

На правах рукописи



НУЖДИН Матвей Леонидович

**УСИЛЕНИЕ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЙ
МЕТОДОМ ПАКЕТНОГО ВЫСОКОНАПОРНОГО ИНЪЕЦИРОВАНИЯ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2021 г.

Работа выполнена на кафедре «Строительное производство и геотехника» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пономарев Андрей Будимирович

Официальные оппоненты: **Полищук Анатолий Иванович**
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», заведующий кафедрой оснований и фундаментов, профессор.

Пронозин Яков Александрович
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», кафедра строительного производства, профессор.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Защита состоится « ____ » _____ 2021 г. в ____ часов (по местному времени) на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.187.02 при АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»; ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21. E-mail: ivanovatv@vniig.ru, тел. +7 (812) 493-93-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и на сайте общества: www.vniig.rushydro.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., ст.нуч.сотр.

Т.В. Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время усиление грунтового основания часто выполняется высоконапорным инъецированием – нагнетанием раствора под давлением, превышающим структурную прочность грунта. Высоконапорное инъецирование позволяет успешно решать разные геотехнические задачи, однако ряд недостатков, в первую очередь, неопределенность формы и размеров инъекционных тел, создаваемых в грунтовой массе, может поставить под сомнение качество выполняемых работ. Традиционно, на практике, надежность обеспечивается увеличением нагнетаемого объема, что в большинстве случаев, существенно снижает эффективность и ведет к заметному удорожанию.

Таким образом, совершенствование метода усиления грунтового основания высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора является актуальной темой и имеет важное практическое значение.

Степень разработанности темы. Изучением метода высоконапорного инъецирования и усиления грунтового основания армированием занимались: В.С. Бадеев, В.Ф. Бай, В.А. Барвашов, В.А. Богомолов, Г.Г. Болдырев, В.И. Бронин, О.В. Герасимов, Э.М. Добров, П.В. Дыба, В.А. Ермолаев, О.Ю. Ещенко, М.Н. Ибрагимов, Б.Н. Исаев, А.М. Караулов, Т.П. Кашарина, А.М. Кидакоев, И.В. Королева, А.Н. Краев, А.П. Кремнев, М.Я. Крицкий, В.И. Крутов, С.А. Кудрявцев, М.В. Кузнецов, А.Л. Ланис, В.В. Лушников, Р.А. Мангушев, Б.Н. Мельников, И.Т. Мирсаяпов, В.Р. Мустакимов, А.Л. Невзоров, Н.С. Никифорова, Л.В. Нуждин, В.И. Осипов, В.Г. Офрихтер, В.Н. Парамонов, А.А. Петухов, А.И. Полищук, А.Б. Пономарев, И.К. Попсуенко, Я.А. Прозин, М.А. Самохвалов, И.И. Сахаров, Г.М. Скибин, А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Л.М. Тимофеева, В.М. Улицкий, Р.А. Усманов, С.Д. Филимонов, И.И. Хусаинов, Р.А. Шарафутдинов, А.Г. Шашкин, О.А. Шулятьев, Н. Cambefort, Н. Brandl, A. Paul, H. Vidal и др.

Цель работы – создание эффективного метода усиления грунтового основания зданий твердыми инъекционными телами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора.

Задачи исследований.

1. Выполнить анализ существующих методов усиления грунтового основания и фундаментов нагнетанием цементно-песчаного раствора.

2. Установить форму твердых инъекционных тел, полученных пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора в грунтовой массив на основании результатов лабораторных и натурных экспериментов.

3. На основе экспериментальных и численных исследований выявить закономерности изменения деформационного состояния основания при разных схемах усиления фундаментов мелкозаложенного, плитных и свайных фундаментов твердыми инъекционными телами.

4. Разработать метод усиления грунтового основания фундаментов мелкозаложенного, плитных фундаментов, свайных фундаментов, в том числе под машины с динамическими нагрузками, твердыми инъекционными телами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием.

Объект исследований – грунтовое основание, усиленное твердыми инъекционными телами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора.

Предмет исследований – форма и размеры инъекционных тел, создаваемых пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора, основные закономерности поведения грунтового основания фундаментов при разных схемах расположения твердых инъекционных тел.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Экспериментально определена форма твердых инъекционных тел, полученных при нагнетании цементно-песчаного раствора пакетным высоконапорным инъецированием при разном расположении инъекторов в различных грунтовых условиях.

2. На основе экспериментальных и численных исследований выявлены закономерности формирования деформационного состояния грунтового основания фундаментов мелкого заложения, плитных и свайных фундаментов при разных схемах расположения твердых инъекционных тел, сформированных пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора.

3. Разработан метод усиления грунтового основания фундаментов мелкого заложения, плитных фундаментов, свайных фундаментов, в том числе под машины с динамическими нагрузками, твердыми инъекционными телами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора.

Теоретическая значимость работы состоит:

1. В определении закономерностей формирования твердых инъекционных тел в основании, сложенном глинистыми грунтами, при нагнетании цементно-песчаного раствора пакетным высоконапорным инъецированием.

2. В выявлении зависимостей осадок грунтового основания фундаментов мелкого заложения, плитных и свайных фундаментов от схемы расположения твердых инъекционных тел.

Практическая значимость заключается: в разработке метода усиления грунтового основания фундаментов мелкого заложения, плитных фундаментов, свайных фундаментов, в том числе под машины с динамическими нагрузками твердыми инъекционными телами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием; в реализации предложенного метода на объектах строительства.

Методология и методы исследований. Лабораторные и натурные эксперименты были выполнены с соблюдением условий простого подобия. Численные исследования осуществлялись в современных сертифицированных программных комплексах. Для аналитического и графического анализа результатов применялись стандартные компьютерные программы. Усиление грунтового основания фундаментов на практике выполнялось с использованием апробированного, поверенного оборудования и средств измерений.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач работы; в разработке и экспериментальном обосновании метода пакетного высоконапорного инъецирования; выполнении, обработке и анализе результатов лабораторных экс-

периментов и численных исследований по оценке влияния схем усиления грунтового основания твердыми инъекционными телами на формирование деформационного состояния; в разработке метода усиления грунтового основания фундаментов мелкого заложения, плитных фундаментов, свайных фундаментов, в том числе под машины с динамическими нагрузками твердыми инъекционными телами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты лабораторных и натурных экспериментов по созданию инъекционных тел установленной формы пакетным высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора.

3. Результаты лабораторных экспериментов и численных исследований по выявлению закономерностей изменения деформационного состояния основания при различных схемах усиления фундаментов мелкого заложения, свайных и плитных фундаментов твердыми инъекционными телами.

3. Метод усиления фундаментов мелкого заложения, плитных фундаментов, свайных фундаментов, в том числе под машины с динамическими нагрузками, твердыми инъекционными телами, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием.

Достоверность работы обеспечивается результатами большого числа экспериментов, выполненных в лабораторных и натурных условиях с использованием апробированных и поверенных приборов и оборудования; результатами численных исследований в современных сертифицированных программных комплексах; результатами мониторинга за техническим состоянием зданий и сооружений в процессе и после выполнения работ по усилению грунтового основания фундаментов пакетным высоконапорным инъецированием.

Результаты исследований реализованы на ряде строительных объектов в Сибири и на Дальнем Востоке, наиболее значимые из которых: жилые дома №№ 9, 9/1, 9/2 и 9/3 по ул. Кузьмы Минина, 37/3 и 39 по ул. Волховской, 7 и 9 по ул. Вилюйской, 13 в микрорайоне «Закаменский», 2/2 по ул. Залесского, 40 по ул. Октябрьской, секции №№ 1.1 и 1.2 жилого дома № 242/1 по ул. Д. Ковальчук, №№ 1, 2 и 3 жилого дома № 116/1 по ул. Кропоткина, корпуса 1А и 1Б жилого дома № 17 по ул. Громова, здание клуба НВИ войск национальной гвардии РФ в г. Новосибирске, жилой дом № 39 и здание № 35 детского сада «Аленький цветочек» по ул. Набережная Оруджева в Надыме Ямало-Ненецкого автономного округа. Внедрение подтверждено 13 актами с экономическим эффектом более 30 млн. рублей.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на 30 международных конференциях, наиболее значимые из которых: «Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство» (Санкт-Петербург, 2003); «Механика грунтов, фундаментостроение и транспортное строительство» (Пермь, 2004); «Геотехнические проблемы мегаполисов» (Москва, 2010); 14th ARC «Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Solutions» (Hong Kong, 2011); «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (Новочеркасск, 2012); IVth CAGS «Geo-Engineering for Construction and Conservation of Cultural Heritage and Historical Sites. Challenges and Solutions» (Sa-

marqand, 2012); «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (Новочеркасск, 2015); XVI ECSM «Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development» (Edinburgh, 2015); 15th ARC «Soil Mechanics and Geotechnical Engineering» (Fukuoka, 2015); 8th AYGEC «Challenges and Innovations in Geotechnics» (Астана, 2016); «Геотехника Беларуси: наука и практика» (Минск, 2018); 4th ICGH «Geotechnics for Sustainable Development» (Hanoi, 2019); «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» (Пермь, 2020); «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Новосибирск, 2020).

Публикации. Результаты диссертационной работы представлены в 36 научных статьях, из них 3 размещены в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 5 включены в международную базу цитирования Scopus. Получено 7 патентов на изобретения РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, списка литературы из 167 наименований и 3 приложений. Она изложена на 189 страницах основного текста, содержит 85 рисунков и 27 таблиц.

Область исследования соответствует пунктам 5, 7 и 11 паспорта научной специальности ВАК 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** выполнен обзор методов усиления грунтового основания нагнетанием подвижных растворов. Они могут классифицироваться по составу инъекционной смеси (цементно-песчаный, силикат натрия, щелочь, синтетические смолы и пр.) и давлению нагнетания (пропитка, высоконапорное инъецирование, Jet Grouting). При высоконапорном инъецировании цементно-песчаный раствор под давлением нарушает сплошность массива и заполняет образовавшиеся полости. После твердения, сформированные инъекционные тела армируют основание и уплотняют окружающий грунт. Однако, образование разрывов в грунте (их количество, размеры и направление) часто носит случайный характер, что затрудняет возможность проектного обоснования. Предлагаемые технологические приемы нагнетания и конструкции инъекторов в разной степени позволяют влиять на результат, однако, они, как правило, являются трудоемкими и не экономичными.

В результате анализа существующих методов, была обоснована необходимость выявления факторов, способных создать условия для разрыва инъецируемого массива в нужном направлении, определения оптимальных схем расположения инъекционных тел и разработки эффективного метода усиления грунтового основания высоконапорным инъецированием цементно-песчаного раствора.

В **главе 2** представлен метод пакетного высоконапорного инъецирования, позволяющий создавать в грунтовом массиве инъекционные тела определенной формы (рис. 1). Сущность метода заключается в одновременном нагнетании цементно-песчаного раствора через группу инъекторов. При расположении инъекторов вдоль прямой линии, с образованием в грунте под их нижними концами ли-

нейных полостей глубиной $10d \dots 20d$ (где d – диаметр иньектора), в основании формируется плоское вертикальное тело. Одновременная подача раствора через иньекторы, расположенные в вершинах равностороннего треугольника, с образованием точечных полостей глубиной $1d \dots 3d$, приводит к созданию горизонтального тела дисковидной формы. В обоих случаях расстояния между иньекторами не должны превышать $20d$.

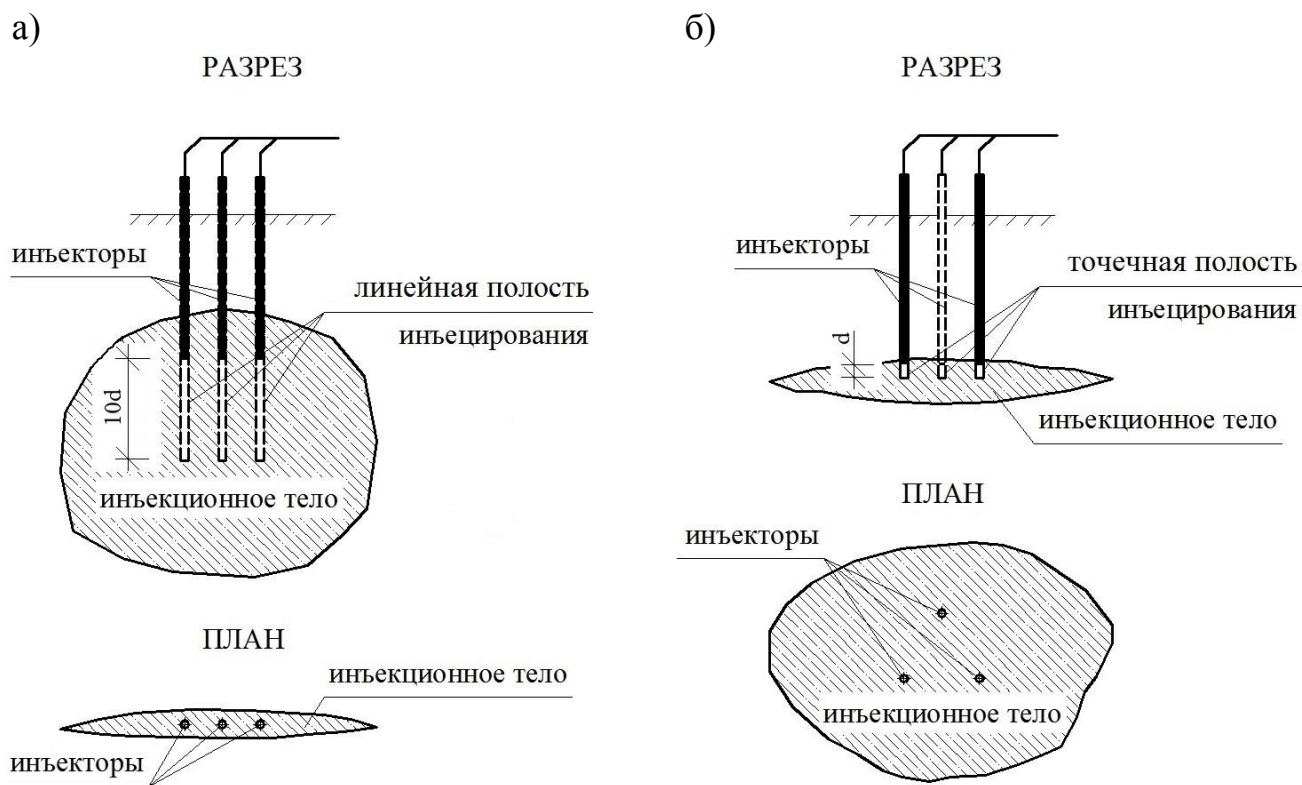


Рисунок 1. Схема формирования вертикального (а) и горизонтального (б) иньекционного тела пакетным высоконапорным иньекцированием.

Экспериментальная проверка в лабораторных условиях была выполнена на монолитах грунта ненарушенного сложения отобранных из супеси малой степени водонасыщения – пылевой и песчанистой, а также из суглинка пылеватого средней степени водонасыщения тугопластичного. Иньекторы – трубки длиной 90 мм, диаметром 2,0 мм, закреплялись в специальных устройствах, обеспечивающих одновременную подачу смеси. В качестве раствора использовалась жидкая эпоксидная смола с отвердителем. Момент разрыва грунтового массива отчетливо фиксировался по резкому падению величины давления, достигающего при иньекции $0,6 \dots 0,9$ МПа.

Было выполнено 6 лабораторных экспериментов, каждый повторялся 3 раза.

При расположении трех иньекторов вдоль прямой линии были сформированы плоские тела толщиной $1 \dots 4$ мм, длиной $120 \dots 125$ мм и высотой $110 \dots 150$ мм. Нагнетание через 3 иньектора, расположенных в вершинах равностороннего треугольника привело к образованию горизонтальных тел дискообразной формы, выходящих к боковой поверхности образцов. Диаметр дисков был около 120 мм, толщина колебалась от 2 мм до 15 мм в центре (рис. 2).

а)



б)



Рисунок 2. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) инъекционное тело, сформированное в ходе лабораторных экспериментов.

Натурные эксперименты выполнялись в суглинке пылеватом средней степени водонасыщения тугопластичном. Для создания вертикальных тел инъекторы размещались вдоль прямой линии на расстоянии 600 мм ($\sim 10d$) друг от друга. Линейные полости инъекционирования формировалась их поднятием на 750 мм ($\sim 13d$) после погружения до проектной отметки.

Было выполнено 3 натурных эксперимента. В процессе инъектирования контролировалось значение подающего давления и объем закаченного раствора. Отчетливо прослеживалось 4 режима нагнетания: заполнение линейных полостей, сформированных в грунтовом основании; разрыв грунтового массива, образование вертикальной трещины и ее расширение; заполнение трещины инъекционным раствором и уплотнение окружающего грунта, и четвертый этап – повышение давления до значений близких к давлению разрыва ($P \approx 0,7 \dots 0,8$ МПа). На четвертом этапе для предупреждения повторного нарушения сплошности, инъекционные работы останавливались.

В результате опытов были получены плоские вертикальные тела, толщиной 250...350 мм и более, длиной 1,8...2,1 м и высотой 1,6...1,8 м (рис. 3).

Лабораторные и натурные эксперименты подтвердили возможность создания инъекционных тел определенной формы (плоских вертикальных тел и горизонтально ориентированных дисков) в массиве сложенном глинистыми грунтами при нагнетании цементно-песчаного раствора методом пакетного высоконапорного инъектирования.



Рисунок 3. Инъекционное тело, созданное в натуральных условиях.

Глава 3 содержит описание лабораторных исследований по оценке эффективности разных схем армирования твердыми включениями, сформированными пакетным высоконапорным инъецированием, основания фундаментов мелкого заложения и свайных фундаментов. Эксперименты проводились в грунтовом лотке, фундаменты моделировались штампами 36×11 см и 10×10 см. Свайный фундамент включал 9 стержней диаметром 0,8 см и длиной 25 см, расположенных по сетке с шагом 4,6 см, объединенных ростверком 10×10 см. В качестве армоэлементов использовались зерна щебня с размерами $d \approx 1 \dots 2$ см и $D \approx 3 \dots 4$ см. В экспериментах варьировались: размеры армоэлементов d и D ; тип армирования (усиление основания под подошвой, прерывистое и сплошное армирование по контуру фундаментов – контурное армирование); шаг армоэлементов в плане (d , $2d$, $3d$, D и $2D$); количество уровней по глубине (от 4 до 10 для d и от 3 до 5 для D) и расстояния между уровнями (d , $2d$, $3d$, D и $2D$).

Было исследовано 42 схемы усиления (19 – ленточного фундамента, 13 – столбчатого и 10 – свайного). Каждый эксперимент повторялся 3 раза. Всего было выполнено 126 опытов.

Сделаны выводы, что деформационные свойства основания, определяются схемой размещения армоэлементов в грунтовом массиве и зависят от их объема. Однако даже минимальное армирование – прерывистое контурное с шагом $3d$ в плане и по глубине (2, рис. 4а) снижает осадку штампа на 15...25% по сравнению с осадкой на неармированном основании (1, рис. 4а). Эксперименты с включениями, расположенными по определенным геометрическим схемам, показывают высокую сходимость результатов, беспорядочному расположению соответствует значительный разброс и практически полное отсутствие повторяемости. Большое значение имеет размер армоэлементов: деформации основания, армированного крупными включениями, меньше деформаций при армировании мелкими, расположенными по аналогичным схемам (2 и 1, рис. 4б).

Было доказано, что контурное армирование – эффективный способ усиления. Результат зависит от расстояния между включениями, как в плане, так и по глубине. При прерывистом контурном армировании с шагом $3d$ (2, рис. 4в) величина предельного давления на основание может быть увеличена до 2 раз, а осадка снижена на 25%. Сплошное контурное армирование снижает осадку в 1,5...2 раза ленточного (1, рис. 4в) и в 3...4 раза столбчатого фундамента, значение предельного давления повышается в 2...3 раза. Деформации основания, армированного включениями, расположенными по разным схемам: прерывистым армированием в плане сплошным по глубине (3, рис. 4г), и, наоборот (2, рис. 4г) с таким же объемом, имеют близкие значения. Армирование включениями d и D с равным объемом, приводит к практически одинаковым осадкам. При этом зерна щебня d , располагаются вплотную, как в плане, так и по глубине, а диаметром D – с шагом $2D$.

Схемы усиления модели свайного фундамента: твердое тело или 1 уровень включений d , состоящий из 2 слоев, расположенных вплотную (здесь и далее) под нижними концами стержней; 1 уровень включений d или D под подошвой штампа; 1 уровень включений d на глубине $0,5l$ от подошвы штампа; 2 уровня включений d – под штампом и на глубине $0,5l$ от подошвы; 3 уровня включений d – под

штампом, на глубине $0,5l$ от подошвы и под нижними концами стержней; сплошное контурное армирование включениями D от подошвы до нижнего конца стержней вдоль двух противоположных сторон или вдоль всего периметра штампа; сплошное контурное армирование включениями D от подошвы до нижнего конца стержней вдоль всего периметра штампа с внедрением включений d в пространство между стержнями. Эксперименты повторялись по 3 раза. Всего было выполнено 30 опытов.

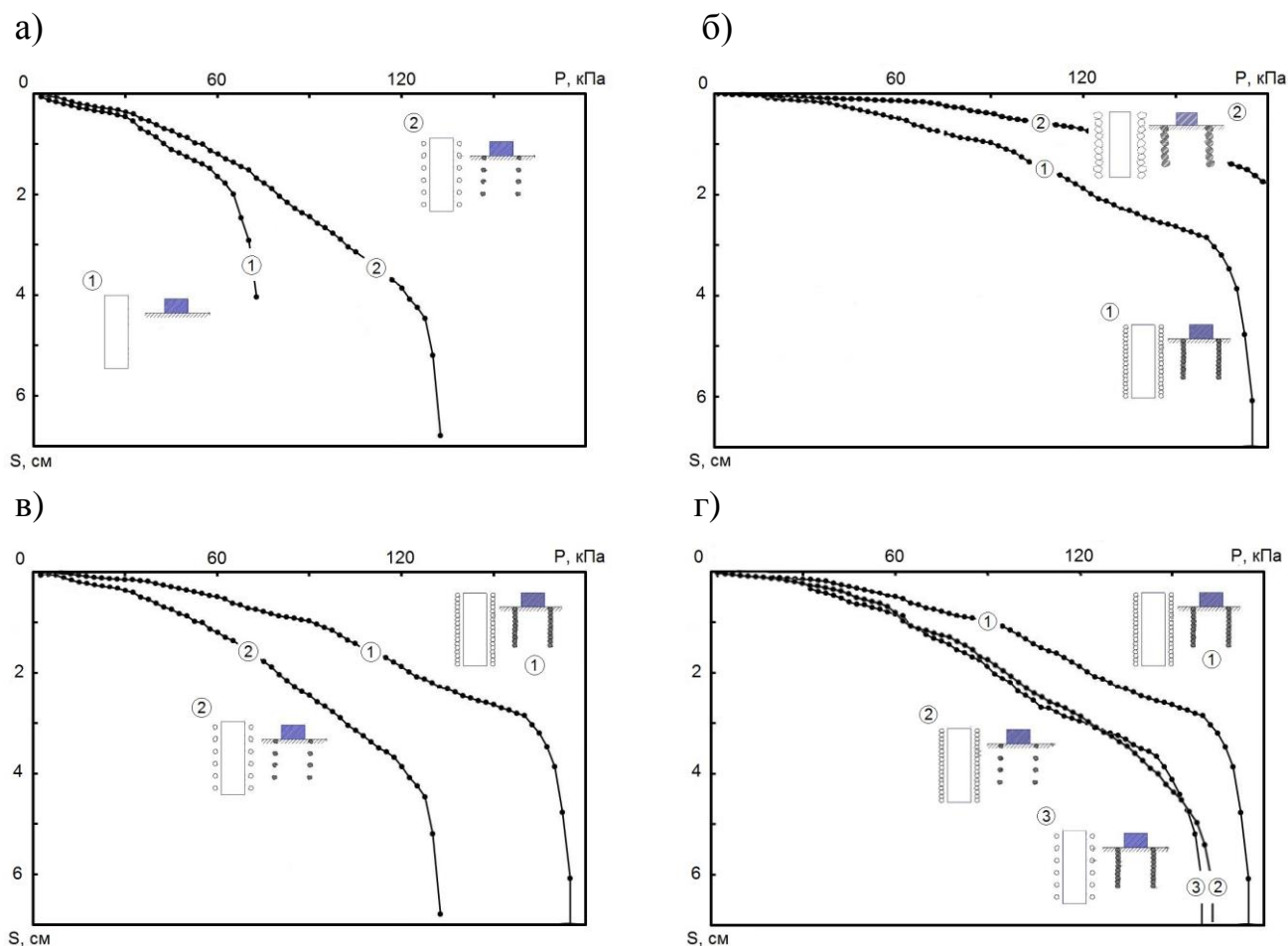


Рисунок 4. Осадка прямоугольного штампа: а – без усиления и с прерывистым контурным армированием (d), б – со сплошным контурным армированием (d и D), в – со сплошным и прерывистым контурным армированием (d), г – со сплошным и прерывистым контурным армированием в плане и по глубине (d).

Установлено, что усиление свайных фундаментов твердыми включениями приводит к снижению деформаций и возможности существенного увеличения нагрузок: при всех схемах зависимость осадки от нагрузки имеет близкий к линейной вид, резкая потеря несущей способности («срыв») отсутствует. Большое значение имеет порядок расположения армоэлементов, формирующий характер взаимодействия свайного фундамента с грунтовым массивом. В некоторых случаях даже значительное увеличение объема включений не приводит к заметному снижению осадок. Например, деформации при армировании по схеме с 2 и 3 уровнями (2 и 3, рис. 5б) отличаются между собой не более чем на 5...10%, при

возрастании объема включений в 1,5 раза. Осадка свайного фундамента со сплошным контурным армированием включениями D от подошвы до нижнего конца стержней вдоль двух противоположных сторон штампа (2, рис. 5в) практически равна осадке при сплошном армировании вдоль всего периметра с внедрением включений d в пространство между стержнями (3, рис. 5в). Усиление модели свайного фундамента сплошным контурным армированием включениями D от подошвы до нижнего конца стержней вдоль двух противоположных сторон штампа (2, рис. 5в) результативнее сплошного армирования вдоль всего периметра (1, рис. 5в). При этом объем включений отличается в 4 раза в первом и в 2 раза во втором случае.

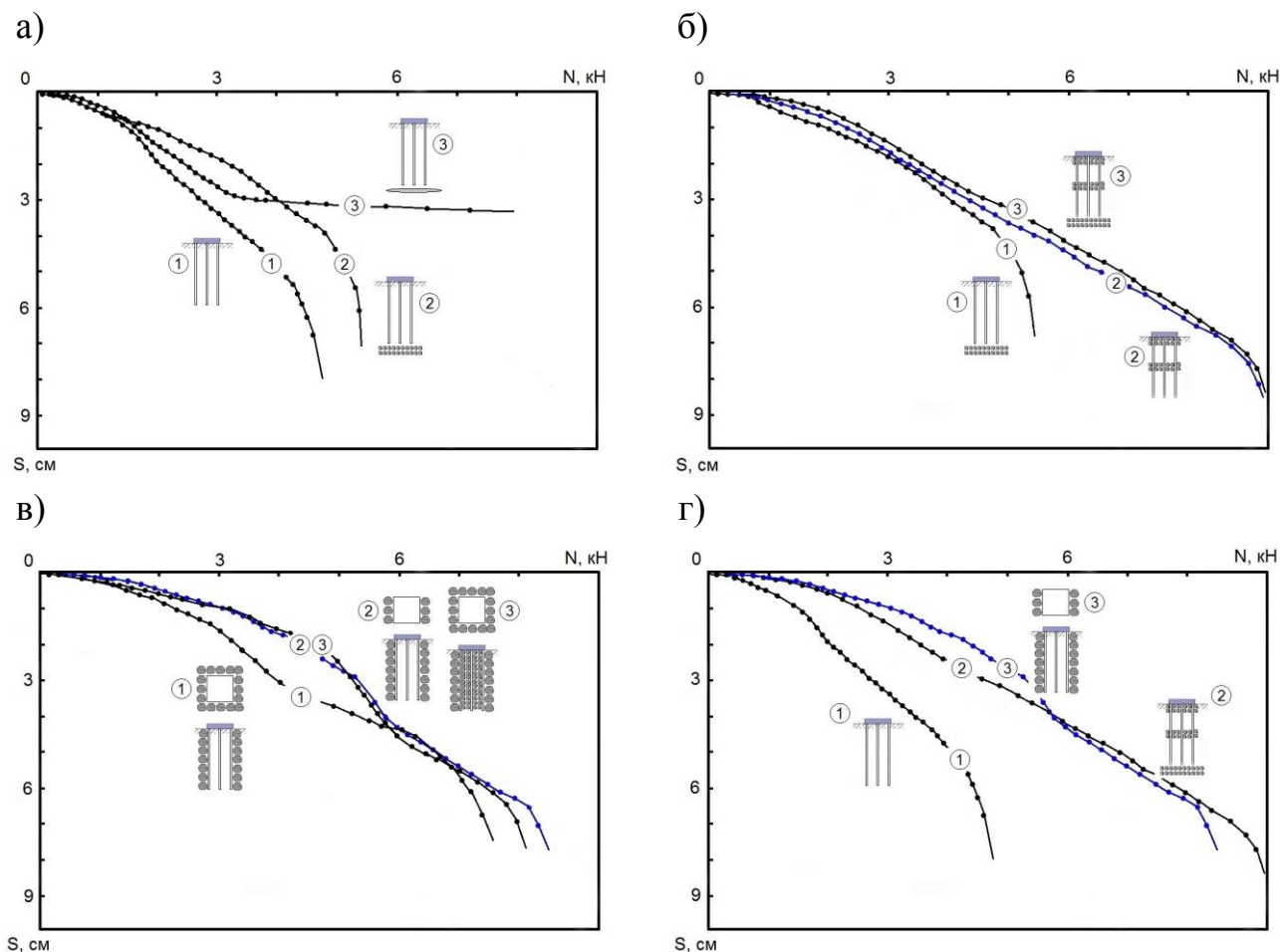


Рисунок 5. Осадка модели свайного фундамента: а – без усиления и с усилением основания под стержнями, б – с усилением основания под стержнями и грунта под подошвой штампа (d), в – с контурным армированием (D), г – без усиления, с контурным армированием (D) и с усилением грунта под подошвой штампа (d).

Экспериментально доказано, что наиболее эффективная схема усиления свайных фундаментов – усиление основания под нижними концами свай (3 и 2, рис. 5а), а также межсвайного пространства (3 и 2, рис. 5б). В этих случаях возможно увеличение нагрузки на 75...100% и снижение осадок более чем в 3 раза.

Эффективность усиления свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками пакетным высоконапорным инъецированием с целью ликвида-

ции возможных зазоров под подошвой и включения грунта межсвайного пространства в работу проверялась в большом грунтовом лотке. Модель фундамента включала ростверк 520×520 мм, опирающийся на 9 свай диаметром 4,2 см и длиной 0,92 м, расположенных по сетке с шагом 21 см. На ростверк передавалась вертикальная нагрузка, колебания возбуждались в диапазоне частот от 5 до 40...45 Гц. Раствор нагнетался одновременно через 3 инжектора, установленных с разных сторон ростверка. Колебания регистрировались: до усиления, на основании, усиленном нагнетанием цементно-песчаной смеси и твердым инъекционным телом (через 6 часов и через 28 дней после инъектирования).

В результате усиления амплитуды горизонтальных колебаний фундамента уменьшились до 2,6 раз (2, рис. 6а), вертикальных – до 1,5 раз (2, рис. 6б). Образование твердого инъекционного тела, объединяющего сваи и ростверк, способствовало дополнительному снижению колебаний на 15...20% (3, рис. 6а и 6б).

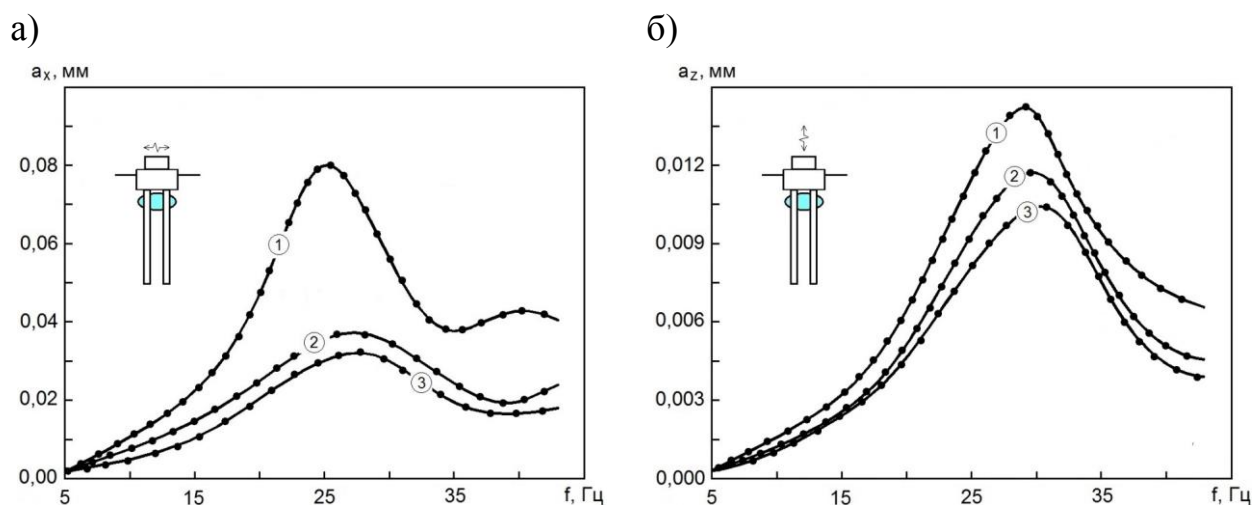


Рисунок 6. Графики горизонтальных (а) и вертикальных (б) колебаний свайного фундамента до усиления (1), после нагнетания инъекционного раствора (2) и после формирования твердого инъекционного тела (3).

В главе 4 представлены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния грунтового основания, усиленного твердыми включениями – армоэлементами, сформированными пакетным высоконапорным инъектированием цементно-песчаного раствора. Моделирование выполнялось в программном комплексе MIDAS GTS NX 2019 (v1.1). Расчеты производились в пространственной постановке с учетом нелинейного характера работы грунта.

Были исследованы разные схемы усиления фундамента мелкого заложения ($b = 2,4 \times 2,4$ м; $P = 210$ кПа), свайного (9 свай $0,3 \times 0,3$ м длиной $l = 6,0$ м по сетке $0,9 \times 0,9$ м; ростверк $b = 2,4 \times 2,4$ м; $N = 5400$ кН) и плитного фундамента ($b = 24 \times 24$ м; $P = 400$ кПа) – рис. 7.

Входные параметры численных исследований: размеры элементов контурного армирования фундамента мелкого заложения и свайного фундамента – $0,50 \times 0,20 \times 0,70$ м; размеры инъекционных тел при усилении межсвайного пространства – $2,4 \times 2,4$ м, толщина $h = 0,7$ м и $2h = 1,4$ м; грунт основания – суглинок

средней степени водонасыщенный тугопластичный $\rho = 1,95 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 14^\circ$, $C = 15 \text{ кПа}$, $E = 4,5 \text{ МПа}$. Размеры элементов контурного армирования плитного фундамента – $0,75 \times 0,25 \times 1,40 \text{ м}$; элементов усиления под плитой – $0,75 \times 0,75 \times 1,40 \text{ м}$ с шагом – $2,25 \text{ м}$; основание плиты – супесь песчанистая малой степени водонасыщения $\rho = 2,00 \text{ г/см}^3$, $\varphi = 17^\circ$, $C = 34 \text{ кПа}$, $E = 15 \text{ МПа}$. Материал фундаментов – тяжелый бетон; физико-механические характеристики армоэлементов – $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$, $\nu = 0,2$, $E = 100 \text{ МПа}$.

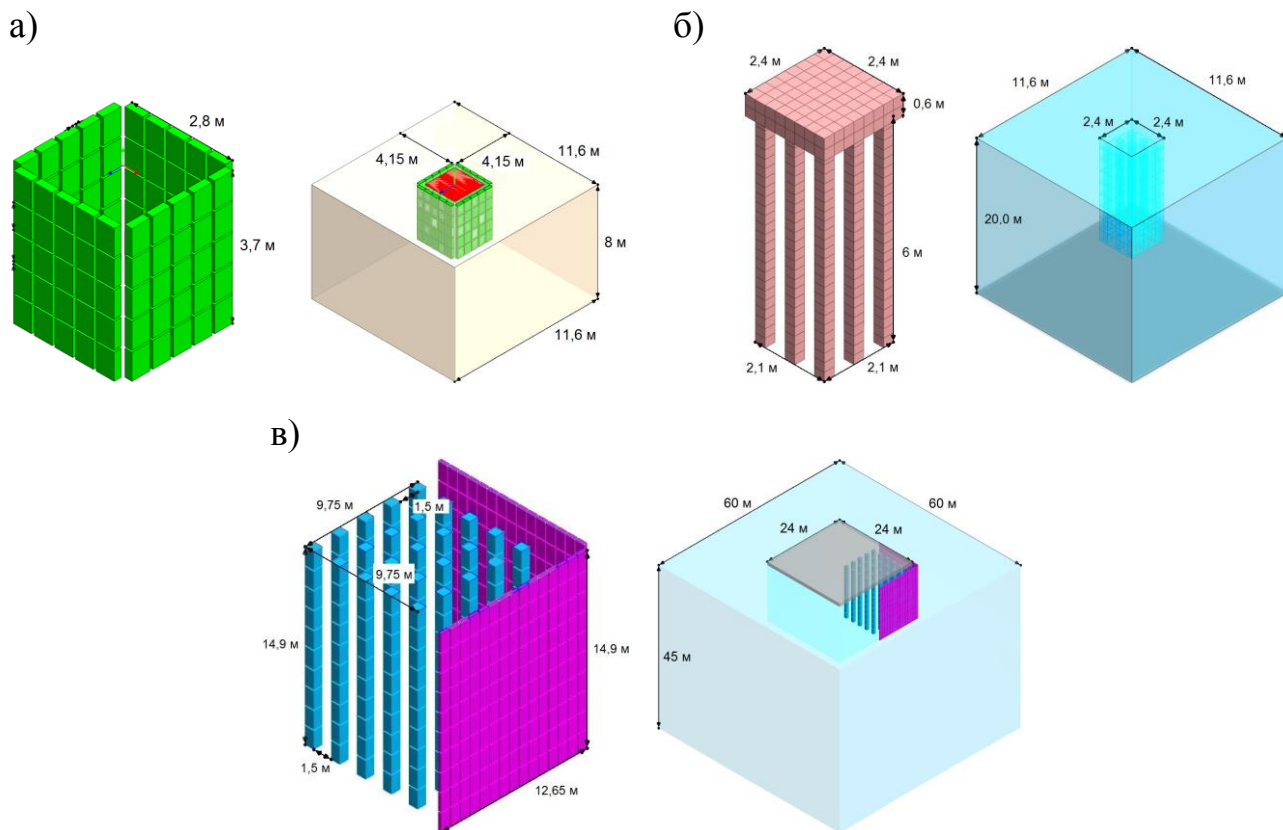


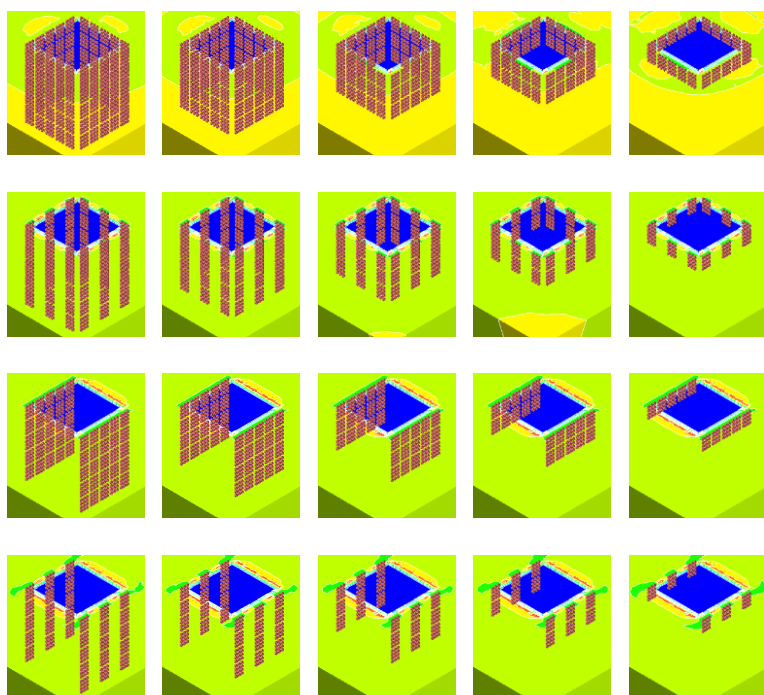
Рисунок 7. Расчетные схемы фундамента мелкого заложения (а), свайного (б) и плитного фундамента (в).

Для фундамента мелкого заложения были рассмотрены варианты прерывистого и сплошного контурного армирования вдоль двух противоположных сторон и вдоль всего периметра подошвы. Для каждого варианта рассчитывались случаи 1-го, 2-х, 3-х, 4-х и 5-уровневого армирования по глубине ($0,29b \dots 1,54b$) (рис. 8а).

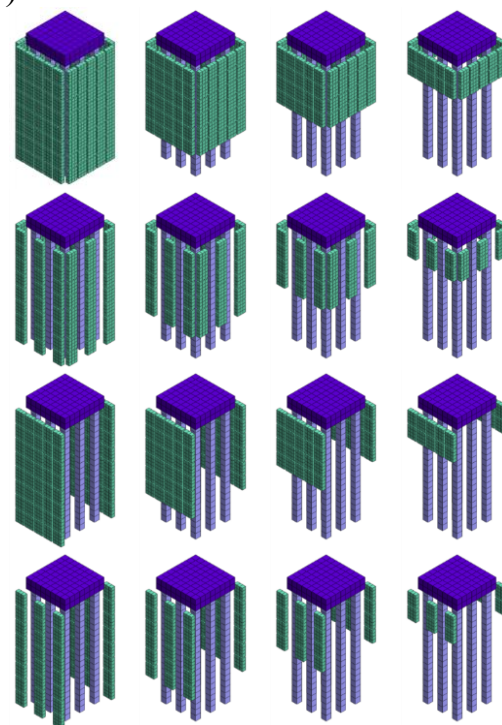
Схемы усиления свайного фундамента: прерывистое и сплошное контурное армирование вдоль двух противоположных сторон и вдоль всего периметра ростверка; инъекционное тело толщиной h или $2h$ под нижними концами свай; инъекционное тело толщиной h или $2h$ под нижними концами свай со сплошным контурным армированием вдоль всего периметра ростверка; инъекционное тело толщиной h или $2h$ под подошвой ростверка или на глубине $0,5l$ от подошвы; 2 инъекционных тела толщиной $2h$ – под подошвой ростверка и на глубине $0,5l$ от подошвы; 3 инъекционных тела толщиной $2h$ – под подошвой ростверка, на глубине $0,5l$ от подошвы и под нижними концами свай. Для контурного армирования

свайного фундамента рассчитывались случаи 2-х, 4-х, 6-ти и 8-уровневого армирования по глубине ($0,25l \dots l$ от подошвы ростверка) (рис. 8б).

а)



б)



в)

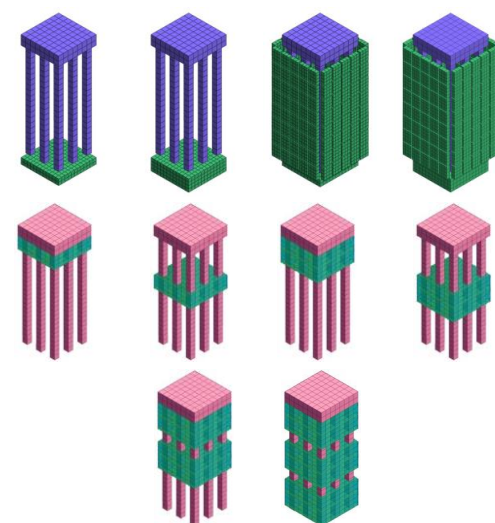
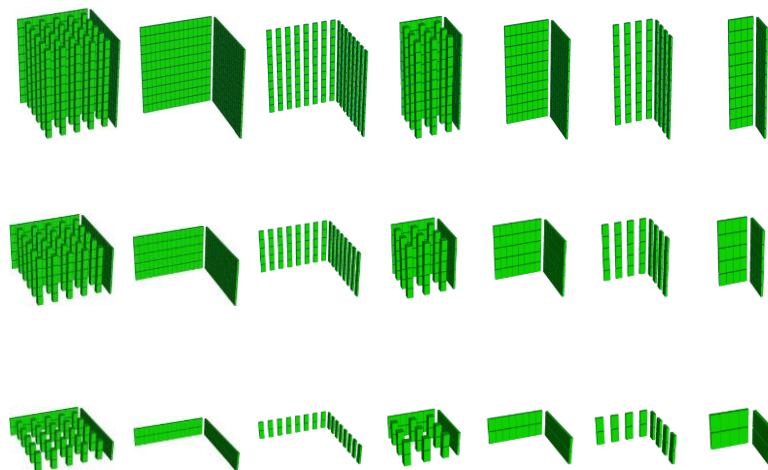


Рисунок 8. Схемы усиления фундамента мелкого заложения (а), свайного (б) и плитного фундамента (в) инъекционными телами.

Были рассмотрены следующие схемы усиления основания плитного фундамента: прерывистое и сплошное контурное армирование около угловой части; сплошное контурное армирование около угловой части с усилением основания под подошвой плиты (рис. 8в). Прерывистое контурное армирование включало выполнение ряда армоэлементов вдоль каждой из смежных сторон на участках длиной $0,24b$ и $0,53b$ (4 и 8 столбцов), сплошное на участках $0,14b$, $0,28b$ и $0,53b$

(4, 8 и 15 столбцов). Схемы усиления основания под подошвой плиты – 9 столбцов армоэлементов под угловой частью по сетке 3×3 или 25 столбцов по сетке 5×5 со сплошным контурным армированием на участках длиной 0,28b и 0,53b соответственно. Шаг армоэлементов под подошвой в обоих случаях – 0,09b. Для каждого варианта рассчитывались случаи 2-х, 5-ти и 10-уровневого армирования по глубине (0,12b, 0,31b и 0,62b).

Всего рассматривалось 67 схем усиления (20 – фундамента мелкого заложения, 26 – свайного фундамента и 21 схема усиления плитного фундамента).

В ходе численного моделирования было доказано, что армирование основания трансформирует напряженно-деформированное состояние грунтового массива, при этом, изменение схемы с увеличением количества армоэлементов уменьшает напряжения и вертикальные деформации непосредственно под подошвой и во всей активной зоне фундаментов (рис. 9, 10). При прерывистом контурном армировании фундаментов мелкого заложения снижение осадки достигает 16% относительно осадки на естественном основании, свайных фундаментов – 6% и угловой точки плитных фундаментов – 3%; при сплошном армировании, осадка фундаментов мелкого заложения может быть снижена на 24%, свайных фундаментов – на 9% и угловой точки плитных фундаментов – на 5%.

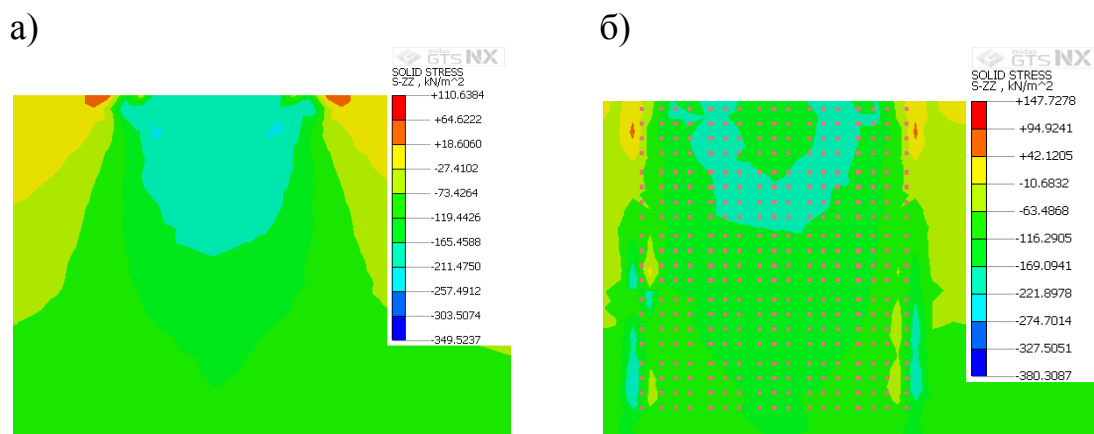


Рисунок 9. Изолинии вертикальных напряжений в грунтовом основании фундамента мелкого заложения до усиления (а) и после усиления 5-уровневым сплошным контурным армированием вдоль всего периметра фундамента (б).

Экспериментально установлено, что прерывистое контурное армирование фундаментов эффективнее сплошного. Это показывает, используемый автором, коэффициент приведенного расхода материала ($K_{ПРМ}$), равный отношению объема включений в кубических метрах к разности осадок фундамента до и после усиления, выраженной в сантиметрах. Практически во всех случаях, коэффициент $K_{ПРМ}$ растет с увеличением объема используемых армоэлементов. Например, при минимальном армировании фундаментов мелкого заложения (прерывистое 1-уровневое контурное армирование вдоль противоположных сторон) $K_{ПРМ} = 0,53$, а при максимальном (сплошное 5-уровневое вдоль всего периметра) – $K_{ПРМ} = 2,06$.

Автором было определено, что наиболее эффективная схема усиления свайных фундаментов – внедрение инъекционных тел в грунтовое основание под

нижними концами свай (снижение деформаций на 24%, $K_{ПРМ} = 0,48$). При усилении межсвайного пространства (3 тела толщиной $2h$: под подошвой ростверка, на глубине $0,5l$ от подошвы и под нижними концами свай) деформации снижаются на 39%, однако коэффициент приведенного расхода материала увеличивается более чем 8 раз – $K_{ПРМ} = 4,00$.

Численное моделирование показало, что оптимальная глубина контурного армирования основания фундаментов мелкого заложения составляет $0,9b \dots 1,2b$. Вместе с тем увеличение глубины контурного армирования вдоль смежных сторон плитных фундаментов не оказывает заметного влияния на деформации.

Наиболее результативным вариантом усиления плитных фундаментов является армирование основания под угловой частью плиты – осадка угловой точки может быть снижена на 31%. В этом случае, величина осадки напрямую зависит от количества армоэлементов и глубины армирования.

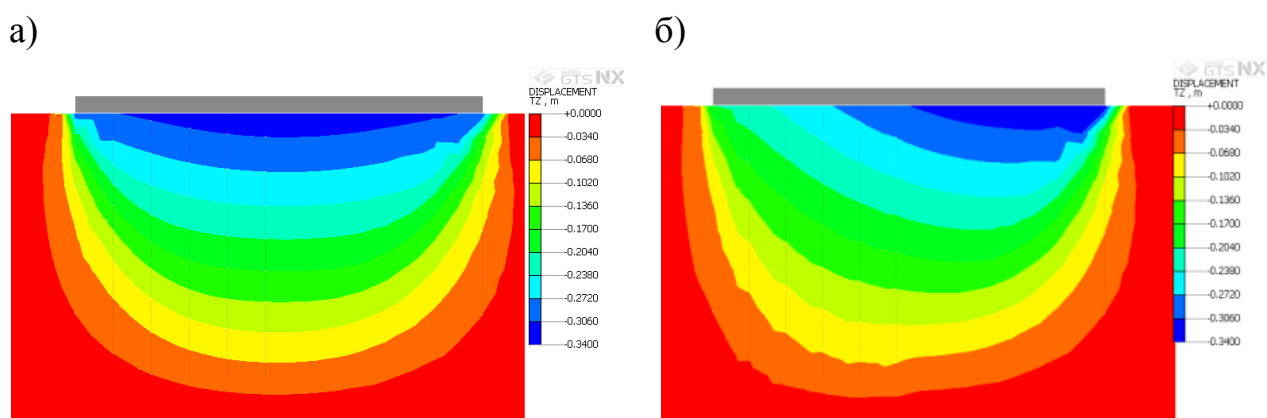


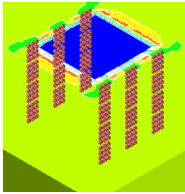
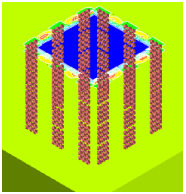
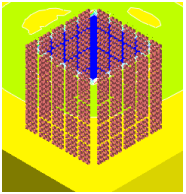
Рисунок 10. Изолинии вертикальных перемещений основания фундаментной плиты до усиления (а) и при армировании участков длиной $0,53b$ с усилением основания под подошвой угловой части (б).

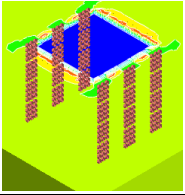
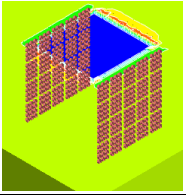
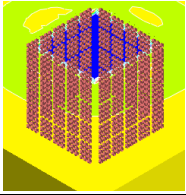
В главе 5 изложен подход к усилению фундаментов пакетным высоконапорным инъецированием. Усиление целесообразно выполнять поэтапно, меняя схему армирования и увеличивая количество армоэлементов на каждом этапе (прерывистое контурное армирование – сплошное – усиление основания под подошвой; армирование вдоль двух противоположных сторон – вдоль всего периметра – усиление основания под подошвой, рис. 11). Необходимость выполнения очередного этапа устанавливается по результатам геодезических наблюдений – в ходе усиления определяются относительные осадки $(\Delta S/L)_u$ или крены i_u и сравниваются с расчетными или предельными значениями. При затухании деформаций работы прекращаются.

Поэтапное усиление дает возможность существенной экономии за счет выполнения оптимального объема работ. Важно, что удельная эффективность армирования на первых этапах, как правило, существенно выше.

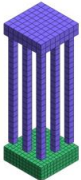
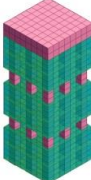
Результативность схем армирования можно оценить по процентному уменьшению осадки при усилении $\Delta S/S_e$ (где, ΔS – разность осадок на естественном основании и при усилении, S_e – осадка фундамента на естественном основании).

а)

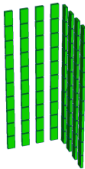
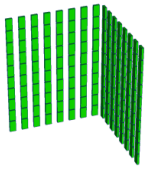
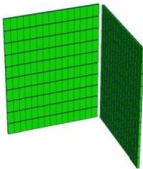
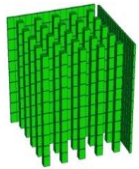
1 этап	2 этап	3 этап
		
$\Delta S/S_e = 7\%$	$\Delta S/S_e = 15\%$	$\Delta S/S_e = 22\%$

1 этап	2 этап	3 этап
		
$\Delta S/S_e = 7\%$	$\Delta S/S_e = 12\%$	$\Delta S/S_e = 22\%$

б)

1 этап	2 этап
	
$\Delta S/S_e = 27\%$	$\Delta S/S_e = 39\%$

в)

1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
			
$\Delta S/S_e = 2\%$	$\Delta S/S_e = 3\%$	$\Delta S/S_e = 5\%$	$\Delta S/S_e = 31\%$

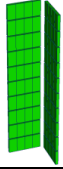
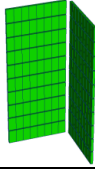
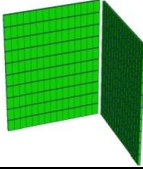
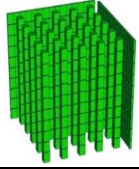
1 этап	2 этап	3 этап	4 этап
			
$\Delta S/S_e = 2\%$	$\Delta S/S_e = 4\%$	$\Delta S/S_e = 5\%$	$\Delta S/S_e = 31\%$

Рисунок 11. Варианты поэтапного усиления фундаментов мелкого заложения (а), свайных (б) и плитных фундаментов (в). $\Delta S/S_e$ – процентное снижение осадки при усилении.

В таблице 1 приведены показатели снижения осадки $\Delta S/S_e$, определенные для зданий, усиленных пакетным высоконапорным инъецированием, в программном комплексе MIDAS и по данным геодезического мониторинга. Расхождение не превышает 10%, что позволяет рекомендовать результаты численных исследований, выполненных в диссертационной работе (рис. 11), для прогнозирования деформационного состояния грунтового основания при усилении.

Таблица 1. Фактические и расчетные осадки зданий, усиленных пакетным высоконапорным инъецированием

Тип фундамента	Схема усиления	Осадка фундамента, мм		Показатель снижения осадки, $\Delta S/S_e$	
		На естественном основании (расчетное значение, СНиП)	После усиления (натурные наблюдения)	Расчетное значение (MIDAS)	Натурные наблюдения
Ленточный		63	43	22%	32%
Плитный		141	121	5%	14%
		284	179	31%	37%

Также в главе содержится описание способов усиления грунтового основания свайных, плитных и свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками методом пакетного высоконапорного инъецирования, защищенных патентами на изобретения РФ.

Способ усиления фундаментов из сборных железобетонных свай предполагает выполнение контурного армирования от подошвы ростверка до границы сжимаемой толщи основания и, в случае необходимости – инъекционных тел под острием свай (рис. 12). Вертикальные инъекционные тела формируются одновременной подачей цементно-песчаного раствора через ряд инъекторов, установленных вдоль граней ростверка. Для создания инъекционных тел пакетным высоконапорным инъецированием под острием свай в ростверке выполняются отверстия, располагаемые группами по 3 штуки (глава 2).

Способ усиления свайных и свайно-плитных фундаментов из буровых свай в процессе их возведения или начального периода эксплуатации также может включать 2 этапа. Сначала, усиливается грунтовое основание под нижними кон-

цами крайних (краевых и угловых) свай, потом – внутренних. В сваях диаметром более 800 мм группа из трех кондукторов устанавливается внутри тела сваи при ее изготовлении. В других случаях в каждой свае размещается по одному кондуктору (патент 2722901 РФ).

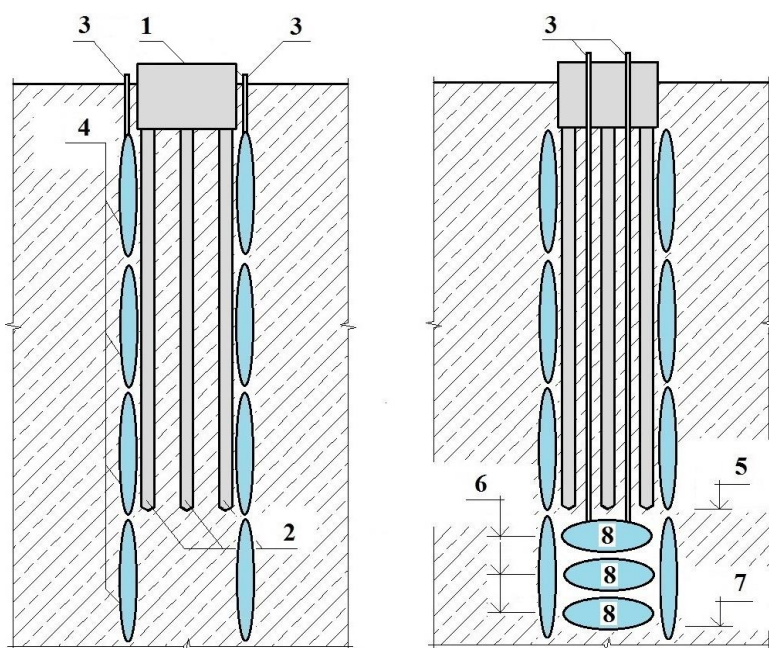


Рисунок 12. Схемы усиления свайных фундаментов пакетным высоконапорным инъецированием. 1 – ростверк; 2 – сваи; 3 – инъекторы; 4 – вертикальные инъекционные тела; 5 – отметка нижнего конца свай; 6 – отметки инъекционных горизонтов; 7 – граница сжимаемой толщи; 8 – горизонтальные инъекционные тела (патент 2728052 РФ).

Автором предложен способ, корректировки вертикального положения зданий на плитных фундаментах, включающий последовательное выполнение, в случае необходимости, нескольких этапов: прерывистое контурное армирование около угловой части фундаментной плиты в направлении крена; сплошное контурное армирование; усиление основания под подошвой угловой части плиты.

Способ снижения параметров колебаний свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками предусматривает подачу цементно-песчаного раствора непосредственно под подошву ростверка через кондукторы или сквозные отверстия (рис. 13, 14).



Рисунок 13. Инъекционные кондукторы, установленные в фундаментной плите для возможности усиления основания под подошвой (патент 2352723 РФ).

При недостаточном количестве инъекционных точек, предварительно создается экран, препятствующий неконтролируемому распространению нагнетаемого

раствора. Экран – сплошной контур из вертикальных инъекционных тел вдоль периметра ростверка, выполняется пакетным высоконапорным инъецированием. Критерием окончания работ является объем закаченного раствора, зависящий от площади подошвы ростверка.

Другой вариант – приложение максимальной динамической нагрузки в процессе работ по усилению с регистрацией колебаний свайного фундамента. В этом случае, инъецирование производится вплоть до снижения колебаний до безопасного или минимально возможного уровня.

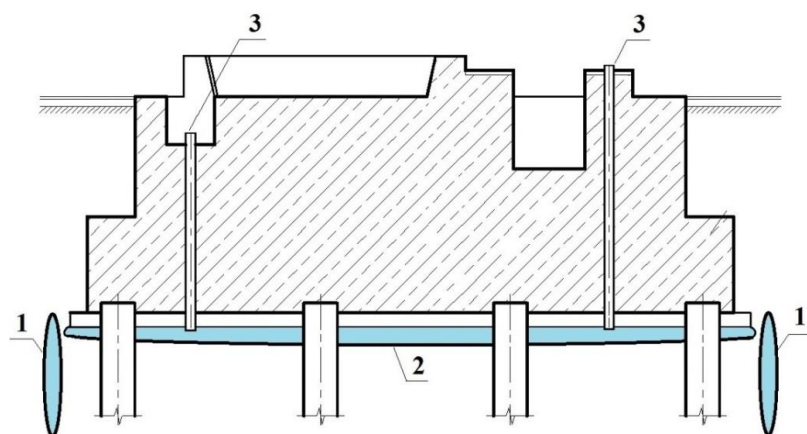


Рисунок 14. Усиление свайного фундамента под машину с динамическими нагрузками. 1 – сплошное контурное армирование, 2 – инъекционное тело под подошвой ростверка, 3 – отверстия в теле ростверка (патенты 2728077, 2729818 РФ).

В **приложении 1** приведены примеры усиления фундаментов мелкого заложения на неравномерно замоченном основании, на просадочных грунтах и на оттаявших вечномерзлых грунтах, усиления здания на фундаментной плите на основании, сложенном насыпными грунтами и выравнивания крена высотного здания методом пакетного высоконапорного инъецирования. **Приложение 2** содержит патенты на изобретения автора, **приложение 3** – акты о внедрении результатов исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально доказана возможность создания твердых тел установленной формы в основании сложенном глинистыми грунтами пакетным высоконапорным инъецированием. Одновременная подача цементно-песчаного раствора через несколько инъекторов, размещенных вдоль прямой линии на расстоянии до $20d$ друг от друга (где d – диаметр инъектора), приводит к формированию вертикального инъекционного тела; при нагнетании через 3 инъектора, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, в грунтовом массиве формируется горизонтальный диск.

2. Экспериментальными и численными исследованиями выявлены основные закономерности изменения деформационного состояния основания при различных схемах усиления, что позволяет сделать следующие выводы:

– достоверный прогноз развития осадок армированного грунтового основания, возможен только при известной геометрической форме включений и схеме их расположения;

– внедрение армоэлементов приводит к заметному снижению деформаций грунтового массива, даже минимальное армирование положительно влияет на осадку фундаментов;

– увеличение количества армоэлементов ведет к уменьшению деформаций грунтового основания, при этом удельная эффективность армирования, как правило, снижается;

– контурное армирование является эффективным способом усиления грунтового основания фундаментов мелкого заложения, свайных и плитных фундаментов.

3. Разработан метод усиления фундаментов мелкого заложения, свайных и плитных фундаментов пакетным высоконапорным инъецированием путем армирования грунтового основания твердыми инъекционными телами. Работы предлагается выполнять последовательно, увеличивая количество армоэлементов и меняя схему армирования: от прерывистого контурного армирования к сплошному и к усилению основания под подошвой (под нижними концами свай). Необходимость выполнения очередного этапа определяется по результатам мониторинга за динамикой развития деформаций грунтового основания в процессе усиления. При затухании деформаций работы прекращаются.

4. Метод усиления грунтового основания фундаментов мелкого заложения, свайных и плитных фундаментов пакетным высоконапорным инъецированием применен при возведении и реконструкции более 20 строительных объектов, что подтверждено 13 актами о внедрении. Экономический эффект от внедрения превысил 30 миллионов рублей.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы: исследование физико-механических свойств грунта после усиления основания пакетным высоконапорным инъецированием; учет уплотнения грунтового массива вокруг инъекционных тел при расчетах усиления основания фундаментов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. **Нуждин, М.Л.** Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01
2. **Нуждин, М.Л.** Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Известия вузов. «Строительство». – 2019. – № 10. – С. 101-112. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-101-112
3. **Нуждин, М.Л.** Снижение колебаний свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками методом высоконапорного группового инъецирова-

ния / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 41-52. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.04

В изданиях, индексируемых международной реферативной базой Scopus:

4. **Nuzhdin, M.L.** Erection many-storey buildings one plate foundation with application high-pressure injection method / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin // Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Solutions: Proc. of 14th Asian Reg. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng. – Hong Kong: The Hong Kong Polytechnics University, 2011. – /on CD-ROM insert. – 4p. (469)/.
5. Nuzhdin, L.V. Implementation of reduced impact geotechnics on historical monuments in Central Asia / L.V. Nuzhdin, **M.L. Nuzhdin**, A.Z. Khasanov, Z.A. Khasanov // The 15th Asian Reg. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng. – Vol. 2, No. 77. – Japanese Geotechnical Society Special Publication. – P. 2662-2666.
6. Nuzhdin L.V. Research of effective parameters to strengthen soil foundations by cement-sand mixture injection method / L.V. Nuzhdin, **M.L. Nuzhdin** // Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: Proc. of the XVI European Conf. on Soil Mech. – London, ICE Publishing Ltd, 2015. – P. 3273-3278.
7. **Nuzhdin, M.L.** Strengthening of pile foundation under dynamic loads by high-pressure injection / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin // Challenges and Innovations in Geotechnics: Proc. of the 8th Asian Young Geotech. Eng. Conf. – Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. – P. 143-145.
8. **Nuzhdin, M.L.** Experimental studies on model pile foundations reinforced by hard inclusions / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin, A.B. Ponomaryov // Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 62 – Singapore: Springer, 2019. – P. 193-197. DOI 10.1007/978-981-15-2184-3_24

Статьи, опубликованные в других изданиях:

9. **Нуждин, М.Л.** Применение метода высоконапорного инъецирования при усилении основания аварийного здания / М.Л. Нуждин // Тр. Каспийской междунар. конф. по геоэкологии и геотехнике – Баку: «Адилоглы», 2003. – С. 183-187.
10. **Нуждин, М.Л.** Использование цементно-песчаных смесей для уплотнения грунтового основания высоконапорной направленной инъекцией / М.Л. Нуждин // Міжвідомчий наук.-техн. збірник наук. праць (будівництво) «Будівельні конструкції» – 2003. – № 59. – Книга 1 – С. 430-433.
11. **Нуждин, М.Л.** Применение инъекционных кондукторов для предупреждения возникновения сверхнормативных кренов фундаментных плит методом группового высоконапорного инъецирования / М.Л. Нуждин // Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов: Тр. междунар. геотехн. конф. посвященной году РФ в РК – Алматы: Казахстанская геотехническая ассоциация, 2004. – С. 351-354.
12. **Нуждин, М.Л.** Усиление фундаментов малоэтажных зданий методом группового высоконапорного инъецирования цементно-песчаных растворов / М.Л.

- Нуждин, Л.В. Нуждин // Малоэтажное строительство в рамках национального проекта «Доступное и комфортное жилье – гражданам России»: Технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области: Мат. междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. – С. 213-216.
13. **Нуждин, М.Л.** Корректировка вертикального положения зданий и сооружений на плитных фундаментах / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Геотехнические проблемы мегаполисов: Тр. междунар. конф. по геотехнике – Том 5 – СПб.: ПИ «Геореконструкция», 2010. – С. 1637-1640.
 14. **Нуждин, М.Л.** О влиянии расположения твердых несжимаемых включений на деформируемость грунтового основания штампа / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: Мат. всероссийской науч.-техн. конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – С. 236-243.
 15. **Nuzhdin, M.L.** Application high-pressure directional injection method for strengthened soil base / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin // Geo-Engineering for Construction and Conservation of Cultural Heritage and Historical Sites. Challenges and Solutions: Proc. of the IVth Central Asian Geotech. Symp. – Самарканд: СамГАСИ, 2012. – P. 201-205.
 16. **Nuzhdin, M.L.** Research of perimeter reinforcement of the foundation soil by cement-sand mortar injection / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin // Geotechnique, Construction Materials & Environment: Proc. of 4th int. conf. GEOMATE 2014. – Vol. 4(1) – Tsu city: The GEOMATE International Society, 2014. – P. 267-272.
 17. **Нуждин, М.Л.** Исследования эффективных параметров контурного армирования твердыми включениями неправильной формы / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: Мат. междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2015. – С. 325-331.
 18. **Нуждин, М.Л.** Усиление грунтового основания исторических памятников Средней Азии инъектированием подвижных цементно-песчаных смесей / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин, А.З. Хасанов, З.А. Хасанов // Геотехника Беларуси: наука и практика: Мат. междунар. конф. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 313-320.
 19. **Nuzhdin, M.L.** Strengthening of supporting ground of a damaged building by high-pressure injection of a moving cement-sand mixture / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin // Proc. of the 17th African Reg. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng. – University of Pretoria, South Africa, 2019. – P. 785-788.
 20. **Нуждин, М.Л.** Расчетное обоснование усиления грунтового основания многоэтажного жилого дома в г. Новосибирске пакетным высоконапорным инъектированием / М.Л. Нуждин, А.Б. Пономарев // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью: Мат. VI междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово: КузГТУ, 2020. – С. 261-266.

Патенты на изобретения РФ:

21. Пат. 2259446 РФ, E02D 3/12 Способ усиления грунтового основания / Лавров С.Н., Нуждин Л.В., **Нуждин М.Л.**, Писаненко В.П. – Опубл. 27.08.05, Бюл. № 24. – 5 с: ил.

22. Пат. 2259447 РФ, E02D 3/12 Способ усиления грунтового основания / Лавров С.Н., Нуждин Л.В., **Нуждин М.Л.**, Писаненко В.П. – Оpubл. 27.08.05, Бюл. № 24. – 4 с: ил.
23. Пат. 2352723 РФ, E02D 35/00 Способ корректировки вертикального положения зданий и сооружений на плитном фундаменте / Нуждин Л.В., **Нуждин М.Л.** – Оpubл. 20.04.09, Бюл. № 11. – 10 с: ил.
24. Пат. 2722901 РФ, E02D 27/08 Способ усиления свайного фундамента / **Нуждин М.Л.**, Нуждин Л.В., Габиров Ф.Г. – Оpubл. 04.06.20, Бюл. № 16.
25. Пат. 2728052 РФ, E02D 27/08 Способ усиления свайного фундамента / **Нуждин М.Л.**, Нуждин Л.В. – Оpubл. 28.07.20, Бюл. № 22.
26. Пат. 2728077 РФ, E02D 27/44 Способ устройства свайного фундамента под машины с динамическими нагрузками и виброчувствительное оборудование / **Нуждин М.Л.**, Нуждин Л.В. – Оpubл. 28.07.20, Бюл. № 22.
27. Пат. 2729818 РФ, E02D 27/44 Способ устройства свайного фундамента под машины с динамическими нагрузками и виброчувствительное оборудование / Нуждин Л.В., **Нуждин М.Л.**, Габиров Ф.Г., Габирова Л.Ф. – Оpubл. 12.08.20, Бюл. № 23.