

На правах рукописи



Дьяков Михаил Игоревич

Взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстром догрузении

2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Барыкин Борис Юрьевич

Официальные оппоненты: **Евтушенко Сергей Иванович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», кафедра «Информационных
систем, технологий и автоматизации в
строительстве», профессор
Купчикова Наталья Викторовна
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский университет
транспорта», кафедра «Строительные
конструкции, здания и сооружения»,
доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Южно-Российский
государственный политехнический
университет (НПИ) имени М.И.
Платова»

Защита состоится 26 марта 2025 г., в 15:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

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

Автореферат разослан «___» февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ Артюшенко Игорь Александрович

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время нормативный инженерный расчет отдельно стоящих фундаментов в Российской Федерации и ряде зарубежных стран выполняется при прямоугольной эпюре нормальных контактных напряжений в случае нагружения фундамента центральной нагрузкой либо трапециевидной эпюре – при внецентренной нагрузке. В значительном количестве исследований указывается на отличие реальной формы эпюры нормальных контактных напряжений от нормативной. Большинство исследователей сходятся во мнении о трансформации эпюры нормальных контактных напряжений в процессе нагружения от седловидной к параболической и стреловидной не только под гибкими, но и жесткими фундаментами. При этом не рассматривается возможность возникновения быстрых (внезапных) догрузений и их влияние на форму эпюры нормальных контактных напряжений и конструкцию фундамента.

Под быстрым (внезапным) догрузением в проведенных исследованиях понимается дополнительное нагружение фундаментов нагрузкой, скорость возрастания которого превышает скорость процесса перераспределения напряжений в основании от данного догружения, но не вызывает существенного динамического эффекта. Причины возникновения быстрых догрузений достаточно разнообразны. В условиях территорий со сложным рельефом местности Крыма и Кавказа они могут происходить вследствие развития склоновых и других экзогенных процессов в виде оползней, обрушений откосов грунта, селевых потоков и т.д. При реконструкции быстрые догружения связаны с пересадкой здания либо передачей части нагрузки на новые фундаменты. Быстрое догружение фундаментов происходит при повреждении колонны каркасного здания и в ряде других аварийных ситуаций.

Несмотря на распространенность возникновения быстрых догрузений в конструкциях зданий и сооружений, их влияние на взаимодействия фундаментов с основанием остается практически не изученным. Быстрые догружения фундаментов не учитываются в нормативных документах, в методиках определения эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента и расчетных моделях силового сопротивления фундаментов, в расчете зданий на прогрессирующее обрушение. В научных публикациях отсутствуют предложения по учету быстрого догружения фундаментов в расчетных моделях основания и методике расчета фундаментов, что определяет актуальность научных исследований по данной тематике.

Степень разработанности темы исследований. Исследования таких ученых, как: В.П. Дыба, О.В. Евдокимцев, С.И. Евтушенко, В.В. Ильичёв, К.С. Какенеов, В.В. Леденев, Н.Н. Маслов, Ю.Н. Мурзенко, А.И. Полищук, Г.М. Скибин, А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Н.Я. Хархута и многих других авторов показали, что характер внешней нагрузки и особенности ее приложения оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние грунтового основания, взаимодействие фундаментов с грунтом.

Вместе с тем, многие эксперименты проводились штампами либо на лабораторном оборудовании. Влияние быстрого (внезапного) догружения на силовое взаимодействие фундаментов с основанием практически не изучалось.

Цель диссертационного исследования: разработка методики расчета проектируемых и подлежащих проверке отдельно стоящих фундаментов в условиях прогнозируемой возможности возникновения внезапного быстрого догружения.

Задачи исследования, определенные для достижения цели:

1. Дать анализ современного состояния исследований в области: работы грунтового основания отдельно стоящих фундаментов; взаимодействия фундаментов с основанием при различных видах и характерах нагружений; влияния скорости нагружения на характеристики грунта.

2. Провести экспериментальные исследования взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстром догружении от эксплуатационной нагрузки различного уровня.

3. Выявить особенности изменения напряженно-деформированного состояния грунтового основания при быстром догружении и его влияние на подошву отдельно стоящего фундамента.

4. Выбрать и доработать модель грунтового основания для рассматриваемых условий взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстром догружении.

5. Разработать алгоритм и методику определения эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой отдельно стоящих фундаментов при воздействии быстрого догружения.

6. Разработать алгоритм и методику расчета отдельно стоящих фундаментов с учетом изменения эпюры нормальных контактных напряжений при быстром догружении.

Объектом исследования являются отдельно стоящие фундаменты на грунтовом основании.

Предмет исследования – изменение параметров силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым основанием при быстром догружении.

Научная новизна работы состоит в уточнении расчетной модели силового сопротивления отдельно стоящих фундаментов, учитывающей увеличение краевых нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента при быстром (внезапном) догружении, а именно:

– выявленных особенностях силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстрых догружениях, основными из которых являются: изменение формы эпюры нормальных контактных напряжений с относительным увеличением ординат под краевой зоной подошвы и уменьшением под центральной частью; изменение характера и величины осадки; увеличение воздействия реактивного отпора грунта на фундамент по мере увеличения разницы между уровнем эксплуатационной нагрузки и уровнем

быстрого догружения, что требует учета при расчете фундаментов, в процессе работы которых прогнозируется возможность быстрого догружения;

- развитию модели грунтового основания Фусса-Винклера для применения в условиях возникновения быстрого догружения отдельно стоящих фундаментов, включающее разные коэффициенты постели по площади подошвы фундаментов, изменяющиеся с увеличением уровня нагруженности основания, которые учитывают: развитие пластических деформаций под краевыми зонами подошвы, формирование уплотненного ядра под центральной частью подошвы – при эксплуатационной нагрузке; замедление развития пластических деформаций в грунте под краевыми зонами подошвы и процесса формирования уплотненного ядра под средней частью подошвы – при быстром догружении;

- разработке алгоритма и методики расчета эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой отдельно стоящего фундамента при быстром догружении, предусматривающих последовательное определение эпюры нормальных контактных напряжений при эксплуатационной нагрузке и дополнительной эпюры нормальных контактных напряжений при быстром догружении, учитывающей эпюру эксплуатационной нагрузки, суммирование эпюр;

- разработке алгоритма расчета прочности проектируемых и подлежащих проверке отдельно стоящих фундаментов в условиях прогнозируемой возможности быстрого догружения, учитывающего изменение эпюры нормальных контактных напряжений в зависимости от истории нагружений и предусматривающего определение изгибающего момента в фундаменте отдельно от составляющих объема эпюры эксплуатационной нагрузки и нагрузки быстрого догружения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в том, что:

- выявлена закономерность изменения силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстром догружении;

- разработан алгоритм и методика определения эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой отдельно стоящих фундаментов при воздействии быстрого догружения на основании усовершенствованной модели Фусса-Винклера.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики расчета отдельно стоящих фундаментов при воздействии быстрого догружения, позволяющей использовать ее:

- при проектировании отдельно стоящих фундаментов в условиях прогнозируемой возможности возникновения быстрого догружения;

- при проектировании реконструкции зданий с пересадкой на новые фундаменты для уточнения их параметров;

- при расчетной оценке состояния основания и фундаментов, оценке риска разрушения фундаментов на объектах, подверженных воздействию быстрых догружений, в том числе связанных с экзогенными процессами, запредельными нагрузками и т.д.

Методология и методы исследования. Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, использовались следующие научные методы исследования: экспериментальный метод с испытанием железобетонных и металлических моделей фундаментов на песчаном основании, методы физического и математического моделирования, расчетно-аналитический метод, методы анализа, синтеза и сравнения и др.

Положения, выносимые на защиту:

– Результаты экспериментальных исследований и выявленные особенности силового взаимодействия фундаментов с грунтовым основанием при быстром догружении.

– Усовершенствованная модель грунтового основания Фусса-Винклера для применения в условиях возникновения быстрого догружения.

– Алгоритм и методика расчета эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента при быстром догружении.

– Алгоритм и методика расчета проектируемых и подлежащих проверке отдельно стоящих фундаментов в условиях прогнозируемой возможности быстрого догружения.

Степень достоверности результатов. Для обеспечения достоверности полученных в работе результатов применялись апробированные и основанные на нормативных подходах методики экспериментальных исследований, экспериментальные исследования выполнены в достаточном для анализа и статистической обработки объеме, в процессе формирования алгоритмов и методики расчета использовались методы теории механики грунтов. Результаты расчета в разработанных методиках показали хорошую сходимость с опытными данными.

Апробация результатов исследований. В полном объеме работа была доложена и одобрена на объединенном заседании кафедр «Геотехники и конструктивных элементов зданий», «Строительных конструкций», «Строительного инжиниринга и материаловедения», «Технологии, организации и управления строительством» института «Академия строительства и архитектуры федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» 10.06.2024 г.

Результаты исследований доложены и обсуждены на таких международных научных и научно-практических конференциях, как:

– III Международная научно-техническая конференция «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (САТРИД-2020), 28-30 сентября 2020, г Нальчик.

– V Международная научно-практическая конференция «Методология безопасности среды жизнедеятельности», Республика Крым, г. Симферополь, 03-07 октября 2022 г.

– VI Международная научно-практическая конференция «Методология безопасности среды жизнедеятельности», Республика Крым, Симферополь, 04-06 октября 2023 г.

– Научно-техническая конференция: «Современные методы проектирования, подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов», посвященная 90-летию кафедры геотехники СПбГАСУ, Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 23-25 октября 2024 г.

Внедрение результатов исследования. Результаты исследования внедрены: при расчете конструкции усиления поврежденного многоэтажного каркасного здания служебно-бытового блока Курской АЭС, предусматривающей переопирание колонн крайнего ряда каркаса здания на дополнительный независимый ленточный фундамент (произведен проверочный расчет вновь устраиваемого фундамента на быстрое догружение эксплуатационными нагрузками); при расчетной оценке фундаментов многоэтажного здания компанией ООО «Гранд Конструктив» в условиях быстрого увеличения нагрузок на колонны здания в процессе монтажа металлической конструкции мостового перехода и при въезде автомобиля на мостовое сооружение; при разработке ООО «ЮгИнжПроект» проектных решений по усилению фундаментов здания гражданского назначения для расчетного уточнения параметров дополнительных фундаментов, устраиваемых взамен поврежденных; компанией ООО «Стройэксперт» при расчете несущей способности фундаментов с учетом дополнительных быстро возрастающих нагрузок при монтаже на перекрытие реконструируемого каркасного здания инженерного оборудования, обладающего значительным весом; при оценке состояния основания и фундаментов в рамках разработки ООО КрымСтройИндастриал» проекта реконструкции многоэтажного каркасного здания с перепрофилированием под складское здание; в практические и лекционные занятия курса «Специальные вопросы проектирования оснований и фундаментов», читаемого по программе подготовки магистров направления 08.04.01 «Строительство» магистерская программа «Геостойкое строительство зданий и сооружений».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (173 наименования) и трех приложений. Общий объем работы составляет 190 печатных страниц, включая 70 рисунков, 6 таблиц и 3 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность темы, степень ее разработанности, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе рассмотрены и проанализированы результаты исследования работы грунта и взаимодействия фундаментов с основанием при различных видах нагружения. Проведен обзор работ, затрагивающих влияние на характеристики грунта фактора скорости в нагружении. Рассмотрено

современное состояние исследований в области воздействия на фундаменты и основание динамических, малоцикловых нагрузок, влияния на работу фундаментов и основания процессов дилатансии и фрикционных автоколебаний.

Значительный вклад в изучение взаимодействия фундаментов с основанием при различных видах нагрузений внесли такие ученые, как: М.Ю. Абелев, А.В. Вронский, А.А. Бартоломей, В.Г. Березанцев, А.Н. Богомолов, Ю.В. Галашев, Х.Г. Гафуров, Н.М. Герсеванов, А.В. Голли, М.Н. Гольдштейн, А.Л. Гольфред, Д.А. Гохфельд, В.Л. Дедов, Б.И. Далматов, С.В. Довнарлович, И.М. Дорошкевич, В.П. Дыба, О.В. Евдокимцев, С.И. Евтушенко, М.В. Егоров, Ю.К. Зарецкий, Р.С. Зиангиров, В.А. Ильиных, В.В. Ильичёв, А. Казагранде, М.Т. Кенесбаев, С.Н. Клепиков, П.А. Коновалов, Е.Н. Курбацкий, С.Г. Кушнер, Г.Е. Лазебник, В.В. Леденев, Май Дык Минь, Н.Н. Маслов, Ю.Н. Мурзенко, А.И. Полищук, А.В. Прокопенко, Л.Н. Рассказов, О.А. Савинов, Е.А. Сорочан, Г.М. Скибин, А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Р. Уайтман, В.М. Улицкий, В.И. Феклин, В.А. Флорин, Р.Р. Хасанов, А.А. Цесарский, В. Шанон, В.Г. Шаповал, В.Б. Швец, В.П. Шумовский, С.И. Яковлев и др. Вместе с тем вопросы быстрого (внезапного) догружения в их исследованиях и исследованиях других авторов не затрагиваются.

В работах таких ученых, как: А.С. Везис, А.Н. Драновский, А.И. Латыпов, М.С. Савкин, В.С. Федоров, В.А. Коронатова, Е.К. Юдин, В.В. Леденев, В.Г. Однолько, З.Х. Нгуен, С.Ф. Маклаков, В.А. Мишин, Н.Н. Маслов, О.А. Савинов, А. Казагранде, В. Шанон, Р. Уайтман, Н.Я. Хархута, Г.В. Рыков, А.М. Скобеев, Л.Ф. Сиразиев, М.Г. Скибин, К.С. Какенеов и др. в том или ином аспекте исследовано влияние фактора времени на физико-механические и прочностные характеристики грунта, осадку штампа, и т.д. в том числе при кратковременном нагружении. При этом данные исследования не направлены на решение задачи выявления особенностей силового взаимодействия фундаментов с основанием при быстром догружении с последующим формированием методики расчета фундаментов.

Во второй главе определены направления экспериментальных исследований и факторы, требующие изучения для оценки их влияния на силовое взаимодействие фундаментов с грунтовым основанием при быстрых догружениях. Осуществлено планирование и разработана методика экспериментов. Приняты параметры опытных моделей фундаментов, подобрано силовое и измерительное оборудование. Назначены режимы испытаний.

Исследования проводили в грунтовом лотке размерами 2,2x2,2x2,2 м, заполненном песком средней крупности. Испытано 11 моделей железобетонных фундаментов размерами в плане 0,5x0,5 м с толщиной плиты 7,0...8,2 см; 5 моделей железобетонных фундаментов размерами в плане 0,5x0,4 м с толщиной плиты 7,0 и 8,2 см. Также проведено 12 экспериментов с металлической моделью размерами в плане 0,425x0,425 м.

Испытания железобетонных моделей фундаментов проводили до разрушения с традиционным (медленным) нагружением, а также быстрым

догрузением после предварительного медленного нагружения уровнями 25, 50 и 75% от расчетной разрушающей нагрузки. Испытания металлических моделей выполняли до заданной нагрузки с учетом несущей способности основания. Скорость нагружения в экспериментах составляла 0,1...1,0 МПа/мин.

Железобетонные модели фундаментов использовались для выявления влияния быстрого нагружения на несущую способность, осадку фундаментов, эпюру нормальных контактных напряжений. Особенности трансформации эпюры нормальных контактных напряжений до, во время и после быстрого догружения исследовали с применением металлических моделей.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым основанием при быстрых догружениях.

Все опытные модели железобетонных фундаментов разрушились от изгиба по нормальным сечениям. При этом наблюдалось снижение уровня разрушающей нагрузки при наличии быстрого догружения на 14,7 – 24,8% относительно моделей, испытанных при традиционном медленном нагружении (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры железобетонных квадратных в плане моделей фундаментов и характеристики их несущей способности

№ модели	Размеры в плане, высота плитной части, см	Расчетная нормативная несущая способность фундаментов на изгиб $R_{пз}$, кН	Уровень предварительного медленного нагружения (кН)	Наличие быстрого догружения	Опытная несущая способность, P_i (кН)	$P_i/P_{пз}$	Снижение несущей способности относительно условного базового фундамента (%)
1-я серия экспериментов							
Ф-1	50x50x7	35,4	-	нет	40,00	1,13	-
Ф-2	50x50x7	35,4	15,0	есть	35,00	0,99	12,5
Ф-3	50x50x7	35,4	21,0	есть	36,00	1,02	10,0
Ф-4	50x50x7	35,4	15,0***	нет	48,00	1,36	-
Ф-5	50x50x7	35,4	15,0***	есть	39,00	1,10	18,8
2-я серия экспериментов							
Ф-2.1	40x50x7	47,6	36	да	48,0	1,01	21,7
Ф-2.2	40x50x8	55,8	48	да	54,1	0,97	24,8
Ф-2.3	40x50x8	57,4	4	да	63,6	1,1	14,7
Ф-2.4	40x50x8	55,8	-	нет	75,0	1,34	-
Ф-2.5	40x50x8	55,8	-	нет	72,0	1,29	-
3-я серия экспериментов							
Ф-3.1	50x50x7	23,85	-	нет	61,0	2,56	-
Ф-3.2	50x50x8	27,96	18,3	да	55,0	1,96	20,5
Ф-3.3	50x50x8,2	28,77	7,32	да	59,0	2,05	16,8
Ф-3.4	50x50x8	27,88	-	нет	66,0	2,37	-
Ф-3.5	50x50x8	27,88	28,9	да	56,0	2,01	18,4
Ф-3.6	50x50x7,6	26,35	26,7	да	51,0	1,93	21,7

Разница в разрушающей нагрузке увеличивалась при более высоком уровне нагруженности основания (модели серии 2 и 3). Изучение характера разрушения фундаментов не выявило каких-либо специфических особенностей при наличии быстрого догружения.

Существенное влияние быстрое догружение оказывало на осадку фундаментов, что прослеживается как на графиках абсолютной осадки (рисунок 1), так и графиках относительного приращения осадки (рисунок 2). На момент разрушения железобетонных моделей, осадка у большинства образцов была меньше, чем осадка аналогичных образцов, испытанных при традиционном медленном нагружении (рисунок 1). Наибольшее снижение осадки наблюдалась в образцах Ф-2.3 и Ф-3.3, быстрое догружение которых осуществлялась при наименьшем уровне медленного нагружения. Сниженная величина осадки при быстром догружении объясняется запаздыванием развития пластических деформаций в грунте относительно роста внешней нагрузки, а также отсутствием силового равновесия между внешней нагрузкой и опорной реакцией грунта на момент разрушения фундамента.

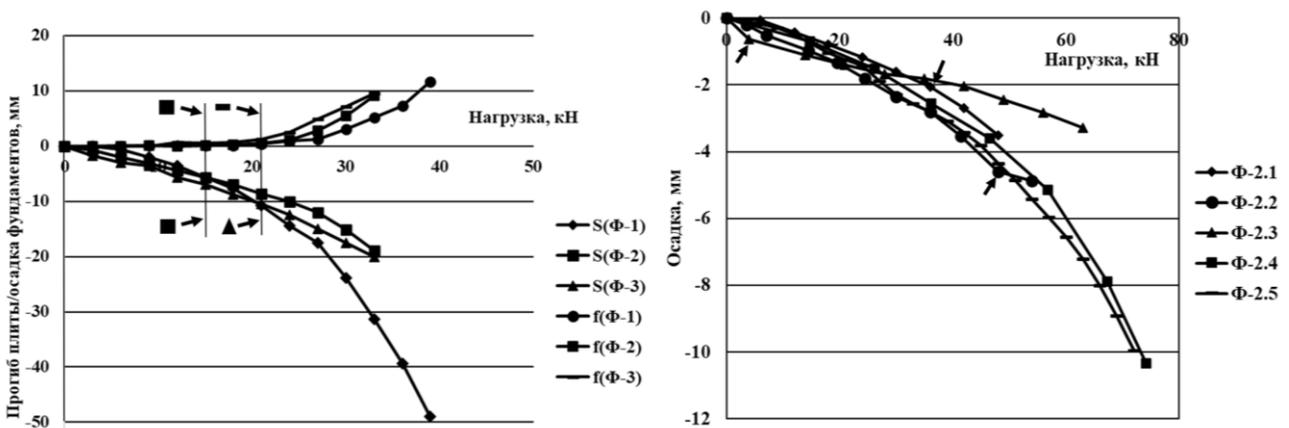


Рисунок 1 – Прогибы и осадка фундаментов 1 и 2 серии (стрелками показано начало быстрого догружения)

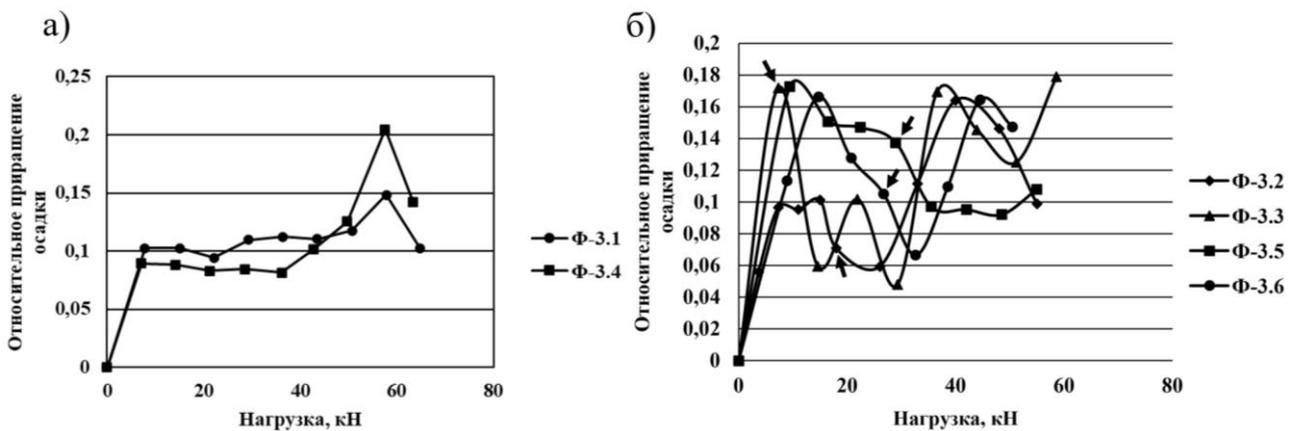


Рисунок 2 – Относительное приращение осадки фундаментов 3 серии: а) при медленном нагружении; б) при нагружении с быстрым догружением (стрелками показано начало быстрого догружения)

Приращение осадки железобетонных моделей во время быстрого догружения носили волнообразный характер изменения в отличие от более равномерного приращения осадки у моделей с медленным нагружением (рисунок 2, б). Это объясняется развитием фрикционных автоколебаний системы «фундамент-грунт» и циклическим характером процесса дилатансии грунта у краевых зон подошвы фундаментов в виде циклов «уплотнение-разуплотнение». После стабилизации нагрузки быстрого догружения осадка металлических моделей полностью затухала в течении 10-15 минут. При этом наиболее интенсивные изменения происходили в первые 5-6 минут.

Форма эпюры нормальных контактных напряжений в центральных сечениях перед началом быстрого догружения была близка к параболической как у железобетонных, так и металлических моделей (рисунок 3, 4). После быстрого догружения нормальные контактные напряжения у краевых зон подошвы металлических моделей имели более высокие значения относительно образцов, испытанных при традиционном медленном нагружении, а у центральных зон – более низкие (рисунок 5). При этом образцы, начало быстрого догружения которых стартвало с более низкого уровня нагрузки медленного нагружения, после догружения имели менее перераспределенную эпюру нормальных контактных напряжений и соответственно более высокие краевые ординаты эпюры.

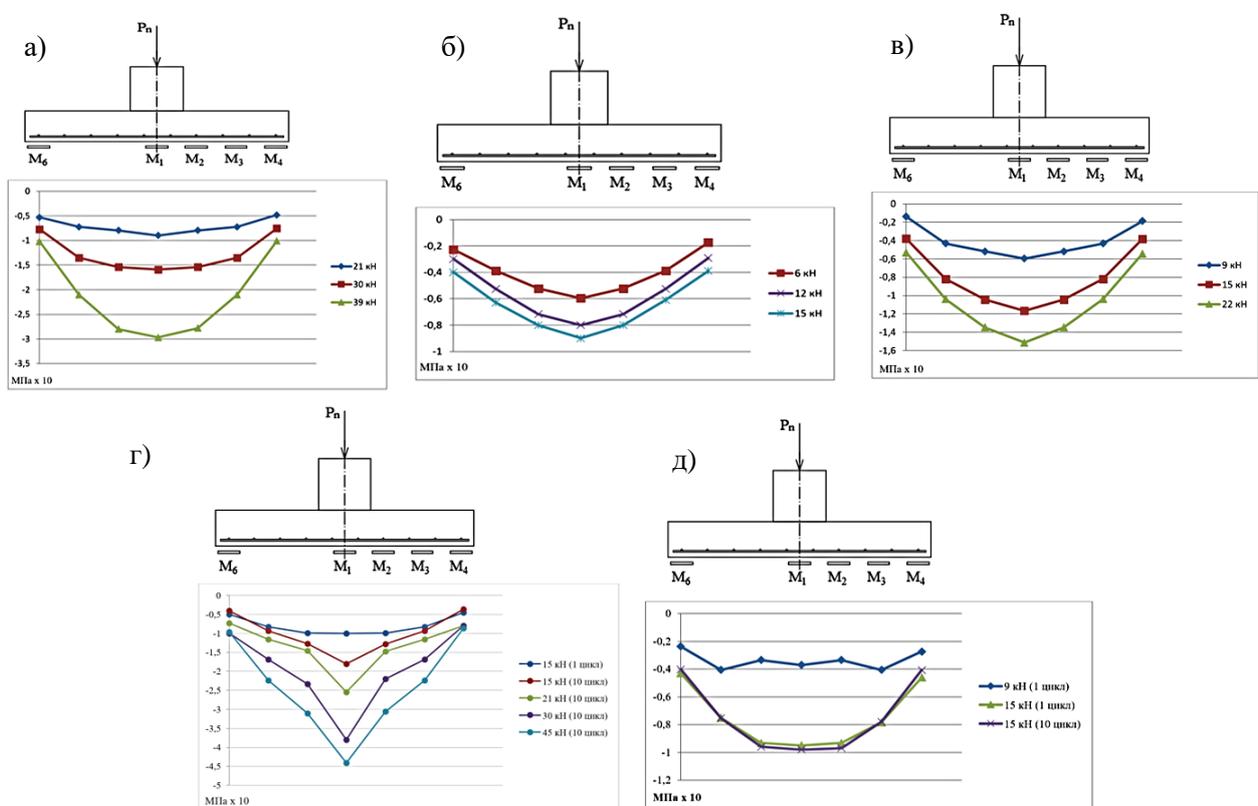


Рисунок 3 – Эпюры нормальных контактных напряжений при медленном нагружении под подошвой железобетонных фундаментов: а) Ф-1; б) Ф-2; в) Ф-3; г) Ф-4; д) Ф-5

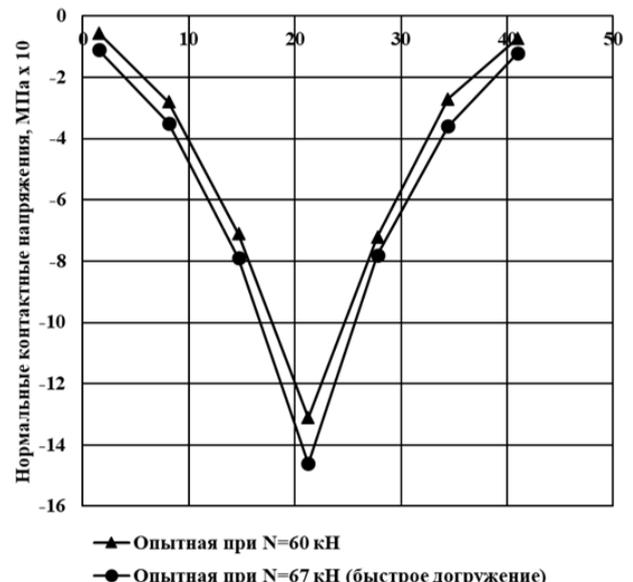
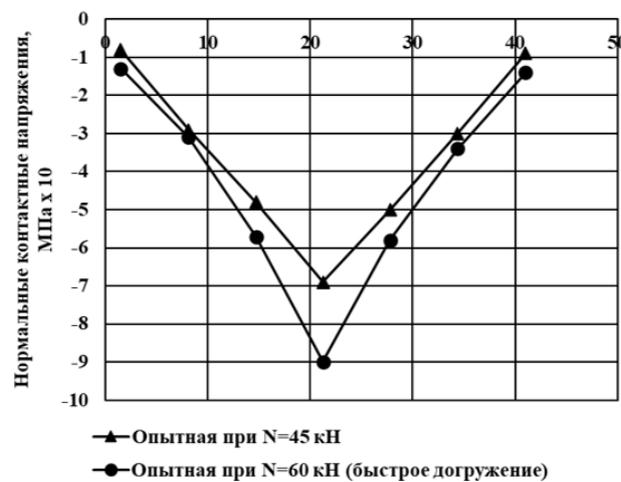
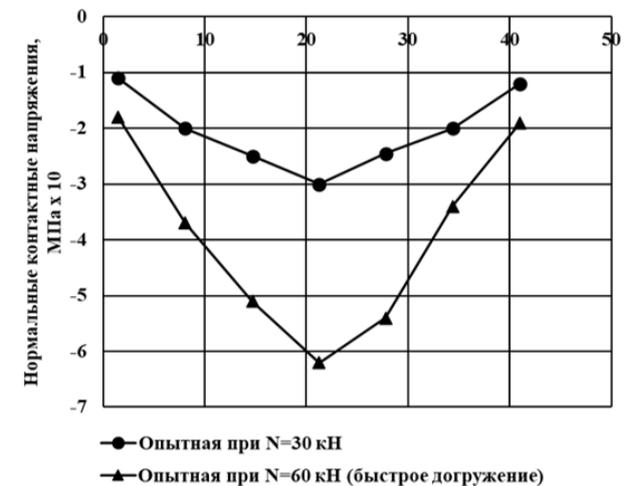
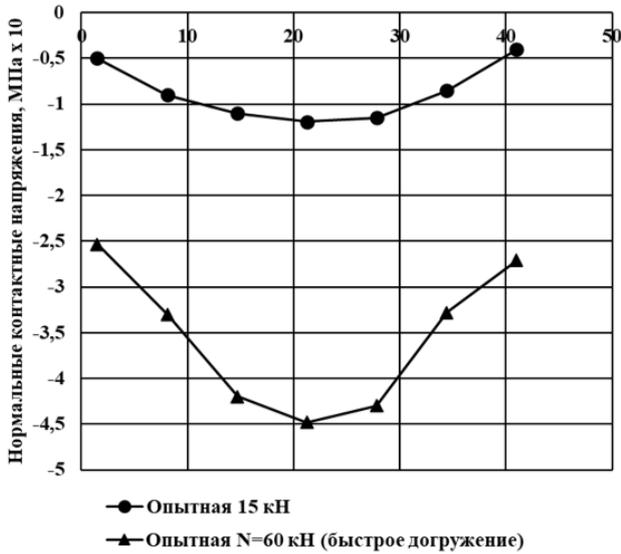
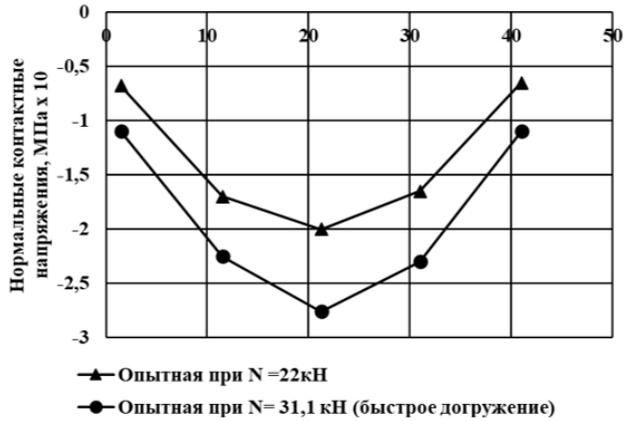
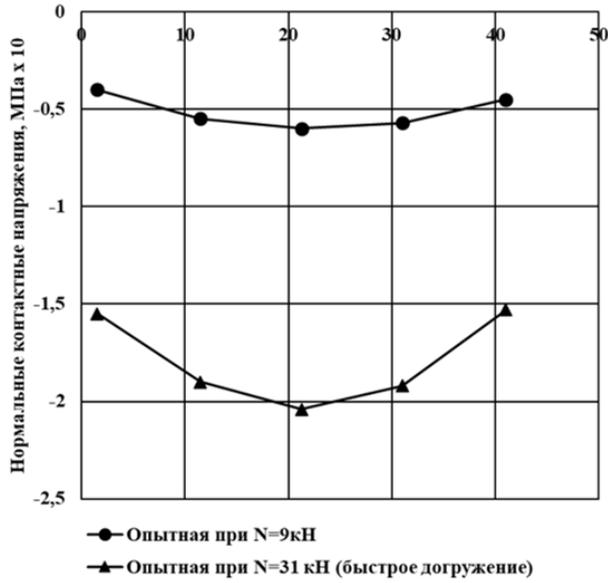


Рисунок 4 – Эпюры нормальных контактных напряжений под металлическими штампами до начала быстрого догружения и после

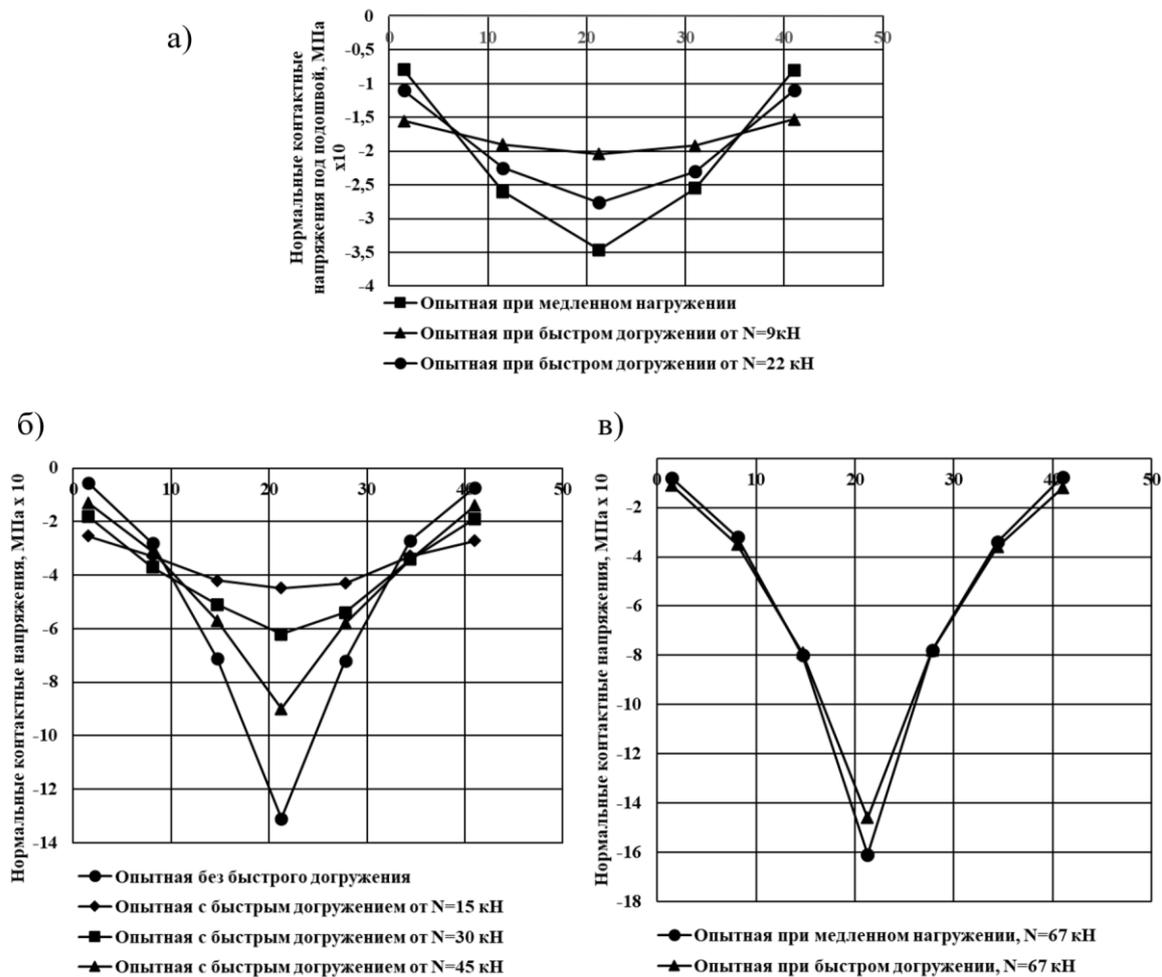


Рисунок 5 – Сравнение эпюры нормальных контактных напряжений под металлическими моделями фундаментов: при догружении а) до 31 кН, б) до 60 кН, в) до 67 кН

После стабилизации внешней нагрузки быстрого догружения под краевой зоной подошвы наблюдался непродолжительный во времени рост напряжений, после чего они стабилизировались либо незначительно снижались (рисунок 6). Нормальные контактные напряжения под центральной частью подошвы фундамента после фиксации нагрузки быстрого догружения возрастали в течении более длительного времени, составлявшего 5-6 минут. С увеличением степени нагруженности основания величина прироста нормальных контактных напряжений под центральной частью подошвы после фиксации нагрузки быстрого догружения была больше, а зона прироста - шире. При этом изменение контактных напряжений во времени и по характеру изменения совпадало с изменением осадки образцов.

В экспериментах с медленным нагружением прирост контактных напряжений и осадки моделей после стабилизации нагрузки каждой ступени проявлялся лишь при высокой степени нагруженности основания и имел существенно меньшие значения, чем при наличии быстрого догружения.

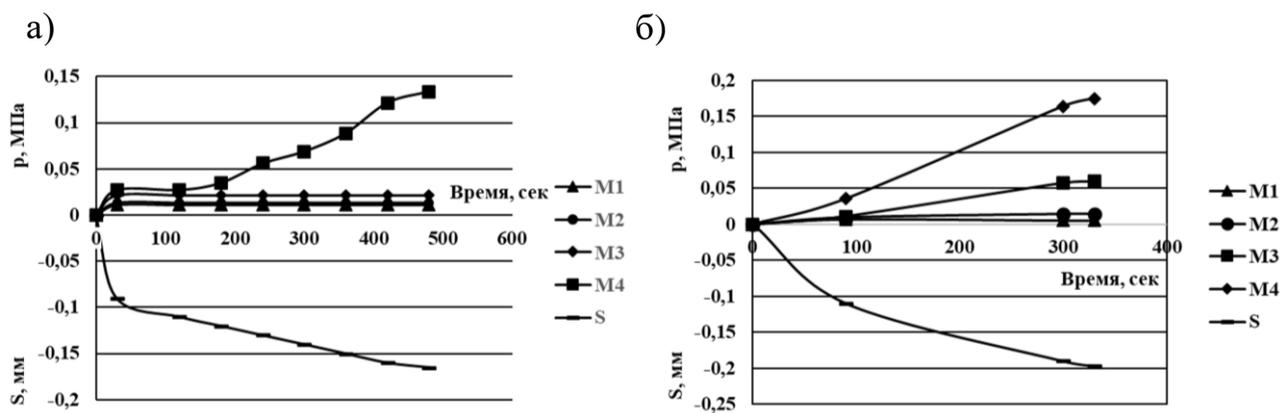


Рисунок 6 – Прирост нормальных контактных напряжений во времени под металлическим фундаментом после быстрого догружения (размещение месдоз M1...M4 в соответствии с рисунком 3): а – после быстрого догружения с 15 кН до 60 кН; б – то же с 60 до 67,3 кН

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить, что основными причинами более высокого уровня нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы фундамента на момент фиксации внешней нагрузки быстрого догружения относительно уровня напряжений при медленном нагружении при одинаковой внешней нагрузке являются: кратковременное увеличение прочности грунта на сдвиг, более низкая скорость развития сдвиговых и пластических деформаций относительно скорости догружения, развитие процесса дилатансии. Косвенно возможность влияния дилатансии на краевые контактные напряжения подтверждается в ряде работ.

Более высокий уровень нормальных контактных напряжений у краевой зоны подошвы фундамента, формирующий более высокие значения изгибающего момента в центральных сечениях подошвы, является основной причиной снижения несущей способности фундамента на изгиб при быстром догружении.

В четвертой главе разработана модель расчетного определения нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента при медленном нагружении и быстром догружении. Она представляет собой усовершенствованную модель Фусса-Винклера с переменным по площади подошвы коэффициентом жесткости основания, изменяющимся в зависимости от уровня медленного нагружения и уровня нагруженности основания при медленном нагружении и быстром догружении.

При разработке модели были приняты следующие допущения и упрощения:

1. Границами применимости разработанной методики является скорость быстрого догружения 0,01...3,00 МПа.

2. Основой для построения эпюры на стадии быстрого догружения является эпюра, перераспределенная на стадии медленного нагружения. При этом стартовая эпюра учитывает развитие пластических и сдвиговых деформаций под краевыми зонами подошвы, формирование уплотненного ядра

грунта под центральной частью подошвы. При уточненном расчете возможен учет изгиба плиты фундамента и образование нормальных трещин.

3. При быстром догрузении происходит более интенсивный рост краевых контактных напряжений относительно медленного нагружения, что связано с замедлением процесса развития пластических деформаций, кратковременным увеличением прочности грунта на сдвиг, возможным проявлением процесса дилатансии и фрикционных автоколебаний.

4. Под центральной частью подошвы фундамента при быстром догрузении происходит торможение роста нормальных контактных напряжений, что связано с относительным возрастанием напряжений под краевыми зонами подошвы, снижением осадки фундамента.

Итоговая расчетная эпюра нормальных контактных напряжений представляет собой сумму эпюры, сформировавшейся при медленном нагружении, и дополнительной эпюры быстрого догрузения.

На стадии медленного (эксплуатационного) нагружения:

В точке 1 нормальные контактные напряжения определяются с использованием коэффициента жесткости основания K_1 , возрастающего с увеличением степени нагруженности основания (рисунок 7). Коэффициент может учитывать наличие малоцикловых нагружений и других факторов, ускоряющих формирование упругого уплотненного ядра.

$$p_1 = K_1 \times S \quad (1)$$

$$K_1 = K \times k_5^{\left(\frac{p_{ср}}{R_0}\right)} \quad (2)$$

В точке 2 нормальные контактные напряжения определяются с учетом постоянного коэффициента жесткости основания K , определенного для рассматриваемого грунта. Напряжение здесь равно средним напряжениям.

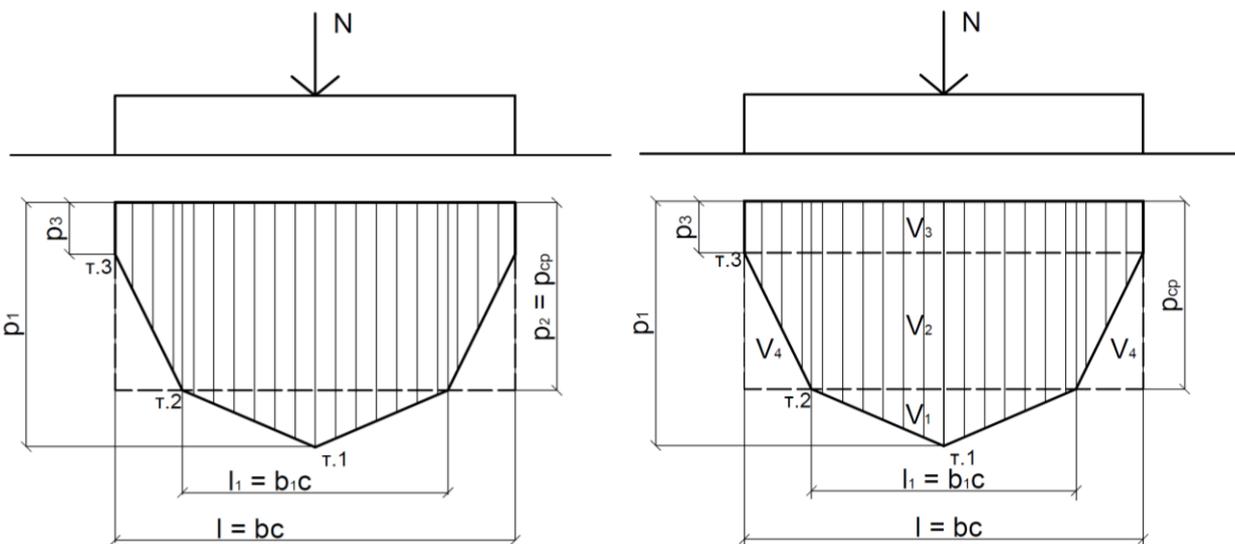


Рисунок 7 – Схемы к определению эпюры нормальных контактных напряжений при медленном нагружении

$$p_2 = K \times S \quad (3)$$

В точке 3 нормальные контактные напряжения вычисляются с учетом уменьшающегося от степени нагруженности основания коэффициента жесткости основания K_3 . Коэффициент может учитывать факторы, снижающие процесс развития пластических деформаций, например, заглубление фундамента, армирование основания и т.д.

$$p_3 = K_3 \times S \quad (4)$$

$$K_3 = K \times k_6^{\left(\frac{p_{cp}}{R_0}\right)} \quad (5)$$

Расстояние l_1 и b_1 определяется из условия равенства суммы объемов V_1 и V_4 .

Осадка всех точек подошвы фундамента при отсутствии учета прогиба плиты и образования в ней трещин принята одинаковой. Условную осадку определяем из равенства объема эпюры нормальных контактных напряжений внешней нагрузке.

$$V_1 + V_2 + V_3 = N \quad (6)$$

$$S = \frac{3 \times N}{(3 \times b^2 \times K_3 + (K - K_3) \times (b_1^2 + b^2 + b \times b_1) + (K_1 - K) \times b_1^2) \times c} \quad (7)$$

На стадии быстрого догружения определяется дополнительная эпюра нормальных контактных напряжений (рисунок 8).

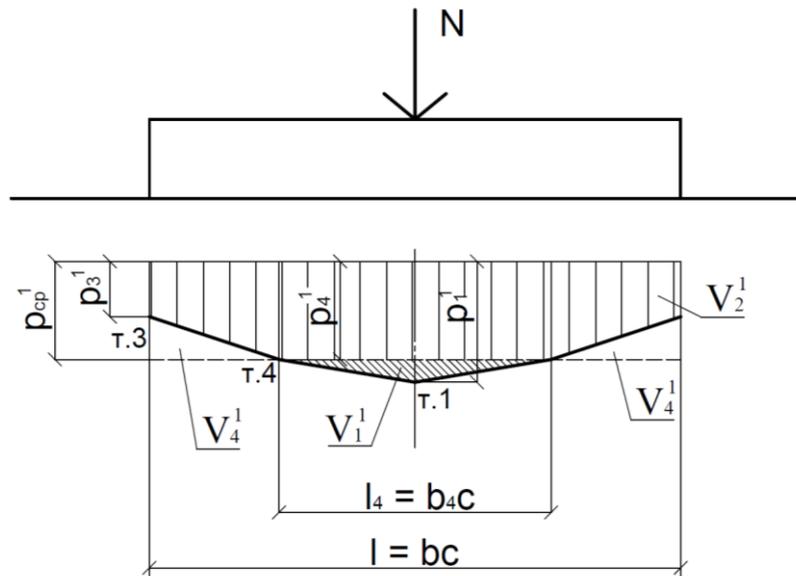


Рисунок 8 – Дополнительная эпюра нормальных контактных напряжений при быстром догружении

$$K_1^1 = K_1 \times a_1 \quad (9)$$

В точке 1 дополнительные напряжения определяются с учетом повышенного коэффициента жесткости основания K_1^1 , учитывающего влияние быстрого догружения основания.

$$p_1^1 = K_1^1 \times S^1 \quad (8)$$

Коэффициент определяется в зависимости от уровня медленного нагружения, предшествовавшего быстрому догружению, учтенному в K_1 , и изменения характера работы грунта при быстром догружении введением коэффициента a_1 .

В точке 4 дополнительные нормальные контактные напряжения при быстром догружении определяются с учетом коэффициента жесткости основания K , определенного для рассматриваемого грунта.

$$p_4^1 = K \times S^1 \quad (10)$$

В точке 3 дополнительные нормальные контактные напряжения определяются с учетом коэффициента жесткости основания K_3^1 .

$$p_3^1 = K_3^1 \times S^1 \quad (11)$$

Величина коэффициента K_3^1 рассчитывается с использованием коэффициента K_3 , достигнутого при медленном нагружении и коэффициентов a_2 и a_3 , определяющих замедление снижения коэффициента жесткости основания при быстром догружении.

$$K_3^1 = K_3 + (K - K_3) \times a_2 \times a_3 \quad (12),$$

Коэффициент a_2 учитывает изменение коэффициента жесткости основания, связанное с замедлением развития пластических деформаций в основании при быстром догружении.

$$a_2 = 0,3 \left(\frac{p_{\text{ср}}^1}{R_0} \right) \quad (13)$$

где: $p_{\text{ср}}^1$ – среднее давление под подошвой фундамента на момент максимальной нагрузки быстрого догружения

$$p_{\text{ср}}^1 = \frac{N + N_1}{b \times l} \quad (14)$$

N_1 – максимальная нагрузка быстрого догружения,

Коэффициент a_3 зависит от скорости догружения. Для скорости догружения в исследуемом диапазоне $0,1 \dots 1,0$ МПа/мин a_3 принят равным 1,0. Расстояние b_4 принимается из условия равенства объема эпюры $V_1^1 = V_4^1$.

Условная дополнительная осадка от нагрузки быстрого догружения определяется из равенства объема эпюры внешней нагрузке быстрого догружения

$$S^1 = \frac{3 \times N_1}{c \times (3 \times b^2 \times K_3^1 + (K - K_3^1) \times (b_4^2 + b^2 + b \times b_4) + (K_1^1 - K) \times b_4^2)} \quad (4.17)$$

Суммарные ординаты эпюры нормальных контактных напряжений при итоговом нагружении фундамента определяются по формулам 19...22 (рисунок 9).

$$p_1^{\text{общ}} = p_1 + p_1^1 \quad (19)$$

$$p_2^{\text{общ}} = p_2 + p_2^1 \quad (20)$$

$$p_4^{\text{общ}} = p_2 + (p_1 - p_2) \times \frac{b_1 - b_4}{b_1} + p_4^1 \quad (21)$$

$$p_3^{\text{общ}} = p_3 + p_3^1 \quad (22)$$

Результаты расчета нормальных контактных напряжений и сопоставление их с опытными для некоторых железобетонных фундаментов и металлических моделей представлены на рисунках 10 и 11. Как видно из эпюр сходимость расчетных и опытных значений хорошая.

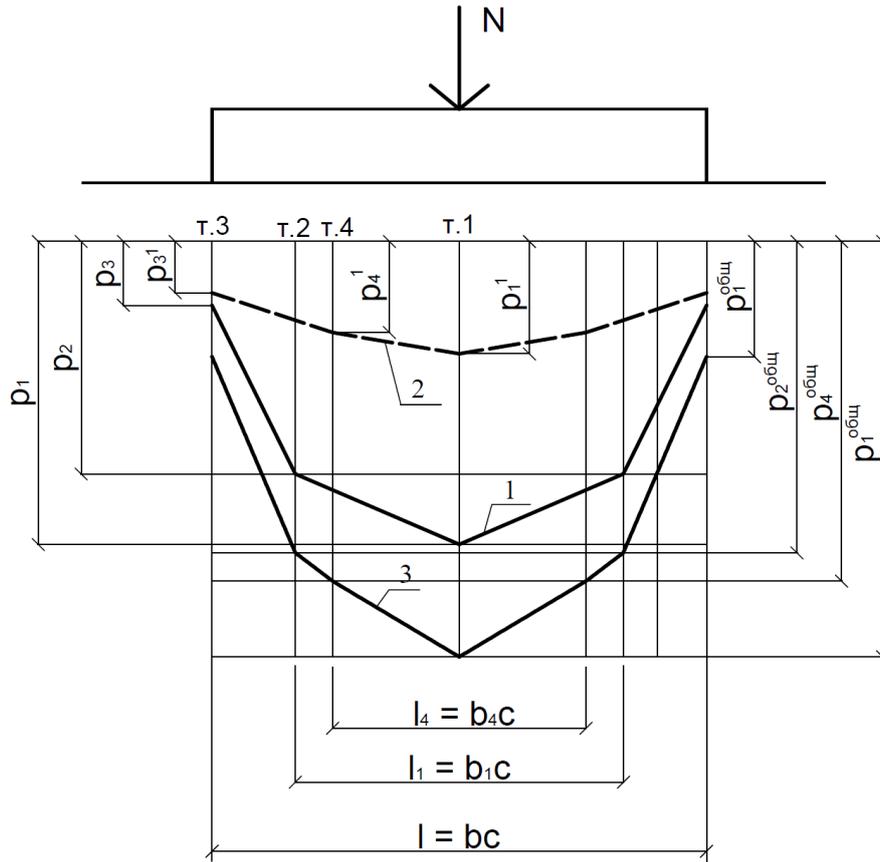


Рисунок 9 – Формирование итоговой эпюры нормальных контактных напряжений после быстрого догружения

На основании методики определения ординат эпюры нормальных контактных напряжений разработан алгоритм и методика расчета отдельно стоящих фундаментов при быстрых догружениях для стадии проектирования и стадии проверки.

Изгибающий момент в расчетном сечении фундамента определяется как сумма моментов от медленного нагружения и быстрого догружения (23).

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{сум}} + M_{\text{сум}}^1 \quad (23)$$

На основе разработанной методики составлена расчетная программа в среде программирования VBA Microsoft Excel.

Сравнение опытной несущей способности фундаментов с расчетными значениями по нормам и предлагаемой методике представлено на рисунке 12. Расчетные значения по предложенной методике расчета имеют лучшую сходимость результатов с опытными значениями. Отклонения в среднем составили 16% в отличие от методики СП, где отклонения достигли 48 %.

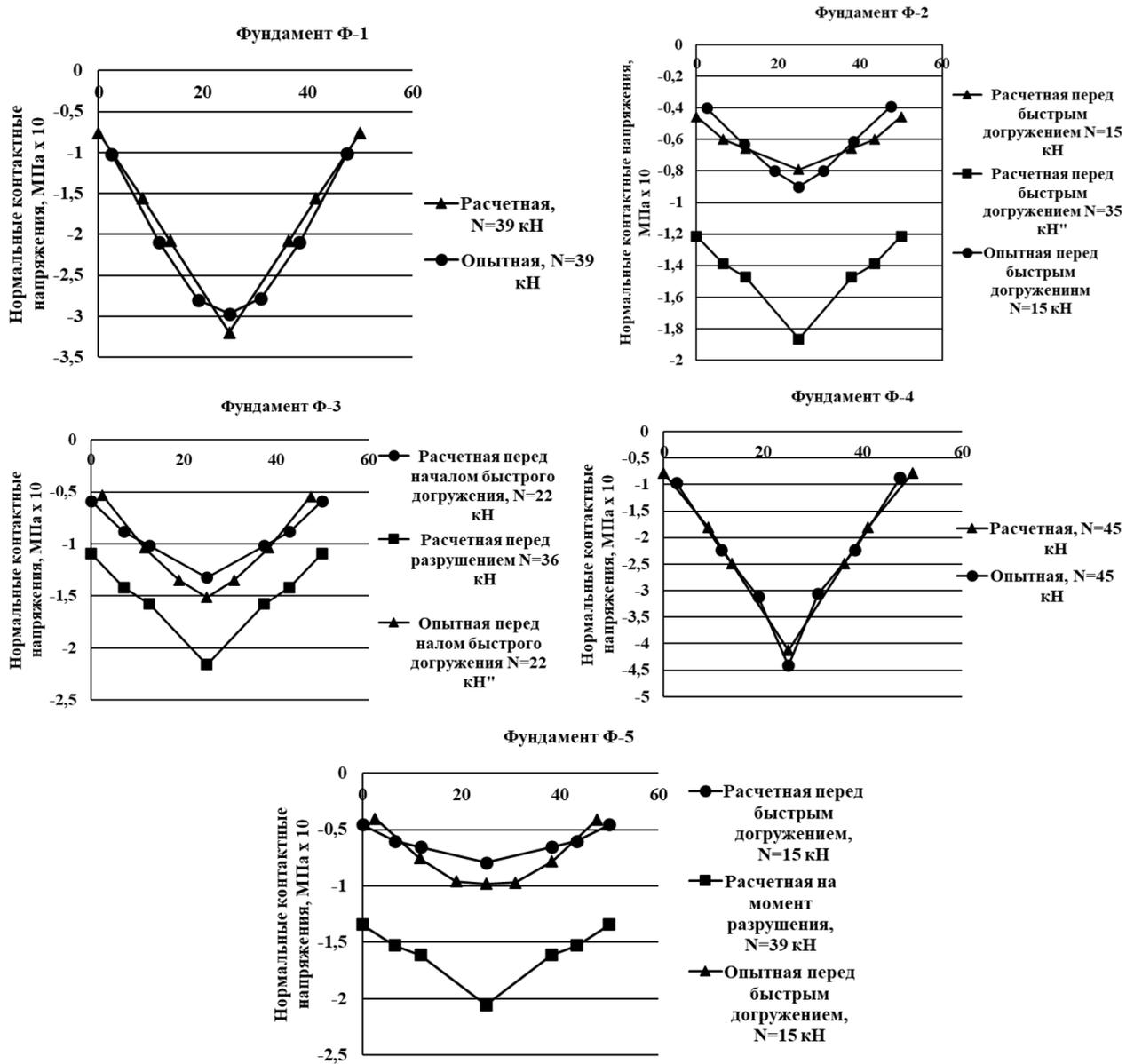


Рисунок 10 – Сопоставление опытных и расчетных эпюр нормальных контактных напряжений под подошвой железобетонных фундаментов первой серии эксперимента до быстрого догрузения и прогнозируемая по результатам расчета эпюра после быстрого догрузения

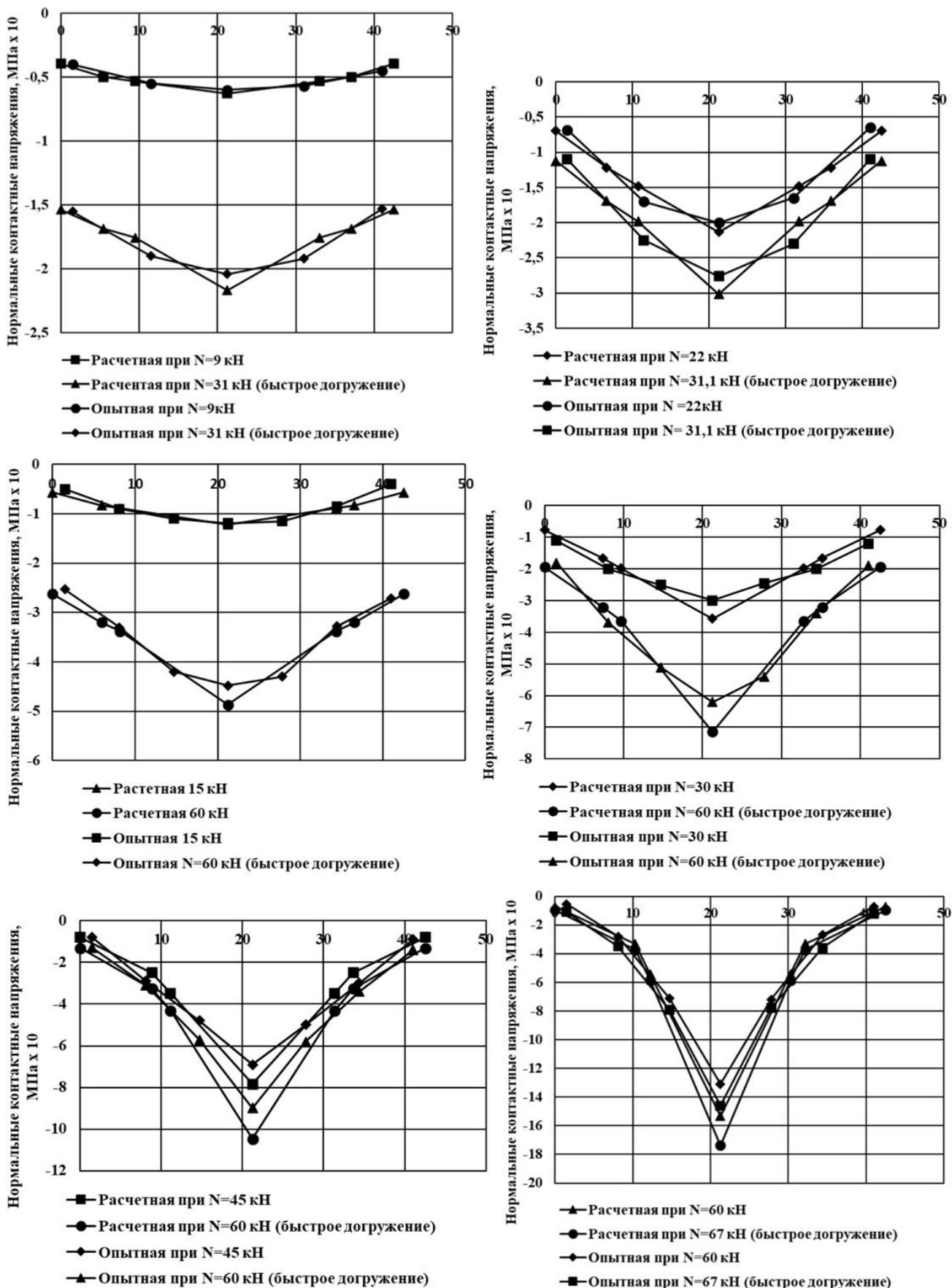


Рисунок 11 – Сравнение опытных и расчетных эпюр нормальных контактных напряжения под металлической моделью

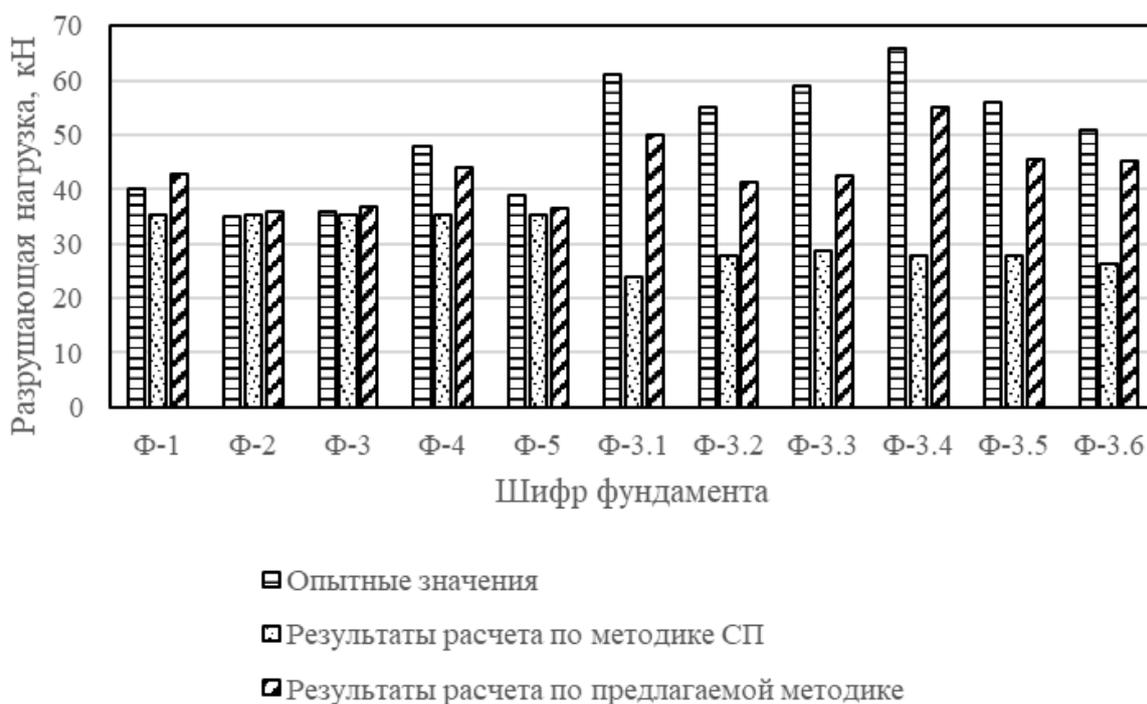


Рисунок 12 – Сравнение опытной несущей способности фундаментов с расчетными значениями по нормам и предлагаемой методике

В приложении приведены: программа расчета нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента при быстрых догружениях, акты внедрения результатов исследования, статистическая обработка результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно подвести следующие итоги и определить направления дальнейшей разработки темы:

1. Воздействие быстрых (внезапных) догрузений оказывает существенное влияние на силовое взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с грунтовым снованием, приводя к изменениям эпюры нормальных контактных напряжений под подошвой фундамента, осадки.

2. Изменение силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым снованием зависит от уровня предварительного медленного (эксплуатационного) нагружения и величины нагрузки быстрого догружения. При этом более низкая величина усилия медленного нагружения и более высокое значение нагрузки быстрого догружения способствует максимальным изменениям в эпюре контактных напряжений и графике осадки.

3. С момента начала быстрого догружения наблюдается замедление осадки фундамента со сплаживанием графика. При этом форма графика в большинстве случаев приобретает обратный выгиб. Осадка фундамента при быстром догружении ниже, чем при медленном нагружении при одной и той же величине внешней нагрузки.

4. Воздействие быстрого догружения способствует относительному увеличению ординат эпюры нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы фундамента и уменьшению ординат эпюры под центральной зоной подошвы, что в наибольшей степени связано с отставанием во времени развития пластических и сдвиговых деформаций от возрастания нагрузки.

5. Изменение эпюры нормальных контактных напряжений при быстром догружении приводит к снижению разрушающей нагрузки фундамента от изгиба вследствие увеличения уровня изгибающего момента в расчетных сечениях.

6. После стабилизации нагрузки быстрого догружения на протяжении ограниченного времени происходит небольшой рост нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы с возможным последующим снижением и более продолжительный интенсивный рост нормальных контактных напряжений под центральной частью эпюры. Рост напряжений под центральной частью подошвы по характеру и продолжительности совпадает с ростом осадки фундамента.

7. Разработанная методика расчетного определения ординат эпюр нормальных контактных напряжений, основанная на усовершенствованной модели Фусса-Винклера с переменным по площади подошвы коэффициентом жесткости основания, изменяющимся в зависимости от уровня медленного нагружения и уровня нагруженности основания при медленном нагружении и быстром догружении, показала хорошую сходимость опытных и расчетных данных.

8. Построенная на основе разработанной методики расчетного определения ординат эпюр нормальных контактных напряжений методика расчета фундаментов при быстром догружении показала лучшую сходимость результатов расчета с опытными значениями, чем нормативная методика.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении изучения влияния быстрого догружения на взаимодействие фундаментов с основанием при скорости догружения более 1,0 МПа/мин и менее 0,1 МПа/мин, изучения влияния быстрого догружения на силовое взаимодействие фундаментов с основанием, сложенным связными грунтами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих научных работах:

а) рецензируемых научных изданиях:

1. Колчунов, В. И. Способ усиления каркаса многоэтажного здания при неравномерных осадках фундаментов / В. И. Колчунов, И. М. Дьяков, С. В. Гречишников, М. И. Дьяков // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 5 (85). – С. 63-73.

2. Дьяков, И. М. Силовое взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстром догружении / И. М. Дьяков, М. И. Дьяков // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 3. – С. 21–30.

3. Дьяков, И. М. Исследование взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с песчаным основанием при быстрых догружениях / И. М. Дьяков, М. И. Дьяков // Интернет-журнал Транспортные сооружения. – 2024. – Т 11. – № 2. – URL: <https://t-s.today/PDF/12SATS224.pdf>. (дата обращения: 28.07.2024).

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus:

4. Diakov, I. N. Experimental studies of the «foundation–soil» system operation with sudden loading / I. N. Diakov, N. V. Tsarenko, M. I. Diakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 913. – 022064. – IOP Publishing. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/913/2/022064/pdf>.)

в) других изданиях:

5. Дьяков, А. И. Применение метода естественного импульсного электромагнитного поля земли при исследовании работы системы «фундамент–грунт» / А. И. Дьяков, М. И. Дьяков // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи - развитию науки и образования. Материалы V Международного научного форума молодых ученых, студентов и школьников. Под общей редакцией Д. П. Ануфриева. – Астрахань. – 2016. – С. 398-403.

6. Дьяков, М. И. Вопросы реконструкции зданий небольшой этажности в Крыму / М. И. Дьяков // Инновационное развитие строительства и архитектуры: взгляд в будущее. Сборник тезисов участников Международного студенческого строительного форума – 2017, Симферополь, 15–17 ноября 2017 года. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2017. – С. 14–16.

7. Дьяков, И. М. Совершенствование расчета отдельно стоящих фундаментов на изгиб при внецентренных малоцикловых нагрузках / И. М. Дьяков, А. И. Дьяков, М. И. Дьяков // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь. – 2017. – № 9 (61). – С. 55-61.

8. Дьяков, И. М. Совершенствование расчета отдельно стоящих фундаментов на изгиб при внецентренных малоцикловых нагрузках / И. М. Дьяков, А. И. Дьяков, М. И. Дьяков // Методология безопасности среды жизнедеятельности. Программа и тезисы IV Крымской Международной научно-практической конференции. Под редакцией: А. Т. Дворецкого, Т. В. Денисовой, А. Е. Максименко. – Симферополь. – 2017. – С. 31.

9. Дьяков, М. И. Некоторые аспекты исследования взаимодействия фундаментов с грунтовым основанием при нагрузках со знакопеременными моментами / М. И. Дьяков // Инновационное развитие строительства и архитектуры: взгляд в будущее Сборник тезисов участников Международного студенческого строительного форума – 2018, Симферополь, 22–24 ноября 2018 года / Под общей редакцией Н.В. Цопы. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2018. – С. 16–18.

10. Дьяков, И. М. Планирование экспериментальных исследований работы системы «фундамент-основание» при внезапных догрузениях [Электронный ресурс] / И. М. Дьяков, М. И. Дьяков, Б. Ю. Барыкин // Строительство и техногенная безопасность. — 2020. — № 19(71). — С.5-12.

Дьяков Михаил Игоревич

Взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстром догрузении

2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__» _____ 20__ г. Формат бумаги 60x90/16

Объем 1,5 усл. п. л. Заказ № Тираж 80 экз.

127994, Россия, Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)