, 1990. – 151 с.
35. Крицкий, М. Я. Использование метода напорных инъекций для упрочнения грунтов в транспортном строительстве / М. Я. Крицкий, В. Ф. Скоркин, А. Л. Ланис // Тр. науч.-техн. конф. «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений в районах развития опасных геологических процессов», 7–9 окт. 2003 г. – М., 2003. – С. 46–47.
36. Крутов, В. И. Расчет армированных массивов / В. И. Крутов, И. К. Попсуенко // Труды института. – М. : Стройиздат, 1980. – Вып. 70.
37. Крутов, В. И. Фундаментостроение на просадочных грунтах / В. И. Крутов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – № 6. – С. 9–11.

38. Кузахметова, Э. К. Усовершенствование методологии прогноза осадки системы «сооружение–грунтовое основание» / Э. К. Кузахметова // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2011. – № 6. – С. 16–21.

39. Кузнецов, А. В. Буровые сваи как технологический фактор влияния на окружающую застройку / А. В. Кузнецов // Теоретические и практические проблемы геотехники : межвуз. темат. сб. тр. / М-во образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2005. – С. 39–44.

40. 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.

41. 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.

42. Ланис, А. Л. Использование метода напорной инъекции при усилении земляного полотна железных дорог : дис. ... канд. техн. наук / Ланис Алексей Леонидович. – Новосибирск, 2009. – 152 с.

43. 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.

44. Лис, В. Д. Рабочий орган для раскатки скважин / В. Д. Лис, Б. В. Колесников // Вест. СибАДИ. – Омск, 2004. – Вып. 2. – С. 10–17.

45. 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.



46. 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.

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

48. 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).

49. 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.

50. Луга, А. А. О повышении эффективности и экономичности свайных фундаментов / А. А. Луга. – М. : Трансп. стр-во, 1978. – № 8. – С. 12–14.

51. Мангушев, Р. А. К вопросу контроля качества изготовления и приёмки буроинъекционных свай / Р.А. Мангушев, А. Б. Пономарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014 №4: ПНИПУ. г. Пермь. – 2014. – С. 87–109.

52. Мангушев, Р. А. Современные свайные технологии: учебное пособие / Р. А. Мангушев, А. В. Ершов, А. И. Осокин; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 240 с.

53. Мангушев, Р. А., Карлов, В. Д. Сахаров, И. И. Механика грунтов: учебник для высшей школы по специальности ПГС / Р. А. Мангушев,

В. Д. Карлов, И. И. Сахаров. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 2009. – 264 с.

54. Мельников, Б. Н. Проблемы методологии исследования геотехногенных структур / Б. Н. Мельников, Ю. Б. Мельников ; УрО РАН, УГТУ. Екатеринбург, 1998. – 304 с.

55. Методические рекомендации по моделированию грунтового основания при исследовании напряженно-деформированного состояния сооружения / НИИСК. – Киев, 1981. – 45 с.

56. Методическое руководство по камеральной обработке результатов лабораторных и полевых исследований горных пород / Главэнергопроект, Всесоюз. ордена Ленина проектно-изыскательский и науч.-исследоват. ин-т «Гидропроект» им. С. Я. Жука. – М., 1964. – 258 с.

57. Механика грунтов, основания и фундаменты / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский, З. Г. Тер-Мартirosян, С. Н. Чернышев. – М. : АСВ, 2004. – 566 с.

58. Минаев, О.П. Виброметод для уплотнения грунтов для строительства в развитии российских специалистов / О. П. Минаев // VI Савиновские чтения к столетию Савинова Олега Александровича: избранные статьи профессора О. А. Савинова и ключевые доклады, представленные на VI Савиновские чтения. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 195 – 212.

59. Минаев, О.П. Метод уплотнения оснований и сооружений вибропогружателем для шпунта в гидроэнергетическом строительстве / О. П. Минаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – № 1. – С. 79–88.

60. Минаев, О.П. Разработка динамических методов глубинного уплотнения слабосвязных грунтов оснований / О. П. Минаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2013. – № 6. – С. 21–23.

61. Нарбут, Р. М. Работа свай в глинистых грунтах / Р. М. Нарбут. – Л. : Стройиздат, 1972. – 210 с.

62. Никиненко, М. И. Эффективность и особенности технологии устройства вибропрессованных свай / М. И. Никитенко // Современные геотех-

нологии 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. 1. – С. 137–141.

63. Новая техника и технология для устройства оснований фундаментов / Бобылев Л. М. и др. // Строит. и дорожные машины. – 2000. – № 1. – С. 34–35.

64. Нуждин, Л. В. Армирование грунтов основания вертикальными стержнями / Л. В. Нуждин, А. А. Кузнецов // Тр. междунар. семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – М., 2000. – С. 204–206.

65. Нуждин, Л. В. Исследование динамического напряженно-деформированного состояния жестких вертикальных армоэлементов / Л. В. Нуждин, Е. П. Скворцов // Вест. ТГАСУ. – Томск : ТГАСУ. – 2003. – № 1. – С. 225–230.

66. Нуждин, Л. В. Расчет вертикально армированного грунтового основания / Л. В. Нуждин, В. В. Теслицкий, М. Л. Нуждин, М. В. Юрьев // Сб. тр. науч.-техн. конф. – СПб., 2010. – С. 143–147.

67. Овчинников, С. А. Упрочнение земляного полотна железных дорог объемным многоэлементным армированием : дис. ... канд. техн. наук / Овчинников Станислав Александрович. – Новосибирск, 2014. – 162 с.

68. Осокин, А.И. Особенности устройства буронабивных свай в слабых грунтах / А.И. Осокин, А. В. Сбитнев, А. Б. Серебрякова, С. В. Татаринов // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 6. – С. 50–52.

69. Парамонов, В. Н. Математическое моделирование устройства свайных фундаментов в условиях плотной городской застройки / В. Н. Парамонов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1998. – № 4, 5. – С. 13–18.

70. Парамонов, В. Н. Моделирование процесса погружения свай методом конечных элементов / Парамонов В. Н. // Тр. VI Междунар. конф. по проблемам свайного фундаментостроения. – М., 1998. – Т. 2 : Результаты экспери-

ментальных исследований взаимодействия свайных фундаментов с грунтом, численное моделирование экспериментов. – С. 189–193.

71. 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.

72. Перменов, А. Н. Исследование и создание грунтоуплотняющего оборудования для стесненных условий строительства : дис. ... канд. техн. наук / Перменов Анатолий Николаевич. – Саратов, 1977. – 185 с.

73. Пневмопробойники / Гурков К. С., Клиماشко В. В., Костылев А. Д. и др. – Новосибирск : Наука, 1990. – С. 215.

74. Пономарев, А. Б. К вопросу о влиянии фактора времени на несущую способность свай / А. Б. Пономарев, А. В. Захаров, М. А. Безгоднов // 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 ЛИ-СИ) и 290-летию рос. науки / СПбГАСУ. – СПб., 2014. – Ч. 2. С. 44–51.

75. Пономаренко, Ю. Е. Классификация и сравнительный анализ оборудования для проходки скважин уплотнением / Ю. Е. Пономаренко, В. Д. Лис // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1989. – Вып. 1. – С. 106–109.

76. Пономаренко, Ю. Е. Создание и выбор основных параметров навесного оборудования для пробивки конических скважин под набивные сваи : дис. ... канд. техн. наук / Пономаренко Юрий Евгеньевич. – М., 1985. – 178 с.

77. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01–83) / НИИОСП им. Герсевича. – М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.

78. Проектирование и устройство свайных фундаментов : учеб. пособие для строит. вузов / С. В. Беленький, Л. Г. Дикман, И. И. Косоруков и др. – М. : Высш. шк., 1983. – 328 с.

79. Разработка СТУ на проектирование земляного полотна, укрепительных и защитных сооружений с применением армогрунтовых и сетчатых

конструкций в сложных инженерно-геологических условиях / В. В. Виноградов, Е. С. Ашпиз, Ю. К. Фроловский, А. А. Зайцев // VII Науч.-техн. конф. с международ. участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна и искусственных сооружений». – М., 2010. – С. 9–15.

80. Рекомендации по проектированию и устройству набивных свай в раскатанных скважинах / ГУП НИИОСП им. Н. М. Герсевича. – М., 2000. – 42 с.

81. Рекомендации по проектированию и устройству фундаментов из буронабивных свай и опор-колонн / НИИ строит. пр-ва. – Киев : Будивельник, 1985. – 80 с.

82. Рекомендации по струйной технологии сооружения противофильтрационных завес, фундаментов, подготовки оснований и разработки мерзлых грунтов / Гидроспецпроект, ВНИИОСП. – Москва, 1989. – 53 с.

83. Саурин, А. Н. Набивные сваи в раскатанных скважинах – перспективное основание для устройства фундаментов в сложных грунтовых и строительных условиях / А. Н. Саурин // Тр. междунар. семинара по механике грунтов, фундаментам и трансп. соор. – М., 2000. – С. 236–239.

84. Саурин, А. Н. Результаты штамповых испытаний оснований, преобразованных шлаковыми набивными сваями в раскатанных скважинах (НРС) / А. Н. Саурин, Ю. В. Редькина, Е. А. Кузнецова // Межвузовский тематический сборник трудов. – СПб., 2008. – С. 71–75.

85. Саурин, А. Н. Сваи в раскатанных скважинах / А. Н. Саурин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 12. – С. 42–43.

86. Саурин, А. Н. Технологические особенности устройства набивных свай в раскатанных скважинах применительно к различным инженерно-геологическим условиям площадок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Саурин Анатолий Никифорович. – М., 1998. – 27 с.

87. Свирщевский, В. К. Проходка скважин в грунте способом раскатки / В. К. Свирщевский. – Новосибирск : Наука, 1982. – 121 с.
88. Силкин, А. М. Оценка уплотнения тела грунтовой плотины методом вероятностного прогноза / В. Я. Жарницкий, А. М. Силкин // Природообустройство. – 2012. – № 3. – С. 56–60.
89. Совершенствование технологии устройства свай усиления / Улицкий В. М., Королев Б. А., Рошин В. М., Бровин С. В. // Фундаменты реставрируемых и реконструируемых зданий и памятников архитектуры. – Л. : ЛДНТП, 1991. – С. 37–43.
90. Сотников, С. Н. Строительство и реконструкция фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.28.02 : защищена 29.02.88 : утв. 20.07.88 / Сотников Сергей Николаевич. – Л., 1988. – 440 с.
91. Татаринов, С. В. Особенности устройства буронабивных свай при подаче бетона под давлением / С. В. Татаринов, А. И. Осокин, А. В. Сбитнев // Пром. и гражд. стр-во. – М. : Изд-во ПГС, 2006. С. 65–66.
92. Тозик, Л. В. Взаимодействие свай с основанием, нагруженной осевой статической нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Тозик Леонид Васильевич. – СПб., 2002. – 22.
93. Трубников, Ю. А. Исследование основных закономерностей и разработка эффективных средств бурения скважин в мягких горных породах : дис. ... канд. техн. наук / Трубников Ю. А. – Днепропетровск, 1973. – 198 с.
94. Улицкий, В. М. Гид по геотехнике. Путеводитель по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин, К. Г. Шашкин. – СПб: ПИ Геореконструкция. – 2012. – 288 с.
95. Уплотнение просадочных грунтов станками ударно-канатного бурения БС–1 / Ю. М. Абелев, В. Г. Галицкий, В. И. Крутов и др. – М. : Стройиздат, 1966. – 23 с.
96. Ухов, С. Б. Расчет сооружений и оснований методом конечных элементов / С. Б. Ухов. – М., 1973. – 118 с.

97. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. – М. : Недра, 1987. – 223 с.
98. Федоров, А. Т. Свайные основания и сооружения / А. Т. Федоров. – М. ; Л., 1932. – 494 с.
99. Федоров, В. И. Вопросы моделирования несущей способности свай в глинистых грунтах / В. И. Федоров // Перспективы развития и опыт внедрения эффективных строительных материалов и конструкций на Дальнем Востоке : крат. тез. науч.-техн. конф., 26–28 янв. 1982 г. / Дальневост. НИИ по строит., Приморское краевое правление НТО «Стройиндустрия». – Владивосток, 1982. – С. 49–51.
100. Федоров, В. И. Моделирование несущей способности свай в глинистых грунтах / В. И. Федоров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – Вып. 3. – С. 14–15.
101. Федоровский, В. Г. О расширении цилиндрической скважины в упругопластической среде / В. Г. Федоровский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1972. – № 2. – С. 28–30.
102. Феклин, В. И. Продавливание скважин под набивные сваи спиралевидными снарядами / В. И. Феклин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – № 5. – С. 16–19.
103. Хартман, К. Планирование экспериментов в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М. : Мир, 1977. – 120 с.
104. Харченко, В. В. Оборудование РС250А для проходки скважин раскатыванием / В. В. Харченко, Ю. Е. Пономаренко, В. Д. Лис // Строительные и дорожные машины. – 1988. – № 6. – С. 21–22.
105. Цой, В. И. Исследование рабочего процесса уширения скважин непрерывного действия для устройства буронабивных свай : дис. ... канд. техн. наук / Цой В. И. – Л., 1980. – 164 с.
106. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1983. – 288 с.

107. Яковлева, Т. Г. Моделирование прочности и устойчивости земляного полотна / Т. Г. Яковлева, Д. И. Иванов. – М. : Транспорт, 1980. – 255 с.
108. Ямонше, Ж. А. С. Взаимодействие свай с окружающим грунтом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.00.20 / Ямонше Жюль Анше Саньон. – М., 2001. – 19 с.
109. Тер-Мартirosян, З. Г. Механика грунтов : сер. библиотека научных разработок МГСУ / Монография. – М.: Издательство МГСУ. – 2009. – 551 с.
110. Benz, T. On the practical use of advanced constitutive laws in finite element foundation analysis / T. Benz, R. Schwab, P. A. Vermeer // Proc. Fondsup International1. Symposium. – 2003. – P. 8.
111. Brandl, H. Dynamic stresses in soils caused by falling weights / H. Brandl, W. Sadgorski // Proceeding of the 1-th International Conferens on Soil Mechanics and Foundation Energineering, Tokyo, 1977. – Vol. 2. – P. 187–194.
112. De Vos, M. Innovative design methods in geotechnical engineering / M. De Vos, V. Whenham // Belgian Building Research. Inst. – 2006. – 90 p.
113. Dembick, E. Dynamis Consolidation of Mud Soils by Means of Blasting Charges / E. Dembick, N. Kisielova, H. Nowakwski, Z. Nowakwski // Inter. Conf on Compaction. P., 1980, – Vol. 1. – P. 295–299.
114. Desai, C. S. Numerical Methods in Geotechnical Engineering / C. S. Desai, J. T. Ctiristian (Eds.). N. Y. : McGraw-Hill, 1977. – 784 p.
115. Drucker, D. C. Soil mechanics and work hardening theories of plasticity / D. C. Drucker, R. E. Gibson, D. J. Henkel // Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. – 1957. № 2864. – Vol. 122. – P. 338–346.
116. Esu, F. Numerical design. Analysis for piles in sands / F. Esu, M. Ottaviani // Journal of the geotechnical engineering division, ASCE. – 1975. – P. 693–695.
117. Fernando, V. Use of cavity expansion theory to predict ground displacement during pipe bursting / V. Fernando, Ian D. Moore // Pipelines — Beneath Our Feet: Challenges and Solutions : proceedings of Pipeline Division Specialty Conference. – 2002. – 11 p.



118. Grabe, J. Simulation of ground improvement using deep vibration compaction / J. Grabe, E. Heins, T. Hamann // Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21–23 2015, IIT Madras, Chennai, India. – P. 281–284.
119. Gupta, B. N. A note on the resonant frequency of pile foundations / B. N. Gupta // Civil Eng. And Public Works Rev. – 1969. – Vol. 64, № 750. – P. 61.
120. Hamidi, B. Predicting Menard Modulus using Dynamic Compaction Induced Subsidence / B. Hamidi, S. Varaksin, H. Nikras // International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE), Perth, 2011, 7–11 November. – 2011. – P. 221–226.
121. Horizontal stiffness and damping of single piles / R. Dobry, E. Vicente, M. J. O'Rourke, J. M. Roeset // J.Geotechn. Eng., ASCE. – 1983. – Vol. 108, № GT3. – P. 439–459.
122. Houlsby, G. T. Analysis of the unloading of a pressuremeter in sand // G. T. Houlsby, B. G. Clarke, C. P. Wroth // Proc. 2nd Int. Symp. on the Pressuremeter and its Marine Applications. – Texas, 1986. – P. 245–262.
123. Kelvin, W. T. A mathematical theory of elasticity / W. T. Kelvin. – L. : Trans. Roy. Soc., 1856.
124. Leemon, C. R. Single piles and pile groups under lateral loading / C. R. Leemon, W. F. Van Impe // Rotterdam, 2001. – 463 p.
125. Levacher, D. R. On the behaviour of opened tubular driven piles in sand / D. R. Levacher // Proc. 6th Budapest conf. Soil mechanic and foundation. – Budapest, 1984. – P. 381–388.
126. Marsden, J. E. Mathematical foundations of elasticity / J. E. Marsden, T. J. R. Hughes – Dover, 1994. – 556 p.
127. Nishida, V. Determination of stresses around compaction pile / V. Nishida // Proc. of 5int conf. Soil Mech. and foudnation. – P., 1961. – Eng. V.II. – P. 123–127.

128. O'Riordan, N. J. The mobilization of shaft adhesion down a bored, cast-in-situ pile in the Woolwich and Reading beds / N. J. O'Riordan // *Ground Engineering*. – 1982. – P. 17–26.
129. Randolph, M. F. The effect of pile type on design parameters driven piles / M. F. Randolph, I. S. Steinfeld, C. P. Wroth // *Proc. of the 7th conf. on soil Mechanics and Foundation*. – Eng. : Brighton, 1979. – Vol. 2. – P. 107–114.
130. Reese, L. C. Design and construction of drilled shafts / L. C. Reese // *Geotechnical engineering division*. – 1978. – Vol. 104. – P. 91–116.
131. Sagaseta, C. Quasi-static undrained expansion of a cylindrical cavity in clay in the presence of shaft friction and anisotropic initial stresses: personal communication / C. Sagaseta. – 1984. – 9 p.
132. Smith, I. Plugging of pipe piles / I. Smith, P. To, S.M. Willson // *Num. Meth. Offshore piling. : 3rd Int. Conf.* – P., 1986. – P. 53–73.
133. Tanaka, T. Elasto-plastic dynamic response analysis for rockfill dam with impounded water / T. Tanaka, Y. Mohri, K. Ueno // *Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGSC Chennai, January 21–23 2015, IIT Madras, Chennai, India*. – P. 145–148.
134. Vesic, A. S. Expansion of cavities in infinite soil mass / A. S. Vesic // *J. Soil Mech. Fdn Engng Div., Am. Soc. Civ. Engrs.* – 1972. – № 98. – P. 265–290.



| 1                                            | 2                                                                         | 3                                                                                                                                                                                                                      | 4                | 5              | 6             | 7       | 8          | 9        | 10                    | 11        | 12 | 13      |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|---------------|---------|------------|----------|-----------------------|-----------|----|---------|
|                                              | 1. 100401                                                                 | Комплекты оборудования шнекового бурения на базе автомобиля глубина бурения до 50 м, грузоподъемность мачты 3,7 т, (маш.час)                                                                                           | 31,93<br>3467,92 | 87,6           | 87,6<br>13,5  |         | 303789,79  |          | 303789,79<br>46816,92 |           |    |         |
|                                              | 2. 400001                                                                 | Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т, (маш.час)                                                                                                                                                                | 0,73<br>79,29    | 87,17          | 87,17         |         | 6911,71    |          | 6911,71               |           |    |         |
|                                              | 3. 109-0148                                                               | Шнек: диаметром 135 мм, (шт.)                                                                                                                                                                                          | 11,67<br>1267    | 597            |               | 597     | 756399     |          |                       | 756399    |    |         |
| 3                                            | <b>ФССЦ-109-0415</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Раскатчик скважин (шт.)                                                                                                                                                                                                | 1                | 4780,83        |               | 4780,83 | 4780,83    |          |                       | 4780,83   |    |         |
| 4                                            | <b>ФЕР05-01-063-01</b><br><i>Приказ Минстроя РФ от 30.01.14 №31/пр</i>    | Заполнение раствором пустот между стенкой скважины и телом сваи (1 м3 конструктивного объема пустот)<br><i>НР (14027,38 руб.): 130% от ФОТ (10790,29 руб.)</i><br><i>СП (8632,23 руб.): 80% от ФОТ (10790,29 руб.)</i> | 505,4            | 58,45<br>16,92 | 41,53<br>4,43 |         | 29540,63   | 8551,37  | 20989,26<br>2238,92   |           | 2  | 1010,8  |
|                                              |                                                                           | Затраты труда рабочих (ср 2,9), (чел.час)                                                                                                                                                                              | 2<br>1010,8      | 8,46           |               |         | 8551,37    | 8551,37  |                       |           |    |         |
|                                              |                                                                           | Затраты труда машинистов, (чел.час)                                                                                                                                                                                    | 0,44<br>222,38   |                |               |         |            |          |                       |           |    |         |
|                                              | 1. 101401                                                                 | Насосы для нагнетания воды, содержащей твердые частицы, подача 45 м3/ч, напор до 55 м, (маш.час)                                                                                                                       | 0,38<br>192,05   | 9,73           | 9,73          |         | 1868,65    |          | 1868,65               |           |    |         |
|                                              | 2. 110501                                                                 | Глиномешалки, 4 м3, (маш.час)                                                                                                                                                                                          | 0,44<br>222,38   | 26,5           | 26,5<br>10,06 |         | 5893,07    |          | 5893,07<br>2237,14    |           |    |         |
|                                              | 3. 270301                                                                 | Насосы грязевые, подача 23,4-65,3 м3/ч, давление нагнетания 15,7-5,88 МПа (160-60 кгс/см2), (маш.час)                                                                                                                  | 0,8<br>404,32    | 32,71          | 32,71         |         | 13225,31   |          | 13225,31              |           |    |         |
| 6                                            | <b>ФССЦ-101-1305</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Портландцемент общестроительного назначения бездобавочный, марки: 400 (т)                                                                                                                                              | 126,3            | 412            |               | 412     | 52035,6    |          |                       | 52035,6   |    |         |
| 7                                            | <b>ФССЦ-407-0002</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Глина (т)                                                                                                                                                                                                              | 168,5            | 41,45          |               | 41,45   | 6984,33    |          |                       | 6984,33   |    |         |
| 8                                            | <b>ФССЦ-408-0141</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Песок природный для строительных: растворов средний (м3)                                                                                                                                                               | 168,5            | 59,99          |               | 59,99   | 10108,32   |          |                       | 10108,32  |    |         |
| Итого прямые затраты по смете в ценах 2001г. |                                                                           |                                                                                                                                                                                                                        |                  |                |               |         | 1236659,3  | 74375,55 | 331689,89<br>49056,35 | 830593,86 |    | 7853,23 |
| Накладные расходы                            |                                                                           |                                                                                                                                                                                                                        |                  |                |               |         | 140185,98  |          |                       |           |    |         |
| Сметная прибыль                              |                                                                           |                                                                                                                                                                                                                        |                  |                |               |         | 66079,45   |          |                       |           |    |         |
| <b>Итого по смете:</b>                       |                                                                           |                                                                                                                                                                                                                        |                  |                |               |         |            |          |                       |           |    |         |
| Скважины                                     |                                                                           |                                                                                                                                                                                                                        |                  |                |               |         | 1321596,24 |          |                       |           |    | 6842,43 |
| Свайные работы                               |                                                                           |                                                                                                                                                                                                                        |                  |                |               |         | 121328,49  |          |                       |           |    | 1010,8  |

| 1                          | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8                 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13             |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|-------------------|---|----|----|----|----------------|
| Итого                      |   |   |   |   |   |   | 1442924,73        |   |    |    |    | 7853,23        |
| Всего с учетом " СМР=6,93" |   |   |   |   |   |   | 9999468,38        |   |    |    |    | 7853,23        |
| Справочно, в ценах 2001г.: |   |   |   |   |   |   |                   |   |    |    |    |                |
| Материалы                  |   |   |   |   |   |   | 830593,86         |   |    |    |    |                |
| Машины и механизмы         |   |   |   |   |   |   | 331689,89         |   |    |    |    |                |
| ФОТ                        |   |   |   |   |   |   | 123431,9          |   |    |    |    |                |
| Накладные расходы          |   |   |   |   |   |   | 140185,98         |   |    |    |    |                |
| Сметная прибыль            |   |   |   |   |   |   | 66079,45          |   |    |    |    |                |
| <b>ВСЕГО по смете</b>      |   |   |   |   |   |   | <b>9999468,38</b> |   |    |    |    | <b>7853,23</b> |



| 1 | 2            | 3                                                                                                                                                                                                             | 4                | 5       | 6               | 7       | 8         | 9 | 10                    | 11      | 12 | 13 |
|---|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------|-----------------|---------|-----------|---|-----------------------|---------|----|----|
|   | 1. 021243    | Краны на гусеничном ходу при работе на других видах строительства до 16 т, (маш.час)                                                                                                                          | 0,02<br>16,7     | 96,89   | 96,89<br>13,5   |         | 1618,06   |   | 1618,06<br>225,45     |         |    |    |
|   | 2. 050501    | Станции компрессорные давлением 245 кПа (2,5 ат), производительность 40 м3/мин, (маш.час)                                                                                                                     | 1,11<br>927,07   | 151,21  | 151,21<br>25,1  |         | 140182,25 |   | 140182,25<br>23269,46 |         |    |    |
|   | 3. 140311    | Копры универсальные с пневматическим молотом: 8 т, (маш.час)                                                                                                                                                  | 1,11<br>927,07   | 385,97  | 385,97<br>15,42 |         | 357821,21 |   | 357821,21<br>14295,42 |         |    |    |
|   | 4. 150704    | Трубоукладчики для труб диаметром: 1200 мм грузоподъемностью 50 т, (маш.час)                                                                                                                                  | 0,28<br>233,86   | 729,08  | 729,08<br>16,44 |         | 170502,65 |   | 170502,65<br>3844,66  |         |    |    |
|   | 5. 400101    | Тягачи седельные, грузоподъемность 12 т, (маш.час)                                                                                                                                                            | 0,03<br>25,06    | 127,82  | 127,82          |         | 3203,17   |   | 3203,17               |         |    |    |
|   | 6. 400111    | Полуприцепы общего назначения, грузоподъемность 12 т, (маш.час)                                                                                                                                               | 0,03<br>25,06    | 12      | 12              |         | 300,72    |   | 300,72                |         |    |    |
|   | 7. 101-0388  | Краски масляные земляные марки: МА-0115 мумия, сурик железный, (т)                                                                                                                                            | 2Е-5<br>0,0167   | 15119   |                 | 15119   | 252,49    |   |                       | 252,49  |    |    |
|   | 8. 101-1805  | Гвозди строительные, (т)                                                                                                                                                                                      | 8Е-5<br>0,0668   | 11978   |                 | 11978   | 800,13    |   |                       | 800,13  |    |    |
|   | 9. 102-0089  | Бруски обрезные хвойных пород длиной: 2-3,75 м, шириной 75-150 мм, толщиной 100-125 мм, III сорта, (м3)                                                                                                       | 0,004<br>3,341   | 1132,64 |                 | 1132,64 | 3784,15   |   |                       | 3784,15 |    |    |
|   | 10. 102-8009 | Доски дубовые II сорта, (м3)                                                                                                                                                                                  | 0,0032<br>2,673  | 1410    |                 | 1410    | 3768,93   |   |                       | 3768,93 |    |    |
|   | 11. 105-0001 | Болты путевые с гайками для скрепления рельсов диаметром 22 мм, (т)                                                                                                                                           | 0,001<br>0,8352  | 9743,43 |                 | 9743,43 | 8137,71   |   |                       | 8137,71 |    |    |
|   | 12. 105-0029 | Костыли для железных дорог широкой колеи сечением, 16x16 мм, длиной: 165 мм, (т)                                                                                                                              | 3Е-5<br>0,0251   | 5470,15 |                 | 5470,15 | 137,3     |   |                       | 137,3   |    |    |
|   | 13. 105-0032 | Накладки двухголовые для рельсов: стыковые Р-75, Р-65, Р-50, Р-43, (т)                                                                                                                                        | 1Е-5<br>0,0084   | 4911,8  |                 | 4911,8  | 41,26     |   |                       | 41,26   |    |    |
|   | 14. 105-0037 | Подкладки для железных дорог широкой колеи костыльного скрепления для рельсов типа: Р-43, (т)                                                                                                                 | 9Е-5<br>0,0752   | 3558,47 |                 | 3558,47 | 267,6     |   |                       | 267,6   |    |    |
|   | 15. 105-0210 | Рельсы железнодорожные марки стали НБ-61 тип: Р-43, (м)                                                                                                                                                       | 0,02<br>16,7     | 217,91  |                 | 217,91  | 3639,1    |   |                       | 3639,1  |    |    |
|   | 16. 201-0774 | Конструктивные элементы вспомогательного назначения: массой не более 50 кг с преобладанием толстолистовой стали собираемые из двух и более деталей, с отверстиями и без отверстий, соединяемые на сварке, (т) | 0,0005<br>0,4176 | 11255   |                 | 11255   | 4700,09   |   |                       | 4700,09 |    |    |





| 1                                            | 2           | 3                                                                                                                                          | 4              | 5     | 6           | 7     | 8                 | 9        | 10                     | 11         | 12 | 13             |
|----------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------------|-------|-------------------|----------|------------------------|------------|----|----------------|
|                                              | 1. 040504   | Аппарат для газовой сварки и резки,<br>(маш.час)                                                                                           | 0,07<br>18,27  | 1,2   | 1,2         |       | 21,92             |          | 21,92                  |            |    |                |
|                                              | 2. 050101   | Компрессоры передвижные с двигателем<br>внутреннего сгорания давлением: до 686<br>кПа (7 ат), производительность до 5 м3/мин,<br>(маш.час) | 0,75<br>195,75 | 90    | 90<br>10,06 |       | 17617,5           |          | 17617,5<br>1969,25     |            |    |                |
|                                              | 3. 330804   | Молотки при работе от передвижных<br>компрессорных станций: отбойные<br>пневматические, (маш.час)                                          | 1,5<br>391,5   | 1,53  | 1,53        |       | 599               |          | 599                    |            |    |                |
|                                              | 4. 101-0324 | Кислород технический: газообразный, (м3)                                                                                                   | 0,063<br>16,44 | 6,22  |             | 6,22  | 102,26            |          |                        | 102,26     |    |                |
|                                              | 5. 101-1602 | Ацетилен газообразный технический, (м3)                                                                                                    | 0,01<br>2,61   | 38,51 |             | 38,51 | 100,51            |          |                        | 100,51     |    |                |
| Итого прямые затраты по смете в ценах 2001г. |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 3184186,57        | 43615,19 | 1127193,23<br>76073,15 | 2013378,15 |    | 4622,83        |
| Накладные расходы                            |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 155594,84         |          |                        |            |    |                |
| Сметная прибыль                              |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 95750,67          |          |                        |            |    |                |
| <b>Итого по смете:</b>                       |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       |                   |          |                        |            |    |                |
| Свайные работы                               |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 3435532,08        |          |                        |            |    | 4622,83        |
| Итого                                        |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 3435532,08        |          |                        |            |    | 4622,83        |
| Всего с учетом " СМР=6,93"                   |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 23808237,3        |          |                        |            |    | 4622,83        |
| Справочно, в ценах 2001г.:                   |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       |                   |          |                        |            |    |                |
| Материалы                                    |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 2013378,15        |          |                        |            |    |                |
| Машины и механизмы                           |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 1127193,23        |          |                        |            |    |                |
| ФОТ                                          |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 119688,34         |          |                        |            |    |                |
| Накладные расходы                            |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 155594,84         |          |                        |            |    |                |
| Сметная прибыль                              |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | 95750,67          |          |                        |            |    |                |
| <b>ВСЕГО по смете</b>                        |             |                                                                                                                                            |                |       |             |       | <b>23808237,3</b> |          |                        |            |    | <b>4622,83</b> |

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ № 3  
(локальная смета)

на Вариант 3. Задавливание свай  
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:  
Сметная стоимость строительных работ \_\_\_\_\_ 28942,921 тыс. руб.  
Средства на оплату труда \_\_\_\_\_ 182,660 тыс. руб.  
Сметная трудоемкость \_\_\_\_\_ 5934,62 чел.час  
Трудозатраты механизаторов \_\_\_\_\_ 9291,08 чел.час  
Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на \_\_\_\_\_

| №<br>пп   | Шифр и номер<br>позиции норматива                           | Наименование работ и затрат, единица<br>измерения                                                                                                                                                                            | Количество<br>на ед./<br>всего | Стоимость единицы, руб. |                            |                | Общая стоимость, руб. |                 |                            |                | Затраты труда<br>рабочих, чел.-ч, не<br>занятых<br>обслуживанием<br>машин |         |
|-----------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------|---------|
|           |                                                             |                                                                                                                                                                                                                              |                                | всего                   | эксплуата-<br>ции<br>машин | мате-<br>риалы | Всего                 | оплаты<br>труда | эксплуата-<br>ции<br>машин | мате-<br>риалы | на<br>единицу                                                             | всего   |
|           |                                                             |                                                                                                                                                                                                                              |                                | оплаты<br>труда         | в т.ч.<br>оплаты<br>труда  |                |                       |                 | в т.ч.<br>оплаты<br>труда  |                |                                                                           |         |
| 1         | 2                                                           | 3                                                                                                                                                                                                                            | 4                              | 5                       | 6                          | 7              | 8                     | 9               | 10                         | 11             | 12                                                                        | 13      |
| Раздел 1. |                                                             |                                                                                                                                                                                                                              |                                |                         |                            |                |                       |                 |                            |                |                                                                           |         |
| 1         | ФЕР05-01-027-02<br>Приказ Минстроя РФ от<br>30.01.14 №31/пр | Погружение одиночных составных<br>железобетонных свай длиной: до 20 м в<br>грунты группы 2<br>(1 м3 составных свай)<br>НР (229573,08 руб.): 130% от ФОТ (176594,68 руб.)<br>СП (141275,74 руб.): 80% от ФОТ (176594,68 руб.) | 835,2<br>0,4*0,4*20*261        | 2078,11<br>64,32        | 1859,47<br>147,12          | 154,32         | 1735637,47            | 53720,06        | 1553029,34<br>122874,62    | 128888,07      | 6,59                                                                      | 5503,97 |
|           |                                                             | Затраты труда рабочих (ср 4,1), (чел.час)                                                                                                                                                                                    | 6,59<br>5503,97                | 9,76                    |                            |                | 53718,75              | 53718,75        |                            |                |                                                                           |         |

| 1 | 2                                                                         | 3                                                                                                                                                                                                             | 4                               | 5      | 6               | 7      | 8         | 9 | 10                    | 11        | 12 | 13 |
|---|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|-----------------|--------|-----------|---|-----------------------|-----------|----|----|
|   |                                                                           | Затраты труда машинистов, (чел.час)                                                                                                                                                                           | 10,89<br>9095,33                |        |                 |        |           |   |                       |           |    |    |
|   | 1. 021141                                                                 | Краны на автомобильном ходу при работе на других видах строительства 10 т, (маш.час)                                                                                                                          | 1,8<br>1503,36                  | 111,99 | 111,99<br>13,5  |        | 168361,29 |   | 168361,29<br>20295,36 |           |    |    |
|   | 2. 040202                                                                 | Агрегаты сварочные передвижные с номинальным сварочным током 250-400 А с дизельным двигателем, (маш.час)                                                                                                      | 1,86<br>1553,47                 | 14     | 14              |        | 21748,58  |   | 21748,58              |           |    |    |
|   | 3. 050501                                                                 | Станции компрессорные давлением 245 кПа (2,5 ат), производительность 40 м3/мин, (маш.час)                                                                                                                     | 3,03<br>2530,66                 | 151,21 | 151,21<br>25,1  |        | 382661,1  |   | 382661,1<br>63519,57  |           |    |    |
|   | 4. 140311                                                                 | Копры универсальные с пневматическим молотом: 8 т, (маш.час)                                                                                                                                                  | 3,03<br>2530,66                 | 385,97 | 385,97<br>15,42 |        | 976758,84 |   | 976758,84<br>39022,78 |           |    |    |
|   | 5. 400101                                                                 | Тягачи седельные, грузоподъемность 12 т, (маш.час)                                                                                                                                                            | 0,03<br>25,06                   | 127,82 | 127,82          |        | 3203,17   |   | 3203,17               |           |    |    |
|   | 6. 400111                                                                 | Полуприцепы общего назначения, грузоподъемность 12 т, (маш.час)                                                                                                                                               | 0,03<br>25,06                   | 12     | 12              |        | 300,72    |   | 300,72                |           |    |    |
|   | 7. 101-0072                                                               | Битумы нефтяные строительные изоляционные БНИ-IV-3, БНИ-IV, БНИ-V, (т)                                                                                                                                        | 6Е-5<br>0,0501                  | 1412,5 |                 | 1412,5 | 70,77     |   |                       | 70,77     |    |    |
|   | 8. 101-0388                                                               | Краски масляные земляные марки: МА-0115 мумия, сурик железный, (т)                                                                                                                                            | 2Е-5<br>0,0167                  | 15119  |                 | 15119  | 252,49    |   |                       | 252,49    |    |    |
|   | 9. 101-1522                                                               | Электроды диаметром: 5 мм Э42А, (т)                                                                                                                                                                           | 0,0008<br>0,6682                | 10362  |                 | 10362  | 6923,89   |   |                       | 6923,89   |    |    |
|   | 10. 101-1805                                                              | Гвозди строительные, (т)                                                                                                                                                                                      | 6Е-5<br>0,0501                  | 11978  |                 | 11978  | 600,1     |   |                       | 600,1     |    |    |
|   | 11. 102-8009                                                              | Доски дубовые II сорта, (м3)                                                                                                                                                                                  | 0,0054<br>4,51                  | 1410   |                 | 1410   | 6359,1    |   |                       | 6359,1    |    |    |
|   | 12. 201-0774                                                              | Конструктивные элементы вспомогательного назначения: массой не более 50 кг с преобладанием толстолистовой стали собираемые из двух и более деталей, с отверстиями и без отверстий, соединяемые на сварке, (т) | 0,0122<br>10,19                 | 11255  |                 | 11255  | 114688,45 |   |                       | 114688,45 |    |    |
| 2 | <b>ФССЦ-201-0768</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Отдельные конструктивные элементы зданий и сооружений с преобладанием: толстолистовой стали, средняя масса сборочной единицы до 0,5 т (т)                                                                     | 6,01344<br>0,4*0,4*261*144/1000 | 8128   |                 | 8128   | 48877,24  |   |                       | 48877,24  |    |    |

| 1                                            | 2                                                                             | 3                                                                                                                                                                                                          | 4                                  | 5              | 6             | 7         | 8          | 9        | 10                      | 11         | 12   | 13      |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|---------------|-----------|------------|----------|-------------------------|------------|------|---------|
| 3                                            | <b>ФССЦ-101-3227</b><br><i>Приказ Минстроя России<br/>от 12.11.14 №703/пр</i> | Мастика Вектор-1214 антикоррозийная (т)                                                                                                                                                                    | 0,006264<br>0,4*0,4*261*0,150/1000 | 109997,55      |               | 109997,55 | 689,02     |          |                         | 689,02     |      |         |
| 4                                            | <b>ФССЦ-403-1073</b><br><i>Приказ Минстроя России<br/>от 12.11.14 №703/пр</i> | Сваи железобетонные квадратного сечения сплошные из бетона: В20 (М250), с расходом арматуры от 180,1 до 190 кг на м3 бетона (в плотном теле) (ГОСТ 19804-91) (м3)                                          | 851,9                              | 2330,25        |               | 2330,25   | 1985139,98 |          |                         | 1985139,98 |      |         |
| 5                                            | <b>ФЕР05-01-010-02</b><br><i>Приказ Минстроя РФ от<br/>30.01.14 №31/пр</i>    | Вырубка бетона из арматурного каркаса железобетонных: свай площадью сечения свыше 0,1 м2 (1 свая)<br><i>НР (7885,33 руб.): 130% от ФОТ (6065,64 руб.)<br/>СП (4852,51 руб.): 80% от ФОТ (6065,64 руб.)</i> | 261                                | 86,35<br>15,69 | 69,88<br>7,55 | 0,78      | 22537,35   | 4095,09  | 18238,68<br>1970,55     | 203,58     | 1,65 | 430,65  |
|                                              |                                                                               | Затраты труда рабочих (ср 3,9), (чел.час)                                                                                                                                                                  | 1,65<br>430,65                     | 9,51           |               |           | 4095,48    | 4095,48  |                         |            |      |         |
|                                              |                                                                               | Затраты труда машинистов, (чел.час)                                                                                                                                                                        | 0,75<br>195,75                     |                |               |           |            |          |                         |            |      |         |
|                                              | 1. 040504                                                                     | Аппарат для газовой сварки и резки, (маш.час)                                                                                                                                                              | 0,07<br>18,27                      | 1,2            | 1,2           |           | 21,92      |          | 21,92                   |            |      |         |
|                                              | 2. 050101                                                                     | Компрессоры передвижные с двигателем внутреннего сгорания давлением: до 686 кПа (7 ат), производительность до 5 м3/мин, (маш.час)                                                                          | 0,75<br>195,75                     | 90             | 90<br>10,06   |           | 17617,5    |          | 17617,5<br>1969,25      |            |      |         |
|                                              | 3. 330804                                                                     | Молотки при работе от передвижных компрессорных станций: отбойные пневматические, (маш.час)                                                                                                                | 1,5<br>391,5                       | 1,53           | 1,53          |           | 599        |          | 599                     |            |      |         |
|                                              | 4. 101-0324                                                                   | Кислород технический: газообразный, (м3)                                                                                                                                                                   | 0,063<br>16,44                     | 6,22           |               | 6,22      | 102,26     |          |                         | 102,26     |      |         |
|                                              | 5. 101-1602                                                                   | Ацетилен газообразный технический, (м3)                                                                                                                                                                    | 0,01<br>2,61                       | 38,51          |               | 38,51     | 100,51     |          |                         | 100,51     |      |         |
| Итого прямые затраты по смете в ценах 2001г. |                                                                               |                                                                                                                                                                                                            |                                    |                |               |           | 3792881,06 | 57815,15 | 1571268,02<br>124845,17 | 2163797,89 |      | 5934,62 |
| Накладные расходы                            |                                                                               |                                                                                                                                                                                                            |                                    |                |               |           | 237458,42  |          |                         |            |      |         |
| Сметная прибыль                              |                                                                               |                                                                                                                                                                                                            |                                    |                |               |           | 146128,26  |          |                         |            |      |         |
| <b>Итого по смете:</b>                       |                                                                               |                                                                                                                                                                                                            |                                    |                |               |           |            |          |                         |            |      |         |
| Свайные работы                               |                                                                               |                                                                                                                                                                                                            |                                    |                |               |           | 4176467,74 |          |                         |            |      | 5934,62 |
| Итого                                        |                                                                               |                                                                                                                                                                                                            |                                    |                |               |           | 4176467,74 |          |                         |            |      | 5934,62 |
| Всего с учетом " СМР=6,93"                   |                                                                               |                                                                                                                                                                                                            |                                    |                |               |           | 28942921,4 |          |                         |            |      | 5934,62 |

| 1                          | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8                 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13             |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|-------------------|---|----|----|----|----------------|
| Справочно, в ценах 2001г.: |   |   |   |   |   |   |                   |   |    |    |    |                |
| Материалы                  |   |   |   |   |   |   | 2163797,89        |   |    |    |    |                |
| Машины и механизмы         |   |   |   |   |   |   | 1571268,02        |   |    |    |    |                |
| ФОТ                        |   |   |   |   |   |   | 182660,32         |   |    |    |    |                |
| Накладные расходы          |   |   |   |   |   |   | 237458,42         |   |    |    |    |                |
| Сметная прибыль            |   |   |   |   |   |   | 146128,26         |   |    |    |    |                |
| <b>ВСЕГО по смете</b>      |   |   |   |   |   |   | <b>28942921,4</b> |   |    |    |    | <b>5934,62</b> |



| 1                                            | 2                                                                         | 3                                                                                                                                                | 4                              | 5        | 6              | 7        | 8          | 9        | 10                    | 11         | 12 | 13      |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|----------------|----------|------------|----------|-----------------------|------------|----|---------|
|                                              | 1. 021244                                                                 | Краны на гусеничном ходу при работе на других видах строительства 25 т, (маш.час)                                                                | 1,02<br>1906,3                 | 120,04   | 120,04<br>13,5 |          | 228832,25  |          | 228832,25<br>25735,05 |            |    |         |
|                                              | 2. 040202                                                                 | Агрегаты сварочные передвижные с номинальным сварочным током 250-400 А с дизельным двигателем, (маш.час)                                         | 0,21<br>392,47                 | 14       | 14             |          | 5494,58    |          | 5494,58               |            |    |         |
|                                              | 3. 100305                                                                 | Установки и станки ударно-канатного бурения: на гусеничном ходу, глубина бурения до 300 м, грузоподъемность 5 т, (маш.час)                       | 1,79<br>3345,37                | 147,4    | 147,4<br>13,5  |          | 493107,54  |          | 493107,54<br>45162,50 |            |    |         |
|                                              | 4. 111100                                                                 | Вибратор глубинный, (маш.час)                                                                                                                    | 0,87<br>1625,96                | 1,9      | 1,9            |          | 3089,32    |          | 3089,32               |            |    |         |
|                                              | 5. 140411                                                                 | Вибропогружатели: низкочастотные для погружения свай-оболочек, (маш.час)                                                                         | 0,98<br>1831,54                | 106,28   | 106,28<br>11,6 |          | 194656,07  |          | 194656,07<br>21245,86 |            |    |         |
|                                              | 6. 400001                                                                 | Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т, (маш.час)                                                                                          | 0,08<br>149,51                 | 87,17    | 87,17          |          | 13032,79   |          | 13032,79              |            |    |         |
|                                              | 7. 101-1513                                                               | Электроды диаметром: 4 мм Э42, (т)                                                                                                               | 0,0001<br>0,1869               | 10315,01 |                | 10315,01 | 1927,88    |          |                       | 1927,88    |    |         |
|                                              | 8. 103-0576                                                               | Трубы бесшовные обсадные из стали группы Д и Б с короткой треугольной резьбой, наружным диаметром: 377 мм, толщина стенки 12 мм, (м)             | 0,04<br>74,76                  | 1001,3   |                | 1001,3   | 74857,19   |          |                       | 74857,19   |    |         |
|                                              | 9. 201-0798                                                               | Кондуктор инвентарный металлический, (шт.)                                                                                                       | 0,0017<br>3,177                | 346      |                | 346      | 1099,24    |          |                       | 1099,24    |    |         |
|                                              | 10. 411-0001                                                              | Вода, (м3)                                                                                                                                       | 3<br>5607                      | 2,44     |                | 2,44     | 13681,08   |          |                       | 13681,08   |    |         |
| 2                                            | <b>ФССЦ-204-0007</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Горячекатаная арматурная сталь гладкая класса А-I, диаметром: 20-22 мм (т)                                                                       | 332,568<br>2,98*30*30*124/1000 | 5520     |                | 5520     | 1835775,36 |          |                       | 1835775,36 |    |         |
| 3                                            | <b>ФССЦ-401-0011</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Бетон тяжелый, класс: В30 (М400) (м3)                                                                                                            | 1896,9538<br>1868,92*1,015     | 790      |                | 790      | 1498593,5  |          |                       | 1498593,5  |    |         |
| 4                                            | <b>ФССЦ-103-8006</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Трубы стальные электросварные прямошовные группы А и Б с сопротивлением по разрыву 38 кгс/мм2, наружный диаметр: 820мм, толщина стенки 14 мм (т) | 55,056<br>14,8*30*124/1000     | 6788,13  |                | 6788,13  | 373727,29  |          |                       | 373727,29  |    |         |
| 5                                            | <b>ФССЦ-109-0001</b><br><i>Приказ Минстроя России от 12.11.14 №703/пр</i> | Буры ложковые типа : БИ119-97А.000 (шт.)                                                                                                         | 20                             | 676,87   |                | 676,87   | 13537,4    |          |                       | 13537,4    |    |         |
| Итого прямые затраты по смете в ценах 2001г. |                                                                           |                                                                                                                                                  |                                |          |                |          | 4842387,5  | 90979,03 | 938216,53<br>92156,45 | 3813191,94 |    | 9456,74 |

| 1                          | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8               | 9 | 10 | 11 | 12 | 13             |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------|---|----|----|----|----------------|
| Накладные расходы          |   |   |   |   |   |   | 238076,12       |   |    |    |    |                |
| Сметная прибыль            |   |   |   |   |   |   | 146508,38       |   |    |    |    |                |
| <b>Итоги по смете:</b>     |   |   |   |   |   |   |                 |   |    |    |    |                |
| Свайные работы             |   |   |   |   |   |   | 5226972         |   |    |    |    | 9456,74        |
| Итого                      |   |   |   |   |   |   | 5226972         |   |    |    |    | 9456,74        |
| Всего с учетом " СМР=6,93" |   |   |   |   |   |   | 36222916        |   |    |    |    | 9456,74        |
| Справочно, в ценах 2001г.: |   |   |   |   |   |   |                 |   |    |    |    |                |
| Материалы                  |   |   |   |   |   |   | 3813191,94      |   |    |    |    |                |
| Машины и механизмы         |   |   |   |   |   |   | 938216,53       |   |    |    |    |                |
| ФОТ                        |   |   |   |   |   |   | 183135,48       |   |    |    |    |                |
| Накладные расходы          |   |   |   |   |   |   | 238076,12       |   |    |    |    |                |
| Сметная прибыль            |   |   |   |   |   |   | 146508,38       |   |    |    |    |                |
| <b>ВСЕГО по смете</b>      |   |   |   |   |   |   | <b>36222916</b> |   |    |    |    | <b>9456,74</b> |



**ООО «КМС»***Общество с ограниченной ответственностью «Краснообск. Монтажспецстрой»*

Адрес: НСО, Новосибирский район, р.п. Краснообск, ГНУ СибНИИ кормов, к. 151 (28)

Телефон 208-20-41, 208-21-22

E-mail: [krasnoobskkms@rambler.ru](mailto:krasnoobskkms@rambler.ru)

Р/сч 40702810715120001336 К/сч 30101810100000000821 в ОАО «МДМ Банк» г. Новосибирск

ИНН 5433120579 БИК 045004821 ОКОНХ 61110 КПО 41369504 КПП 543301001

**А К Т**

об использовании результатов диссертационного исследования  
аспиранта ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей  
сообщения» Ломова Петра Олеговича

Настоящим Актом подтверждается, что Общество с ограниченной ответственностью «КМС» (КРАСНООБСК.МОНТАЖСПЕЦСТРОЙ), при строительстве зданий в городе Новосибирске, использует результаты исследований аспиранта ФГБОУ ВО Сибирского государственного университета путей сообщения Ломова Петра Олеговича, а именно модель раскатчика для изготовления вертикальных и наклонных скважин (Патент РФ № 147223).

Используемый раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин позволил получить экономический эффект при усилении грунтов основания фундаментов зданий за счет снижения материальных и трудовых затрат.

Директор ООО «КМС»



В.П. Плахотников



Общество с ограниченной ответственностью

**«Проспект»**

630559, Новосибирская область, р. п. Кольцово, д.34.

тел/факс (383) 306-13-00, отдел кадров (383) 336-55-99, отдел снабжения (383) 336-02-57

<http://www.sf-prospekt.ru>

e-mail: [info@sf-prospekt.ru](mailto:info@sf-prospekt.ru)

ИНН 5433126637 / КПП 543301001

ОГРН 1025404349398 / ОКПО 4660610

## А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования  
аспиранта ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей  
сообщения» Ломова Петра Олеговича

Настоящим Актом подтверждается, что Общество с ограниченной ответственностью «Проспект», при строительстве зданий в микрорайоне IV, р.п. Кольцово, НСО, использует результаты исследований аспиранта ФГБОУ ВО Сибирского государственного университета путей сообщения Ломова Петра Олеговича, а именно модель раскатчика для изготовления вертикальных и наклонных скважин (Патент РФ № 147223).

Используемый раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин позволил получить экономический эффект при усилении грунтов основания фундаментов зданий за счет снижения материальных и трудовых затрат.

Директор ООО «Проспект»



Н.В. Корчагин

## ООО «СИНТЕЗ»

630088, г. Новосибирск, ул. Петухова, 35, ИНН 5403175556, КПП 540301001,  
р/с 40702810100030013203, в филиале Западно-Сибирский ОАО «Собинбанк»  
г. Новосибирск, к/с 30101810400000000744 БИК 045003744  
ОГРН 1055403027492 ОКПО 76682686 ОКВЭД 45.25, 45.25.6, 24.3, 24.6

### А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования  
аспиранта ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет путей  
сообщения» Ломова Петра Олеговича.

Настоящим Актом подтверждается, что Общество с ограниченной ответственностью «Синтез», при выполнении строительно-монтажных работ по усилению грунтов основания на объектах города Новосибирска, использует результаты исследований аспиранта ФГБОУ ВПО Сибирского государственного университета путей сообщения Ломова Петра Олеговича, а именно модель раскатчика для изготовления вертикальных и наклонных скважин.

Используемый раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин позволил получить экономический эффект за счет снижения материальных и трудовых затрат.

Директор ООО «Синтез»



М.Г. Кавардаков

т/ф (383) 227-93-50

E-mail: sintez-nsk@yandex.ru