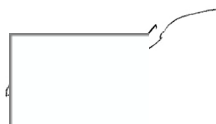


На правах рукописи



Кондратьев Станислав Олегович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА
ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ
КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ
ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ОСАДКЕ**

Специальность: 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Алексеев Сергей Игоревич

Официальные оппоненты: **Королёв Константин Валерьевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет путей сообщения», кафедра
«Геотехника, тоннели и метрополитены»,
заведующий кафедрой;

Осокин Анатолий Иванович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет», кафедра геотехники.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».**

Защита состоится «12» апреля 2022 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/kondratev-stanislav-olegovich>.

Автореферат разослан «15» февраля 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. В. Конюшков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Каркасные здания с шарнирным сопряжением колонн и балок являются достаточно податливыми сооружениями: чем меньше пространственная жесткость такой системы, тем меньше усилия в конструкциях, обусловленные неравномерными осадками. По этой причине нормативные документы всегда допускали для данных зданий наибольшие абсолютные осадки и их относительную неравномерность в сравнении с другими конструктивными схемами. Действительно, несущие конструкции каркасных зданий способны претерпевать значительные осадки без заметных повреждений. Однако любые жесткие элементы, сопряженные с каркасом: протяженные стеклянные фасады, перегородки, полы, – оказываются весьма чувствительными к неравномерным осадкам.

В период, когда основным назначением каркасных зданий было промышленное производство и к оформлению полов и перегородок предъявлялись только утилитарные требования, вопрос деформирования второстепенных конструкций не был значимым. Однако с конца прошлого века в строительной отрасли произошли существенные изменения: каркасные структуры стали широко применяться для торгово-коммерческих и развлекательных комплексов, бизнес-центров.

Применительно к легко деформирующимся перегородкам, отделанным дорогостоящими материалами, протяженным светопрозрачным конструкциям, широко используемым в современных каркасных зданиях, важно решить вопрос об обеспечении их механической безопасности, т.е. сохранности, исключении развития повреждений вследствие неравномерных осадок. В связи с этим актуальной становится задача обеспечения равномерных осадок каркасных зданий. Для структуры, не обладающей значительной собственной жесткостью, она может быть решена только путем выравнивания, введения детерминированной (одинаковой) осадки отдельных опор.

Степень разработанности темы. Вопросы неравномерных деформаций основания, их влияния на механическую работу здания в различных аспектах рассмотрены в работах отечественных и зарубежных исследователей.

Традиционный подход, заключающийся в снижении влияния неравномерных деформаций основания посредством варьирования параметров жесткости конструкции, не используется в каркасных зданиях с шарнирным сопряжением колонн и балок вследствие их податливости. Очевидно, неприемлемы в широкой практике и уникальные мероприятия по снижению неравномерности, используемые, к примеру, при стабилизации Пизанской башни.

Сегодня в основе проектирования зданий и сооружений лежит учет эффектов совместной работы их конструкций и основания. В настоящее

время данное направление развивается преимущественно в аспекте применения метода конечных элементов. Достоинство подобного подхода заключается в выполнении требований «Технического регламента о безопасности зданий и сооружений» (384-ФЗ) в части учета совместной работы, пластических и реологических свойств конструкционных материалов и грунтов, их нелинейного характера деформирования.

Вопросами упругопластического деформирования оснований занималось множество отечественных и зарубежных исследователей: В.Ф. Александрович, С.И. Алексеев, А.Н. Алехин, Е.Н. Беллендир, Г.Г. Болдырев, А.К. Бугров, В.А. Васенин, Е.Ф. Винокуров, С.С. Вялов, А.И. Голубев, А.Л. Гольдин, М.Н. Гольдштейн, М.И. Горбунов-Посадов, М.Е. Грошев, В.И. Дидух, В.П. Дыба, С.И. Евтушенко, Ю.К. Зарецкий, А.А. Зархи, П.Л. Иванов, В.А. Иоселевич, А.М. Караулов, В.М. Кириллов, П.А. Коновалов, В.С. Копейкин, А.Л. Крыжановский, В.Н. Ломбардо, Г.М. Ломизе, В.В. Лушников, М.В. Малышев, В.А. Микулич, Ю.Н. Мурзенко, Н.С. Никитина, В.Н. Николаевский, В.В. Орехов, В.Н. Парамонов, А.В. Пилягин, В.С. Прокопович, Ю.И. Соловьев, А.С. Строганов, Л.А. Строкова, З.Г. Тер-Мартirosян, В.М. Улицкий, А.Б. Фадеев, И.В. Федоров, В.Г. Федоровский, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, В.Н. Широков, J.B. Burlanct, D.C. Drucker, R.E. Gibson, D.J. Henkel, W. Prager, K.H. Roscoe, A.N. Schofield, N.P. Suh, C.P. Worth и многие другие.

Следует заметить, что многофакторное геотехническое проектирование, по существу, обладает признаками исследовательской работы. Исходя из этого возможность учета совместной работы основания и сооружения без компьютерного моделирования с учетом нормативных требований к механической безопасности обладает практической значимостью.

Для этого возможно использовать так называемые инженерные или приближённые методы, активно развивавшиеся в 60-80-х годах прошлого века. Их разработке посвящены работы С.И. Алексеева, А.К. Бугрова (рекомендовано в СП 23.13330), С.С. Вялова, В.М. Кириллова, П.А. Коновалова, В.В. Лушниковой, М.В. Малышева, А.Л. Миндича, Ю.Н. Мурзенко, Н.С. Никитиной, А.В. Пилягина, З.Г. Тер-Мартirosяна и других. Приостановка развития данного «приближённого» направления напрямую связана с прогрессом вычислительной техники и возросшими запросами времени на «нестандартные», «нетиповые» конструктивные решения, для которых развитие теоретической базы – аналитических зависимостей, – часто затруднительно и нецелесообразно.

Строго говоря, проблема заключается ещё и в том, что до сегодняшнего дня не получено универсальной и всеобъемлющей зависимости, позволяющей однозначно описать нелинейную работу грунта. Из этого следует,

что все модели, описываемые уравнениями математической физики, обладающими аналитическими или только численными решениями, – имеют свою границу применимости, т.е., по сути, являются феноменологическими.

Тем не менее, использование и развитие доступных широкому кругу расчетчиков инженерных методов, позволяющих в оговоренных рамках получать адекватные решения для ряда практических задач, является вполне полезным и перспективным.

Цель исследования – разработка метода расчета оснований фундаментов каркасных зданий, позволяющего обеспечить механическую безопасность ограждающих и второстепенных конструкций, при шарнирном сопряжении балок и колонн в условиях неравномерных деформаций основания.

Задачи исследования:

1. Проанализировать методы расчета оснований фундаментов по деформациям, в том числе за пределом границы упругой работы.

2. Ввести критерий выравнивания деформаций внецентренно нагруженных фундаментов, определить значения предельного крена для каркасных зданий с шарнирным сопряжением балок и колонн.

3. Определить расчетные функциональные зависимости, учитывающие в рамках предлагаемого метода характер деформирования грунтов различной плотности сложения, оценить допустимое давление на основание при выравнивании расчетных осадок в области нелинейной работы в долях от предельного.

4. Осуществить экспериментальную оценку принятых допущений на основе решения задачи об определении неравномерности детерминированной осадки.

5. Выполнить сравнительный анализ результатов расчетов по предлагаемому методу сопоставлением с результатами численного моделирования, штамповых испытаний различных исследователей, а также вычислений по инженерным методам с использованием предложений других авторов.

6. Разработать рекомендации по применению представленного метода, алгоритм решения и на его основе программу расчета оснований центрально и внецентренно нагруженных фундаментов.

7. Оценить экономический эффект от применения предлагаемого метода расчета оснований фундаментов.

Объект исследования – ограждающие и второстепенные конструкции каркасных зданий, устроенные на столбчатых фундаментах с шарнирным сопряжением балок и колонн.

Предмет исследования – влияние неравномерных осадок основания на механическую безопасность ограждающих и второстепенных конструкций.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложено минимизировать влияние неравномерности осадки несущего каркаса на техническое состояние ограждающих и второстепенных конструкций каркасных зданий путем расчета основания фундаментов на одинаковую (детерминированную) осадку.

2. Определены расчетные функциональные зависимости, полученные на основе экспериментальных исследований работы штампа на песчаном грунте, позволяющие в рамках инженерного метода выравнивания осадок учесть характер деформирования грунтов различной плотности сложения и адекватно задать наклон кривой «осадка-давление» на стадии проектирования или реконструкции фундаментов каркасных зданий.

3. Введены критерии предельного крена для выравнивания деформаций внецентренно нагруженных фундаментов каркасных зданий с шарнирным сопряжением балок и колонн, основанные на исключении растягивающих напряжений в грунте основания, на анализе условий механической работы узлов сопряжения фундаментных и надземных конструкций.

4. Разработаны методические рекомендации по выравниванию осадок несущего каркаса в условиях центрально и внецентренно нагруженных фундаментов, алгоритм расчета оснований фундаментов проектируемых и реконструируемых зданий и сооружений и программа для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

Теоретическая значимость состоит в определении границ применимости инженерного метода выравнивания осадок на основе сопоставления расчетов с экспериментальными и натурными данными, в уточнении функциональных зависимостей, учитывающих особенности деформирования грунтов различной плотности сложения; введении критериев предельного крена для каркасных зданий с шарнирным сопряжением балок и колонн для выравнивания деформаций внецентренно нагруженных фундаментов.

Практическая значимость заключается в максимальном сокращении затрат на периодический ремонт второстепенных конструкций в связи с проявляющимися неравномерными деформациями основания; в разработке алгоритма и программного обеспечения для расчета по предлагаемому методу.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе применялись следующие основные методы:

1. Поиск, анализ и систематизация литературных источников по вопросам исследования, сведений организаций и исследователей о результатах полевых штамповых испытаний и испытаний отдельных фундаментов.

2. Экспериментальные исследования деформирования грунтов основания – лабораторные лотковые штамповые испытания – с последующей статистической обработкой результатов измерений.

3. Математическое моделирование условий лабораторных лотковых штамповых испытаний с использованием метода конечных элементов.

4. Сравнительный анализ результатов расчетов по предлагаемому методу с результатами проведенных экспериментов, численного моделирования, штамповых испытаний различных организаций и исследователей, инженерных (приближенных) методов расчета осадки других авторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механическая безопасность каркасных зданий при взаимодействии несущих конструкций, обладающих существенной податливостью, и ограждающих, второстепенных конструкций с конечной жесткостью, может быть обеспечена только путем выравнивания осадок несущего каркаса.

2. Расчет осадки за пределом линейной зависимости между напряжениями и деформациями осуществляется путем сведения нелинейной задачи к квазиупругой с поправочными коэффициентами, учитывающими влияние распространения зон пластических деформаций, соотношение между действующим и начальным критическим давлением с экспериментально определенными множителями, определяющими характер наклона зависимости «осадка-давление».

3. Минимизация неравномерных деформаций внецентренно нагруженных фундаментов каркасных зданий производится путем дополнительной расчетной проверки, заключающейся в предотвращении возникновения предельного крена. Для его определения вводятся расчетные критерии, основанные на исключении растягивающих напряжений в грунте основания, на анализе условий механической работы узлов сопряжения фундаментных и надземных конструкций.

Степень достоверности результатов и выводов диссертационной работы подтверждается применением основных положений, линейных и нелинейных моделей механики грунтов, механики твердого деформируемого тела, теории линейно деформируемой среды, теории упругости, методов математической статистики; обеспечивается сопоставлением применяемых инженерных решений с достаточным объемом экспериментальных данных и результатами численного моделирования.

Апробация результатов. Основные положения, результаты и выводы диссертации подтверждены апробацией на следующих конференциях: LXXVI–LXXVIII Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (2016–2018 гг., Санкт-Петербург); Всероссийской

научно-технической конференции по геотехнике «Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований фундаментов и подземных сооружений» (1–3 февраля 2017 г., СПбГАСУ, Санкт-Петербург); International Scientific Conference «Transportation Geotechnics and Geocology (TGG-2017)» (2017 г.); IX Международном симпозиуме «Прорывные технологии электрического транспорта «Элтранс-2017» (Eltrans-2017)» (18–20 октября 2017 г., Санкт-Петербург); Семинаре-совещании с техническими руководителями и специалистами строительных компаний «Применение инновационных методов расчета, технологий, оборудования и специальных материалов при ремонте, реконструкции зданий и углублении пола подвалов в них» (11 апреля 2018 г., Центр импортозамещения и локализации ВК «ЛенЭкспо», Санкт-Петербург); International Geotechnical Symposium «Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region» (4–7 июля 2018 г., Южно-Сахалинск); Третьем российско-китайском симпозиуме по геотехнике и подземному строительству (16–22 сентября 2018 г., ПГУПС, Санкт-Петербург); Научной конференции «Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга», посвященной 155-летию кафедры «Здания» (17 апреля 2019 г., ПГУПС, Санкт-Петербург); International Scientific Conference «Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD 2019)» (2019 г.); XII Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту» (6–7 ноября 2019 г., СамГУПС, Самара).

Публикации. Основные положения диссертационного исследования получили отражение в 15 публикациях, в том числе 2 из которых опубликованы в изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации (определенные перечнем ВАК РФ), 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2 – в изданиях, индексируемых международными базами данных (Scopus).

Тематика работы соответствует пунктам 4, 10 паспорта специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения.

Личный вклад автора. Автором лично выполнено решение задач исследования, в том числе осуществлены: поиск, анализ и систематизация литературных источников, результатов полевых штамповых испытаний и натурных испытаний фундаментов; проведение лотковых экспериментов и их интерпретация; анализ инженерного метода выравнивания осадок, в т.ч. установление граничных условий его применимости, введение расчетных функциональных зависимостей, учитывающих характер деформирования грунтов различной плотности сложения; определение расчетных критериев предельного крена; численное моделирование и расчеты по инженерным методам условий лотковых испытаний с последующим

сравнительным анализом; оценка экономической эффективности предлагаемого метода; подготовка публикаций; разработка рекомендаций, алгоритма расчета и программы для ЭВМ.

Участие автора подтверждается апробациями полученных результатов и публикациями по теме диссертации. Её основные результаты внедрены в учебный процесс кафедры «Основания и фундаменты» ПГУПС.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 207 источников, и четырех приложений. Общий объем работы составляет 182 страницы машинописного текста, в том числе 64 формулы, 78 рисунков и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования и степень её разработанности, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены научные результаты, сведения о публикациях и апробациях.

В первой главе на примерах из практики показано влияние неравномерных деформаций основания на сохранность ограждающих конструкций каркасных зданий, а также выполнен обзор и анализ методов расчета оснований по деформациям.

Наибольшие риски механической безопасности, как правило, связаны с неравномерностью осадки фундаментов, приводящей к появлению повреждений в конструкциях, недопустимых для нормальной эксплуатации здания. Как известно, каркасные здания являются весьма податливыми сооружениями, несущие конструкции которых способны претерпевать существенные осадки без заметных повреждений. Однако любые жесткие элементы, сопряженные с каркасом, – стеклянные фасады, перегородки, полы, – оказываются весьма чувствительными к неравномерным осадкам. Для структуры, не обладающей значительной собственной жесткостью, она может быть решена только путем выравнивания осадок отдельных опор.

Рассмотрим пример из практики: расположенное в Петербурге здание (пл. Конституции, д. 1) представляет собой девятиэтажное строение административного назначения; выполнено в сборном железобетонном каркасе (рисунок 1, а). Возведение вплотную тяжелого соседнего здания, повлекшего развитие неравномерных деформаций (рисунок 1, б), не привело к ухудшению работоспособности несущего каркаса, а проявилось в виде повреждений, нарушений сплошности ограждающих конструкций, причем они продолжают развиваться (рисунок 1, в, г). Это подтверждает практическую значимость работы: как максимально сократить

затраты на периодический ремонт второстепенных конструкций в связи с неравномерными деформациями основания и обеспечить механическую безопасность.

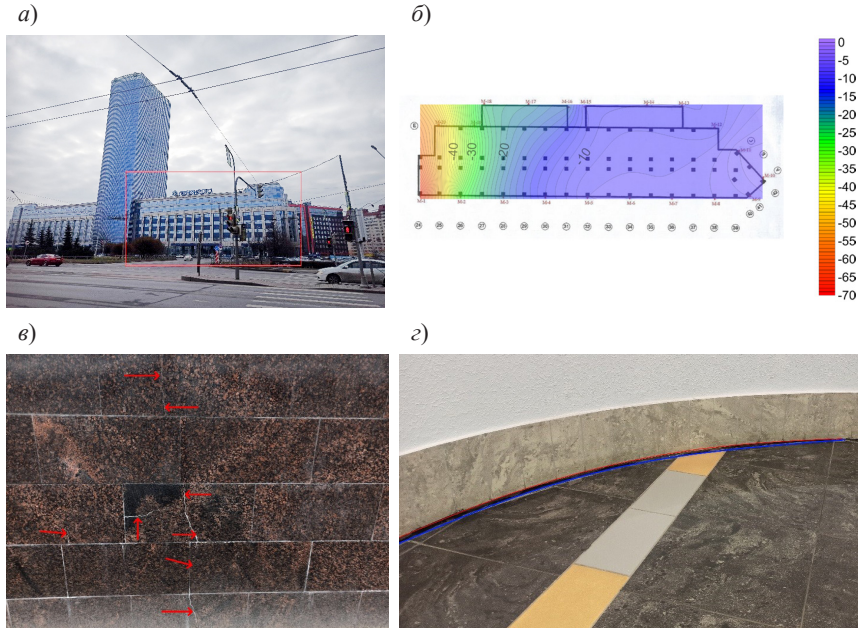


Рисунок 1 – Пл. Конституции, д. 1. а) общий вид; б) изополя деформаций за 12 лет; в, з) характерные повреждения, устраняемые периодическим ремонтом

Вторая глава посвящена теоретическим основам инженерного метода детермированной осадки. Изложены принятые допущения, определены граничные условия, введены расчетные критерии для внецентренно нагруженных фундаментов.

Нелинейный характер деформирования грунтов основания является фактором, подлежащим учету в соответствии с 384-ФЗ. Для корректного и полного рассмотрения нелинейной работы основания используется начальное критическое давление $P_{н.кр.}$, которое принимается граничным условием, до которого выполняются линейные зависимости. Таким образом, в разработанном методе рассмотрен следующий диапазон давлений:

$$k_1 \cdot P_{н.кр.} \leq P_i \leq k_2 \cdot P_{пр.}, \quad (1)$$

где k_1 – числовой множитель при $P_{н.кр.}$, характеризующий начало нелинейной работы («нижнее» условие); обоснован анализом влияния различной дискретизации зависимости $V = f(P)$;

k_2 – числовой множитель при $P_{пр.}$, характеризующий применимость метода («верхнее» условие); обоснован сравнительным анализом теоретических и экспериментальных осадок.

Предлагаемый метод базируется на зависимости «объема» зон пластических деформаций от действующего давления на основании $V = f(P)$ (рисунок 2).

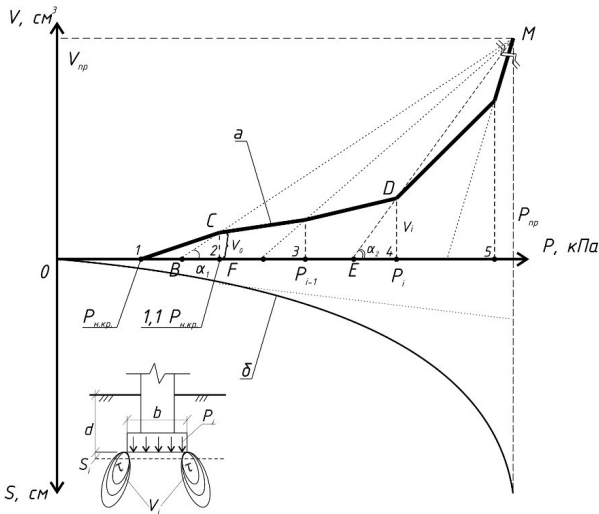


Рисунок 2 – Расчетные зависимости для фундамента:
 а) траектория изменения $V = f(P)$; б) зависимость $S = f(P)$, отличающаяся очертанием для различного состояния грунта; «0–1–2» – зона линейного деформирования; «2–5» – нелинейное деформирование

«Нижней» границей функции $V = f(P)$, характеризуемой k_1 (формула 1), принимается $1,1 \cdot P_{н.кр.}$, поскольку рассматриваемая область давлений ($P_{пр.} - 1,1 \cdot P_{н.кр.}$) делится на конечные элементарные отрезки, равные $0,1 \cdot P_{н.кр.}$. Необходимость «дробления» $V = f(P)$ на мелкие «отрезки» связана с точностью задаваемой расчетной осадки и с использованием максимального количества детерминированных состояний грунта. Дальнейшее уменьшение «шага» – длины «отрезка» – не оказывает значимого влияния на результат (рисунок 3).

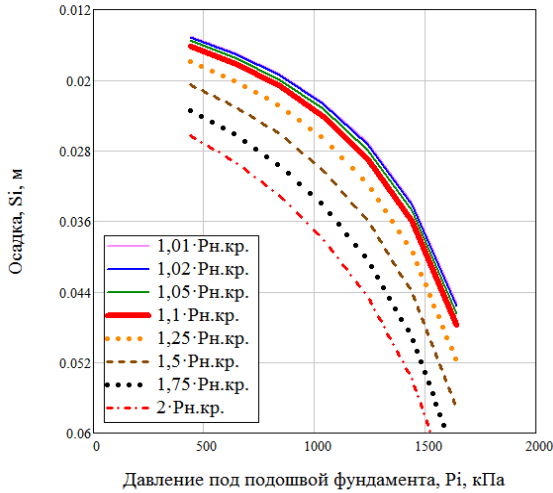


Рисунок 3 – Зависимости $S = f(P)$ при различных числовых множителях при $P_{н.кр.}$

В качестве допущения принято, что НДС основания стремится к предельному состоянию по простой траектории. Это объясняется принципом наименьшего действия: «система» затрачивает минимум энергии при переходе из одного стационарного состояния в другое. Для определения размеров фундамента на основе детерминированной осадки используется коэффициент нелинейной работы грунта основания K_i (отношение зон пластических деформаций при заданном нагружении V_i относительно V_0 при $1,1 \cdot P_{н.кр.}$), определяемый по формуле:

$$K_i = \frac{V_i}{V_0} = \frac{P_{пр.} - 1,05 \cdot P_{н.кр.}}{P_{пр.} - P_i + 0,05 \cdot P_{н.кр.}}, \quad (2)$$

где P_i – давление под подошвой фундамента, кПа;

$P_{пр.}$ – предельное давление на основание (СП 22.13330), кПа.

Предлагаемый инженерный метод, по существу, сводит нелинейную задачу к квазилинейной. При давлении, превышающем принятую границу линейной деформируемости среды $1,1 \cdot P_{н.кр.}$, определение осадки S производится по формуле:

$$S_3 = S_{1,1 \cdot P_{н.кр.}} \cdot K_i, \quad (3)$$

где $S_{1,1 \cdot P_{н.кр.}}$ – осадка при давлении $1,1 \cdot P_{н.кр.}$, м.

Функция $V = f(P)$ в общем случае недостаточно чувствительна для сильно отличающихся состояний грунтов: по результатам экспериментов определены функциональные зависимости и введены коэффициенты.

Методика сводится к следующей последовательности: устанавливается значение осадки S_3 ($S_3 \leq S_{пр}$; $S_{пр}$ – предельная осадка по СП 22.13330) для проектируемых фундаментов, указываются действующие нагрузки и характеристики грунтов, определяются размеры фундаментов. После определения размеров фундаментов осуществляется проверка основания по несущей способности.

В условиях внецентренного нагружения необходимо введение дополнительного критерия. Изгибающий момент M учитывается при определении крена i ; оценить его допустимость предлагается посредством проверки:

$$i \leq i_{пр}, \quad (4)$$

где $i_{пр}$ – предельное значение крена фундамента.

Для проверки крена фундаментов согласно СП 22.13330 (п. 5.6.43) и (4) необходимо его предельное значение $i_{пр}$. Разработка критериев $i_{пр}$ имеет два аспекта: расчет проектируемых внецентренно нагруженных фундаментов, оценка фактического «запаса» наклона конструкций.

Первая система критериев для каркасных зданий введена по принципу «светофора» из условий работы конструкций:

- «зеленая граница» – величина отклонения верха колонны от вертикали согласно СП 70.13330. При её превышении конструкции здания необходимо рассчитывать по деформированной схеме;

- «желтая граница» – на основе исключения возникновения растянутых зон в колонне при её наклоне. Для одноэтажных каркасных зданий (или эстакад транспортных сооружений) необходимо оценить смещение равнодействующей силы балки за ядро сечения колонны;

- «красная граница» – для каменных ограждающих конструкций в ТСН 50-302-2004 указан признак аварийности, заключающийся в отклонении от вертикали более $1/50$ высоты конструкции h ; отсюда следует, что угол отклонения конструкции от вертикали α не должен превышать $0,02$ рад.

Учитывая гибкую связь ограждающих конструкций с несущим каркасом и недопустимость «аварийных» значений крена, «красную границу» целесообразно ограничить по крайней мере половиной α .

Также рассмотрены следующие критерии:

- критерий из условий работы «стандартного» узла каркасных зданий. Принято допущение: рассмотрены условия прямого чистого изгиба. M_{max} определяется исходя из теории железобетонных конструкций. Тогда $i_{пр(j)}$:

$$i_{\text{пр.}(j)} = \frac{1-\mu^2}{E_0} \cdot k_e \frac{M_{\text{max}}}{\left(\frac{b}{2}\right)^3}, \quad i_{\text{пр.}(j)} = \frac{1-\mu^2}{E_0} \cdot k_e \frac{\sigma_{\text{max}} \cdot W_j}{\left(\frac{b}{2}\right)^3}, \quad (5)$$

где $i_{\text{пр.}(j)}$ – предельный крен фундамента относительно заданной оси.

– нормативно допускается отрыв подошвы от грунта при относительном эксцентриситете $e_0 > 1/6$ (СП 22.13330). Из исследований Е.А. Сорочана известно, что при возрастании нагрузок осадки центрально нагруженных фундаментов опережают осадки центрально нагруженных за счет развития зоны предельного состояния на большую глубину, при этом с повышением e_0 соотношение $S_e/S_{e=0}$ существенно увеличивается. Экспериментально установлено, что при $e_0 \leq 1/5$ соотношение $S_e/S_{e=0} \approx 1$. Т. е. ограничение $e_0 \leq 1/6$ позволяет рассчитывать основания внецентренно нагруженных фундаментов по предлагаемому методу с последующей проверкой крена i .

Для конкретной задачи целесообразно установить наименьший $i_{\text{пр.}}$, отражающий наиболее неблагоприятные условия.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям деформирования грунтов и их интерпретации. Лотковые исследования направлены на: установление расчетных функциональных зависимостей для введения в формулу (3), экспериментальную оценку принятых допущений, установление «верхнего» граничного условия. Экспериментальные данные также используются в качестве «эталонов» при сравнительном анализе осадок.

Для построения расчетных функциональных зависимостей при различной плотности грунтового основания с его нагружением до достижения предельного давления осуществлены лабораторные лотковые испытания с учетом условий моделирования и повторяемости.

Лабораторные испытания проводились в лотке цилиндрической формы (рисунок 4, а). Основание из маловлажного пылеватого песка ($\varphi = 35^\circ$) перед каждым испытанием послойно уплотнялось. Использовались круглые жесткие штампы $\varnothing 7,5$ и 10 см. Размер лотка превышал диаметры штампов в 6–7 раз.

Проведены три серии экспериментов с различными плотностями грунта: рыхлый, средней плотности, плотный. Опыты с недопустимыми отклонениями были исключены посредством критерия Смирнова-Граббса (ГОСТ Р 8.736-2011). Отобранные результаты образовали зависимость $S = f(P)$, на основе которой введены расчетные эмпирические коэффициенты, зависящие от плотности сложения грунта. Для этого рассмотрено отношение расчетной S и экспериментальной $S_{\text{эк}}$ осадки и изменение прироста среднего давления под подошвой штампа P_i относительно $P_{\text{н.кр.}}$ (рисунок 4, б).

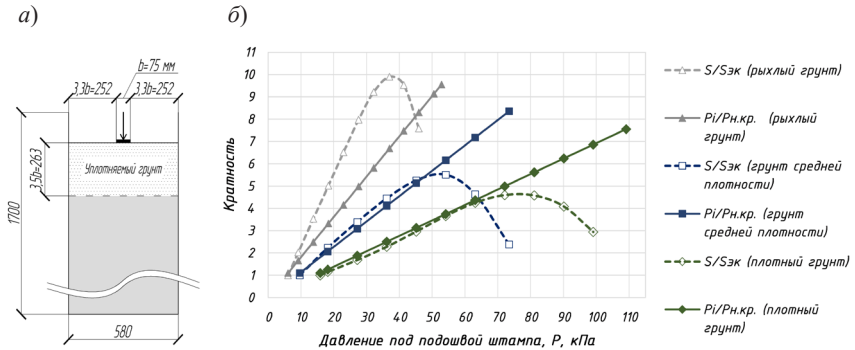


Рисунок 4 – а) Схема лотка; б) Зависимости $S/S_{эк}$ и $P_i/P_{н.кр.}$ для различных серий испытаний

На основе положительной корреляции рассмотрена зависимость $S/S_{эк} = f(P_i/P_{н.кр.})$ (рисунок 5) и её аппроксимация функцией $y = kx^n$. Установлено, что верхней границей допускаемой области нелинейной работы грунта является величина $\approx 0,6-0,7 \cdot P_{пр.}$ (« k_2 » в формуле 1).

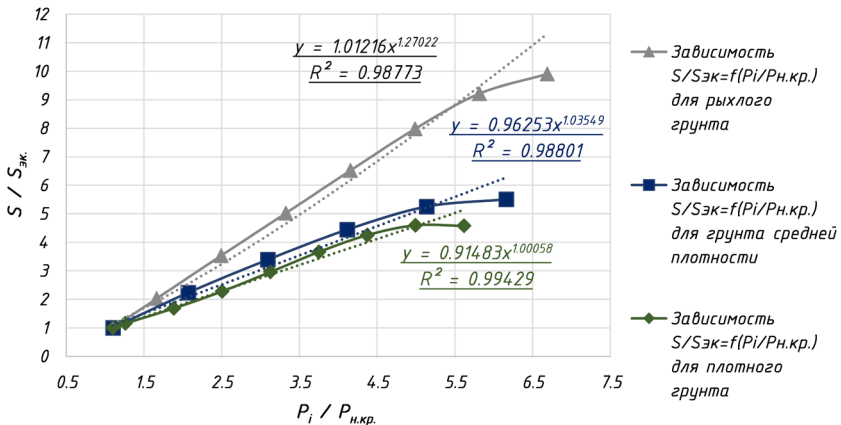


Рисунок 5 – Зависимость $S/S_{эк} = f(P_i/P_{н.кр.})$ и её аппроксимация функцией $y = kx^n$

Таким образом, уточненная функциональная зависимость (3) для определения размеров фундамента на основе детерминированной осадки при нелинейной работе грунта (с учетом введенных коэффициентов), зависящих от его плотности, примет вид:

$$S_3 = K_i \cdot \frac{1,1P_{н.кр.} \cdot \omega \cdot b \cdot (1-\mu^2)}{E_0} \cdot \frac{k \cdot \left(\frac{N_0}{\eta b^2} + d\gamma_{ср}\right)^n}{P_{н.кр.}^n}, \quad (6)$$

где $d, \gamma_{ср}, \eta$ – согласно общепринятым обозначениям;
 b – ширина подошвы фундамента, м;
 ω – коэффициент формы и жесткости фундамента;
 k, n – расчетные эмпирические коэффициенты, соответствующие плотности сложения грунта (для рыхлых грунтов 1,01; 1,27, для средней плотности – 0,96; 1,04, для плотных – 0,91; 1).

Четвертая глава посвящена представлению алгоритма, рекомендаций и программы для ЭВМ по применению разработанного метода.

Для использования разработанных решений необходимо установление взаимообусловленной связи между свойствами грунта, действующими нагрузками и размерами фундамента: назначение осадки осуществляется после ряда итераций, определяющих возможные размеры фундамента. Для упрощения расчетов оснований как вновь проектируемых, так и реконструируемых фундаментов по предлагаемому методу, разработаны рекомендации, алгоритм и соответствующая программа для ЭВМ на его основе. В кратком виде блок-схема представлена на рисунке 6. На основе блок-схемы разработана программа «BRNL-FT», прошедшая государственную регистрацию.

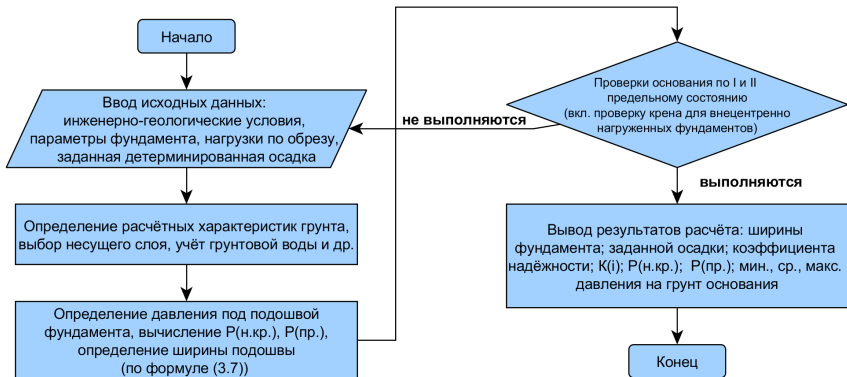


Рисунок 6 – Укрупненная блок-схема расчета по предлагаемому методу

В пятой главе выполнено сопоставление результатов расчетов по предлагаемому методу с численным моделированием, экспериментальными исследованиями и инженерными методами других авторов, а также оценен экономический эффект от применения предлагаемого метода.

Проведен сравнительный анализ расчетной осадки с инженерными методами С.С. Вялова и А.Л. Миндича, В.М. Кириллова, М.В. Малышева и Н.С. Никитиной, а также с численным моделированием в ПК Plaxis 3D (модель Мора-Кулона). Сопоставление основано на характеристиках грунта из экспериментальной части исследования. Результаты для плотного грунта (в качестве примера) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ расчетных осадок

Давление под подошвой, P_p , кПа	1,1	R	0,25	0,41	0,58	0,66	0,74	Ср. откл. от эксп., %
	$P_{н.кр.}$		$P_{пр.}$	$P_{пр.}$	$P_{пр.}$	$P_{пр.}$	$P_{пр.}$	
Эксперимент, S_p , мм	15,9	16	27,2	45,2	63,1	72,1	81,1	
Предлагаемый метод (расчет по «BRNL-FT»)	0,11	0,12	0,22	0,49	0,98	1,3	1,7	4,3
Отклон. от эксп., %	0,115	0,116	0,223	0,474	0,918	1,297	1,912	
Малышев М.В., Никитина Н.С.	4,5	3,4	1,4	3,4	6,8	0,2	12,5	4,5
Отклон. от эксп., %	–	0,115	0,222	0,473	0,918	1,302	1,932	
Вялов С.С., Миндич А.	–	4,3	0,9	3,6	6,8	0,2	13,6	16
Отклон. от эксп., %	–	0,135	0,26	0,554	1,075	1,525	2,263	
Кириллов В.М.	–	12,5	18,2	13,1	9,7	17,3	33,1	9,5
Отклон. от эксп., %	–	0,115	0,21	0,431	0,824	1,163	1,718	
Числ. моделирование	–	4,3	4,8	13,7	18,9	11,8	1,1	9
Отклон. от эксп., %	0,107	0,108	0,245	0,555	0,97	1,219	1,496	
Отклон. от эксп., %	2,8	11,1	11,4	13,3	1	6,6	13,6	

Отдельным вопросом является сопоставление расчетных осадок, полученных по рассматриваемому методу, и осадок, определенных в результате экспериментальных исследований других авторов и организаций (при нагружении основания до разрушения). В качестве примеров приводятся: испытание полутвердого суглинка на опытной площадке рядом с г. Екатеринбург (рисунок 7, а); испытания столбчатых фундаментов в песчаном грунте, проводившиеся Ж.-Л. Брийо (TAMU, Техас) – рисунок 7, б; масштабные изыскания на Васильевском острове (рисунок 8), выполненные ЛО ГПИ «Фундаментпроект» (г. Ленинград, 1965 г.).

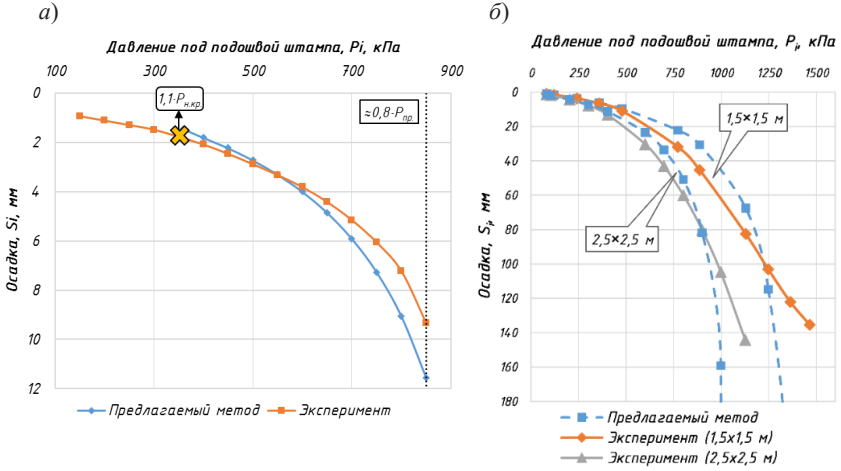


Рисунок 7 – $S = f(P)$ по предлагаемому методу и экспериментально:
 а) для полутвердого суглинка; б) для столбчатых фундаментов (1,5×1,5 м, 2,5×2,5 м)

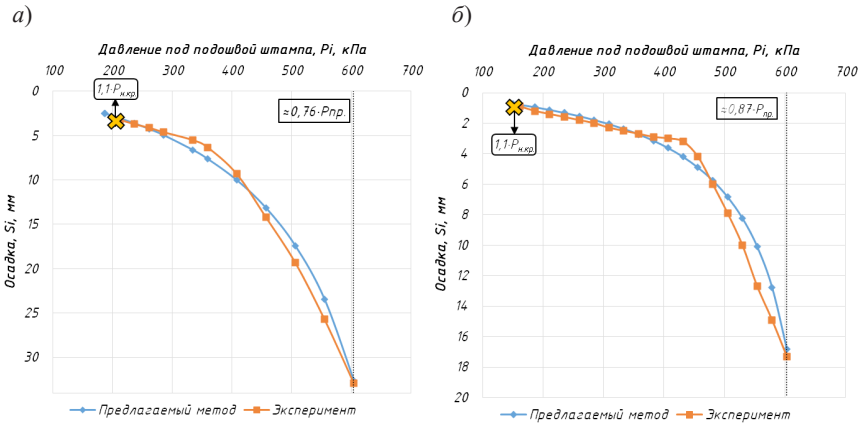


Рисунок 8 – $S = f(P)$ по предлагаемому методу и экспериментально:
 а) для текучего суглинка; б) для тугопластичного суглинка

В результате проведенной работы установлено:

- отклонение численного моделирования от всех серий эксперимента в среднем составило 15,5 % в интервале давления на грунт от $1,1 \cdot P_{н.кр}$ до $0,7 \cdot P_{пр}$;
- инженерные методы других авторов показывают следующие результаты при давлении от $1,1 \cdot P_{н.кр}$ до $\approx 0,7 \cdot P_{пр}$: при средней плотности грунта

отклонения составляют от 7,1 % до 28,6 %, при плотном грунте от 4,3 % до 16 %;

– среднее по ступеням нагружения отклонение осадки составило для песка пылеватого при давлении до $\approx 0,7 \cdot P_{\text{пр}}$ – 4,1%; для пылеватых супесей, до $\approx 0,44 - 0,6 \cdot P_{\text{пр}}$ – 5,9–12,7%; для полутвердых суглинков, до $\approx 0,8 \cdot P_{\text{пр}}$ – 8,2–13,5%; для твердой глины, до $\approx 0,7 \cdot P_{\text{пр}}$ – 4,7%; для текучепластичных суглинков, до $\approx 0,5 \cdot P_{\text{пр}}$ – 7,2–8,2%; для текучих суглинков, до $\approx 0,5 - 0,76 \cdot P_{\text{пр}}$ – 8,3–10,3%; для тугопластичного суглинка, до $\approx 0,87 \cdot P_{\text{пр}}$ – 13,9%;

– среднее отклонение расчетной осадки от экспериментальной для фундаментов с размерами 1,5×1,5 м, 2,5×2,5 м и 3×3 м составляет 13,7 % в диапазоне от $1,1 \cdot P_{\text{н.кр}}$ до $\approx 0,8 \cdot P_{\text{пр}}$;

– полученные отклонения в целом являются допустимыми для инженерного метода; они являются наименьшими среди других методов, что позволяет сделать вывод о его применимости.

Оценка экономического эффекта предлагаемого метода относительно нормативного основана на примере расчета основания фундамента эстакады для высокоскоростной железнодорожной магистрали. Сопоставляя размеры фундаментов, рассчитанные по предлагаемому методу и по методике СП 22.13330, установлен приведенный экономический эффект: среднее сокращение расхода бетона составило 35,2 %, арматуры – 15,8 %. Наибольший эффект достигается при наименьшем нормативно допускаемом значении γ_n или при детерминированной осадке, равной $0,75 - 0,8 \cdot S_{\text{пр}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан метод расчета основания фундаментов каркасных зданий, позволяющий обеспечить их механическую безопасность при взаимодействии несущих конструкций, обладающих существенной податливостью, и ограждающих, второстепенных конструкций с конечной жесткостью, которая достигается путем выравнивания осадок несущего каркаса.

2. Установлены границы применимости разработанного инженерного метода расчета основания фундаментов на одинаковую (детерминированную) осадку, учитывающего нелинейную работу основания. Границы представлены в виде следующего диапазона:

– учет нелинейного характера деформирования осуществлен с величины $1,1 \cdot P_{\text{н.кр}}$ («нижнее» условие), что обосновано введением шага приращения давления при возрастании зон пластических деформаций, равного $0,1 \cdot P_{\text{н.кр}}$. Это связано с точностью назначаемой расчетной осадки и с возможностью использования максимального количества детерминированных состояний грунта;

– на основе сравнительного анализа расчетных и экспериментальных осадок из различных испытаний принято «верхнее» условие, равное – в зависимости от вида грунта, $\approx 0,44-0,8 \cdot P_{пр}$.

3. Определены функциональные зависимости, полученные на основе экспериментальных исследований песчаного грунта, позволяющие при использовании детерминированной осадки учесть характер деформирования грунтов различной плотности сложения и адекватно их свойствам задать наклон кривой «осадка-давление» при проектировании или реконструкции фундаментов каркасных зданий.

4. На основе сравнительного анализа расчетных осадок, полученных по предлагаемому методу, результатов численного моделирования и расчетов по инженерным методам других авторов установлено, что отклонения являются удовлетворительными, составляющими в среднем до 15 %.

5. Показано, что среднее по ступеням нагружения отклонение расчетных и экспериментальных осадок из штамповых испытаний и испытаний фундаментов в полевых условиях, выполненных отечественными и зарубежными исследователями, составляет для песчаных грунтов до 4,1 % при давлении до $\approx 0,7 \cdot P_{пр}$, для глинистых, в зависимости от показателя текучести, в интервале давления $\approx 0,44-0,87 \cdot P_{пр}$ – 4,7–13,9 %. Полученные отклонения оцениваются как удовлетворительные, позволяющие сделать вывод о достоверности метода расчета и его достаточной точности в указанных диапазонах для ряда грунтов.

6. Введена дополнительная деформационная проверка для расчета внецентренно нагруженных фундаментов каркасных зданий с шарнирным опиранием балок и колонн по инженерному методу детерминированной осадки, заключающаяся в предотвращении возникновения предельного крена. Для его определения вводятся расчетные критерии, основанные на исключении растягивающих напряжений в грунте основания, на анализе взаимодействия надфундаментных и фундаментных конструкций. Предложенные решения следует рассматривать как дополнение к существующим нормативным ограничениям. Данные критерии могут быть также использованы при контроле наклонов колонн в рамках геотехнического мониторинга.

7. Разработаны рекомендации, алгоритм и программа для ЭВМ «BRNL-FT» для автоматизации расчетов, поскольку назначение осадки в ряде случаев осуществляется итерационно в аспекте определения функциональной взаимосвязи между свойствами грунтов, действующими нагрузками и размерами фундамента. Программа предназначена для расчетов оснований фундаментов проектируемых и реконструируемых зданий и сооружений на основе введенных критериев деформаций.

8. Определен экономический эффект разработанного метода относительно традиционного подхода (СП 22.13330), который составил на основе примера расчета: среднее (приведенное к 1 м^3) сокращение расхода бетона достигло 35,2 %, арматуры – 15,8 %. Сокращение материалоемкости зависит от степени «риска». Наибольший экономический эффект достигается при наименьшем нормативно допускаемом запасе надежности $\gamma_{n,ult} = 1,2$ или при назначаемой осадке, равной $0,7-0,8 \cdot S_{пр.}$.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ и приравненные к ним, в том числе публикации в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

1. Алексеев, С.И. Определение предельной величины крена фундамента в результате его взаимодействия с надфундаментной конструкцией / С.И. Алексеев, **С.О. Кондратьев** // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2017. – Т. 7. № 1. – С. 53–58.

2. Алексеев, С.И. Методика проектирования фундаментов на естественном основании по заданной осадке / С.И. Алексеев, **С.О. Кондратьев** // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 20. № 2. – С. 194–206.

3. Свид. **2017613015 Российская Федерация**. BRNL-FT – Проектирование внецентренно нагруженных фундаментов по заданной осадке : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / С.И. Алексеев, С.О. Кондратьев ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС (RU). – №2017610109; заявл. 10.01.2017; опубл. 07.03.2017, бюл. №3–2017. – 1 с.

4. Alekseev, S.I. Usage of the «BRNL-FT» program for foundation calculation using the method of the predefined equated soil settlements / S.I. Alekseev, **S.O. Kondratev** // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – pp. 126–132.

5. Ulitskiy, V. Experimental Evaluation of the Deformational Calculation Method of Foundations for Overpasses of High-Speed Railways / V. Ulitskiy, S. Alekseev, **S. Kondratev** // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 50 (2). – pp. 83–91.

Публикации в других изданиях

6. Кондратьев, С.О. Определение крена подпорной стены как критерия расчета по второму предельному состоянию / С.О. Кондратьев, С.И. Алексеев // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб., 2016. – С. 184–188.

7. Алексеев, С.И. Определение предельного крена ленточного фундамента на основе учёта его взаимодействия с надфундаментной конструкцией / С.И. Алексеев, **С.О. Кондратьев** // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений : сб. тр. Все-рос. науч.-техн. конф. по геотехнике. – СПб., 2017. – С. 83–87.

8. Улицкий, В.М. Использование программного комплекса «Buildcalc» как фактора обучения расчётам оснований и фундаментов по методу задаваемой осадки с оптимизацией проектных решений в программе «BRNL-FT» / В.М. Улицкий, С.И. Алексеев, **С.О. Кондратьев** // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке : сб. трудов XI Санкт-Петербургского конгресса / ФГБОУ ВО ПГУПС. – СПб., 2017. – С. 271–272.

9. Алексеев, С.И. Анализ экономической эффективности проектирования фундаментов мелкого заложения по заданной осадке / С.И. Алексеев, **С.О. Кондратьев** // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке : сб. трудов XII Санкт-Петербургского конгресса / ФГБОУ ВО ПГУПС. – СПб., 2018. – С. 17–18.

10. Кондратьев, С.О. Предотвращение возникновения неравномерных осадок фундаментов на естественном основании в результате их проектирования по заданной осадке / С.О. Кондратьев, С.И. Алексеев // Перспективы будущего в образовательном процессе : сборник тезисов национальной научно-технической конференции / ФГБОУ ВО ПГУПС. – СПб., 2018. – С. 114–116.

11. Кондратьев, С.О. Проектирование фундаментов мелкого заложения по заданной осадке для эстакад высокоскоростной железнодорожной магистрали / С.О. Кондратьев, С.И. Алексеев // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов LXXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб., 2018. – С. 39–43.

12. Алексеев, С.И. Методика автоматизированного инженерного расчёта фундаментов мелкого заложения при нелинейной работе основания (деформационный метод) / С.И. Алексеев, С.О. Кондратьев // Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга : сборник материалов внутрифакультетской научной конференции, посвященной 210-летию Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I и 155-летию кафедры «Здания». – СПб., 2019. – С. 5–10.

13. Kudryavtsev, S. Consideration of soil strata heterogeneity influence on differential foundation settlements of overpasses for high-speed railways / S. Kudryavtsev, V. Ulitskii, S. Alekseev and **S. Kondrat'ev** // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 265. – 02003.

14. Алексеев, С.И. Новый метод проектирования фундаментов опор эстакад высокоскоростной железнодорожной магистрали / С.И. Алексеев, **С.О. Кондратьев** // Прорывные технологии электрического транспорта : материалы Девятого Международного симпозиума «Элтранс-2017» («Eltrans-2017»), посвященного 130-летию основания Г.К. Мерчингом электротехнической школы в России. – СПб., 2019. – С. 10–17.

15. Кондратьев, С.О. Расчётный метод снижения неравномерности осадки фундаментов эстакад ВСМ / С.О. Кондратьев // Наука и образование транспорту. – 2019. – №2. – С. 145–149.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 28.01.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,34. Тираж 120 экз. Заказ 8.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.