

На правах рукописи



**Рачков Дмитрий Владимирович**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ-ФУНДАМЕНТ»  
ПРИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЕ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Волгоград – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Геотехника».

<b>Научный руководитель:</b>	доктор технических наук, доцент <b>Пронозин Яков Александрович</b>
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Королёв Константин Валерьевич</b> доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Геотехника, тоннели и метрополитены», заведующий кафедрой  <b>Калошина Светлана Валентиновна</b> кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Строительное производство и геотехника», доцент
<b>Ведущая организация:</b>	ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «29» ноября 2018 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.194.02 при ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, к. Б-203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградского государственного технического университета» и на официальном сайте по ссылке <http://www.vstu.ru/nauka/dissertatsionnye-sovety/obyavleniya-o-zashchitakh/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Акчурин Талгаты Кадимович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Степень разработанности темы.** В связи с высокими темпами экономического развития городов перед строительной индустрией встает проблема освоения, как ранее считалось, не пригодных для строительства территорий. Одновременно с данной задачей происходит усложнение архитектуры и конструктивных особенностей в плане и по высоте гражданских и промышленных зданий и сооружений. Зачастую широко распространенные и активно применяемые технологии по устройству фундаментов в таких сложных условиях приводят к большим экономическим затратам. Также известны случаи, когда на этапе строительства или эксплуатации возникают отказы основания и фундаментов, что приводит к ещё большим экономическим затратам. В связи с этой проблематикой инженеры-геотехники предлагают новые решения и конструкции фундаментов, позволяющие с учетом инженерно-геологических особенностей и конструкции здания обеспечить его надежность при эксплуатации, а также обеспечить высокий экономический эффект при осуществлении строительства.

Одним из современных методов устройства фундаментов мелкого заложения в сложных инженерно-геологических условиях является конструкция фундаментов, имеющих криволинейное очертание контактной поверхности в пролетной части, обращенное выпуклостью вверх. Данная конструкция позволяет эффективно включить грунтовое основание в работу, обеспечив меньшую его деформируемость за счет создания дополнительного горизонтального обжатия грунта. Существующая методика по определению взаимодействия основания и фундаментов такого типа требует более детальной проработки с целью адаптации под современные нормативные документы, а также возможной оптимизации конструктивных решений фундаментов.

**Актуальной задачей,** в связи с вышеизложенным, становится исследование взаимодействия фундаментов с криволинейной контактной поверхностью и основания в целях повышения эффективности и надежности фундаментов мелкого заложения.

**Объект исследования:** система «основание – фундамент» при криволинейной форме контактной поверхности.

**Предмет исследования:** напряженно-деформируемое состояние системы «основание – фундамент» при криволинейной форме контактной поверхности в условиях статического нагружения.

**Цель диссертационной работы:** выявление закономерностей взаимодействия фундаментов, имеющих криволинейное очертание контактной поверхности, с грунтовым основанием с позиций оценки несущей способности, расчетного сопротивления и деформируемости грунтового основания.

**Задачи исследования:**

1. Оценка напряженного состояния грунтового массива при различных вариантах распределения вертикальных и горизонтальных контактных напряжений;
2. Разработка алгоритма определения деформируемости основания при загрузении по криволинейному очертанию контактной поверхности;
3. Разработка алгоритма по определению несущей способности основания при различных вариантах криволинейных контактных поверхностей, с учетом их конструктивных особенностей;
4. Разработка алгоритма определения расчетного сопротивления грунтового основания при криволинейном очертании контактной поверхности;
5. Экспериментальное исследование взаимодействия моделей фундаментов с шероховатой криволинейной контактной поверхностью;
6. Оценка зависимости деформационных характеристик от величины горизонтальных напряжений в грунтовом массиве.

**Научная новизна:**

1. Теоретически и экспериментально выявлены закономерности распределения напряжений и деформаций в грунтовом массиве при нагружении различным распределением вертикальных и горизонтальных контактных давлений;
2. Теоретически обосновано повышение несущей способности основания при нагружении фундаментами с шероховатой и гладкой криволинейной контактной поверхностью;
3. Выявлены закономерности увеличения расчетного сопротивления грунта при передаче нагрузки посредством фундаментов с криволинейной контактной поверхностью;
4. Теоретически и экспериментально выявлены зависимости модуля деформации от величины горизонтальных напряжений в грунтовом основании.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в:

- разработке инженерного метода определения НДС основания при нагружении по криволинейной контактной поверхности;

- получении результатов натурных испытаний работы грунтового основания при загрузке штампами с шероховатой криволинейной контактной поверхностью;
- получении повышающих коэффициентов несущей способности оснований при использовании фундаментов с криволинейной контактной поверхностью;
- получении повышающих коэффициентов расчетного сопротивления грунтового основания при использовании фундаментов с криволинейной контактной поверхностью;
- экономической эффективности использования фундаментов с криволинейной контактной поверхностью.

#### **Методология и методы исследования:**

- произведен анализ состояния фундаментостроения в области определения НДС основания для фундаментов мелкого заложения с позиции уменьшения деформируемости оснований и повышения экономической эффективности;
- аналитическое моделирование взаимодействия системы «основание – фундамент» при криволинейной форме контактной поверхности на основании строгих решений теории упругости и теории предельного равновесия грунтового основания;
- проведение экспериментального исследования взаимодействия системы «основание – фундамент» при криволинейной форме контактной поверхности;
- сравнение результатов измерения деформаций слоев грунта при натурном эксперименте с расчетными значениями;
- алгоритмизация процесса прогнозирования деформирования основания при загрузке фундаментами с криволинейной контактной поверхностью.

#### **Личный вклад автора состоит в:**

- анализе состояния фундаментостроения в области определения НДС основания для фундаментов мелкого заложения с позиции уменьшения деформируемости оснований и повышения экономической эффективности;
- выполнении численных и аналитических исследований по анализу взаимодействия основания, загруженного различными вертикальными и горизонтальными напряжениями;
- модификации программного обеспечения с целью возможности определения несущей способности грунтового основания с учетом конструктивных особенностей фундамента;

- выполнении исследований по изменению расчетного сопротивления грунта при криволинейной контактной поверхности по отношению к плоской;
- проведении и получении результатов натурных экспериментальных исследований на моделях фундаментов в полевых условиях, их анализе и обобщении;
- разработке инженерного метода по определению деформируемости слоев грунтового основания при учете зависимости модуля деформации грунта от величины горизонтального обжатия.

#### **Результаты исследования реализованы:**

- при разработке проектной документации на устройство фундаментов 22-х этажных жилых домов по адресу: г. Тюмень, ул. Таврическая, д. 9к1, 9к2;
- в ФГБОУ ВО ТИУ при выполнении дипломных проектов по специальности 270102 «Промышленное и гражданское строительство»; при выполнении магистерских диссертаций по направлению 270800 «Строительство», магистерская программа «Теория и проектирование геотехнических сооружений».

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- аналитически выявленные закономерности влияния распределения горизонтальных и вертикальных контактных эпюр на НДС основания;
- теоретически выявленные закономерности влияния формы и характера контактной поверхности на несущую способность и расчетное сопротивление грунтового основания;
- результаты экспериментальных исследований взаимодействия крупномасштабных моделей фундамента с грунтами естественного сложения;
- инженерный метод по проектированию конструктивных параметров фундаментов с криволинейной контактной поверхностью в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства.

#### **Достоверность защищаемых положений обеспечивается:**

- применением в работе классических теорий, в частности теории упругости и теории предельного равновесия грунта, а также теоретически и экспериментально доказанных их современных модификаций;
- использованием в работе сертифицированных и верифицированных в соответствии с действующими нормативными документами на территории РФ программных продуктов;
- выполнением экспериментальных исследований с помощью современных апробированных контрольно-измерительных цифровых комплексов, тарированных первичных преобразователей и поверенных приборов;

- сравнением полученных в работе результатов с данными других исследований;
- сопоставлением результатов численных и аналитических решений с экспериментальными данными.

**Апробация работы:** основные результаты работы были доложены и обсуждены на: I Российской учебно-практической молодежной конференции по геотехнике (г. Москва, 2015г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы архитектуры, строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири» (г.Тюмень, 2015г.); XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей Тюменского государственного архитектурно-строительного университета (г.Тюмень, 2015г.); II Российской учебно-практической молодежной конференции по геотехнике (г. Москва, 2016г.); III Российской учебно-практической молодежной конференции по геотехнике (г. Москва, 2017г.); Всероссийской научно-технической конференции «Инженерно-геологические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений» (г.Санкт-Петербург, 2017г.); Всероссийской национальной конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий» (г.Пермь, 2017г.), Национальной научно-технической конференции с иностранным участием «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (г.Новочеркасск, 2018г.).

**Публикации:** научные результаты изложены в 10 научных работах, из которых 4 статьи опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), 1 статья опубликована в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и других.

**Объем и структура работы:** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 164 страниц, в том числе 72 рисунков и 19 таблиц.

**Специальность, которой соответствует диссертация.** Согласно сформулированной цели научной работы, научной новизне и практической значимости результатов диссертация соответствует паспорту специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения, отрасль науки – технические науки, пункту 3 «Разработка новых методов расчета,

высокоэффективных конструкций и способов устройства подземных сооружений промышленного и гражданского назначения», пункту 5 «Разработка новых методов расчета, высокоэффективных конструкций и способов устройства оснований и фундаментов в особых инженерно-геологических условиях: на слабых, насыпных, просадочных, засоленных, набухающих, закарстованных, вечномёрзлых, пучинистых и других грунтах».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведена общая характеристика работы.

**Первая глава** посвящена анализу существующих методов по определению параметров взаимодействия системы «основание-фундамент», также рассмотрен алгоритм определения расчетного сопротивления грунтового основания при нагружении фундаментами с различной формой контактной поверхности и в плане, указаны существующие методы расчета несущей способности, основанные на исследованиях отечественных и зарубежных ученых.

Рациональным решением по сдерживанию развития горизонтальных деформаций в грунтовом массиве от дополнительного силового воздействия является устройство подпорных стенок гравитационного или шпунтового типа. Исследованиями по созданию таких разделительных конструкций занимались отечественные ученые, такие как М.Ю. Абелев, С.Г. Богов, Е.И. Бровко, И.С. Бровко, А.К. Бугров, В.А. Васенин, В.П. Вершинин, Б.И. Далматов, В.А. Ильичев, Я.В. Качурин, А.М. Крыгина, С.К. Лапин, А.А. Левкин, Р.А. Мангушев, В.Н. Парамонов, Д.Е. Разводовский, А.В. Савинов, В.В. Семенюк-Ситников, В.Г. Симагин, А.А. Собенин, С.Н. Сотников, Л.К. Тихомирова, В.М. Улицкий, А.Б. Фадеев, А.Л. Четвериков, А.Г. Шашкин и др.

Исследованиями взаимодействия работы фундаментов, имеющих особенности в контактном слое, отличающемся формой контактной поверхности и введением дополнительных материалов в область взаимодействия, занимались Г.Г. Болдырев, С.А. Болдырев, М.С. Грицук, М.М. Дубина, Р.Катценбах, В.И. Крутов, Г.Е. Лабезник, В.В. Лушников, Е.А. Сорочан, Я.А. Пронозин, Г.М. Скибин, А.Н. Тетиор, З.Г. Тер-Мартirosян и др.

R. L. Nicholls и M. V. Izadi провели экспериментальные исследования распределения контактных давлений моделей конического и гипарного



фундаментов-оболочек в сравнении с круглым и прямоугольным плоским штампом. На протяжении всего эксперимента осадки моделей фундаментов-оболочек были значительно меньше, а конечная несущая способность была выше по сравнению с обычными плоскими штампами.

Я.А. Пронозин в своих работах предложил новую конструкцию ленточно-оболочечного фундамента, обладающего свойством активного регулирования взаимодействия с грунтовым основанием за счет своих конструктивных и геометрических параметров. Конструкция состоит из различных по жесткости и характеру работы элементов: первый – ленточный фундамент – опорная конструкция для несущих стен или колонн. Второй – гибкий элемент в пролетной части, объединяющий соседние опорные ленты в сплошной фундамент.

Для проектирования фундаментов данной конструкции необходимо по теории упругости определить НДС основания нагруженного вертикальными и горизонтальными контактными эпюрами. В рамках теории предельного равновесия оценить устойчивость массива, имеющего криволинейное очертание контактной поверхности системы «основание – фундамент», при учете характера поверхности контакта. Расчетное сопротивление грунтового массива также зависит от характера передачи нагрузки на основание, поэтому учет криволинейной формы требует введения дополнительного коэффициента в имеющуюся нормативную формулу, который будет учитывать характер передачи нагрузки.

На основании анализа существующих методик определения параметров взаимодействия системы «основание-фундамент» были сформулированы *цель и задачи исследования*.

**Во второй главе** представлены теоретические исследования напряженно-деформированного состояния основания, при различной эпюре вертикальных и горизонтальных контактных давлений, так как НДС основания загруженного переменной распределенной нагрузкой и нагрузкой различного направления будет значительно отличаться от нагружения вертикальной равномерно распределенной, как это часто рассматривается при инженерных расчётах при проектировании ленточных, плитных или нестандартных форм контактной поверхности фундаментов с грунтовым основанием.

Для оценки характера распределения вертикальных, горизонтальных и касательных напряжений, а также деформируемости массива было произведено сравнение различных вариантов эпюр контактных давлений при изменяющихся значениях вертикального и горизонтального нагружения по ширине фундамента.

Расчет деформаций производился путем преобразования обобщенного уравнения Генки. Это позволило разделить линейную деформацию на объемную и сдвиговую части. При рассмотрении данной задачи это разделение имеет важное значение, так как в массиве формируется сложное НДС, где большое влияние будет оказывать величина горизонтальных напряжений.

Для аналитического сравнения влияния величины горизонтального обжатия грунта были приняты варианты вертикально загрузки по варианту тип I и тип II (рисунок 1, таблица 1). Нагружение горизонтальной эпюрой контактных давлений было принято по четырем вариантам, где прирост нагружения к краям фундамента также распределяется по закону треугольника. Схемы нагружения основания представлены в таблице 1. С целью выявления закономерностей изменения НДС основания различные виды нагружения были скомбинированы.

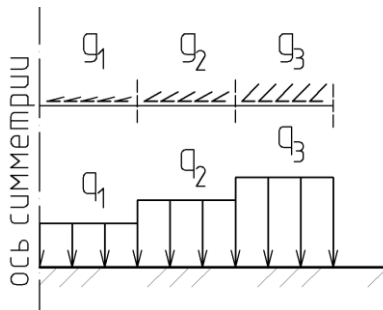


Рисунок 1 – Схема распределение нагружения на основание

Таблица 1 – Варианты нагружения

Номер нагружения	Нагрузка, кПа		
Вертикальное нагружение			
	$q_1$	$q_2$	$q_3$
Тип I	45	136	227
Тип II	227	136	45
Тип III	136	136	136
Горизонтальное нагружение			
	$g_1$	$g_2$	$g_3$
Случай 1	20	60	100
Случай 2	15	45	75
Случай 3	10	30	50
Случай 4	5	15	25

Наибольший положительный эффект, с точки зрения меньшей деформации основания, проявляется в вариантах загрузки с наименьшими вертикальными и наибольшими горизонтальными напряжениями.

Для определения коэффициентов, учитывающих увеличение нагрузки при устройстве фундаментов, имеющих криволинейной очертание контактной поверхности, было произведено сопоставление суммарного силового нагружения на основания при различной форме контактной поверхности по отношению к загрузке по плоской контактной поверхности.

$$k_p = \frac{p^*}{p}, \quad (1)$$

где  $k_p$  – повышающий коэффициент, учитывающий форму подошвы фундамента;  $p^*$  – суммарное силовое воздействие под криволинейной контактной

поверхностью;  $p$  - суммарное силовое воздействие под плоской контактной поверхностью.

Установлено, что при изменении относительной стрелы подъема  $\bar{h}$  от значения 0,05 до 0,2 происходит увеличение максимального суммарного силового воздействия на 10% при равном значении осадки. Дальнейшее увеличение относительной стрелы подъема не целесообразно по причине выхода за пределы работы фундаментов в виде пологих оболочек и увеличению трудозатрат по проведению земляных работ.

По результатам проведенного аналитического расчета по определению НДС грунтового основания загруженного различными эпюрами вертикальных и горизонтальных контактных давлений установлено наибольший положительный эффект с точки зрения меньшей деформации основания проявляется в вариантах загрузки с наименьшими вертикальными и наибольшими горизонтальными напряжениями. Стоит отметить, что в данных комбинациях снизилась разница между осадками центральной и крайней оси фундамента с 36% до среднего значения в 5%, что говорит о более равномерном деформировании грунтового основания, что приводит к возникновению меньших внутренних напряжений в теле фундамента.

**В третьей главе** представлены решения по определению несущей способности грунтового основания при криволинейном очертании контактной поверхности, при учете характера контактной поверхности - гладкая или шероховатая. Представлены повышающие коэффициенты для определения расчетного сопротивления грунтового основания при криволинейной форме контактной поверхности.

Надежной теорией по определению несущей способности грунтового основания является теория предельного равновесия грунта (ТПРГ). Определение развития областей предельного равновесия в грунтовом массиве в случае криволинейного очертания контактной поверхности, обращенного от грунта, необходимо определять на основании имеющихся теоретически и экспериментально обоснованных позиций.

Используя данную расчетную схему, были рассмотрены варианты с гладкой и шероховатой контактной поверхностью для описания взаимодействия различных вариантов конструкций фундаментов.

В этом случае по аналогии с известным решением В.В. Соколовского решение было построено для одностороннего выпора грунта. Последовательность краевых задач для этого расчетного случая показана на рисунке 2.

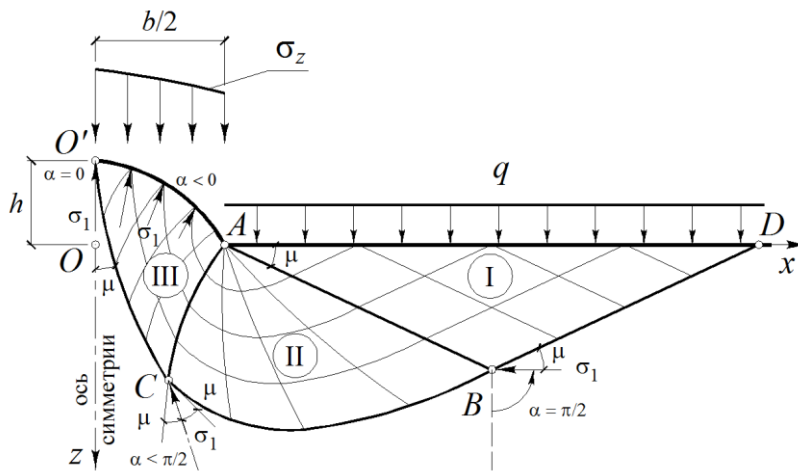


Рисунок 2 –  
Последовательность  
краевых задач в решении  
для гладкой подошвы  
I краевая задача (Коши),  
II краевая задача (Гурса),  
III краевая задача  
(смешанная)

Анализ изменения формы эпюры вертикальной составляющей предельного давления и очертания областей предельного равновесия при увеличении подъема кривизны показан на рисунке 3.

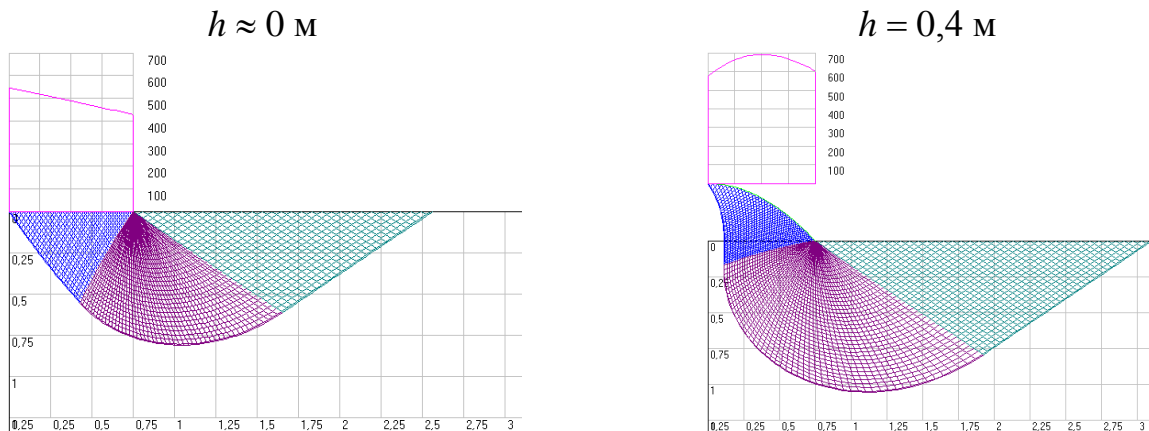


Рисунок 3 – Сетки характеристик в основании фундамента с гладкой криволинейной подошвой и эпюры вертикальных напряжений по подошве при различной величине подъема  $h$

На рисунке 4 показан график изменения средней величины вертикальной составляющей предельного давления  $p_u'$  по мере увеличения кривизны (подъема  $h$ ) фундамента.



Рисунок 4 – Зависимость  $p_u'(h)$  для фундамента с гладкой криволинейной подошвой при  $\varphi = 22^\circ$

Как следует из приведенных результатов, эпюра предельного давления качественно меняет свой характер при увеличении подъема. Кроме того, линия скольжения, ограничивающая области предельного равновесия, приобретает точки перегиба. Наконец, предельная нагрузка в данном примере только за счет увеличения подъема возрастает в 1,7 раза.

Для фундамента с шероховатой подошвой решение базировалось на известном решении Ю.И. Соловьева. Последовательность краевых задач для расчетного случая показана на рисунке 5.

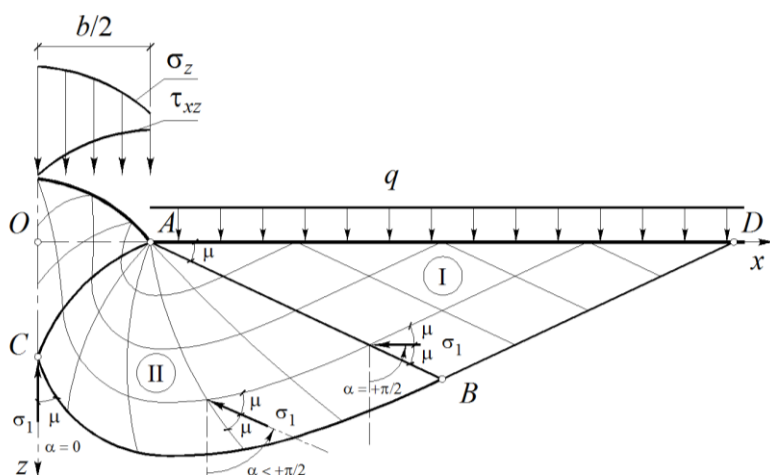


Рисунок 5 – Последовательность краевых задач в решении для шероховатой подошвы

Величина несущей способности вначале (при малых значениях подъема  $h$ ) несколько снижается, но затем достаточно быстро начинает увеличиваться. Это объясняется уже установленным снижением вертикальных напряжений  $\sigma_z$  при увеличении  $h$ , которое при малой кривизне еще не компенсируется увеличением контактной поверхности фундамент-грунт, которое имеет место при достаточно больших  $h$ .

На основании вышеизложенных пунктов был проведен сопоставительный анализ влияния наличия сил терния на предельную нагрузку при различных вариантах угла внутреннего трения, а также величины боковой пригрузки

(рисунок 6). В целом, следует отметить, что рост величины несущей способности по мере увеличения подъема кривизны происходит значительно быстрее у криволинейных фундаментов с гладкой поверхностью, чем у шероховатой.

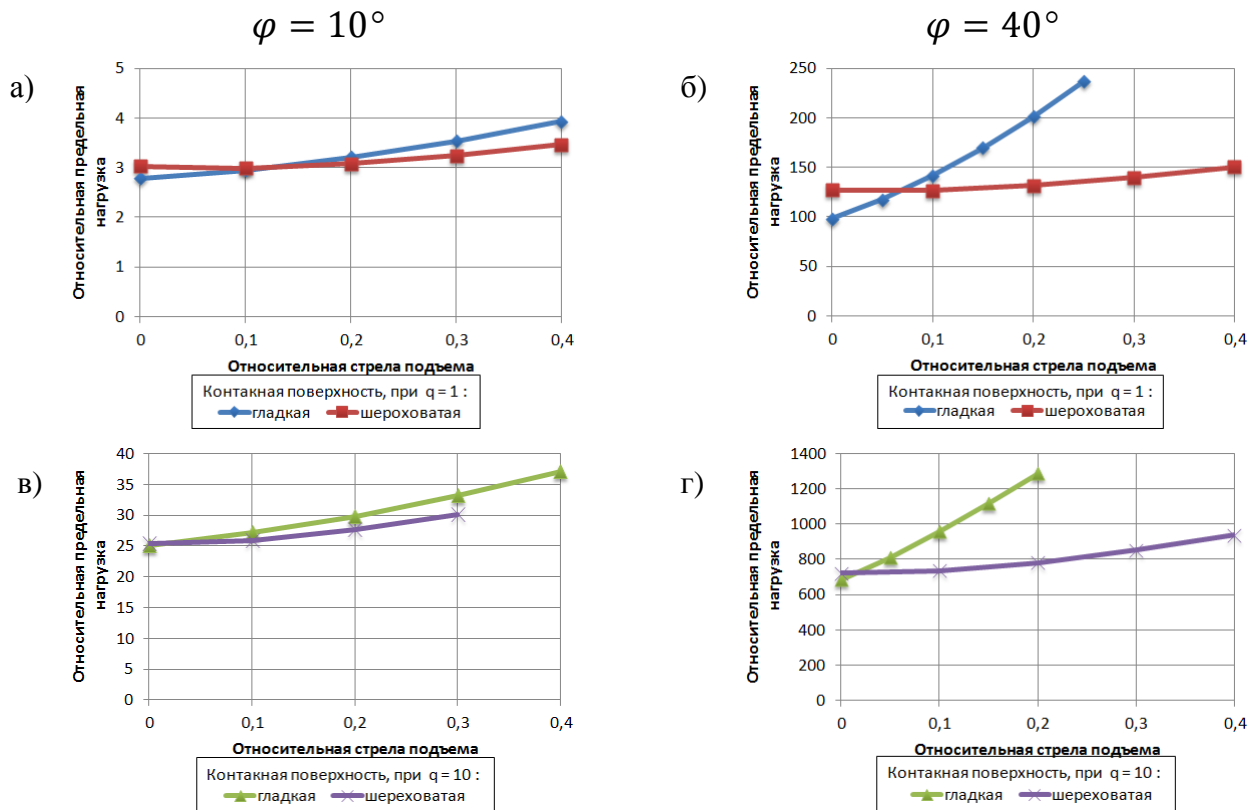


Рисунок 6 – Зависимость относительной предельной нагрузки от относительной стрелы подъема контактной поверхности при различных вариантах поверхности, угла внутреннего трения и пригрузки: а, б) при  $q=1$ ; в, г) при  $q=10$

Для практического использования предложен алгоритм определения несущей способности основания при криволинейной форме контактной поверхности (рисунок 7).

Проведя аппроксимацию численных решений, получены коэффициенты несущей способности  $k_N$  (2) для гладкой контактной поверхности:

$$\begin{aligned}
 \text{при } \varphi = 10^\circ & \quad k_N = 1,319q^{-0,05} \bar{h}^2 + (0,0907 \ln(q') + 0,5419) \bar{h} + 0,9991; \\
 \text{при } \varphi = 20^\circ & \quad k_N = 1,4665q^{-0,283} \bar{h}^2 + (0,0215 \ln(q') + 1,4659) \bar{h} + 0,9995; \\
 \text{при } \varphi = 30^\circ & \quad k_N = 2,7992q^{-0,474} \bar{h}^2 + (-0,002 \ln(q') + 2,519) \bar{h} + 0,9993; \\
 \text{при } \varphi = 40^\circ & \quad k_N = 7,5793q^{-0,284} \bar{h}^2 + (-0,03 \ln(q') + 3,723) \bar{h} + 0,9976.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Расчетное сопротивление грунта основания фундаментов с криволинейной контактной поверхностью рекомендуется определять на основании традиционно принятого в отечественном проектировании правила, согласно которому за расчетное сопротивление принимается такая величина давления, при которой

максимальная глубина развития зон разрушения в основании достигает величины  $b/4$ .

Для определения зон разрушения грунта был использован программный комплекс Plaxis 2D.2016, который позволил определить напряжения в точках массива при криволинейном очертании поверхности грунта. Расчетная схема для решения задачи представлена на рисунке 8.

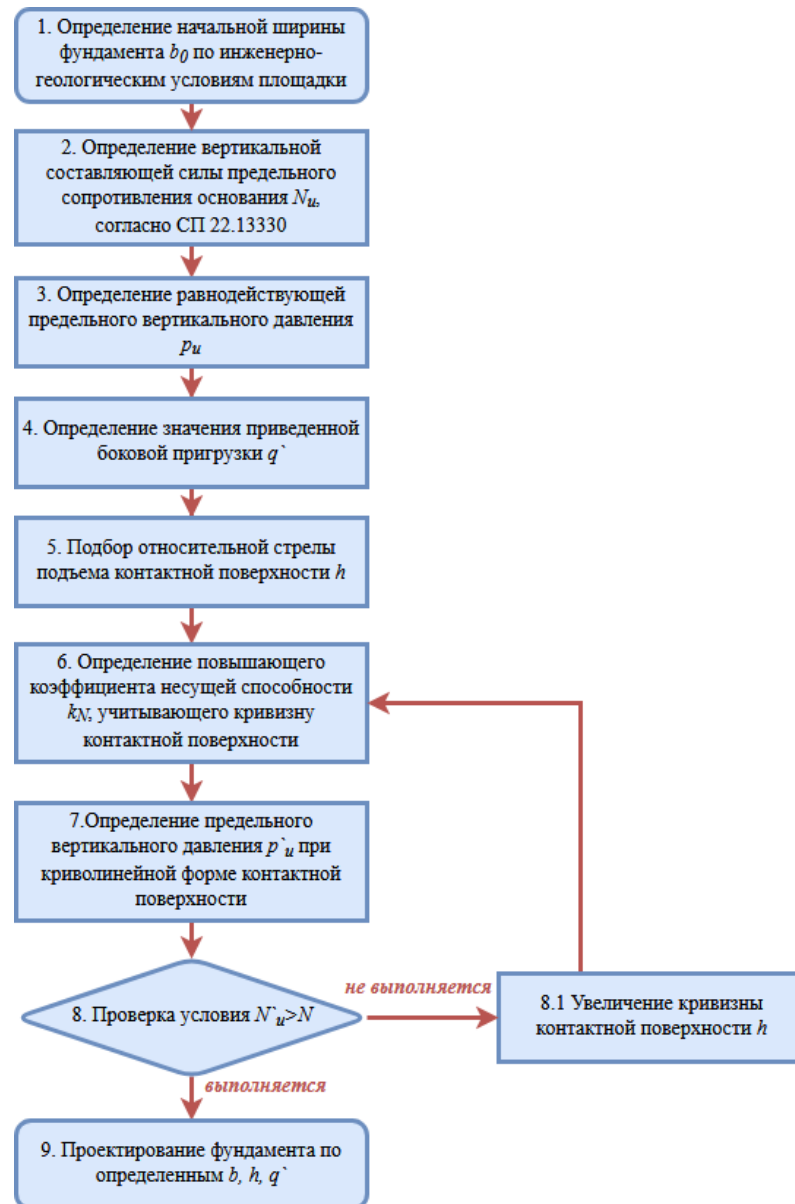


Рисунок 7 – Блок-схема определения несущей способности основания при криволинейной форме контактной поверхности фундамента

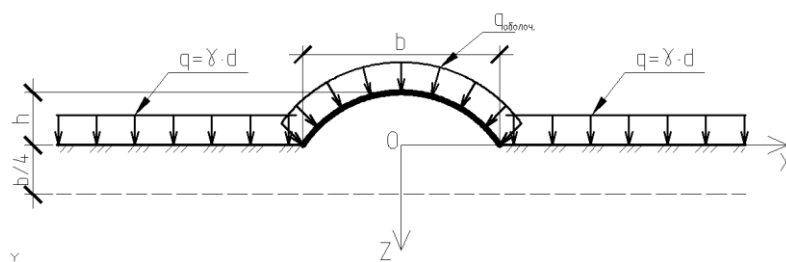


Рисунок 8 – Схема для определения расчетного сопротивления грунта

Расчет производился пошаговым методом. На первом шаге задавалась малая величина внешней нагрузки. В основании рассчитывались напряжения по линейно-деформируемой модели. После чего на линии  $z = -b/4$  (штриховая линия на рисунке 8) вычислялась функция пластичности Кулона-Мора:

$$f = \tau - \sigma \sin \varphi - c \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $\sigma$  и  $\tau$  – полусумма и полуразность главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

На последующих шагах расчета постепенно увеличивалась внешняя нагрузка и при каждом ее значении вычисляется  $f$  по всей линии  $z = -b/4$ , пока зоны разрушения впервые не достигнут глубины  $b/4$ . Эта внешняя нагрузка и будет искомым расчетным сопротивлением грунта.

Значение коэффициента расчетного сопротивления основания  $k_R$  определяется по формуле:

$$k_R = \frac{R^*}{R}, \quad (4)$$

где  $k_R$  – повышающий коэффициент расчетного сопротивления основания, учитывающий форму подошвы фундамента;  $R^*$  – расчетное сопротивление основания при криволинейной контактной поверхности;  $R$  – расчетное сопротивление основания при плоской контактной поверхности.

Проведя аппроксимацию численных решений также получены повышающие коэффициенты  $k_R$ .

Установлено, что значимое увеличение расчетного сопротивления основания происходит за счет увеличения стрелы подъема контактной поверхности. Повышение расчетного сопротивления грунта может достигать в среднем 50% в зависимости от стрелы подъема контактной поверхности, грунтовых условий и заглубления фундамента.

**В четвертой главе** представлены результаты сопоставления теоретических исследований с результатами, полученными в ходе проведения масштабного натурного экспериментального исследования.

Исследуемым объектом в рамках натурного эксперимента являлись грунтовое основание и жесткие осесимметричные штампы, диаметры которых



составлял 1200 мм с различной формой контактной поверхности (рисунок 9). Кривизна описывалась квадратным уравнением и задавалась по всей контактной поверхности. Также для сравнения был изготовлен штамп с плоской контактной поверхностью.

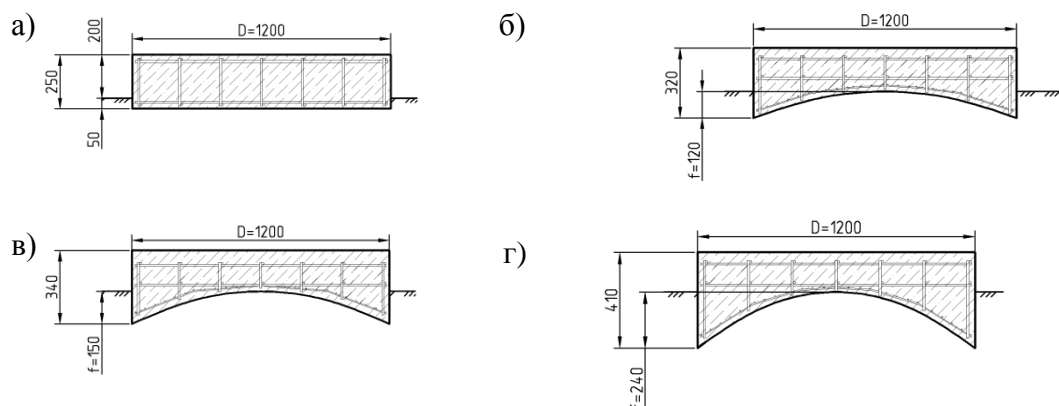


Рисунок 9 – Конструктивная схема экспериментальных штампов:

- а) штамп №1 – с плоской контактной поверхностью;
- б) штамп №2 – с криволинейной контактной поверхностью,  $f/D = 1/10$  ;
- в) штамп №3 – с криволинейной контактной поверхностью,  $f/D = 1/8$  ;
- г) штамп №4 – с криволинейной контактной поверхностью,  $f/D = 1/5$  .

Измерение контактных напряжений по поверхности соприкосновения грунтового основания и модели фундамента осуществлялось с помощью односторонних датчиков давления – мессдоз. Вертикальные перемещения точек грунтового массива фиксировались при помощи винтовых глубинных марок.

На графиках (рисунок 10) отмечаются участки линейных зависимостей давления на штамп и контактных напряжений. Данный характер наблюдается до напряжений примерно равных расчетному сопротивлению грунта  $R$ . С увеличением нагружения в работу включается центральная часть штампа, а давления в краевой зоне принимают меньшие приращения.

Вертикальное и горизонтальное нагружения в данном случае криволинейного очертания контактной поверхности распределяются по типу трапеции с минимальным значением в центре штампа и максимальным по краям. С увеличением относительной стрелы подъема контактной поверхности происходит разгрузка краевой зоны за счёт снижения вертикальной составляющей, но происходит увеличение горизонтального обжатия грунта. В сравнении штампа №2 и штампа №4 данное обжатие увеличивается в среднем в 2 раза. Увеличение горизонтального обжатия стесняет вертикальные и горизонтальные деформации слоёв грунта, что уменьшает общую конечную осадку.

В отличие от штампа №1 в остальных экспериментальных штампах удалось фиксировать возникающие горизонтальные контактные напряжения. Их распределение происходило по закону треугольника с нулевым значением под центром штампа. Максимальное горизонтальное контактное напряжение по значению в среднем составляет  $0,4-0,6 p$  от внешнего давления на штамп. С увеличением стрелы подъема кривизны контактной поверхности происходит пропорциональное увеличение значений горизонтальных максимальных значений.

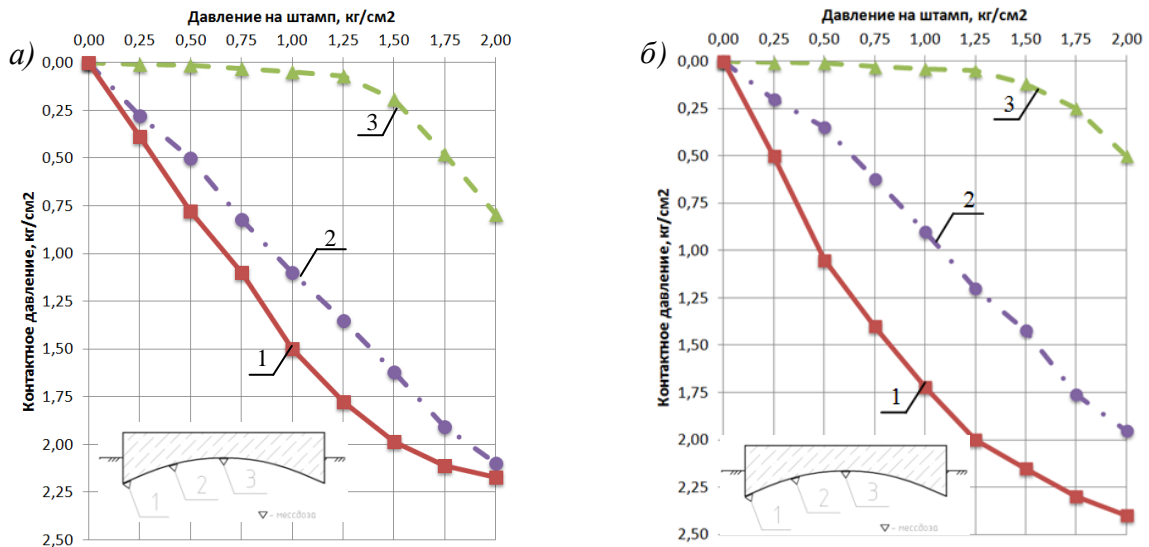


Рисунок 10 – Значения контактных давлений при статическом испытании штампов с криволинейной контактной поверхностью и схема расположения мессдоз: а) штамп №2; б) штамп №4

По окончании статического испытания грунтового основания экспериментальными штампами, сбора и обработке информации с регистрирующей аппаратуры был построен график зависимости осадки штампа от нагрузки (рисунок 11).

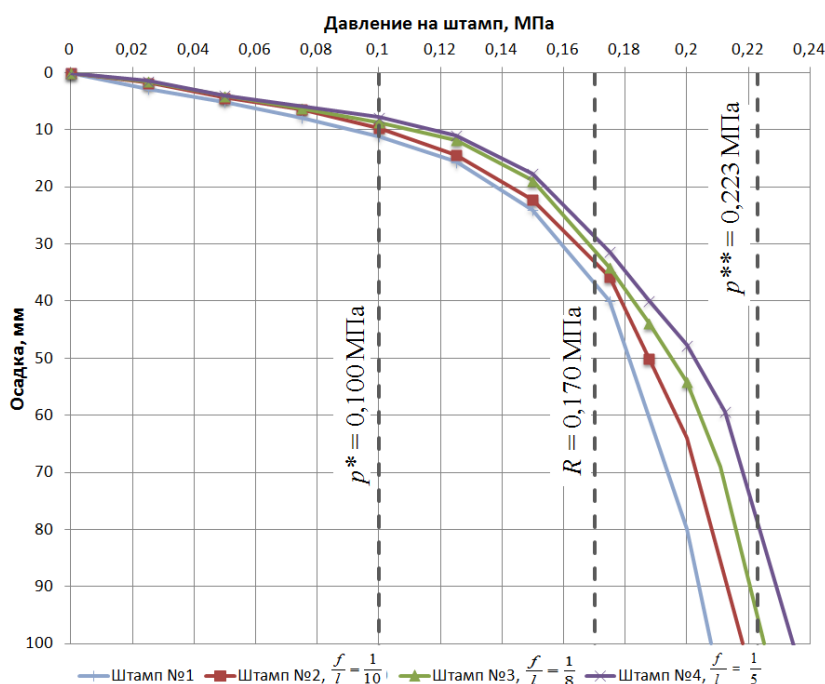


Рисунок 11 – График зависимости осадки штампов от нагрузки

Как видно из полученных зависимостей линейная работа грунтового основания под экспериментальными штампами №1 и №2 наблюдается в диапазоне давлений от 0 до  $p^*$ . С увеличением относительной стрелы подъема контактной поверхности линейный характер работы основания под штампами №3 и №4 увеличился на 25%.

По результатам анализа работы грунтового основания при статическом испытании штампами с различной кривизной контактной поверхности установлено, что во всем диапазоне нагружения осадки штампа №1 (с плоской контактной поверхностью) в среднем на 10% больше, чем осадки штампа №2 (с относительной стрелой подъема  $\frac{f}{l} = \frac{1}{10}$ ) и в среднем на 20% больше, чем осадки штампа №4 (с относительной стрелой подъема  $\frac{f}{l} = \frac{1}{5}$ ) во всем диапазоне нагружения.

Необходимо отметить, что при нагрузке равной расчетному сопротивлению грунта  $R$  разница в осадке штампа №1 и штампа №4 составляет 17%, что подтверждает отличие не только итогового деформированного состояния основания, но и в первую очередь напряженного состояния. Меньшие осадки фундамента с криволинейной контактной поверхностью объясняются сдерживанием горизонтальных перемещений в грунте в силу характерной геометрии, выраженной объемно напряженным состоянием грунта под оболочкой.

Для верификации применения предложенных повышающих коэффициентов был произведен расчет предельных нагрузок на грунтовое основание на

основании имеющегося полевого экспериментального исследования. Получившиеся результаты расчета несущей способности и расчетного сопротивления основания представлены в таблице 2 и 3. Численные значения определенных характеристик с высокой сходимостью совпадают с имеющимися экспериментальными результатами (рисунок 12), что подтверждает степень достоверности теоретически полученных повышающих коэффициентов, учитывающих криволинейное очертание контактной поверхности.

Таблица 2 – Определение несущей способности грунтового основания

Стрела подъема $h$ , м	Глубина заложения $d$ , м	Боковой пригруз $q$ , кПа	Относит. боковой пригруз $q'$ , кПа	Коэффициент несущей способности $k_N$	Несущая способность основания $N$ , кН	Предельное давление $p_u$ , кПа
0	0,1	1,74	3,3	1,00	269,4	224,5
0,1	0,12	2,09	3,3	1,01	271,5	226,3
0,2	0,24	4,18	3,4	1,08	291,4	242,8

Таблица 3 – Определение расчетного сопротивления грунтового основания

Стрела подъема $h$ , м	Глубина заложения $d$ , м	Боковой пригруз $q$ , кПа	Относит. боковой пригруз $q'$ , кПа	Коэффициент расчетного сопротивления $k_R$	Расчетное сопротивление $R$ , кПа
0	0,1	1,74	3,3	1,00	170,0
0,1	0,12	2,09	3,3	1,09	185,3
0,2	0,24	4,18	3,4	1,15	195,5

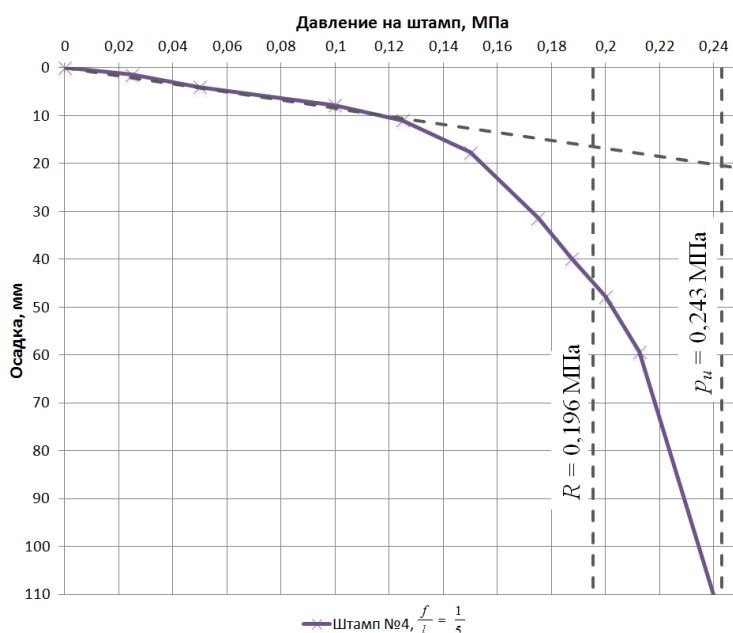


Рисунок 12 – График зависимости осадки от давления на экспериментальный штамп №4

Для изучения влияния бокового обжатия на деформирование грунтов, залегающих в активной зоне экспериментальной площадки, были проведены исследования в приборах трехосного сжатия, в камере типа А. Для получения зависимостей изменения модуля деформации от величины горизонтального обжатия грунта образцы испытывались при различном всестороннем давлении (рисунок 13). По результатам испытаний были найдены значения модуля деформации для дополнительного давления в различных диапазонах (5).

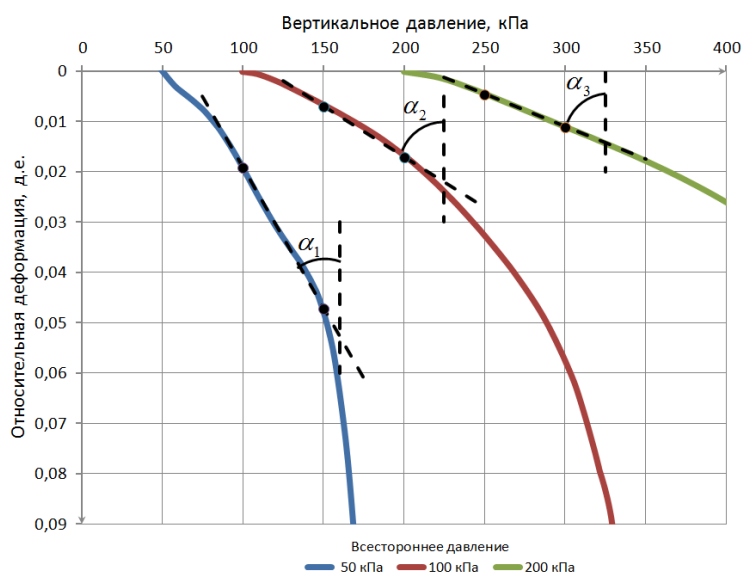


Рисунок 13 – Результаты стабилометрических испытаний ИГЭ №2 суглинка мягкопластичного

$$E_1 = tg\alpha_1, E_2 = tg\alpha_2, E_3 = tg\alpha_3 \quad (8)$$

Зависимость модуля деформации от величины горизонтальных напряжений (рисунок 14) имеет линейный характер, значение горизонтального давления пропорционально увеличивает жесткость грунта.

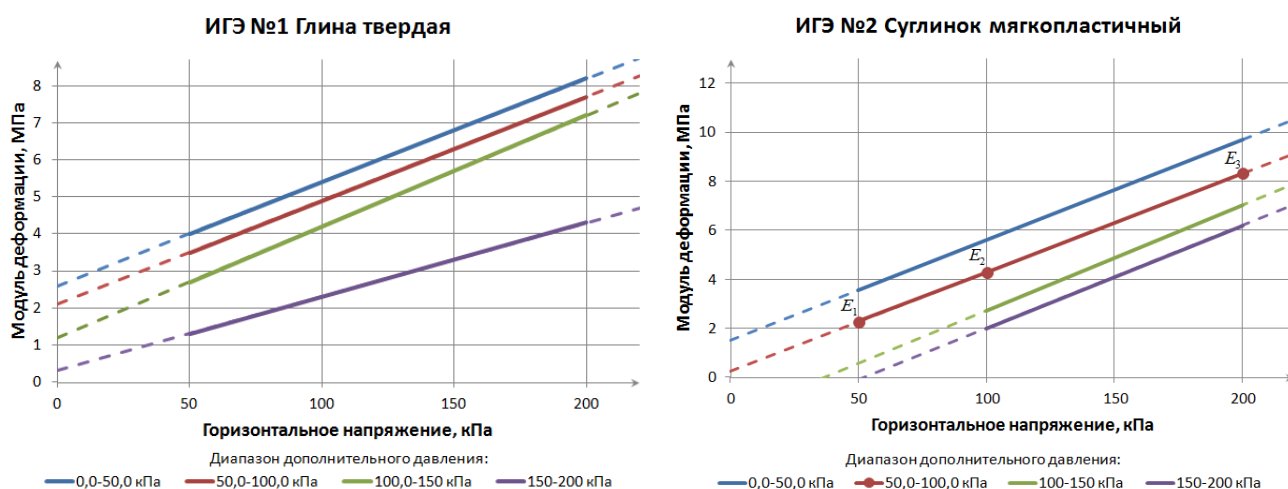


Рисунок 14 – Графики зависимости модуля деформации от величины горизонтального обжатия

Основываясь на полученных зависимостях  $E = f(\sigma_x)$ , было описано взаимодействие экспериментальных штампов и грунтового основания. Значения горизонтальных и вертикальных напряжений получены теоретически при учете экспериментальной эпюры контактных напряжений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен алгоритм определения деформируемости грунтового основания, при взаимодействии системы «основание-фундамент» при криволинейной форме контактной поверхности, а также теоретически обосновано уменьшение деформируемости основания при загрузении данными фундаментами при решении задачи в рамках теории упругости;

2. Предложена методика расчета деформаций грунтового основания с учетом зависимости модуля деформации грунта от величины горизонтального обжатия  $E = f(\sigma_x)$ . Данные зависимости предлагается получать путем проведения серий испытания грунта в приборах трехосного сжатия;

3. Предложена методика определения несущей способности грунтового основания при загрузении фундаментами с криволинейным очертанием контактной поверхности. Составлены справочные таблицы повышающих коэффициентов несущей способности при изменении стрелы подъема контактной поверхности, а также учитывающие характер контактной поверхности: гладкая или шероховатая. Доказано, что грунтовое основание загруженное гладкой криволинейной контактной поверхностью при одинаковых характеристиках грунтового основания обладает большей несущей способностью.

4. Установлено, что в рамках применимости фундаментов с криволинейным очертанием контактной поверхности, с технологической точки зрения (при относительной стреле подъема  $\bar{h}$  до 0,2), увеличение несущей способности возможно в пределах до 10% и 100% для шероховатой и гладкой контактной поверхности соответственно. Определяющее значение имеют конструкция фундамента (стрела подъема кривизны и характер контактной поверхности), его заглубление, а также прочностные характеристики, а именно угол внутреннего трения  $\varphi$ ;

5. Предложена методика и коэффициенты расчетного сопротивления, которые позволяют определить расчетное сопротивление грунтового основания при криволинейном очертании контактной поверхности;

6. Установлено, что при относительной стреле подъема  $\bar{h}$  до 0,2 расчетное сопротивление грунтового основания увеличивается до 20%. Определяющее значение имеют стрела подъема кривизны, заглубление

фундамента, а также прочностные характеристики грунтового массива, из которых наибольшее влияние оказывает угол внутреннего трения  $\varphi$ ;

7. Выполнены экспериментальные исследования взаимодействия грунтового основания со штампами, имеющими криволинейное очертание контактной поверхности. Произведена верификация коэффициентов несущей способности и расчетного сопротивления грунтового основания, полученных в рамках теоретического исследования. Подтверждена возможность увеличения несущей способности основания до 10% в зависимости от кривизны контактной поверхности, а увеличение расчетного сопротивления до 15% в рамках данных инженерно-геологических условиях экспериментальной площадки.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий**

1. Рачков, Д. В. Теоретическое обоснование повышения жесткости грунтового основания, нагруженного по выпуклой вверх криволинейной поверхности [Текст] / Я. А. Пронозин, Ю. В. Наумкина, Д. В. Рачков // Геотехника. International Journal Geotechnics. – 2015. – №2. – С. 4-9.

2. Рачков, Д. В. Уточненный метод послойного суммирования для определения осадки плитных фундаментов [Текст] / Я. А. Пронозин, Ю. В. Наумкина, Д. В. Рачков // Академический вестник. УралНИИпроект РААСН. – 2015. – №3. – С. 82-86.

3. Рачков, Д. В. Теоретические исследования особенностей напряженно-деформированного состояния основания, нагруженного по выпуклой вверх криволинейной поверхности [Текст] / Я. А. Пронозин, Д. В. Рачков // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – №1 (45). – С. 29-39.

4. Рачков, Д. В. Экспериментально - теоретическое обоснование уточненного метода послойного суммирования для определения осадки фундаментов мелкого заложения [Текст] / Я. А. Пронозин, В. М. Чикишев, Д. В. Рачков // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – №Т.8, – № 4. – С. 95-103.

### **Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.**

5. Rachkov, D. V. Qualified method of layer-by-layer summation to define the settlement of foundation [Text] / D. V. Rachkov, Ya. A. Pronozin, V. M. Chikishev // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – №4. – pp. 36-45.

### **Статьи, опубликованные в других журналах и изданиях:**

6. Рачков, Д. В. Исследование влияния формы контактной поверхности фундамента на деформируемость грунтового основания естественного сложения [Текст] / Я. А. Пронозин, Д. В. Рачков // Вестник Тюменского Государственного Архитектурно-Строительного Университета. ФГБОУ ВПО ТЮМГАСУ. – 2015. – С. 20-24

7. Рачков, Д. В. Экспериментально-теоретическое обоснование уточненного метода послойного суммирования для определения осадки фундаментов мелкого заложения [Текст] / Я. А. Пронозин, В. М. Чикишев, Д. В. Рачков // Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий. – Пермь. – 2017. – С.163-174

8. Рачков, Д. В. Результаты экспериментального исследования влияния формы контактной поверхности фундамента на деформируемость грунтового основания [Текст] / Я. А. Пронозин, Ю. В. Наумкина, Д. В. Рачков // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении. Материалы международной научно-технической конференции, г. Новочеркасск 13-15 мая 2015г. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ). – 2015. – С. 253-259.

9. Рачков, Д. В. Теоретическое исследование влияния способа расчета осадки фундамента мелкого заложения на её значение [Текст] / Я. А. Пронозин, Д. В. Рачков, Ю. В. Ванина // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, соискателей и магистрантов ТЮМГАСУ в двух томах. ФГБОУ ВПО "ТЮМГАСУ". – 2015. – С. 120-126

10. Рачков, Д. В. Теоретическое исследование взаимодействия однопролетного ленточно-оболочечного фундамента с линейно-деформируемым основанием [Текст] / Я. А. Пронозин, Д. В. Рачков, Ю. В. Ванина // В сборнике: Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии - 2016. Сборник материалов международной научно-практической конференции: в трех томах. ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». – 2016. – С. 127-132.

Подписано в печать 26.09.2018 г. Заказ No \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1,0

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Типография библиотечно-издательского комплекса.

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.