

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Евдокимов Александр Геннадьевич

РАСЧЕТ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ МОСТОВЫХ ОПОР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Готман Наталья Залмановна

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ МОСТОВЫХ ОПОР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ.....	11
1.1 Механизм карстовых деформаций	11
1.2 Особенности работы сваи в составе группы	20
1.3 Проектирование свайных фундаментов зданий и сооружений с учетом карстовых деформаций.....	23
1.4 Обзор нормативных документов, регламентирующих проектирование свайных фундаментов опор моста с учетом карстовой опасности	30
1.5 Выводы по главе 1.....	37
2 ОБОБЩЕНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНДАМЕНТОВ МОСТОВЫХ ОПОР И ПОСТРОЕНИЕ ВАРИАТИВНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	39
2.1 Использование МКЭ для моделирования карстовых деформаций	39
2.2 Верификация расчетной модели нагруженной сваи над карстовой полостью	51
2.2.1 Описание физического эксперимента.....	51
2.2.2 Результаты численного моделирования эксперимента и их сопоставление с натурными данными	55
2.2 Анализ проектных решений и выделение типов фундаментов опор	59
2.3 Описание вариативной конечно-элементной модели	65
2.4 Обоснование граничных условий конечно-элементной модели.....	68
2.6 Выводы по главе 2.....	75
3 МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	77
3.1 Описание методики выполнения численных расчетов	77
3.2 Планирование численного эксперимента.....	82
3.3 Выводы по главе 3.....	85
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВАЙ С ГРУНТОМ В СОСТАВЕ	

ФУНДАМЕНТА ОПОРЫ МОСТА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ	86
4.1 Исследование закономерностей изменения касательных напряжений на боковой поверхности свай и вертикальных напряжений в нижнем конце свай	86
4.1.1. Определение расчетных параметров свайных фундаментов опор мостов при действии карстовых деформаций при $h/b \leq 1$	90
4.1.2. Определение расчетных параметров свайных фундаментов опор мостов при действии карстовых деформаций при $h/b > 1$	94
4.2 Разработка метода расчета несущей способности свай	98
4.3 Выводы по главе 4	103
5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА МОСТОВОЙ ОПОРЫ ПРИ РАЗВИТИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ	105
5.1 Методика расчета свайных фундаментов мостовой опоры при образовании карстовых деформаций	105
5.2 Рекомендации по выполнению численных расчетов	111
5.3 Пример расчета	116
5.4 Выводы по главе 5	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В связи с высокой актуальностью модернизации и расширения магистральной инфраструктуры в нашей стране, в ближайшем будущем может быть создано тысячи километров новых ж/д путей и автомобильных дорог. При этом, неизбежным будет процесс инженерно-строительного освоения площадок, на которых протекают опасные природные (карстовые) процессы. Мостовые переходы с опорами на кустовых свайных фундаментах наиболее подвержены негативному влиянию карстовых процессов.

В настоящее время в нормативной и в научной литературе недостаточно учтены особенности поведения свайных фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании при возникновении разных типов карстопроявлений, что требует проведения специальных исследований.

При расчете карстозащитных свайных фундаментов мостовых опор должны быть учтены возможные типы карстопроявлений, влияющие на выбор расчетных параметров карстовых деформаций, а также изменение напряженно-деформированного состояния массива грунта, взаимодействующего со сваями, в зоне карстопроявлений. Учет этих изменений традиционно выполняется путем исключения ряда свай в зоне карстопроявлений по типу «провал», в то время как в связи с разнообразием геологического сложения оснований свайных фундаментов опор возможны карстопроявления по типу «оседание». В этом случае зона карстопроявлений увеличивается, а взаимодействие свай с деформируемым массивом грунта приводит к увеличению нагрузок на сваи и снижению их несущей способности.

Исследование и усовершенствование методов расчета свай при возникновении карстовых деформаций позволят повысить эффективность и надежность проектных решений. Поэтому данная тема исследования является актуальной и имеет практическую ценность.

Степень разработанности темы исследования

Российскими и зарубежными учеными выполнено большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований, направленных на изучение работы фундаментов зданий и сооружений при карстовых деформациях.

Исследованием процесса карстовых деформаций и проблемой проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Аникеев А.В., Андрейчук В.Н., Ашпиз Е.С., Гарбер В.А., Готман А.Л., Готман Н.З., Давлетяров Д.А., Илюхин В.А., Ковалев В.А., Каюмов М.З., Леоненко М.В., Магзумов Р.Н., Мартин В.И., Метелюк Н.С., Мулюков Э.И., Незамутдинов Ш.Р., Поспехов В.С., Протодьяконов М.М., Патрикеев А.Б., Сорочан Е.А., Толмачев В.В., Травкин А.И., Троицкий Г.М., Уткин М.М., Хоменко В.П., Шахунянц Г.М., Шапошников А.В., Шейнин В.И., Aderhold G., Beck B.F., Reuter F., Milanovic P.T., Walham T., Bell F.G., Sowers G.F. и др. Однако, в работах ученых не учитываются закономерности распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай в зависимости от параметров карстовых деформаций.

Свайный фундамент мостовой опоры в большинстве случаев представляет собой куст из буронабивных свай, объединенных ростверком. Поведение группы свай при нагружении, а также при действии карстовых деформаций, имеет свои особенности и отличается от поведения одиночной сваи. При этом традиционно рассматриваются карстовые деформации по типу «провал».

Существенный вклад в изучение особенностей работы свай, в том числе поведение свай в составе группы в своих многочисленных исследованиях внесли следующие ученые: Алехин В.С., Безволев С.Г., Барвашов В.А., Бартоломей А.А., Бартоломей Л.А., Бахолдин Б.В., Готман А.Л., Готман Н.З., Григорян А.А., Глухов В.С., Дорошкевич Н.М., Зерцалов М.Г., Знаменский В.В., Королева И.В., Лалетин Н.В., Мангушев Р.А., Мирсаяпов И.Т., Никифорова Н.С., Пилягин А.В., Полищук А.И., Пономарев А.Б., Разводовский Д.Е., Скибин Г.М., Тер-Мартirosян А.З.,

Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Фадеев А.Б., Федоровский В.Г., Чунюк Д.Ю., Шапиро Д.М., Шарафутдинов Р.Ф., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шейнин В.И., Шулятьев О.А., Randolph M.F., Katzenbach R. и др. Тем не менее, в исследованиях ученых не затрагиваются особенности работы кустовых фундаментов при возникновении карстовых деформаций.

Цель и задачи исследования. Целью работы является развитие методики расчета свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций в основании.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- выполнить анализ нормативной и научной литературы по исследуемой теме, обобщить опыт проектирования фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании;
- составить вариативную расчетную конечно-элементную модель и разработать методику численных исследований с учетом вариативности расчетных параметров для проведения численного эксперимента;
- изучить влияние расчетных параметров карстовых деформаций на взаимодействие свай с грунтовым основанием, которое выражается в изменении касательных напряжений на боковой поверхности свай и вертикальных напряжений в нижнем конце свай;
- с учетом выявленных закономерностей разработать аналитические решения для расчета свай, а именно: дополнительных нагрузок на сваи, несущей способности свай, осадок фундаментов мостовых опор и коэффициента жесткости свай при образовании карстовых деформаций в основании;
- усовершенствовать методику расчета свайных фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании и составить рекомендации по выполнению численных расчетов фундаментов.

Объектом исследования в диссертации являются свайные фундаменты мостовых опор на карстоопасном основании.

Предметом исследования является взаимодействие свай с окружающим грунтовым массивом при действии карстовых деформаций.

Научная новизна заключается в следующем:

- получены закономерности распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай фундамента мостовой опоры в зависимости от параметров карстовых деформаций;
- разработаны аналитические методы расчета дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициента жесткости свай при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- предложен новый способ назначения граничных условий по нижней грани модели при выполнении численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор на образование карстовых деформаций в основании;
- усовершенствованы аналитические методы расчета несущей способности свай фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- составлены рекомендации по выполнению численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор при действии карстовых деформаций.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке аналитических методов расчета осадок и несущей способности свай фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций, основанных на полученных закономерностях распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай в зависимости от параметров карстовых деформаций.

Практическая значимость заключается в предложении методики расчета свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций, учитывающей все варианты возможных карстопроявлений в основании свай и включающей рекомендации по выполнению численных расчетов. Методика может

быть применена при проектировании фундаментов опор на закарстованных территориях.

Методология и методы исследования. Достижение цели исследования и решение задач осуществлялось с использованием следующих методов:

– анализ и синтез – при уточнении и конкретизации проблемы расчета кустовых свайных фундаментов при действии карстовых деформаций в обзоре литературы (глава 1); при разработке аналитических методов расчета свайных фундаментов мостовых опор при действии карстовых деформаций (глава 4) и рекомендаций по выполнению численных расчетов (глава 5);

– обобщение – при обобщении опыта проектирования фундаментов мостовых опор на карстоопасных площадках (глава 1);

– сравнение – при обосновании использования численных исследований взаимодействия свай с грунтовым основанием при действии карстовых деформаций (глава 2);

– классификация – при выделении существенных признаков фундаментов мостовых опор и разделению их по геометрическим параметрам и типам основания для составления вариативных расчетных схем (глава 2);

– моделирование – при составлении численной модели для моделирования физического эксперимента (глава 2); при составлении численной вариативной модели для выполнения исследования особенностей взаимодействия свай фундамента мостовых опор с грунтовым основанием при действии карстовых деформаций (глава 3).

Для решения поставленных задач в части аналитических и численных исследований использовались классические решения механики грунтов, теории упругости, условия пластичности и прочности Мора-Кулона. При выполнении численных исследований были использованы программные комплексы, реализующие метод конечных элементов. Анализ и интерпретация результатов численного исследования выполнялась с использованием методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай фундамента мостовой опоры в зависимости от параметров карстовых деформаций;
- аналитические методы расчета дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициента жесткости свай при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- способ назначения граничных условий по нижней грани модели при выполнении численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор на образование карстовых деформаций в основании;
- аналитические методы расчета несущей способности свай фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- рекомендации по выполнению численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор при действии карстовых деформаций.

Степень достоверности основывается на:

- применении классических методов механики грунтов и строительной механики, апробированных методов численного моделирования, использованием верифицированных программных комплексов;
- удовлетворительной сходимости численных исследований с обоснованными результатами экспериментальных исследований, опубликованных в научной литературе, а также результатов аналитических и численных решений.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты» ФГАОУ «Российский университет транспорта», на внутренних научно-практических конференциях «Неделя науки» в период с 2019 по 2022 г.; на научно-технической конференции с иностранным участием «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении» в 2019 г. (ВГТУ, г. Воронеж); на научно-практической конференции с международным участием «Пути к конкурентно способным и экономичным решениям по

строительству зданий и сооружений транспортной инфраструктуры» в 2019 г. (РОАТ РУТ (МИИТ), г. Москва); на II всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» в 2021 г. (ПНИПУ, г. Пермь); на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог, аэродромов и транспортных сооружений» в 2021 г. (РУТ (МИИТ), г. Москва); на 80-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ в 2022 г. (МАДИ, г. Москва); на IV международной научно-технической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» в 2022 г. (ЮРГПУ (НПИ), г. Новочеркасск); на 2-й Международную научно-техническую конференцию памяти профессора Д.М. Шапиро «Использование современных моделей в механике грунтов, геотехнических расчетах и фундаментостроении» в 2023 г. (ВГТУ, г. Воронеж).

Результаты данного исследования были использованы при разработке «Методики учета нагрузок, воздействующих на фундаменты опор мостовых сооружений высокоскоростной железнодорожной линии при образовании карстовых деформаций», разработанной НИИОСП им. Н.М. Герсевича – АО «НИЦ «Строительство».

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них: 2 работы в рецензируемых научных изданиях; 1 работа в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 7 таблиц.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА РАСЧЕТА ФУНДАМЕНТОВ МОСТОВЫХ ОПОР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

1.1 Механизм карстовых деформаций

Для расчета свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций необходимо изучение и понимание механизма течения карстовых деформацией, факторов, влияющих на него, особенностей деформирования покрывающих слоев. Исследованием механизма карстовых деформаций, а также вопросами проектирования фундаментов зданий и сооружений на карстоопасных площадках занимались многие отечественные и иностранные ученые. В их число входят: Адерхолд Г.И. [2], Андрейчук В.Н. [6], Аникеев А.В. [7], Ашпиз Е.С. [8; 9], Ковалев В.А. и Патрикеев А.Б. [64–66], Незамутдинов Ш.Р. [90; 92], Протодяконов М.М. [88], Толмачев В.В. [105; 107], Травкин А.И. [109], Хоменко В.П. [121; 122], Шейнин В.И. [60; 66; 130] и др.

На механизм карстовых деформаций оказывает влияние множество природных и техногенных факторов: литологическая изменчивость карстующихся пород и их растворимость, гидрогеологические условия, мощность и состав покровной толщи и др. Обычно, карстующиеся грунты перекрыты осадочными породами (глинистыми или песчаными). Глинистые грунты считаются наиболее распространенным типом горных пород [5; 94; 111; 123]. Они же наиболее часто применяются в качестве оснований зданий и сооружений, особенно, если фундаменты выполнены в виде сильно заглубленных свай.

Карстово-суффозионные разрушения дисперсных покрывающих пород развиваются в условиях трех типов [122]:

- если постоянные водоносные горизонты отсутствуют;
- если есть один водоносный горизонт, который присутствует как в карстующихся, так и в покрывающих породах;

- если между водоносным горизонтом, находящимся в карстующемся слое, и водоносным горизонтом покровной толщи есть водонепроницаемый слой.

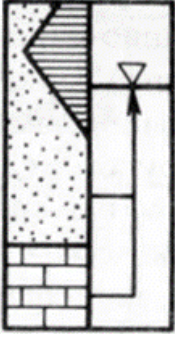
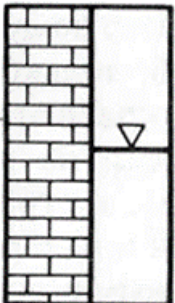
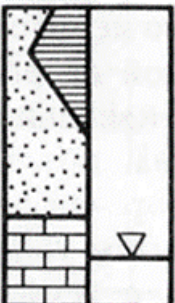
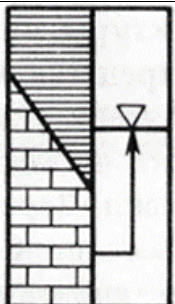
Наиболее существенное влияние на механизм разрушения грунтов над растущей карстовой полостью оказывают тип (связные, или несвязные) и характеристики грунта над карстующимися грунтами. При этом грунт, заполняющий трещины и карстовые полости, может быть вымыт в процессе суффозионного выноса даже без наличия покрывающих пород.

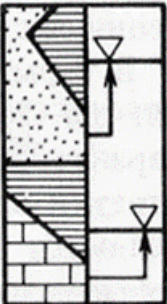
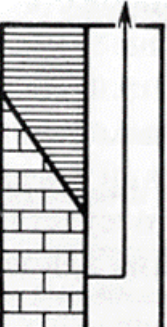
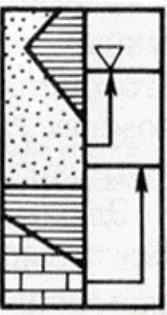
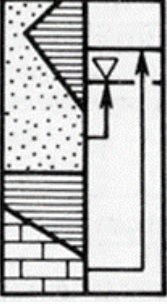
Если покровная толща представлена водопроницаемыми грунтами или имеет вертикальные фильтрационные каналы, то вода, в процессе фильтрации, может вызвать суффозионный вынос грунта в карстовые полости. При этом начинается последовательное формирование сводов обрушение и, как следствие, рост вверх суффозионной полости вплоть до выхода на поверхность в виде провала. В случае поступления подземных вод снизу из карстовых трещин, может происходить как бы обратный процесс, который заключается в разрушении покрывающих пород поступающими подземными водами.

Если покровная толща карстующихся грунтов представлена водоупором, карстово-суффозионные процессы способны развиваться только при наличии в нем сквозных нарушений сплошности. Такие нарушения могут возникнуть, если водонепроницаемый слой находится над растущей карстовой полостью или из-за техногенного влияния человека на подземные воды, приводящего к изменению напряженного-деформированного состояния покровной толщи .

В таблице 1.1 приведены схемы напластования пород над карстующимися грунтами, а также уровни подземных вод и наличие напорных горизонтов, сочетание которых приводит к возникновению карстово-суффозионных процессов.

Таблица 1.1 – Типизация природных условий развития карстово-суффозионных процессов

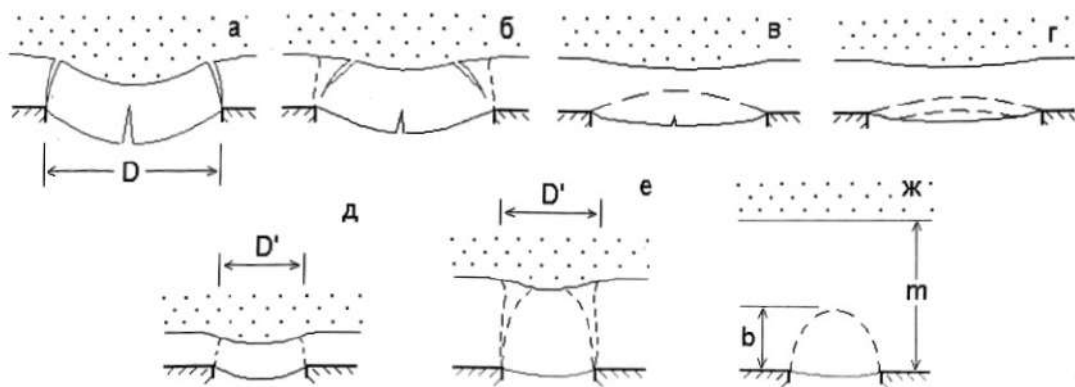
Схематичное изображение	Описание
	Над карстующимися породами залегают дисперсные некарстующиеся (покрытый карст) несвязные водопроницаемые грунты. Уровень трещинно-карстовых вод (при их безнапорном характере) расположен выше кровли карстующих пород (единый водоносный горизонт в карстующихся и покрывающих породах).
	Карстующиеся породы выходят на поверхность земли (открытый карст). Уровень трещинно-карстовых вод (при их безнапорном характере) расположен ниже кровли карстующихся пород.
	Над карстующимися породами залегают дисперсные некарстующиеся (покрытый карст) несвязные водопроницаемые грунты. Уровень трещинно-карстовых вод (при их безнапорном характере) расположен ниже кровли карстующихся пород.
	Над карстующимися породами залегают дисперсные некарстующиеся (покрытый карст) связные слабопроницаемые грунты до поверхности земли. Уровень трещинно-карстовых вод (при их безнапорном характере) расположен ниже кровли карстующихся пород.

Схематичное изображение	Описание
	Над карстующимися породами залегают дисперсные некарстующиеся (покрытый карст) связные водопроницаемые грунты, перекрытые несвязными водопроницаемыми грунтами. Уровень трещинно-карстовых вод (при их безнапорном характере) расположен ниже кровли карстующихся пород.
	Над карстующимися породами залегают дисперсные некарстующиеся (покрытый карст) связные слабопроницаемые грунты до поверхности земли. Трещинно-карстовые воды обладают пьезометрическим напором, отметка которого превышает отметку кровли вышележащего водоупора.
	Над карстующимися породами залегают дисперсные некарстующиеся (покрытый карст) связные водопроницаемые грунты, перекрытые несвязными водопроницаемыми грунтами. Отметка пьезометрического напора трещинно-карстовых вод не превышает отметку уровня (напора) надкарстовых вод.
	Над карстующимися породами залегают дисперсные некарстующиеся (покрытый карст) связные водопроницаемые грунты, перекрытые несвязными водопроницаемыми грунтами. Отметка пьезометрического напора трещинно-карстовых вод превышает отметку уровня (напора) надкарстовых вод.

На закарстованных участках весьма часто встречается покровная толща, представленная водоупорными глинистыми грунтами [62; 74; 109; 121]. На

рисунке 1.1 показан типичный механизм разрушения связных грунтов над полостью в зависимости от состояния, свойств и толщины пород [7]. Показано, что в растянутых в плане участках водоупорных глин над карстовой полостью, как правило, образуется трещина (рисунок 1.1, а-в). Также видно (рисунок 1.1, а-г), что чем тверже и прочнее слой связных грунтов, тем меньше его прогиб и менее ярко выражена трещина разлома. Свод обрушения формируется при замыкании таких трещин в грунте.

При формировании полости под слабым и пластичным покровным слоем создается иллюзия, что происходит его срез по краю отверстия (см. рисунок 1.1, а).



а-г – мягкопластичная, пластичная, полутвердая и твердая консистенция грунтов покровной толщи соответственно; д – $m < D$; е – $m \approx D$; ж – $m > D$

Рисунок 1.1 – Характер деформирования-разрушения слоя связных грунтов над полостью в зависимости от их консистенции (и соотношения мощности слоя и пролета полости m/D [7])

Когда относительная толщина покровного слоя m/D увеличивается (рисунок 1.1, д-ж) характер его деформирования и разрушения становится похожими на тот, что проявляется при уменьшении влажности глинистых пород. Если соотношение высоты свода b и толщины водоупорных глин m примерно равно единице, консоли, нависающие над сводом, могут оказаться неустойчивыми и разрушиться после выпадения центрального блока. (рисунок 1.1, е). Если выполняется условие $b \geq m$, то образуются почти вертикальные стенки сквозного отверстия (см.

рисунок 1.1, а, б, в, е), при этом его нижние и верхние пролеты почти одинаковые ($D \approx D'$). Если $b < m$, свод над полостью остаётся устойчивым. И если в процессе эксплуатации полости в карстующихся грунтах соотношение $b < m$ сохраняется, образование провала в основании становится невозможным. Эту особенность необходимо принимать во внимание при определении типа карстовой деформации («провал» или «оседание»), а также при расчётах диаметра провалов на поверхности земли. Стоит отметить, что за пределами ослабленного участка деформации слоя незначительны, но они всё же присутствуют и тем больше, чем более пластичен слой и чем сильнее давление вышележащих пород.

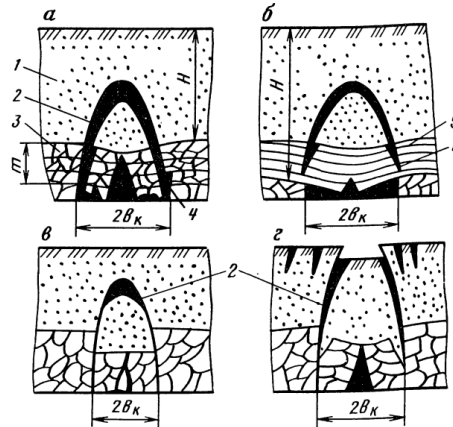
Карстовые деформации по характеру их проявления на земной поверхности можно классифицировать следующим образом: провалы, локальные оседания и оседания [43; 105; 108]. Характер деформирования покровной толщи при достижении полостью критических размеров практически не зависит от ее глубины расположения (при том, что глубина расположения больше критической ширины). При обрушении грунтов над полостью образуются своды. В некоторых случаях, своды могут выходить на поверхность (рисунок 1.2, г). При дальнейшем расширении полости, в грунте покровной толщи может образоваться ряд последовательных сводов (каждый следующий – круче предыдущего).

Если полости в карстующихся грунтах находятся на небольшой глубине и имеют сравнительно небольшую высоту незаполненного пространства (h_n), то карстовые деформации могут проявиться плавным прогибом всей покровной толщи, формируя на поверхности земли просадки с крутыми склонами (рисунок 1.3).

В случае образования на глубине разуплотненной зоны (например, из-за заполнения свода равновесия вышележащим грунтом (рисунок 1.4), происходит уплотнение грунта и формируется оседание поверхности.

Изучению механизма карстовых деформаций посвящено множество лабораторных испытаний. Особенностью карстово-суффозионных процессов является то, что они протекают, как правило, на значительной глубине и скрыты от

непосредственного наблюдения. При этом, проведение натурных испытаний с воспроизведением этого процесса либо связано со значительными материальными затратами, либо попросту невозможно.



а – кровля полости сложена скальными грунтами; б – кровля полости сложена глинистыми грунтами; в – вывал отдельных блоков: г – обрушение консолей; 1 – песок; 2 – полость; 3 – скальный грунт; 4 – наклонная трещина; 5 – глинистый грунт

Рисунок 1.2 – Особенности деформации пород, образующих кровлю полости [108]

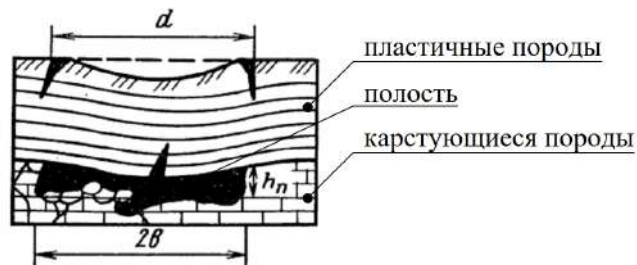


Рисунок 1.3 – Предполагаемый механизм локального оседания при наличии незаполненной карстовой полости [106]

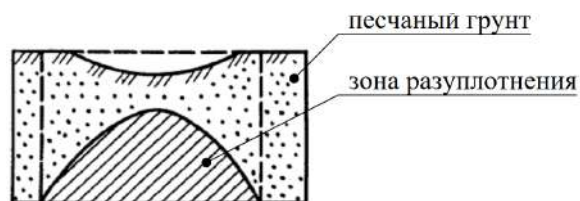
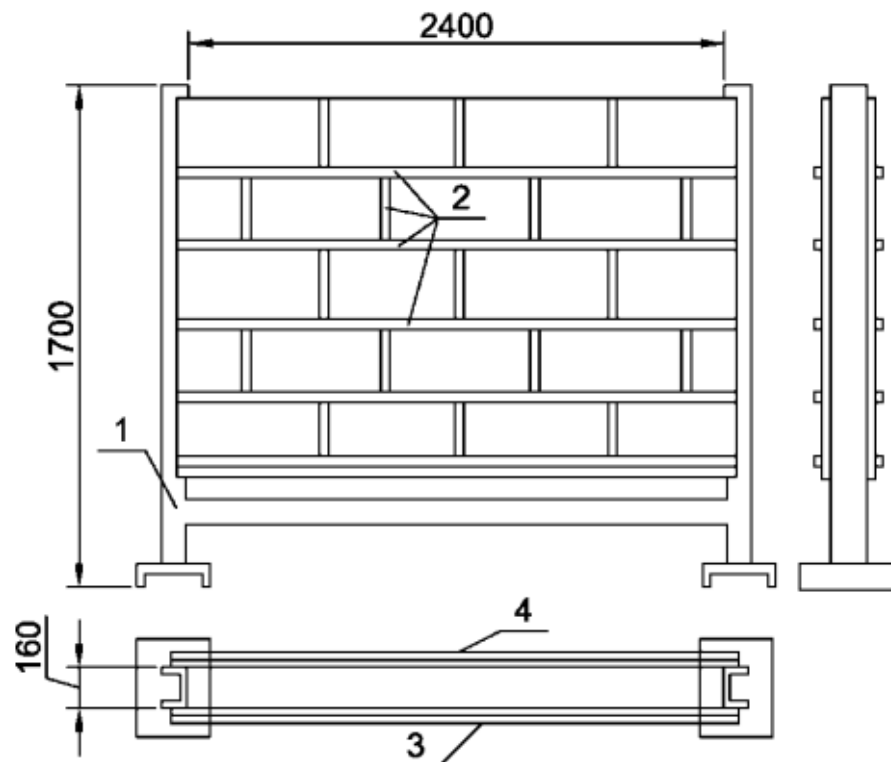


Рисунок 1.4 – Предполагаемый механизм локального оседания при наличии разуплотненной зоны [106]

Большое распространение получило моделирование методом эквивалентных материалов в плоских лотках. В отличие от объемных моделей, в плоских нельзя учесть трехмерное напряженно-деформированное состояние, но они более наглядны и менее трудоемки.

В методе эквивалентных материалов взамен натуральных горных пород используют некоторые искусственные материалы, эквивалентные моделируемым грунтам. При правильно подобранных материалах модели, их физико-механические характеристики находятся в необходимых масштабированных соотношениях со свойствами натурных горных пород.

В работе Травкина А.И. [109] выполнено исследование устойчивости покровной толщи над карстовой полостью. Опыты выполнялись в плоском лотке, представляющем собой жесткий металлический каркас с прозрачной лицевой стенкой (рисунок 1.5)



1 – швеллер; 2 – уголки жесткости; 3 – оргстекло; 4 – доски

Рисунок 1.5 – Схема испытательного лотка [109]

Для изготовления эквивалентного материала использовались следующие составляющие: песок различной крупности, бентонитовая глина, гипс, известь, дизельное масло, дробленая слюда, мыльная эмульсия, вода.

В процессе проведения испытания выполнялся последовательный рост полости, а наблюдение за процессом позволило в общих чертах оценить схему механизма провалообразования и поведение покрывающих полость грунтов, представляющих собой глины, гипсы или мергели.

По результатам испытаний можно рассмотреть поведение непосредственной и основной кровли на этапах от зарождения полости до достижения ею критических размеров. К непосредственной кровле относятся слои, находящиеся в непосредственном контакте с карстующимися грунтами. Непосредственная кровля беспорядочно обрушается или плавно прогибается в растущую полость. Основная кровля располагается над непосредственной. Провалообразование при последовательном росте полости происходит в следующей этапности:

- 1) прогиб и первые вывалы непосредственной кровли;
- 2) прогиб основной кровли;
- 3) обрушение значительных масс пород кровли;
- 4) обрушение пород массива выше кровли, вплоть до земной поверхности.

Впрочем, иногда обрушения до поверхности не происходит и весь массив вовлекается в плавный изгиб. Таким образом, в результате выполненных опытов, было установлено, что образованию карстовой воронки на поверхности земли предшествуют несколько этапов локального разрушения покровной толщи, так называемых внутренних вывалов в карстовую полость.

Похожие результаты были получены Незамутдиновым Ш.Р. [90]. Испытания выполнялись на стенде, аналогичном стенду Травкина А.И. (рисунок 1.5). Полученные результаты моделирования также показывают, что при увеличении пролета

карстовой полости происходит образование промежуточных вывалов покровной толщи, и лишь затем образование карстового провала на поверхности земли.

В исследованиях Незамутдинова Ш.Р. был проведен анализ влияния дополнительной нагрузки, приложенной на поверхности земли, на устойчивость покровной толщи при различных пролетах полости. Опыты показали, что при наличии жесткой нагрузки устойчивость грунтового массива значительно выше, чем при свободной поверхности.

Основываясь на данных, полученных в ходе серии лотковых экспериментов, можно предположить, что потеря устойчивости грунтового массива над растущей карстовой полостью не всегда становится причиной начала прогрессирующего разрушения основания и провальных деформаций.

Немаловажным является вывод о том, что нагрузка от здания или сооружения, находящегося над полостью, будет оказывать дополнительное влияние на напряженно-деформированное состояние покровных слоев в процессе развития полости. Сам фундамент и его жесткость, воздействуя на кровлю карстовой полости, также может изменить характер ее деформирования и обрушения. Наличие у фундамента заглубленных свай может внести дополнительный вклад механизм развития карстовых деформаций в процессе роста полости. Все эти факторы могут быть учтены только путем математического моделирования роста полости в карстующихся грунтах.

1.2 Особенности работы свай в составе группы

Свайные фундаменты мостовых опор, как правило, представляют собой группу свай различных конфигураций (свайный куст). При этом, поведение в составе группы отличается от поведения одиночной сваи. На текущий момент поведение одиночных свай изучено достаточно хорошо, о чем свидетельствует множество исследований отечественных и зарубежных ученых: Безволев С.Г. [17],

Готман А.Л. [20–22; 25], Готман Н.З. [26; 27; 36–38; 38; 40; 42; 44–46; 143; 144; 146; 147], Девальтовский Е.Э. [49], Зарецкий Ю.К. [56; 57], Фадеев А.Б. [112–116], Федоровский В.Г. [61; 117–120], Шапиро Д.М. [125–128], Шулятьев О.А., Broms В.В. [138], Terzaghi К. [153; 154] и др.

В поведении групп свай выделен ряд вопросов, которым среди отечественных и зарубежных ученых было уделено наибольшее внимание. Среди них, актуальными в области кустовых фундаментов мостовых опор являются:

- влияние устройства сваи на напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта вокруг и под свай;
- расчет осадок комбинированных свайно-плитных фундаментов и кустов свай;
- влияние процесса нагружения свайного фундамента на НДС грунта вокруг и под сваями;
- зависимость предельное сопротивление основания от расчетных параметров свайного фундамента;
- взаимодействие куста свай с окружающим грунтом при образовании карстовых деформаций.

В настоящем исследовании сделан акцент на вопросах изменения напряженно-деформированного состояния окружающего сваи грунта в процессе нагружения свай и при образовании карстовых деформаций.

В обычных условиях эксплуатации касательные напряжения на боковых поверхностях свай увеличиваются с глубиной, причем на крайних и угловых сваях они растут с верха сваи (боковая поверхность не обжата соседними сваями и работает на протяжении всей глубины), а в центральных – касательные напряжения развиваются в большей мере в нижней части сваи (боковая поверхность центральных свай не включается в работу полностью из-за эффекта «обжатия») [32]. Изучением данного эффекта «обжатия» свай при их нагружении занимались

Бартоломей А.А. [13; 14], Готман А.Л. [20–22; 25], Григорян А.А. [47; 48], Лалетин Н.В. [68].

В исследованиях Дорошкевича Н.М., Знаменского В.В. и др. [50–53; 136] был проведен анализ работы групп свай в различных условиях. В результате анализа было установлено, что свайный фундамент допускается рассматривать как единый массив при шаге свай менее пяти диаметров.

Исследования, проведенные Фадеевым А.Б. [112–116], Пилягиным А.В. [75; 77; 78], Бахолдиным Б.В. [15; 16], Разводовским Д.Е. [89] выявили, что работа одиночных свай и свай в составе группы существенно отличается друг от друга. Была обнаружена характерная особенность центральных свай: что при нагружении группы свай первыми включаются в работу нижние части свай, а затем верхние. При этом предельное состояние по боковой поверхности достигается снизу вверх, а не сверху вниз, как у одиночной сваи. В этом проявляется эффект «обжатия».

Подобные исследования (экспериментальные и теоретические), проводились и иностранными учеными. Randolph M.F. [150–152] в своих исследованиях подтвердил качественные различия в работе свай в группах и одиночных свай. Основное отличие заключалось в разном порядке нагружения сваи вдоль её длины при увеличении нагрузки. Katzenbach R. также отмечал специфическое поведение сваи в группах в своих работах [139; 148]. Необходимость выполнения экспериментальных исследований и внедрения систем мониторинга за возводимыми объектами отмечена в работах Шулятьева О.А. [65; 132–135], Ильичева В.А. [58; 91]. Авторы внесли существенный вклад в развитие методов расчета комбинированных свайно-плитных фундаментов для высотного строительства.

Стоит отметить исследования Готман Н.З. [26; 27; 36–38; 38; 40; 42; 44–46; 143; 144; 146; 147]. Многочисленные работы Готман Н.З. посвящены изучению особенностей расчета свайно-плитных фундаментов на специфических грунтах и в особых условиях, в том числе в условиях карстовых деформаций. Разработана методика расчета свайно-плитного фундамента, учитывающая возникновении

карстовых деформаций. Использование данной методики расчета позволяет обеспечить высокую экономическую эффективность при проектировании фундаментов.

Специфическое поведение свай в составе группы отметили также в своих работах Аббасов П.А. [1], Барвашов В.А. [10–12], Березанцев В.Г. [18], Мангушев Р.А. [70; 71], Мирсаяпов И.Т. [72; 73], Пономарев А.Б. [81–83], Семенов В.В. [93], Тер-Мартirosян А.З. [76; 102], Тер-Мартirosян З.Г. [102; 103], Улицкий В.М. [110], Чунюк Д.Ю. [93; 124], Шапиро Д.М. [125–128], Шашкин А.Г. [129], Шашкин К.Г. [110], Шейнин В.И. [131]. В своих исследованиях они подтверждают необходимость учета особенностей взаимодействия свай с окружающим грунтом, друг с другом через грунт, и другие виды взаимодействия при проектировании и расчете свай в составе группы.

1.3 Проектирование свайных фундаментов зданий и сооружений с учетом карстовых деформаций

Исследования поведения свай при образовании карстового провала в основании [24; 29; 41; 105; 155], выполненные в России и за рубежом, показывают, что на сваи передаются дополнительные вертикальные и горизонтальные нагрузки.

В результате своих исследований Готман Н.З. и Каюмов М.З. [34; 35; 63] представили новый метод расчета зданий и сооружений в районах с высокой вероятностью карстовых образований. Этот метод основывается на определении расчетного диаметра карстовой полости в грунте – это максимальный диаметр полости, при котором покровная толща сохраняет стабильность, а карстовые деформации не приводят к проявлению провалов на поверхности. Авторы также разработали методику расчета коэффициента постели для плитных фундаментов заглубленных зданий. Методика предусматривает понижение коэффициента постели к исходному значению, рассчитанному без учета образования карстовых полостей

Авторы разработали метод расчета коэффициента постели основания плитного фундамента заглубленного здания, предусматривающий введение снижающего коэффициента к коэффициенту постели основания, определенному без учета образования полости [39].

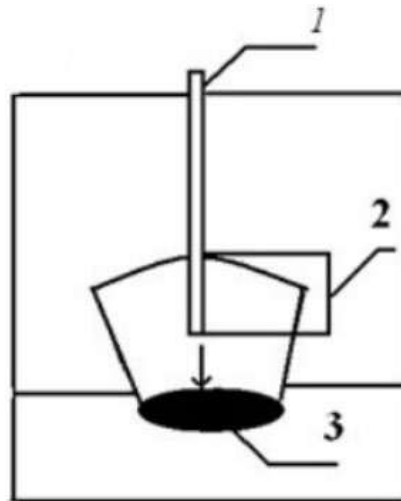
Ученые Готман А.Л. и Магзумов Р.Н. в результате серии численных экспериментов выявили особенности поведения свайных ленточных фундаментов при обрушении грунта на границах карстовых провалов, которые не были отражены в нормативных документах [23; 24]. Основная особенность заключается в том, что при образовании карстового провала в основании на сваи передается горизонтальное давление грунта, которое затем передается на ростверк. Также было установлено, что глубина нахождения карстового провала, длина свай и грунтовые условия оказывают существенное влияние на дополнительные изгибающие моменты, возникающие в сваях при образовании карстового провала. Диаметр провала, в свою очередь, практически не оказывает влияние на эти моменты [69].

В нормах РФ [97] сказано, что при возникновении карстовых деформаций на сваи передаются дополнительные вертикальные нагрузки (схема представлена на рисунке 1.6). Эти нагрузки рассматриваются как «негативное трение» и указывается на необходимость их учета в расчете при образовании карстовых деформаций [32].

Несмотря на необходимость учета негативного трения на зависших над полостью свай, ни в нормативной документации, ни в научной литературе нет указаний по расчету значения дополнительной нагрузки, воздействующей на сваи.

Зарубежными исследователями на данный момент активно развивается тема расчета несущей способности одиночной сваи-стойки, находящейся над карстовой полостью [137; 140–142]. В выполненных исследованиях проводились натурные и модельные эксперименты, а также численные исследования по нагружению статической нагрузкой одиночной буронабивной сваи, находящейся над карстовой полостью. По результатам исследований сделаны следующие основные выводы:

- 1) с увеличением пролета полости под сваей несущая способность сваи по грунту уменьшается, при этом возрастает доля нагрузки, воспринимаемая боковой поверхностью сваи относительно пяты: при полости, имеющей размеры 2м x 2м соотношение «боковая поверхность-пята» составляет 3:1, при полости 12м x 12м – 9:1;
- 2) при постоянном размере полости в плане, несущая способность сваи по грунту увеличивается с увеличением высоты покровной толщи до значения, равного трем диаметрам сваи, дальнейшее увеличение высоты покровной толщи не оказывает влияния на несущую способность сваи.



1 – свая; 2 – зона развития негативного трения; 3 – карстовая полость

Рисунок 1.6 – Схема механического взаимодействия сваи с карстовой полостью [98]

Расчет свайно-плитных фундаментов и кустов свай в зоне карстового провала отличается от расчета при обычных условиях из-за особенностей поведения свай и перераспределения нагрузок в зоне провала. При выборе параметров свайного поля (куста) важно помнить, что нагрузка, передаваемая на сваю, не должна быть больше расчетного допустимого значения. Усилия в сечениях плиты необходимо определять с учётом переменного коэффициента постели, с использованием которого моделируется упругое основание. Однако, при расчете фундаментов на

карстоопасных площадках необходимо учитывать особенности нагрузок, передаваемых на сваи, а также жесткости свай в поле, которые могут значительно отличаться от нагрузок и жесткостей при обычных условиях работы.

Коэффициент жесткости свай и расчетный диаметр карстовой полости являются основными расчетными параметрами для проектирования свайно-плитных фундаментов в грунтах, подверженных карстовым процессам.

Опыт проектирования и расчета свайных фундаментов зданий и сооружений на закарстованных площадках показывает, что наиболее простым способом описания карстовых процессов в расчете является моделирование карстового провала под подошвой фундамента в соответствии с расчетным диаметром карстовой полости, определяемого статистическими методами по данным инженерно-геологических изысканий. Положение возможных карстовых провалов под сооружением определяют исходя из наиболее неблагоприятного их влияния на работу конструкций сооружения. Обязательным является условие расположения провала под наиболее нагруженными колоннами, пересечениями стен, углами сооружений, в середине большей и меньшей сторон [97].

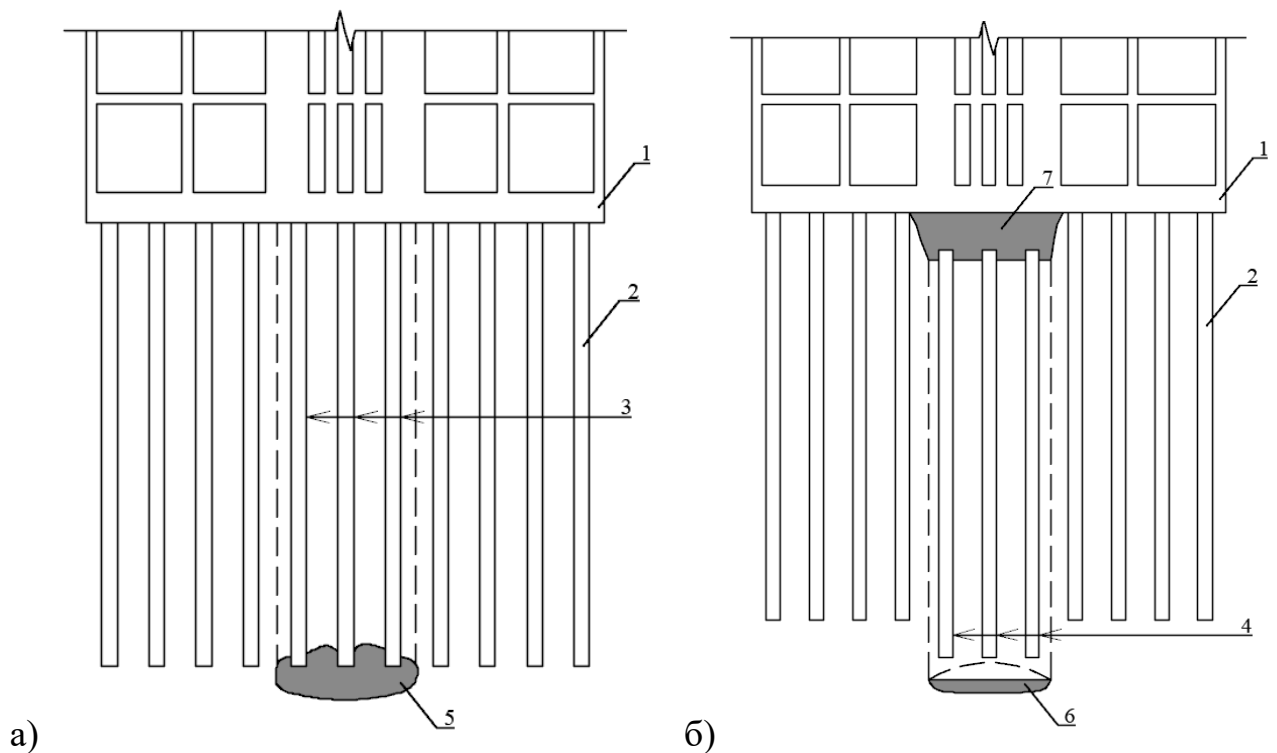
Расчет свайного фундамента на карстующихся площадках обычно выполняется с учетом возникновения карстовых деформаций типа «провал». В этом случае коэффициенты жесткости свай внутри площади провала принимаются равными нулю, а за пределами этой зоны остаются неизменными.

В СП 499.1325800 [101] рассмотрено несколько положений по расчету свайных фундаментов на закарстованных территориях.

В случае применения висячих свай с шарнирным узлом сопряжения свай с ростверком, необходимо обеспечить возможность выкальзывания свай из ростверка при образовании карстового провала (рисунок 1.7, б). Эта мера позволит исключить дополнительное нагружение основания и конструкций сооружения зависящими на участке провала сваями.

При жестком сопряжении висячих свай и ростверка, необходимо при расчете конструкций сооружения учесть дополнительную нагрузку, возникающую из-за «зависания» свай на участке провала. Это – нагрузка от собственного веса свай, от негативного трения грунта, передаваемого на сваи и т.д. (рисунок 1.7, а).

В случае использования свай-стоек, необходимо рассмотреть исключение из работы не менее одной сваи, находящейся на участке провала (рисунок 1.8).



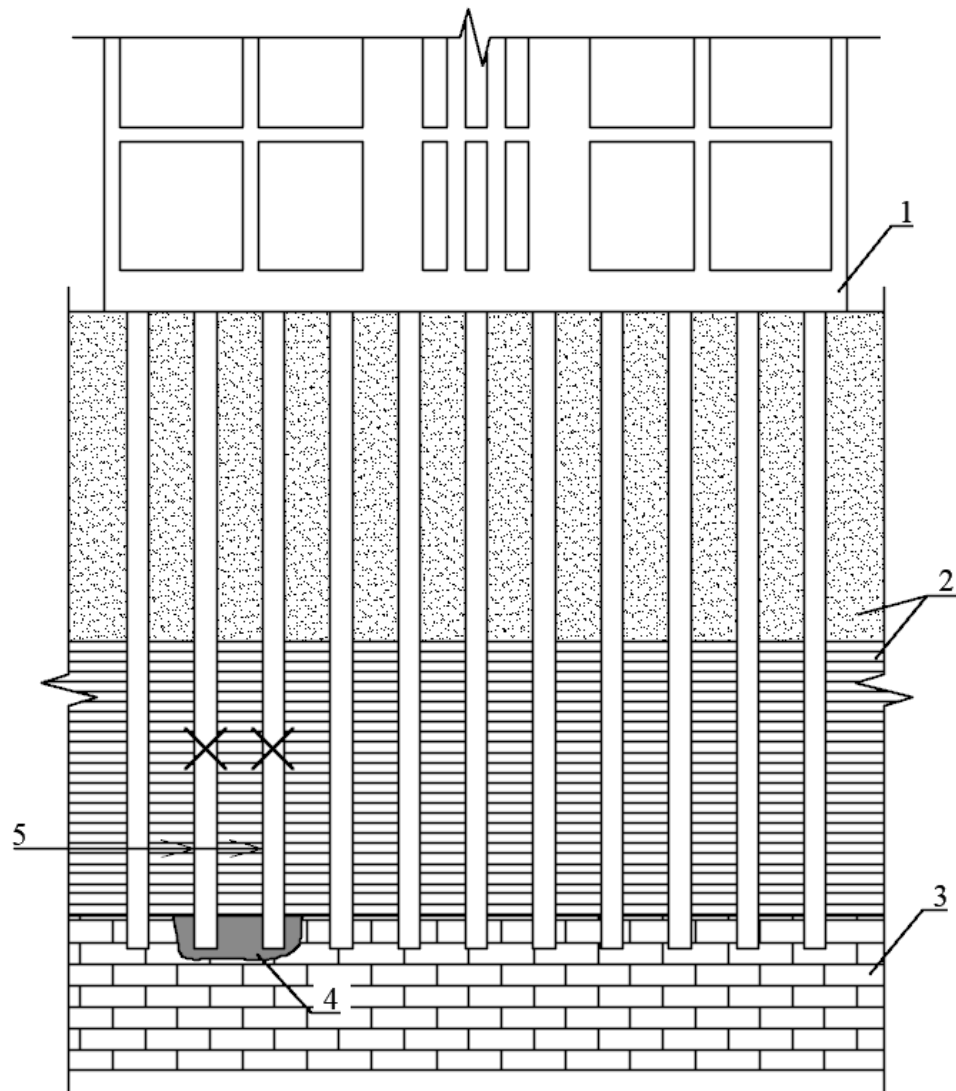
а – жесткое соединение свай и ростверка; б – шарнирное соединение свай и ростверка;

1 – подземная часть здания; 2 – сваи; 3 – сваи, зависшие над полостью с налипшим на них грунтом; 4 – сваи, вышедшие из работы при выпадении в провал; 5 – карстовая полость; 6 – обрушенная карстовая полость; 7 – провал под ростверком

Рисунок 1.7 – Конструкция свайных фундаментов на карстоопасных площадках (висячие сваи)

При проектировании зданий и сооружений на участках, где возможно развитие карстовых процессов, в соответствии с действующими нормативными документами [97; 99; 101] рекомендуется предусмотреть противокарстовые

мероприятия. Эти меры могут включать специальные (конструктивные или геотехнические) решения, меры по защите от воздействия подземных вод, технологические и эксплуатационные мероприятия. Все эти меры могут применяться как отдельно, так и в сочетании друг с другом, в зависимости от конкретной ситуации и требуемого уровня защиты.



1 – подземная часть здания; 2 – грунты покровной толщи; 3 – карстующийся грунт; 4 – карстовая полость; 5 – сваи-стойки, выключаемые из работы фундамента

Рисунок 1.8 – Конструкция свайных фундаментов на карстоопасных площадках (сваи-стойки)

Рассмотрим подробнее специальные мероприятия. Они включают в себя использование таких конструктивных решений, которые обеспечивают прочность и устойчивость сооружения с учетом развития карстовых деформаций (конструктивные), а также мер, направленных на изменение свойств основания таким образом, чтобы предотвратить возникновение карстовых деформаций (геотехнические).

Целью водозащитных мероприятий является предотвращение активизации карстово-суффозионных процессов за счёт изменения гидрогеологических условий в период строительства и эксплуатации зданий и сооружений. При этом оказывается ограниченное техногенное влияние на режим подземных вод.

К водозащитным мероприятиям относят:

- 1) вертикальную планировку земной поверхности и устройство надежной ливневой канализации с отводом вод за пределы застраиваемых участков;
- 2) мероприятия по борьбе с утечками промышленных и хозяйственно-бытовых вод;
- 3) исключение скопления поверхностных вод в котлованах и на площадках в период строительства, строгий контроль за качеством работ по гидроизоляции, укладка водонесущих коммуникаций и продуктопроводов, засыпка пазух котлованов;
- 4) ограничение объемов откачки подземных вод.

Технологические мероприятия направлены на повышение надежности технологического оборудования и инженерных коммуникаций для исключения возможности длительных неконтролируемых протечек в основании сооружения и отсутствия активизации карстово-суффозионных процессов.

Эксплуатационные мероприятия (геотехнический мониторинг) выполняются для контроля над возможной активизацией карстово-суффозионных процессов в основании сооружения.

1.4 Обзор нормативных документов, регламентирующих проектирование свайных фундаментов опор моста с учетом карстовой опасности

В основу современных нормативных документов, регламентирующих проектирование свайных фундаментов на площадках, подверженных карстовым деформациям, легли многочисленные исследования, выполненные отечественными учеными. Однако не все положения таких документов согласуются между собой и являются однозначными, что приводит к проблемам с принятием проектных решений у инженера при проектировании сооружений в таких условиях.

На данный момент на территории РФ действует множество нормативных документов, регламентирующих проектирование и расчет различных зданий и сооружений. Часть из них посвящена проектированию сооружений при действии опасных процессов, таких как карстовые деформации. Наиболее полно требования к расчету и проектированию свайных фундаментов при образовании карстовых деформаций представлены в следующих документах:

- СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 [97];
- СП 453.1325800.2019 Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства [100];
- СП 499.1325800.2021 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования [101].

Далее выполним анализ и рассмотрим применимость на практике некоторых указаний, приведенных в актуальных сводах правил.

Согласно СП 24.13330 [97], свайные фундаменты, устраиваемые на закарстованных территориях при новом строительстве и реконструкции, должны проектироваться с учетом возможного развития карстовых процессов в массиве

водорастворимых пород (полости, каверны и т.п.), в залегающей над ними грунтовой толще (зоны разуплотнения и т.п.) и возможности образования карстовых деформаций – провалов и оседаний. При проектировании свайных фундаментов на закарстованных территориях следует обеспечивать их прочность (с учетом изгиба от развития карстовых полостей) и устойчивость с учетом образования карстовых деформаций как непосредственно под нижним концом свай, так и в прорезаемом ими грунтовым массиве. Следует учитывать возможность проявления карстообразования на территории, непосредственно прилегающей к площадке строительства.

В СП 24.13330 [97] даны следующие рекомендации для проектирования свайных фундаментов на участках, отнесенных к категориям потенциально опасных или опасных в карстово-суффозионном отношении:

- 1) при возможности образования карстовых деформаций по типу «провал» выполнять расчеты с учетом исключения свай в зоне провала из работы фундамента (выскальзывания свай);
- 2) необходимо учитывать возможность появления провалов под колоннами, пересечениями стен, углами сооружений, в середине большей и меньшей сторон;
- 3) в узле сопряжения свай с ростверком, как правило, предусматривать возможность выскальзывания свай, а в случае необходимости устройства жесткого узла сопряжения свай с ростверком – учитывать дополнительные нагрузки от сил отрицательного трения, возникающего вследствие образования карстовых деформаций.

Данные рекомендации (пункты 1 и 3) согласуются с рекомендациями нормативной документации по проектированию искусственных сооружений скоростных железнодорожных линий ([100], п. 10.13) в районах развития карстово-суффозионных процессов, в которых указано, что:

- допускается применение висячих буронабивных свай большого диаметра с жесткой заделкой в ростверк;

- свайный фундамент под опору моста следует проектировать с учетом того, что в пределах контура фундамента в плане возможно образование одного участка (зоны) полной потери несущей способности основания;
- свая, попадающая в зону полной потери несущей способности основания, не участвует в работе свайного ростверка, при этом она воспринимает отрицательное трение оседающего вокруг нее грунта и (вместе с весом самой сваи) передает его через ростверк на остальные сваи в составе фундамента
- сочетания нагрузок и воздействий, включающие воздействие от образования карстового провала, следует рассматривать как особые.

Что касается определения типа и параметров карстовых деформаций, есть существенные различия этих двух нормативных документов, которые заключаются в следующем:

- 1) СП 453.1325800.2019 [100], п. 5.1.11: «... Основным параметром для разработки противокарстовых мероприятий конструктивного характера при проектировании свайно-ростверковых фундаментов опор мостов являются: или расчетный пролет карстового провала l_d в случае фундаментов с однорядным расположением свай, или расчетная площадь карстового провала S_d – в остальных случаях. Данные параметры определяют с использованием вероятностно-статистических методов на основании данных по карстово-суффозионному районированию участка строительства (интенсивность провалообразования, средний и максимальный диаметры карстового провала)»;
- 2) СП 24.13330.2011 [97], п.13.5: «Для определения типа карстовых деформаций (провал или оседание) и параметров, их характеризующих, необходимо определить геометрические параметры карстовой полости в водорастворимой горной породе, при образовании которой, возникают

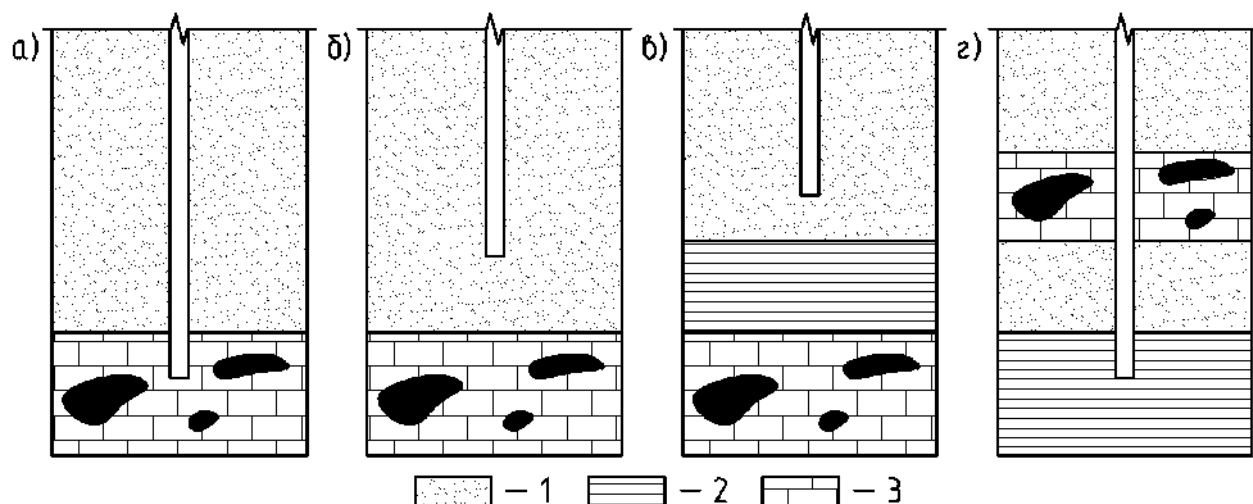
карстовые деформации... При этом допустимо применение численного моделирования с использованием апробированных геотехнических программ».

СП 453.1325800.2019 [100] рассматривает принципиально 2 варианта свайного фундамента, а именно: с прорезанием сваями карстующейся толщи и опиранием на монолитные скальные грунты (рис. 1, г) и со сваями, расположенными выше карстующихся скальных грунтов (рис. 1, б). В первом и во втором случаях рекомендовано учитывать отрицательное трение, но не указано как, а во втором выполнять расчеты с учетом исключения свай по площади карстового провала S_d , определенной статистико-вероятностным методом.

СП 24.13330.2011 [97] рассматривает принципиально 3 варианта свайного фундамента, а именно: с прорезанием сваями карстующейся толщи и опиранием на монолитные скальные грунты (рисунок 1.9, г), со сваями, расположенными выше карстующихся скальных грунтов (рисунок 1.9, б), и с опиранием свай на карстующиеся грунты (рисунок 1.9, а). В первом и во втором случаях рекомендовано учитывать отрицательное трение, определяемое численным моделированием. Во втором случае выполнять расчеты с учетом исключения свай в зоне провала, параметры которого могут быть определены численными методами. В третьем случае обязательным является проектирование специальных (геотехнических) мероприятий (тампонирование, инъецирование и другие мероприятия, выполняемые для горной породы ниже торца сваи и, при необходимости, в грунтах выше торца), исключающих существующие полости и образование новых полостей с последующим переводом площадки в категорию безопасной в карстово-суффозионном отношении.

Свайные фундаменты мостовых опоры, проектируемые на закарстованных площадках, имеют следующие конструктивные особенности и основные характеристики: тип фундамента – свайный кустовой из буронабивных длинных свай, нагрузки на сваи – вертикальные, горизонтальные и моментные (для неподвижных

опор), допускаемые дополнительные осадки от карстовых деформаций определяются совместными расчетами опор и пролетного строения [54].



1 - несвязные грунты; 2 - связные малопроницаемые грунты (глины); 3 - карстующиеся скальные грунты

Рисунок 1.9 – Варианты устройства свайных фундаментов в карстоопасных районах

В связи с тем, что опора моста – это точечное сооружение, площадь зоны провала может исключать из работы значительную часть свай фундамента, что может привести к недопустимым деформациям пролетного строения. В этом случае для обеспечения требуемого уровня надежности необходимы специальные мероприятия независимо от варианта свайного фундамента [54].

Для защиты от непредсказуемых последствий в современной нормативной документации [97], применительно к свайным кустовым фундаментам, рекомендуется выполнять закрепление закарстованных пород (или вышележащих грунтов) инъекцией цементационных растворов или другими способами.

Данные мероприятия относятся к геотехническим, при выполнении которых происходит изменение физико-механических характеристик основания сооружения, исключающих образование карстовых деформаций или обеспечивающих

прочность и устойчивость сооружения с учетом расчетных параметров карстовых деформаций [55].

Таким образом, есть необходимость в выполнении серии расчетов для обеспечения прочности и устойчивости фундаментов опор. В процессе расчетов решаются следующие задачи:

- определение типа и параметров карстовых деформаций;
- выбор варианта свайного основания (рисунок 1.9);
- определение требуемых объемов выполнения геотехнических мероприятий противокарстовой защиты (при необходимости).

Определение типа (провал или оседание) и параметров карстовых деформаций целесообразно выполнять на основе численного моделирования основания над карстовой полостью в карстующихся грунтах с использованием геотехнических программ, аналитических расчетов и статистико-вероятностных методов.

Выбор варианта свайного основания выполняется на основе численного моделирования. При этом определяются дополнительные нагрузки на сваи (вертикальные и горизонтальные) и осадки опоры от возможных карстовых деформаций, а также производятся совместные расчеты опоры и пролетного строения. Допускается моделирование свайного основания опоры совокупностью пружин конечной жесткости (контактная модель). По результатам расчета определяется необходимость геотехнических мероприятий защиты.

Определение объема геотехнических мероприятий защиты выполняется по результатам численного моделирования закрепленного основания над растущей карстовой полостью.

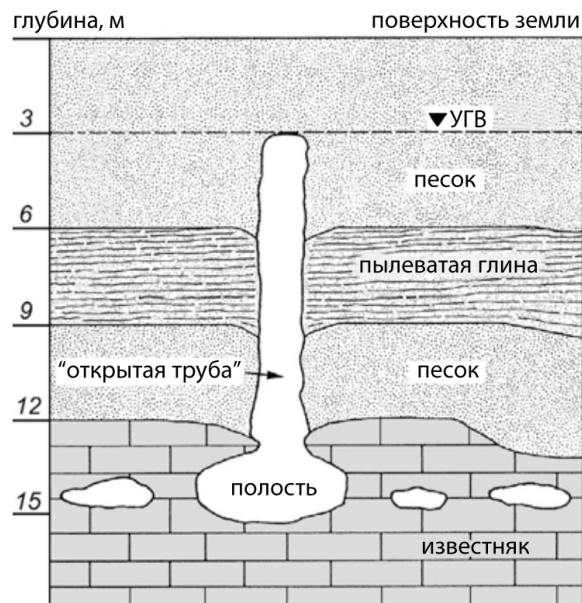


Рисунок 1.10 – Схема карстообразования по типу «провал» [155]

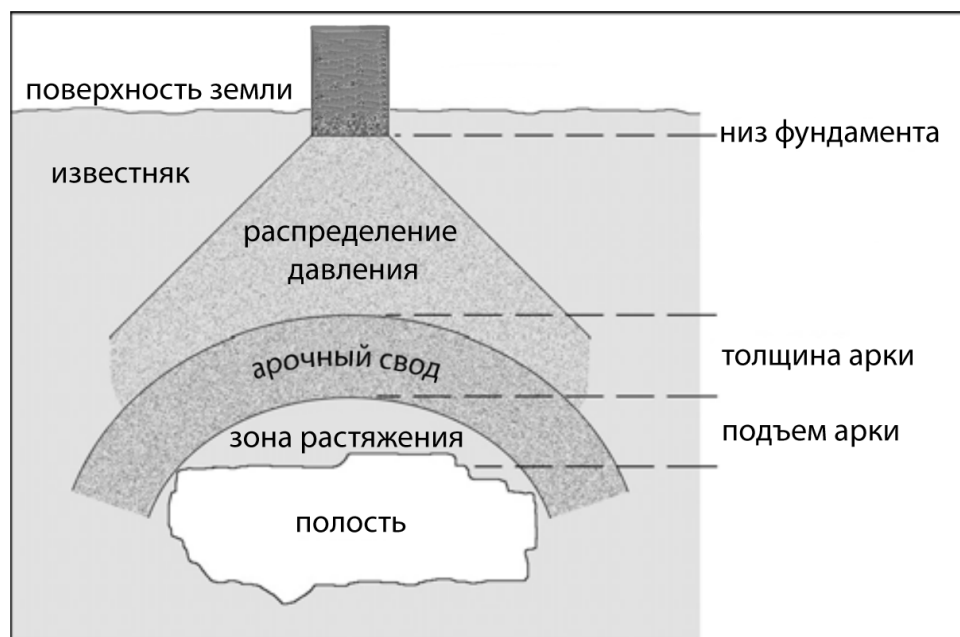


Рисунок 1.11 – Схема карстообразования по типу «оседание» [155]

1.5 Выводы по главе 1

1 В научной и нормативной литературе принципиально рассматривается два варианта свайного карстозащитного фундамента, а именно: с прорезанием сваями карстующейся толщи и опиранием на монолитные скальные грунты; со сваями, нижний конец которых расположен выше карстующихся скальных грунтов. В обоих вариантах рекомендовано учитывать отрицательное (негативное) трение. При этом расчеты второго варианта фундаментов (наиболее распространенного) выполняются на образование 2-х типов карстовых деформаций: «провал» и «оседание».

2 В расчетах фундамента на карстовые деформации типа «провал» часть свай в зоне провала исключается из работы фундамента, для чего коэффициенты жесткостей свай в пределах площади провала обнуляются, а за его границами – остаются неизменными. Данный подход является традиционным, но для фундаментов опор мостов (свайных кустовых фундаментов) может исключать из работы значительную часть свай, что не требуется, когда в основании нижних концов свай реализуются деформации по типу «оседание». Данный тип карстовых деформаций возможен при залегании глинистых грунтов под нижними концами свай и над кровлей карстующихся грунтов при росте полости в карстующихся грунтах.

3 При расчете свай фундаментов опор моста на карстоопасных площадках в условиях роста полости в карстующихся грунтах и развития карстовых деформаций по типу «оседание» необходимо учитывать их работу в составе группы свай, так как их поведение в составе группы при действии карстовых деформаций будет отличаться от поведения одиночной сваи.

4 В результате исследований российских и зарубежных ученых установлено, что при возникновении карстовых деформаций по типу «оседание», вызванных ростом полости в карстующихся грунтах в основании свай фундамента, на сваи передаются дополнительные нагрузки, в том числе вызванные возникновением

«негативного трения» на боковой поверхности свай, а несущая способность свай над полостью снижается.

5 Таким образом, учет разных типов карстовых деформаций и особенностей взаимодействия свай с грунтом в расчете позволит повысить эффективность и надежность карстозащитных свайных фундаментов мостовых опор. Для учета этих факторов необходима разработка новой методики расчета и проектирования свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций в основании с учетом негативного трения на боковой поверхности свай, что и является целью выполненного исследования.

В процессе работы решались следующие **задачи**:

- выполнить анализ нормативной и научной литературы и обобщить опыт проектирования фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании;
- обобщить входные параметры фундаментов мостовых опор, обосновать выбор параметров вариативной конечно-элементной расчетной модели для выполнения численных исследований;
- разработать методику численных исследований;
- на основании численных исследований взаимодействия свай с грунтовым основанием выявить закономерности изменения касательных напряжений на боковой поверхности свай и вертикальных напряжений в нижнем конце свай в зависимости от типа и параметров карстовых деформаций;
- с учетом выявленных закономерностей разработать аналитические решения для расчета негативных сил трения, дополнительных нагрузок на сваи и осадок фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций в основании, а также теоретические решения для определения несущей способности свай;
- разработать метод расчета свайных фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании и рекомендации по выполнению численных расчетов фундаментов.

2 ОБОБЩЕНИЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНДАМЕНТОВ МОСТОВЫХ ОПОР И ПОСТРОЕНИЕ ВАРИАТИВНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения численных исследований взаимодействия свай фундаментов мостовых опор с грунтом при образовании карстовых деформаций в основании обоснован выбор метода математического моделирования свай при образовании карстовых деформаций в основании свай, обобщены входные параметры свайных фундаментов опор и построена вариативная конечно-элементная модель, а именно:

- на основании обзора ранее выполненных исследований выполнена оценка использования МКЭ для моделирования карстовых деформаций и определения типа деформаций («провал» или «оседание») и расчетных параметров прогнозируемого провала;

- на основании сопоставления численных расчетов МКЭ с данными натурного эксперимента выполнена верификация расчетной модели нагруженной свай над карстовой полостью;

- по результатам анализа проектных решений опор мостов на закарстованных территориях определены входные параметры фундаментов опор мостов;

- построена вариативная конечно-элементная модель для выполнения численных исследований взаимодействия свай фундаментов мостовых опор с грунтом при образовании карстовых деформаций.

2.1 Использование МКЭ для моделирования карстовых деформаций

Когда карстовая полость растёт под покровной толщей, которая нагружена внешней нагрузкой и состоит из дисперсных грунтов, грунт в основном работает на сдвиг по поверхности с наименьшей несущей способностью. Разрушение

происходит, когда напряжение сдвига достигает предела прочности грунта на сдвиг. Границы области сдвиговых деформаций в грунте над карстовой полостью можно определить с помощью критерия прочности Мора-Кулона, который принимается как граничное условие возникновения пластических деформаций в грунте.

Модель Мора-Кулона в большинстве случаев используется для описания поведения грунтов в численных расчетах и дает достаточно надежные результаты при выполнении нелинейных расчетов.

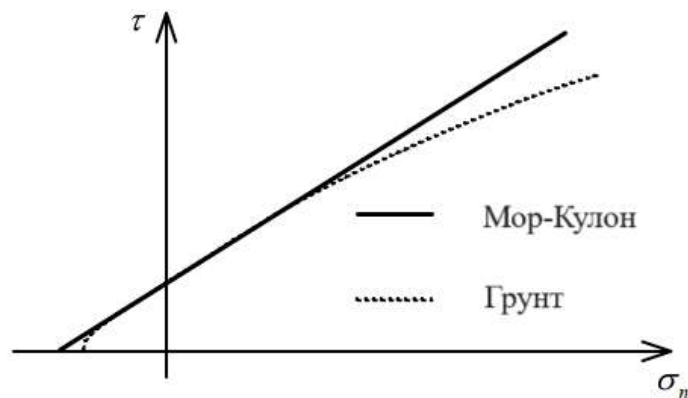


Рисунок 2.1 – Функция текучести модели Мора-Кулона [149]

При этом, нагрузочная кривая и кривая разрушения для критерия Мора-Кулона имеют линейную форму (рисунок 2.2), поэтому параметр прочности (угол внутреннего трения) не зависит от давления всестороннего обжатия (гидростатического давления).

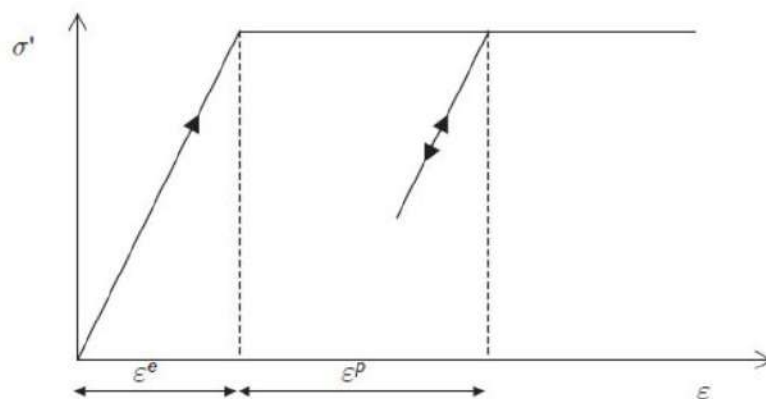


Рисунок 2.2 – Поведение материала в соответствии с моделью Мора-Кулона [149]

Условие предельного состояния грунта в модели Мора-Кулона может быть выражено с помощью следующего уравнения:

$$|\tau| = c - \sigma_n \tan \phi, \quad (2.1)$$

где c – удельное сцепление, ϕ – угол внутреннего трения.

Предельное напряжение сдвига в произвольной плоскости τ связано только с нормальным напряжением σ_n в той же плоскости. Уравнение (2.1) показывает, что разрушение материала происходит в таком напряженном состоянии, при котором наибольшая окружность Мора пересекает границу разрушения Кулоновским трением. Оно также показывает, что главное напряжение σ_2 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) не оказывает влияния на разрушение.

Таким образом, функция текучести Мора-Кулона в плоскости разрушения выглядит следующим образом:

$$f = |\tau| + \sigma_n \tan \phi - c = 0. \quad (2.2)$$

Критерий прочности, указанный в уравнении ((2.)), называется критерием Мора-Кулона и является наиболее широко используемым способом для моделирования проведения грунтов из-за его простоты и точности.

Критерий Мора-Кулона может быть записан в главных напряжениях ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + c \cos \phi \\ \sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} &= 1 \\ \frac{\sigma_1}{f'_t} - \frac{\sigma_3}{f'_c} &= 1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $f'_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$ – предел прочности на одноосное сжатие при максимальном

главном напряжении, равном 0; $f'_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi}$ – предел прочности на одноосное

растяжение при минимальном главном напряжении, равном 0.

Выражение (2.3) удобно использовать при определении свойств материала, поскольку в нем используются значения прочности при одноосном сжатии и растяжении.

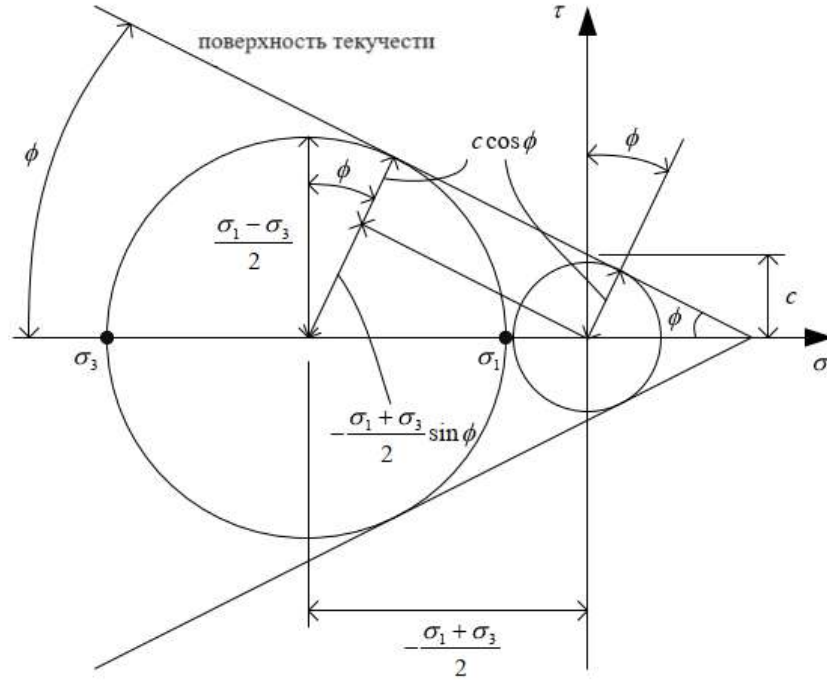


Рисунок 2.3 – Диаграмма главных напряжений [149]

Уравнение (2.2) может быть выражено с использованием членов I_1 , J_2 и θ , которые часто используются в численных расчетах:

$$f(I_1, J_2, \theta) = -\frac{1}{3} I_1 \sin \phi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi \right) - c \cos \phi = 0. \quad (2.4)$$

Аналогично записывается функция пластического потенциала:

$$g(I_1, J_2, \theta) = -\frac{1}{3} I_1 \sin \psi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \psi \right) - c \cos \psi = 0. \quad (2.5)$$

Угол дилатансии ψ является частью функции пластического потенциала. Он описывает дополнительный объем деформации, который может произойти при достижении грунтом состояния дилатансии. Дилатансия – это явление, при

котором материал расширяется при приложении давления, что часто наблюдается в плотных грунтах. Если нет возможности определить этот параметр напрямую, он вычисляется по формуле: $\psi \approx \varphi - 30$, если $\varphi < 30$, то принимается равным 0.

Критерий Мора-Кулона представляет собой неправильную шестиугольную пирамиду с прямым меридианом в пространстве главных напряжений (см. рисунок 2.7), а девиаторная форма в π -плоскости ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$) представляет собой неправильный шестиугольник.

Чтобы нарисовать неправильный шестиугольник, требуются длины r_{t0} и r_{c0} , которые могут быть определены следующим образом:

$$r_{t0} = \frac{2\sqrt{6}c \cos \phi}{3 + \sin \phi}, \quad (2.6)$$

$$r_{c0} = \frac{2\sqrt{6}c \cos \phi}{3 - \sin \phi}. \quad (2.7)$$

Соотношение r_{t0}/r_{c0} выражается из уравнений (2.6-2.7) следующим образом:

$$\frac{r_{t0}}{r_{c0}} = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi}. \quad (2.8)$$

Поскольку все девиаторные плоскости поверхности разрушения Мора-Кулона геометрически подобны, отношение r_t/r_c всегда является постоянным для любой девиаторной плоскости.

$$\frac{r_t}{r_c} = \frac{r_{t0}}{r_{c0}} = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi}. \quad (2.9)$$

Критерий прочности Мора-Кулона является достаточно точным, когда внешние напряжения невелики, но он соответствует реальному поведению грунта, когда напряжения близки к разрушающим. Однако этот критерий дает очень точные результаты в ограниченных диапазонах напряжений в полевых условиях и прост в использовании.

Модель Кулона-Мора включает следующие параметры, получаемые стандартными испытаниями образцов грунта:

- модуль деформации, E ;
- угол внутреннего трения, ϕ ;
- удельное сцепление, c .
- коэффициент поперечной деформации (Пуассона), ν , определяется согласно таблице 5.10 СП 22.13330.2011 [95].

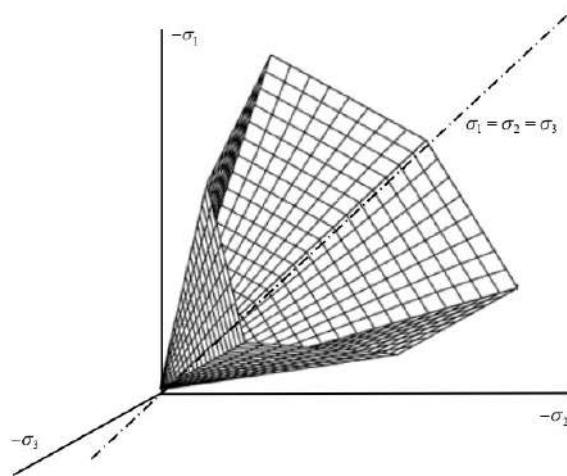


Рисунок 2.4 – Форма поверхности разрушения по Мору-Кулону в пространстве главных напряжений [149]

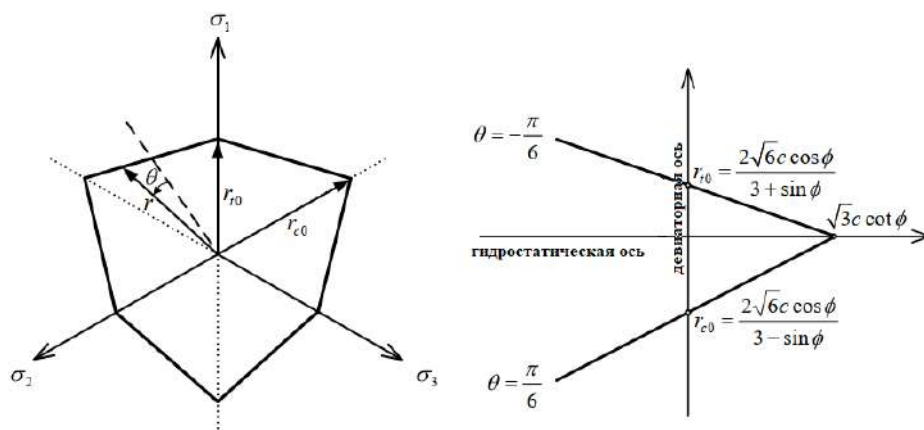


Рисунок 2.5 – Форма поверхности разрушения по Мору-Кулону в π -плоскости и в меридианной плоскости для $\theta = -\frac{\pi}{6}$

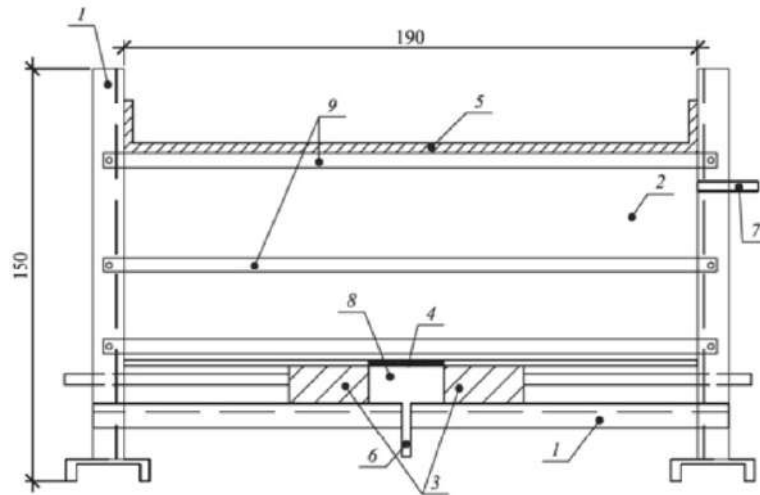
В связи с тем, что разрушение грунта над карстовой полостью происходит, когда сдвиговое напряжение достигает предела прочности грунта на сдвиг, прогнозируемый свод (или полусвод, для осесимметричной задачи) обрушения определяется как геометрическое место точек, в которых соблюдается условие (2.1).

Готман Н.З. и Вагаповым Р.Р. было выполнено подтверждение возможности определения прогнозируемого высоты свода обрушения над карстовой полостью с использованием критерия прочности Мора-Кулона [28]. Для этого был выполнен ряд численных исследований, результаты которых сопоставлялись с результатами модельных экспериментов, проведенных в Дзержинской карстовой лаборатории [104]. Экспериментальные модельные испытания проводились с целью определения высоты свода обрушения при различных диаметрах полости в плоском стенде 190x150x16 см. Схема стенда представлена на рисунке 2.6.

Для моделирования полости в нижней части стенда была установлена камера, в которую помещены два штока. Раздвижка штоков позволяла создавать различную ширину полости.

В результате численных расчетов анализировалось положение в пространстве расчетной модели узлов, для которых выполняется условие предельного состояния в грунте (2.1). По геометрическому положению данных точек определяются высота прогнозируемого свода обрушения h_l и отношение h_l к диаметру карстовой полости D .

Отношения h_l/D , определенные расчетом, сравнивались с экспериментальными. По итогам сравнения была получена удовлетворительная сходимость результатов численных расчетов с экспериментальными данными (расхождение составило не более 20%, рисунок 2.7), что подтверждает возможность использования критерия прочности Мора-Кулона для описания геометрического положения прогнозируемого свода обрушения и определения его высоты над карстовой полостью.



1 – швеллер; 2 – органическое стекло; 3 – бруски со стержнями; 4 – крышка; 5 – скоба; 6 – сливная труба; 7 – труба для заполнения модели водой; 8 – имитируемая полость; 9 – уголки жесткости

Рисунок 2.6 – Схема плоского стенда [104]

Численное исследование (Plaxis 2D)			Расчетная схема	Физическое моделирование (плоский стенд)		
Характеристики расчетной модели		Результат		Результат	Характеристики физической модели	
Грунты	Размеры	H_1/D		H_1/D	Размеры	Грунты
$\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ $E = 1100 \text{ кН/м}^2$ $c = 2 \text{ кН/м}^2$ $\varphi = 260$	$D = 3 \text{ м}$ $H = 8 \text{ м}$ $L = 42 \text{ м}$	0,63		0,66	$D = 33 \text{ см}$ $H = 90 \text{ см}$ $L = 195 \text{ см}$	$\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ $E = 1100 \text{ кН/м}^2$ $c = 2 \text{ кН/м}^2$ $\varphi = 260$ $w = 18 \%$
	$D = 6 \text{ м}$ $H = 16 \text{ м}$ $L = 42 \text{ м}$	0,66		0,75		
	$D = 10 \text{ м}$ $H = 27 \text{ м}$ $L = 42 \text{ м}$	0,65		0,8		
$\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ $E = 2800 \text{ кН/м}^2$ $c = 6 \text{ кН/м}^2$ $\varphi = 340$	$D = 3 \text{ м}$ $H = 8 \text{ м}$ $L = 42 \text{ м}$	1		1,2	$\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ $E = 2800 \text{ кН/м}^2$ $c = 6 \text{ кН/м}^2$ $\varphi = 340$ $w = 14 \%$	
	$D = 6 \text{ м}$ $H = 16 \text{ м}$ $L = 42 \text{ м}$	1,2		1,2		
	$D = 10 \text{ м}$ $H = 27 \text{ м}$ $L = 42 \text{ м}$	1		1,1		

Рисунок 2.7 – Обоснование применения критерия прочности Мора-Кулона для определения формы сводов обрушения над полостью [28]

Определение параметров карстовых деформаций допускается выполнять численными методами в соответствии с СП 499.1325800 [101]. В приложении А прописана методика моделирования процесса образования полости в карстующихся породах до момента потери несущей способности грунта покровной толщи.

Необходимо отметить, что расчеты, выполненные с использованием метода конечных элементов, позволяют:

- 1) определить параметры карстового провала на участках со сложной геологической и гидрогеологической структурой;
- 2) оценить влияние процесса образования карстовой полости на существующие или проектируемые здания и сооружения;
- 3) получить детальное очертание образования провалов.

Рекомендуется рассматривать грунты как нелинейно-деформируемое тело и моделируются при помощи моделей Мора-Кулона, упрочняющегося грунта и др.

Рекомендуемый тип задания расчетной модели – осесимметричная. В осесимметричной модели предполагается, что поперечные, а точнее, радиальные деформации модели равны, то есть $\varepsilon_x = \varepsilon_z$. Как и следует из названия, в этом случае модель симметрична относительно вертикальной оси Y , и образована вращением вокруг оси Y (рисунок 2.8). Значение координаты X в осесимметричных задачах представляет собой радиус.

Цилиндрическая форма моделируемой карстовой полости является упрощением, поскольку большинство карстовых полостей имеют более сложные, нелинейные формы. Однако использование цилиндра в качестве модели позволяет упростить расчёты и получить приближенные значения основных параметров, таких как размеры полости и её влияние на основание [101]. Кроме того, такая модель позволяет изучать общие закономерности образования и развития карстовых процессов, что важно для понимания природы карста и разработки методов борьбы с ним.

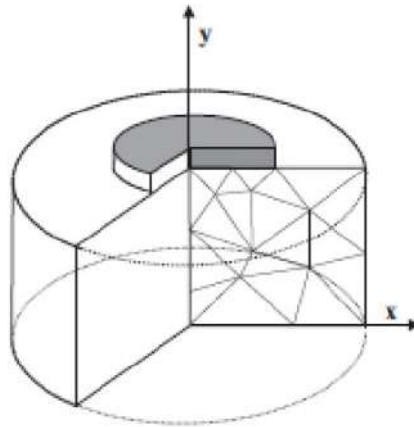


Рисунок 2.8 – Общий случай осесимметричной конечно-элементной модели [149]

Выполняя расчет, необходимо определить параметры начала процесса разрушения и затем оценить зоны сдвиговых деформаций (качественно и количественно). За критерий начала разрушения можно принять:

- возникновение свода обрушения в покровном слое водоупорных глин над карстующимися грунтами, определяемого как область сгущения «точек пластических деформаций» над полостью, высота свода при этом более мощности глин;
- на графике зависимости общих перемещений от коэффициента массы ($\Sigma MStage$) при выполнении расчета с учетом этапности непрерывно растут сдвиговые деформации и/или общие перемещения при неизменных значениях коэффициента массы $\Sigma MStage$ (рисунок 2.10).

Современные научные исследования и рекомендации российских нормативных документов позволяют учитывать не только карстовые деформации по типу «провал», при которых сваи над провалом «выключаются» из работы, но и карстовые деформации по типу «оседание». Это позволяет выполнять более точные расчеты и проектировать свайные фундаменты на закарстованных территориях, учитывая различные виды карстовых процессов.

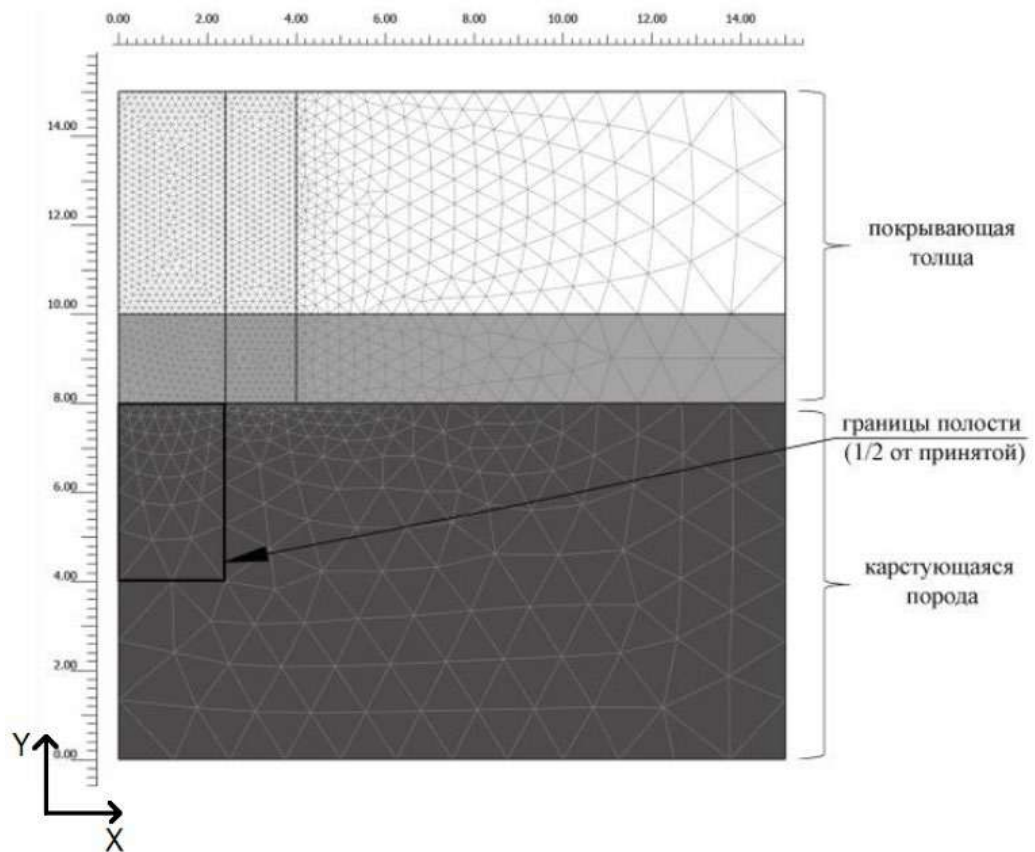


Рисунок 2.9 – Типовая расчетная схема в осесимметричной постановке с разбиением на конечные элементы [101]

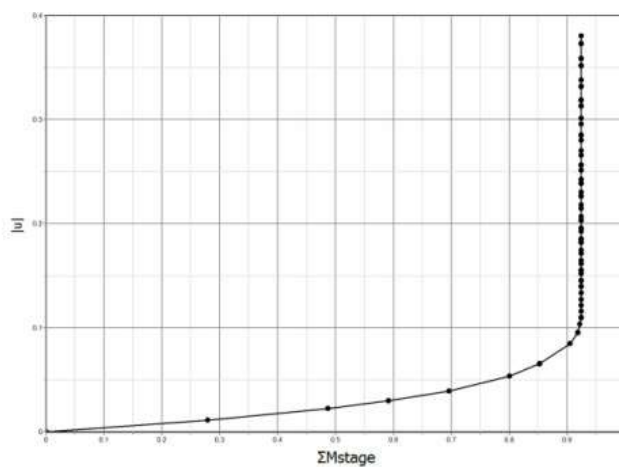


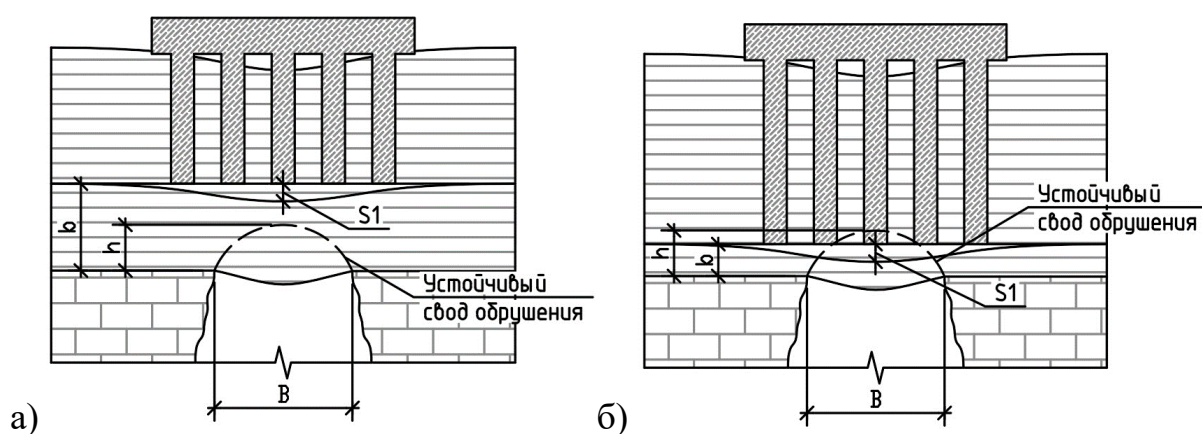
Рисунок 2.10 – Кривая зависимости общих перемещений от развития коэффициента массы ΣM_{Stage} [101]

Карстовые деформации свайных фундаментов опор моста по типу «оседание» возможны в случае наличия слоя водоупорных глин под нижними концами свай над карстующимися грунтами. При этом должно соблюдаться следующее условие: высота прогнозируемого свода обрушения, определяемая расчетом как область сгущения «точек пластических деформаций» над карстовой полостью, меньше мощности слоя глин. При выполнении данного условия «всплытие» полости под подошву ростверка фундамента опоры моста и образование провала (с исключением части свай) исключается.

Для карстовых деформаций по типу «оседание» возможно возникновение двух расчетных случаев:

- 1) прогнозируемый свод обрушения расположен ниже нижних концов свай (рисунок 2.11, а);
- 2) прогнозируемый свод обрушения выше нижних концов свай (рисунок 2.11, б).

Эти расчетные случаи описаны в методике численных исследований (подраздел 3.1), при этом все расчеты выполняются при условии наличия покровных толщ над карстующимися грунтами, сложенными глинистыми грунтами.



а – свод обрушения находится не доходит до свай, б – свод обрушения расположен выше низа свай;

b – расстояние от кровли карстующихся грунтов до низа свай, h – высота прогнозируемого свода обрушения, B – расчетный диаметр карстовой полости

Рисунок 2.11 – Расчетные случаи для деформаций по типу «оседание»

2.2 Верификация расчетной модели нагруженной сваи над карстовой полостью

2.2.1 Описание физического эксперимента

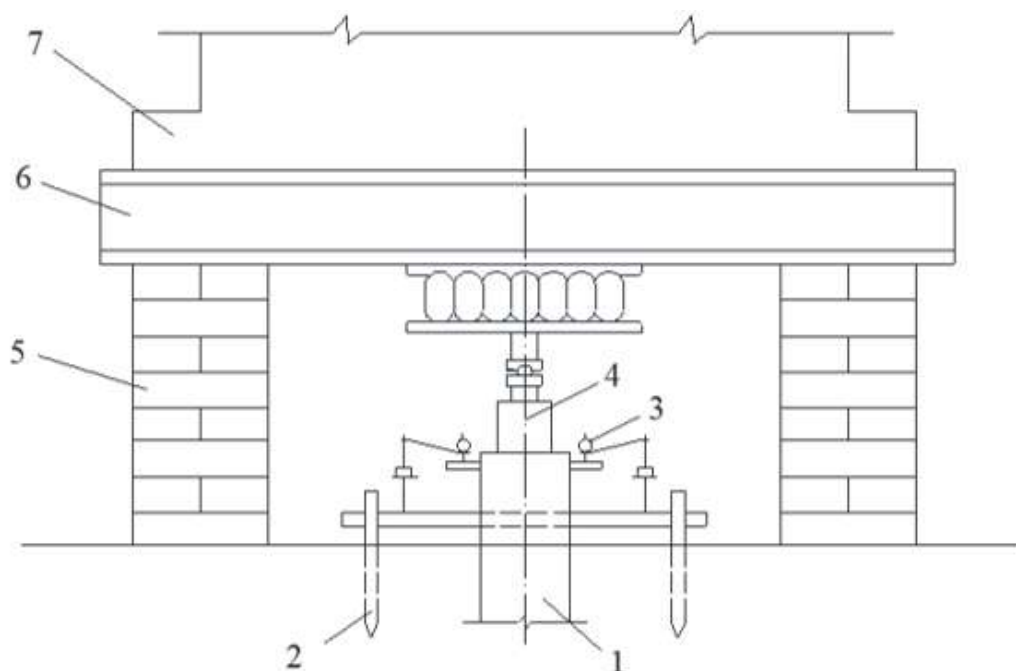
Натурный эксперимент был проведен в Китае [141], на площадке для строительства протяженного эстакадного моста. Мост проходит через область, в которой присутствует множество скрытых карстовых полостей. В процессе инженерно-геологических изысканий было выделено 4 инженерно-геологических элемента. На поверхности, до глубины ~3,5 м залегают четвертичные осадочные породы, представленные супесью и песками. Под ними на глубину 10...20 м залегают пылеватые глины. Под глинами расположен карстующийся доломитовый известняк. Его толщина 1,6...6,8 м. ИГЭ состоит в основном из доломита и кальцита, частично содержит брекчию и валуны. Горная масса разрушена и имеет ячеистую структуру. Пустоты заполнены глиной. Данный ИГЭ покрывает средневыветрелый известняк. В породе развито небольшое количество трещин. Локально образуются карстовые полости, которые в основном полые или заполнены глиной. Физико-механические характеристики грунтов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Физико-механические характеристики грунтов на площадке [141]

№ ИГЭ	Описание	Удельный вес γ , кН/м ³	Модуль деформации E, МПа	Удельное сцепление c, кПа	Угол внутреннего трения φ , °	Коэффициент Пуассона ν	Сопротивление одноосному сжатию R _c , МПа
1	Техногенные грунты	18,5	13	10	8	0,4	-
2	Глины пылеватые	19,5	40	18	10	0,3	-
3	Карстующийся доломитовый известняк	24,5	8000	0	28	0,26	-
4	Средневыветрелый известняк	25	22000	-	-	-	33

Тестовая свая – буронабивная железобетонная, длиной 19,5 м и диаметром 1,5 м. Свая выполнена над карстовой полостью, которая имеет высоту 3,2 м и размеры в плане 6,0х3,0 м. Низ сваи находится на расстоянии 1,5 м от свода полости.

Испытание проводилось методом ступенчатого нагружения. Вертикальная прикладывалась за 11 шагов, с каждым шагом увеличение составляло 2 МН. Осадка испытуемой сваи регистрировалась через 5 мин, 15 мин, 30 мин, 45 мин и 60 мин в течение первого часа, а затем каждые 30 мин. Если зарегистрированное значение осадки по крайней мере два раза в течение часа составляло менее 0,1 мм, то можно было считать, что осадка стабилизировалась. Затем нагрузка снималась по 2 МН за каждый шаг. После снятия нагрузки на каждом шаге, остаточная осадка фиксировалась через 15 мин, 30 мин, 60 мин. После полного снятия нагрузки остаточная осадка измерялась каждые 15 мин в первые полчаса, а затем каждые 30 мин, что в общей сложности заняло 3 часа.



*1 – испытуемая свая; 2 – репер; 3 – датчик перемещений; 4 – домкрат; 5 – опора;
6 – поперечные балки; 7 – пригруз*

Рисунок 2.12 – Схема испытания [141]

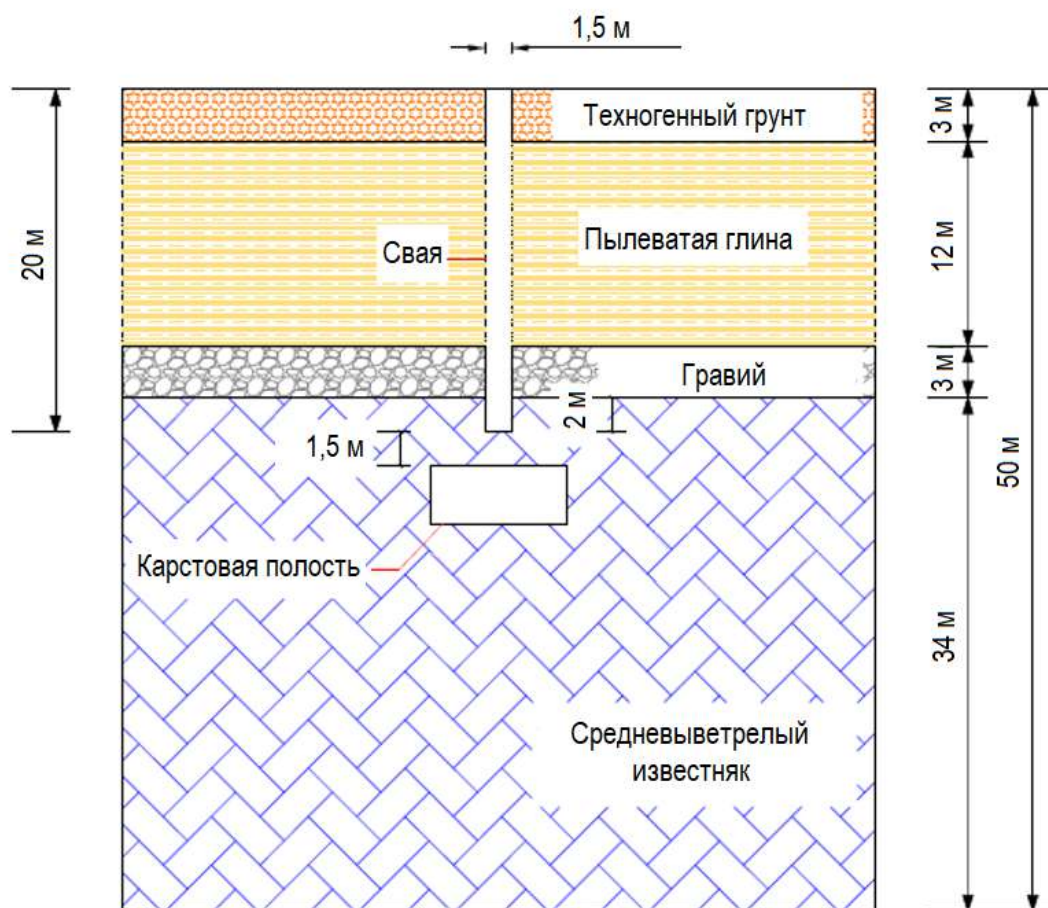


Рисунок 2.13 – Посадка испытуемой сваи на инженерно-геологический разрез [141]

В результате проведенного испытания получена кривая зависимости перемещений оголовка сваи от прикладываемой нагрузки (рисунок 2.14). Как видно из графика, конечная нагрузка при испытании составляет 22 МН, а соответствующая осадка сваи – 31,8 мм. Несущая способность сваи по грунту определена как 20,35 МН при осадке 21,6 мм. Неупругая часть осадки сваи после снятия нагрузки составила 22 мм.

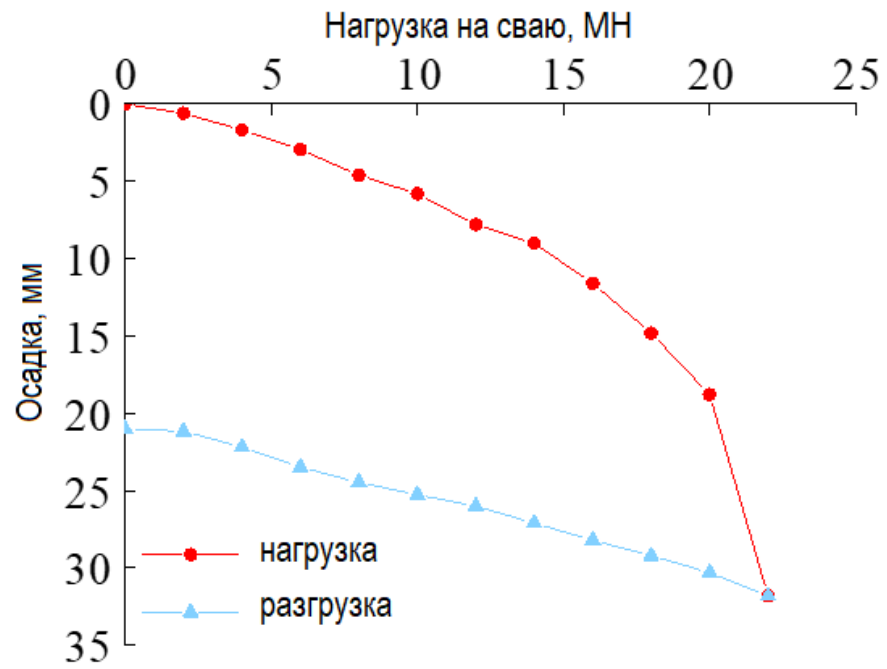


Рисунок 2.14 – График «нагрузка-осадка» [141]

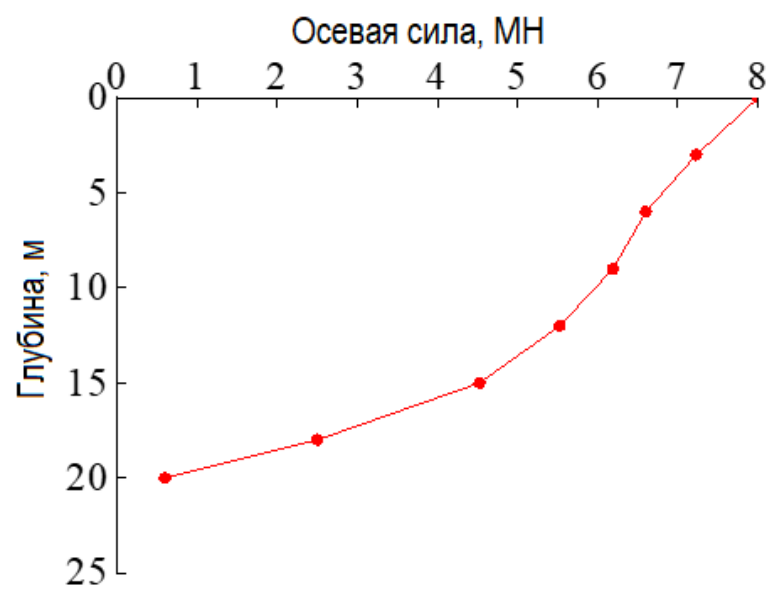


Рисунок 2.15 – График распределения осевой силы вдоль длины сваи [141]

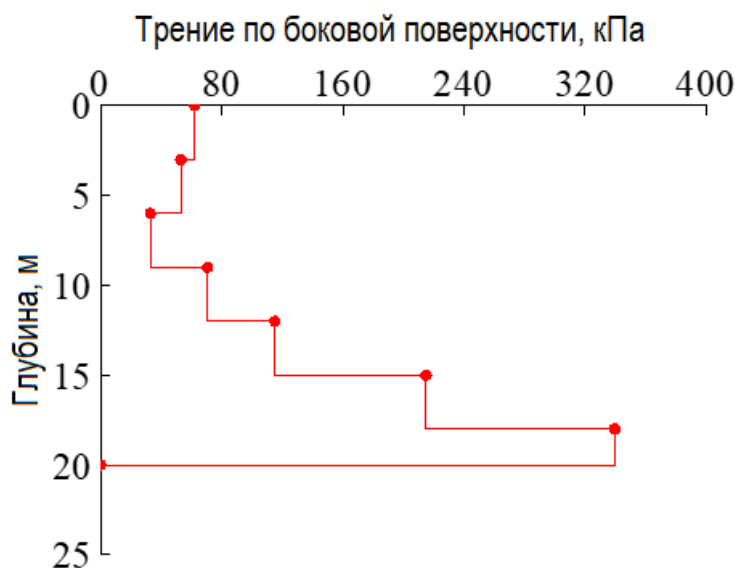


Рисунок 2.16 – График распределения трения по боковой поверхности сваи [141]

2.2.2 Результаты численного моделирования эксперимента и их сопоставление с натурными данными

Для проведения численного эксперимента была выполнена серия расчетов в программном комплексе Plaxis 2D. Расчеты выполнялись в осесимметричной постановке. Ниже на рисунке представлен общий вид расчетной модели.

В качестве модели грунтового основания принята упругопластическая модель Мора-Кулона. Как было описано ранее, данная модель достаточно хорошо подходит для моделирования грунтового основания при возникновении карстовых деформаций. Свая и грунт моделируются треугольными 15-ти узловыми элементами. Для описания несовместности деформаций на контакте «свая-грунт» используются специальные интерфейсные элементы.

Нагрузки, принятые для расчета:

- собственный вес грунта и бетона – определяется автоматически на

основании заданных свойств материалов;

- нагрузка от испытательного стенда – задается на оголовки свай, равномерно распределенная, увеличивается в соответствии с этапами загрузки.

Граничные условия, принятые в расчетной модели:

- на боковых границах расчетной модели узлы закреплены от горизонтального смещения;
- по нижней границе расчетной модели узлы закреплены от вертикального и горизонтального смещения;
- по верхней границе расчетной модели – закрепления отсутствуют.

Способ моделирования карстовой полости – классический, при котором карстовая полость моделируется исключением из расчета элементов, находящихся в пределах ее объема.

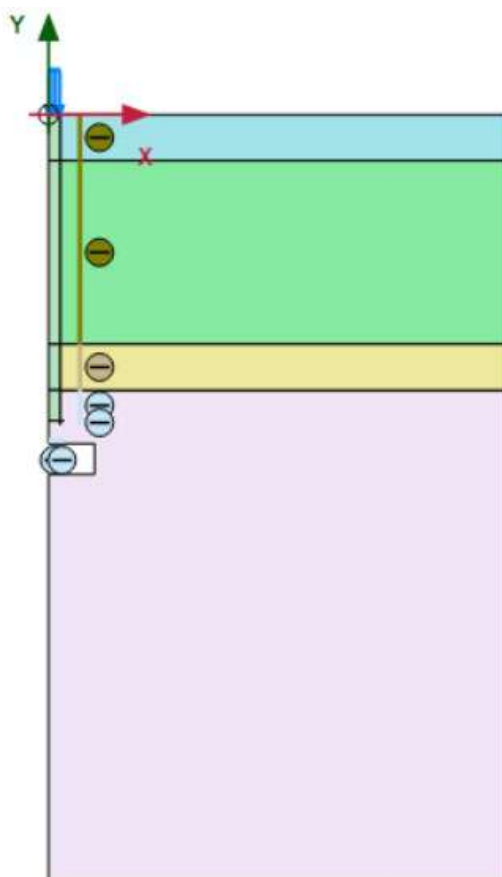


Рисунок 2.17 – Конечно-элементная модель (общий вид)

Расчет выполнялся в соответствии со следующей этапностью:

- 1) расчет исходного напряженно-деформированного состояния грунта, обнуление перемещений;
- 2) устройство сваи;
- 3) приложение нагрузки на оголовок сваи.

После выполнения расчетов получены следующие результаты (представлены на рисунках 2.18-2.20):

- 1) график зависимости «нагрузка-осадка»;
- 2) эпюры распределения касательных напряжений вдоль длины сваи на ее боковой поверхности (трение);
- 3) эпюра распределения осевой силы вдоль длины сваи.

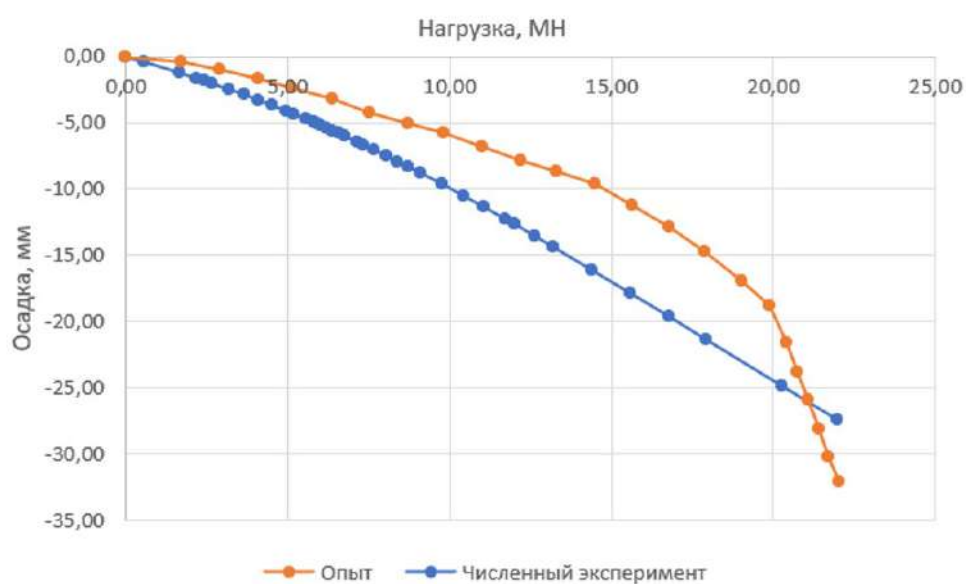


Рисунок 2.18 – Графики «нагрузка-осадка»

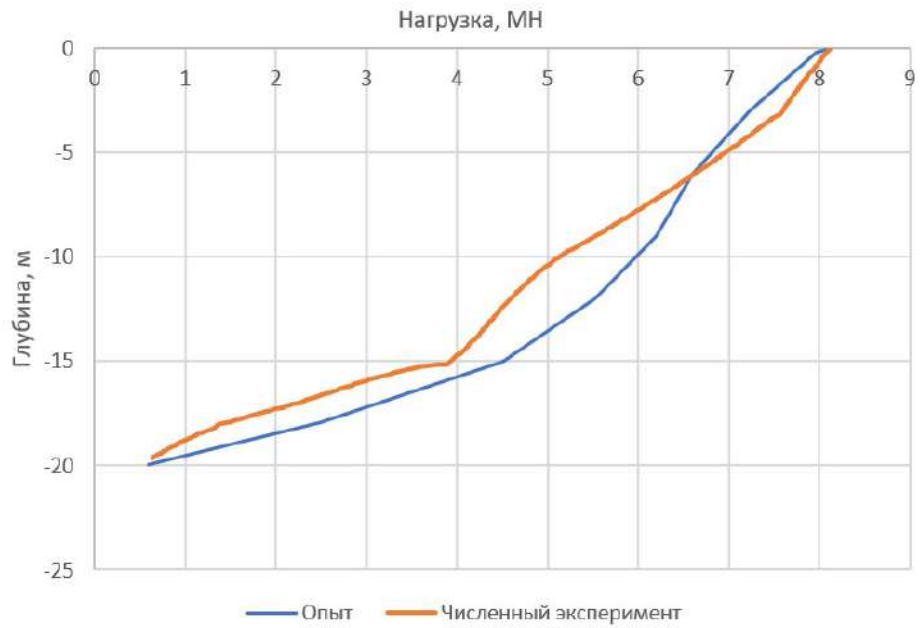


Рисунок 2.19 – График распределения осевой силы вдоль длины сваи



Рисунок 2.20 – График касательных напряжений вдоль длины сваи на ее боковой поверхности (трение)

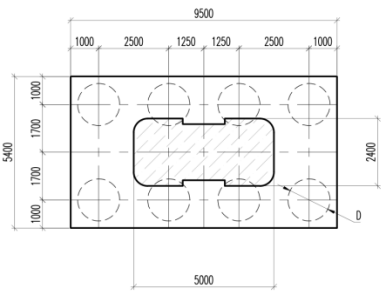
По результатам сравнения, представленном на графиках на рисунках 2.18-2.20, можно сделать вывод, что при численном моделировании испытания сваи статической нагрузкой над карстовой полостью, получена достаточная сходимость по основным результатам испытания: график «нагрузка-осадка», распределение осевой силы по длине сваи и распределение трения по боковой поверхности сваи.

2.2 Анализ проектных решений и выделение типов фундаментов опор

Для выполнения численного исследования влияния образования карстовой полости под свайным фундаментом мостовой опоры на расчетные параметры, определяемые при образовании карстовых деформаций, был выполнен анализ и систематизация проектных решений фундаментов мостовых опор на различных объектах [86; 87]. За пример были взяты мостовые переходы на карстоопасных участках, отнесенных к III и IV категориям по устойчивости к образованию карстовых деформаций.

Ниже в таблице приведено схематичные изображения наиболее часто встречающихся ростверков, а также дана информация по объединяемым ими сваям: количество, диаметр и длина.

Таблица 2.2 – Основные параметры типовых фундаментов опор мостовых переходов

№	Схематичное изображение опоры	Количество свай	Диаметр свай, м	Длина свай, м
1		8	1,5	26-31

№	Схематичное изображение опоры	Количество свай	Диаметр свай, м	Длина свай, м
2		6	1,5	26-39
3		10	1,5	30
4		8	1,2	20-35
5		11	1,2	20-35
6		9	1,5 с ушире- нием	30-35

№	Схематичное изображение опоры	Количество свай	Диаметр свай, м	Длина свай, м
7		6	1,2 с ушире- нием до 2,4	30,5
8		12	1	20-28
9		8	1,5	29-41
10		8	1,5	20-28
11		10	1,2	21-32

№	Схематичное изображение опоры	Количество свай	Диаметр свай, м	Длина свай, м
12		14	1,5	27
13		36	1,2	33

В результате анализа фундаменты опор были разделены на 2 типа по признаку условной площади свайного фундамента: условная площадь фундамента менее 150 м^2 (для ростверков №№1-12 по таблице 2.2) и более 150 м^2 (для ростверка №13 по таблице 2.2). Данное разделение необходимо для дальнейшего определения степени влияния площади условного фундамента на расчетные параметры, определяемые при образовании карстовых деформаций.

В случае остальных параметров было отмечено, что для подобного типа фундаментов используются буронабивные сваи диаметром 1,0-1,5 м длиной более 30 м. Число свай и их длина определяется из инженерно-геологических условий площадки, а также из требуемой несущей способности свай. При этом карстующиеся грунты, обычно, перекрыты прочным слоем водоупора, который представлен глинистыми грунтами.

Ниже на рисунках представлены типовые инженерно-геологические разрезы с посадкой на них проектируемых мостовых переходов.

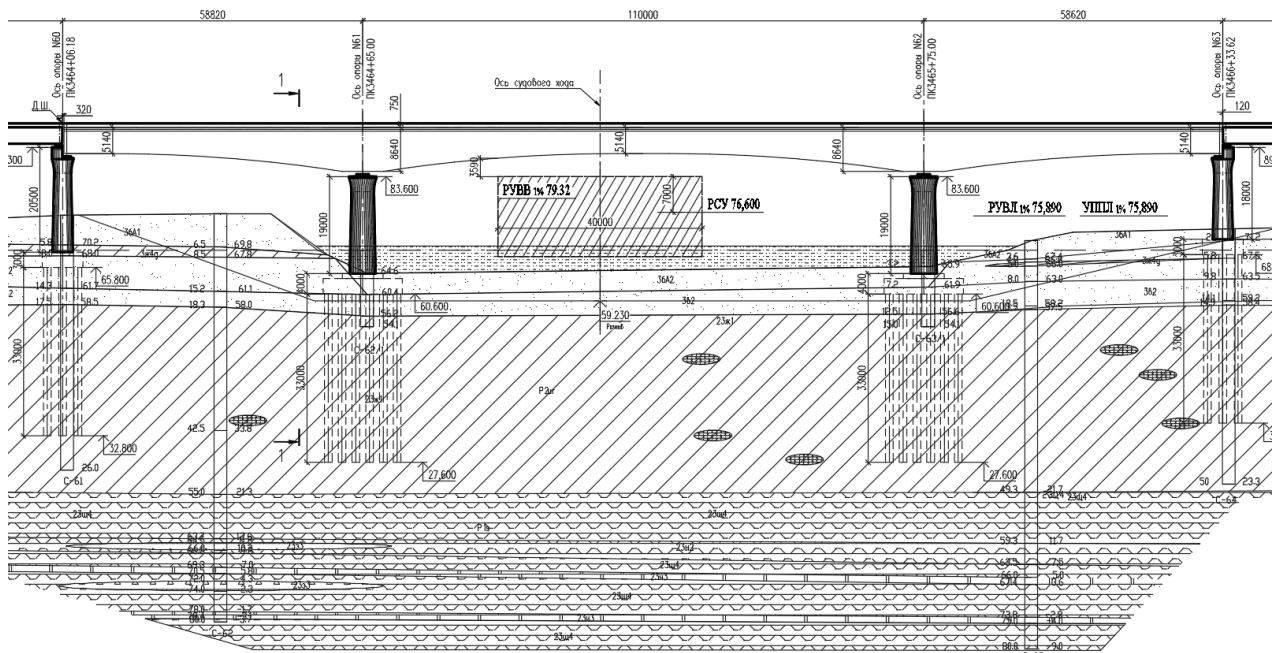


Рисунок 2.21 – Инженерно-геологический разрез с посадкой сооружения [86; 87]

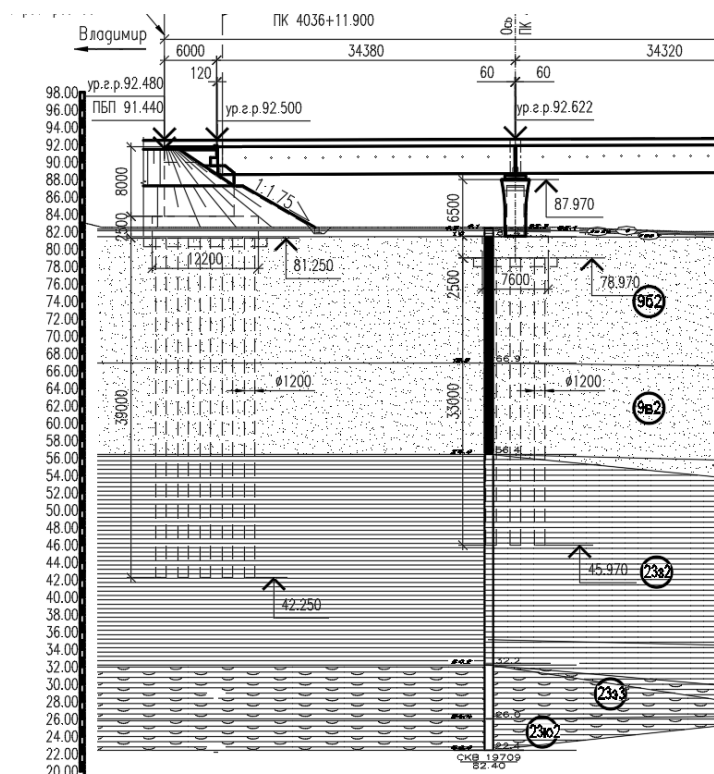


Рисунок 2.22 – Инженерно-геологический разрез с посадкой сооружения [86; 87]

На основании проведенного анализа и систематизации проектных решений для выполнения дальнейших расчетов было выделено 2 типа фундамента мостовых опор, основные параметры которых представлены в таблице 3.3 и на рисунке 2.23.

Таблица 3.3 – Выделенные фундаменты мостовых опор

	Тип 1	Тип 2
Тип свай	Висячие	Висячие
Число свай, шт.	12	36
Площадь условного фундамента	$\sim 80 \text{ м}^2$	$\sim 250 \text{ м}^2$
Диаметр свай, м	1,2	1,2
Длина свай, м	33	33
Тип соединения свай с ростверком	Жесткое	Жесткое

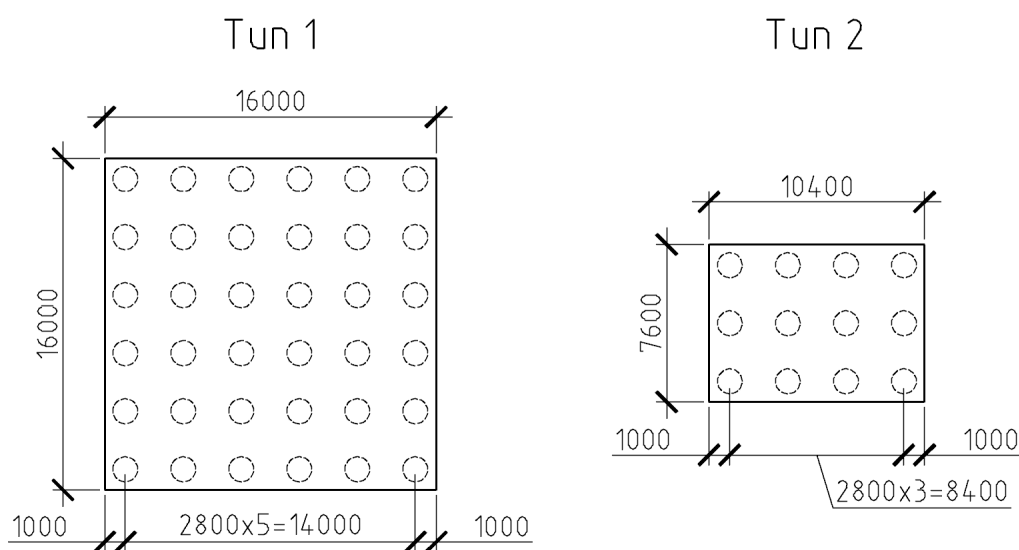


Рисунок 2.23 – Конструкция рассчитываемых ростверков

Физико-механические характеристики грунта, принятые для выполнения вариативных расчетов, представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Физико-механические характеристики грунта

№ п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Плотность грунта, кН/м ³	18,0
2	Модуль деформации, МПа	25,0
3	Угол внутреннего трения, град.	20,0
4	Удельное сцепление, кПа	80,0

2.3 Описание вариативной конечно-элементной модели

Вариативные расчеты выполняются в объемной постановке в программном комплексе Midas GTS NX. Данный программный комплекс сертифицирован и верифицирован для решения задач в области механики грунтов, геотехники и фундаментостроения на территории Российской Федерации.

Midas GTS NX является программой, специально разработанной для моделирования взаимодействий между сооружениями и грунтовым основанием на основе метода конечных элементов. Midas GTS NX специализирована на выполнении пошаговых расчетов устройства выемок, насыпей, возведения зданий и сооружений, загрузений и других воздействий, оказывающих непосредственное влияние на проектируемые, существующие здания и сооружения и на вмещающее их грунтовое основание.

Используемые для решения настоящей задачи в Midas GTS NX типы элементов, в зависимости от их формы и свойств, можно классифицировать следующим образом:

Трехмерные элементы (3 Dimensional shape element).

Элементы твердого тела имеют форму тетраэдра, пентаэдра или гексаэдра и содержат 4/5/6/8/10/13/15/20 узлов. Пентаэдры могут быть пирамидальной или призматической формы. Эти элементы используются для моделирования конструкций ростверка, свай и грунта.

Элементы «интерфейса» (контактные элементы) (Interface element).

Для описания взаимодействия на контакте «грунт-сооружение» используются контактные элементы двух типов: «грань-грань» с 6/8/12/16 узлами и «линия-линия» с 4/6 узлами. Эти элементы вводятся на контакте "конструкция-грунт" с целью моделирования несовместности деформаций основания и конструкций.

Элементы жесткой связи (Rigid link).

Элементы жесткой связи используются для моделирования жестких связей между узлами. Их характеристики аналогичны характеристикам многоточечных связей.

В результате анализа проектных решений и инженерно-геологических условий была составлена вариативная конечно-элементная расчетная модель (представлена на рисунке 2.24) со следующими параметрами [33]:

- однослойный грунтовый массив, представленный твердой глиной с характеристиками, указанными в таблице 2.4;
- размер расчетной области L (по горизонтали) определен из условия отсутствия влияния его на результаты расчета, узлы на границах области закреплены;
- размер расчетной области H (по вертикали) ограничен кровлей скальных карстующихся грунтов, узлы на границах области закреплены, кроме прогнозируемой карстовой полости (см. подраздел 2.4);
- прогнозируемая карстовая полость представлена отсутствием закрепления по оси Z узлов в ее пределах (рисунок 2.24);
- учтена несовместность деформаций конструкции и грунта в соответствии с п.9.16 СП 22.13330.2016 [95] введением специальных интерфейсных элементов на контакте свай и грунта;

Расчеты выполнены при варьировании следующих параметров, выбор которых определен в результате планирования эксперимента на основании факторного анализа (подраздел 3.2):

- расстояние до кровли скального грунта (b): 6 м, 10 м, 14 м, 18 м, 22 м;
- расчетный размер полости за время эксплуатации (B): 3 м, 5,5 м, 7,8 м, 10 м;
- тип фундамента: тип 1 и тип 2 по таблице 3.3 и рисунку 2.23.

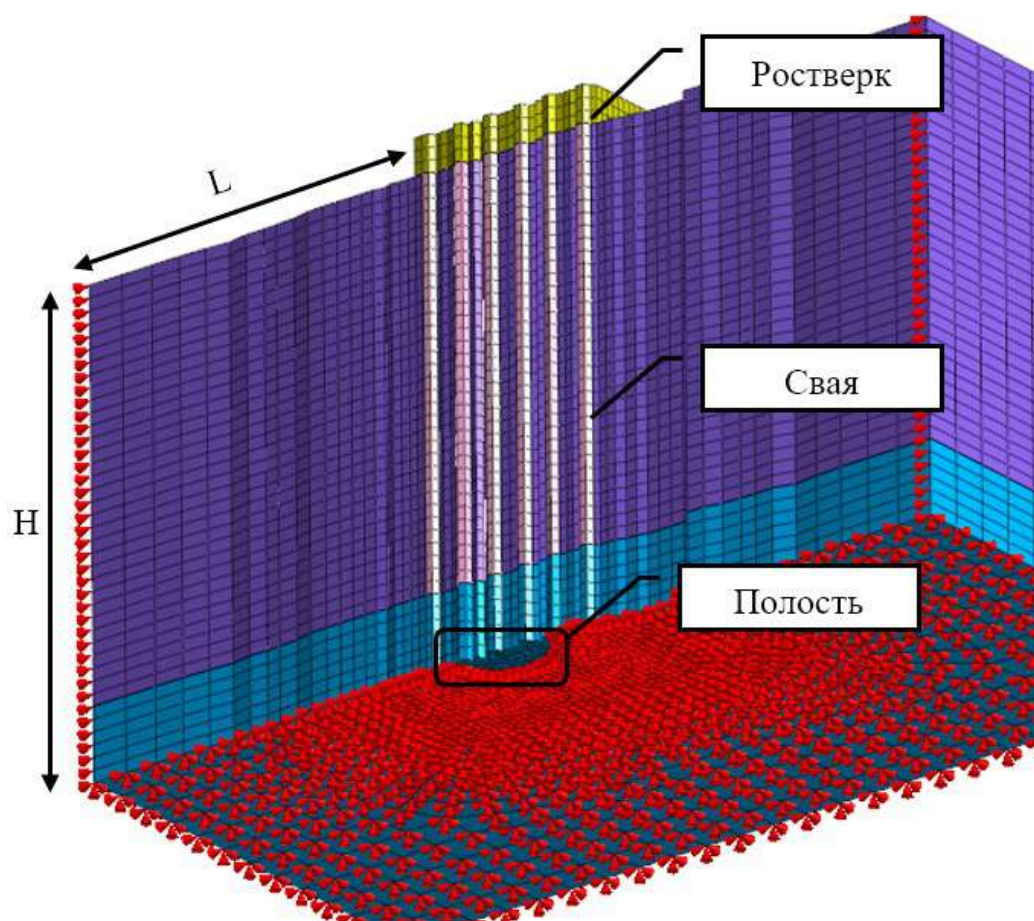


Рисунок 2.24 – Конечно-элементная модель, разрез

Численные расчеты выполняются в трехмерной постановке. Грунт, ростверк и сваи моделируются объемными элементами. Для моделирования бетона использовалась линейно-упругая модель. Для моделирования грунта применяется упруго-пластическая модель Кулона-Мора. Обоснование применимости данной модели при моделировании нагружения сваи при образовании карстовых деформаций выполнено в подразделе 2.2.

При помощи реализованного в модели критерия прочности возможна оценка размеров «свода обрушения» в покровной толще грунта над карстовой полостью, при котором реализуется тип деформации «оседание» под нижними концами свай, а также выход полости выше низа свай фундамента и ее «всплытие» под подошву ростверка, что приводит к типу деформации «провал» [2; 7; 107; 122].

2.4 Обоснование граничных условий конечно-элементной модели

Традиционно при расчете фундаментов в условиях возникновения карстовых деформаций с использованием специального ПО для выполнения геотехнических расчетов (в плоской, осесимметричной или пространственной постановках) не обходится без прямого моделирования прослойки карстующихся грунтов с исключением из модели конечных элементов в пределах площади полости (пример представлен на рисунке 2.25). Такой подход применяется во многих исследовательских работах [19; 29; 67; 79; 80], в нормативной документации [101] а также при проектировании зданий и сооружений. Недостатком такого подхода является его высокая трудоемкость, что существенно увеличивает время выполнения расчетов [30; 145].

В дальнейшем в данной работе потребуется выполнить значительное число вариативных численных расчетов с перебором различных типов факторов. При этом становится актуально построить такую модель, в которой возможно выполнить численные исследования и значительно ускорить процесс расчета и перебора различных вариантов. Следует отметить, что допущения, принятые при создании такой модели, не должны оказывать значительного влияния на результаты расчета.

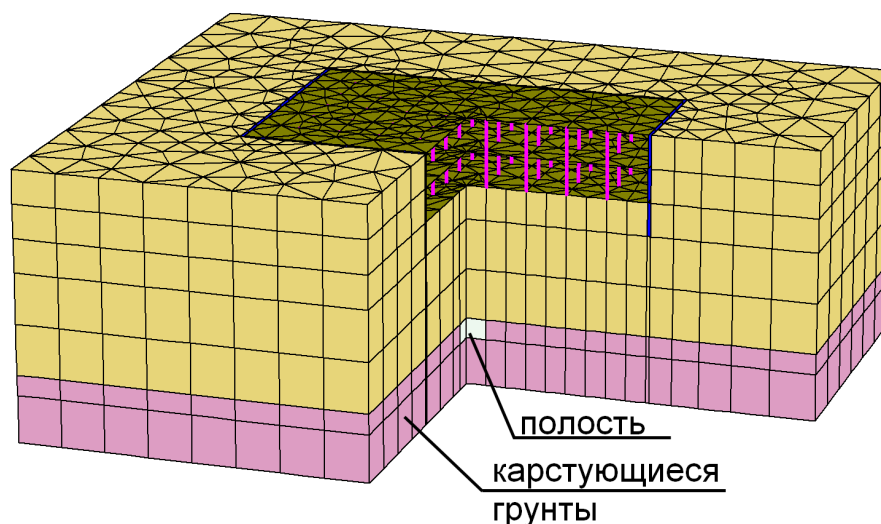


Рисунок 2.25 – Пример моделирования карстовой полости

Одним из таких допущений является моделирование граничных условий путем ограничения расчетной модели снизу кровлей карстующихся грунтов и представление растущей карстовой полости не традиционным способом (рисунок 2.25) а путем исключения связей по вертикали в пределах ее площади (рисунок 2.26, б) [30].

Моделирование граничных условий вышеописанным способом позволяет избавиться от нескольких неудобств, затрудняющих быстрый перебор различных вариантов:

- 1) При переборе различного расстояния от низа сваи до кровли карстующихся грунтов (b , м), необходимо создать несколько наборов конечных элементов, моделирующих прослойку карстующихся грунтов;
- 2) При переборе различных диаметров карстовой полости (B , м), необходимо также создать несколько наборов конечных элементов, описывающих положение полости в прослое карстующихся грунтов. При этом, каждому b будут соответствовать свои наборы с различными диаметрами.

Эта задачи выполнимы, но при большом числе вариантов легко допустить ошибку, что приведет к некорректным результатам, корректировке модели, выполнению перерасчетов и т.д., что, в свою очередь, может привести к большим временным затратам. Необходимо показать, что использование описанного подхода вместо традиционного (рисунок 2.25) не оказывает значительного влияния на основные расчетные параметры, а именно на высоту прогнозируемого свода обрушения над растущей полостью (рисунок 3.5), изменение касательных напряжений на боковой поверхности сваи в зоне действия негативного трения (рисунки 3.2-3.3), а также на осадку ростверка [30].

Для выполнения поставленной задачи выполним серию численных вариативных расчетов. Как было установлено ранее, наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на расчетные параметры свайного фундамента опор мостов при действии карстовых деформаций, являются расчетный диаметр карстовой полости и расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов. Исходя из этого, составим расчетные модели с вариативностью следующих параметров [33; 145]:

- расстояние от низа сваи до кровли карстующихся грунтов (b): 6 м, 10 м;
- расчетный диаметр полости за время эксплуатации (B): 5,5 м, 10 м.

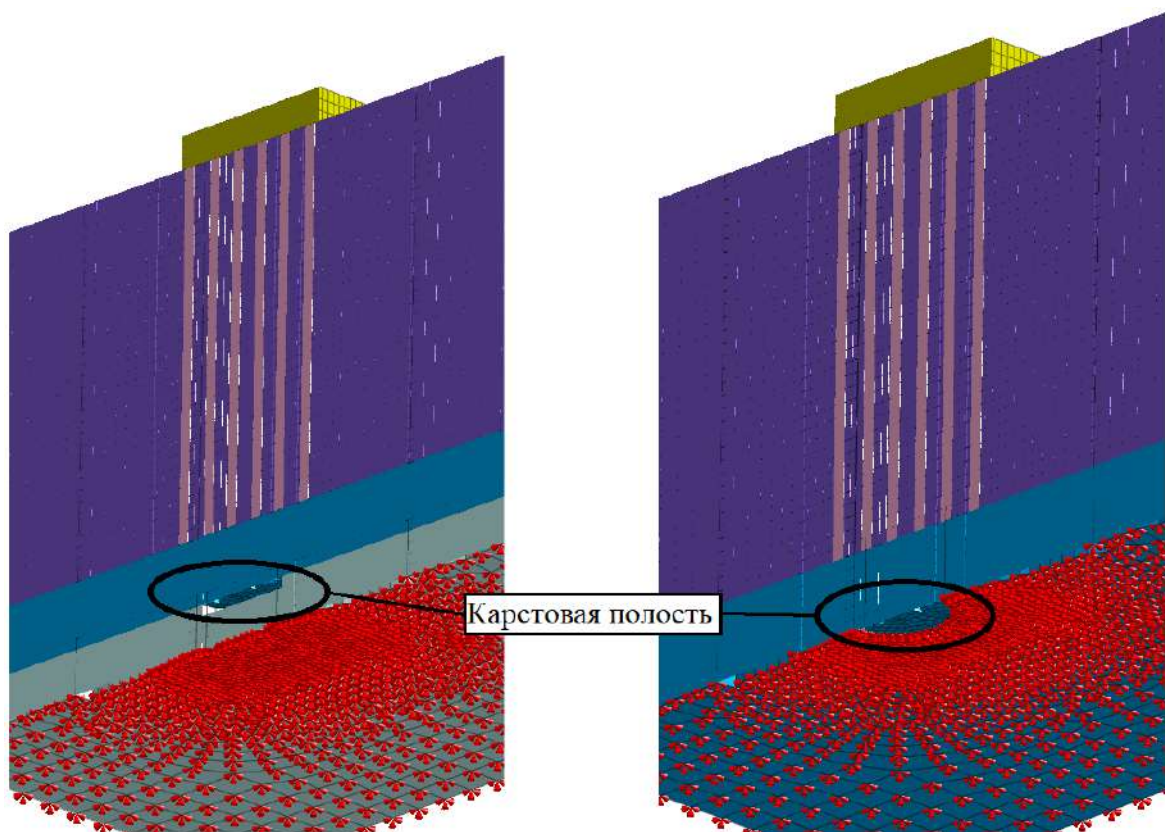
Расчетная схема 1. Карстующийся грунт моделируется непосредственно набором конечных элементов, карстовая полость представлена исключением в кровле карстующихся грунтов элементов в пределах площади полости (рисунок 2.26, а).

Расчетная схема 2. Карстующийся грунт не моделируется, расчетная схема снизу ограничена кровлей карстующихся грунтов, карстовая полость представлена отключением связей в узлах в пределах площади полости (упрощенный способ, рисунок 2.26, б).

Общий вид расчетных схем в разрезе показан на рисунке 2.26.

Работа выполняется в следующей последовательности [30; 32; 145]:

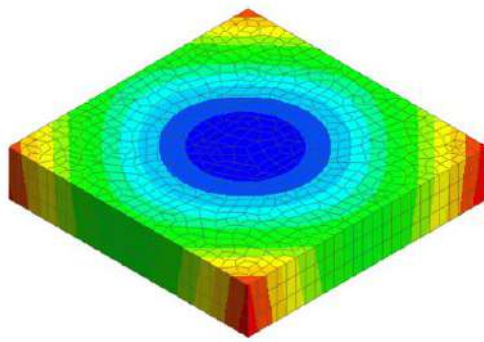
- 1) выполнение расчетов двумя способами (в соответствие с алгоритмом, описанном в п. 4.1);
- 2) определение и сопоставление результатов расчета осадки ростверка при образовании карстовых деформаций, высоты прогнозируемого свода обрушения и значений изменения касательных напряжений в зоне действия негативного трения;
- 3) составление выводов о результатах сравнительных расчетов и степени влияния способа моделирования карстовой полости.



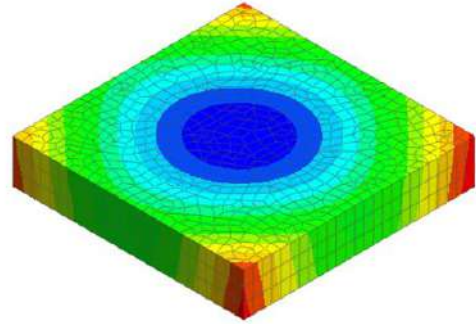
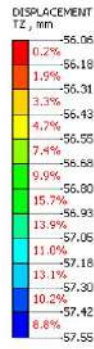
а – традиционный способ; б – упрощенный способ

Рисунок 2.26 – Общий вид расчетных схем (разрез)

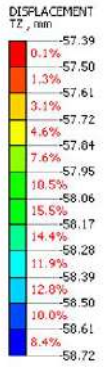
Ниже на рисунках представлены некоторые из полученных результатов, а также сводная таблица со сравнением полученных результатов.



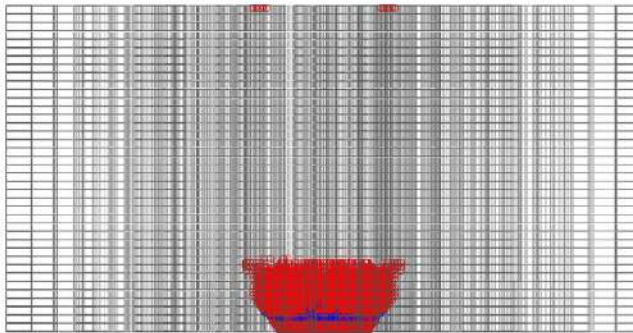
a)



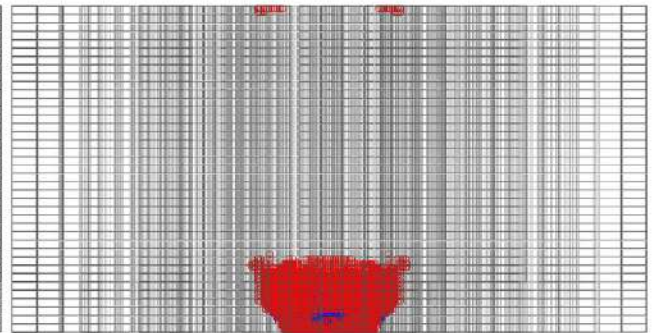
б)



а – традиционный способ; б – упрощенный способ
 Рисунок 2.27 – Вертикальные перемещения, мм: $b=6$ м, $V=5,5$ м

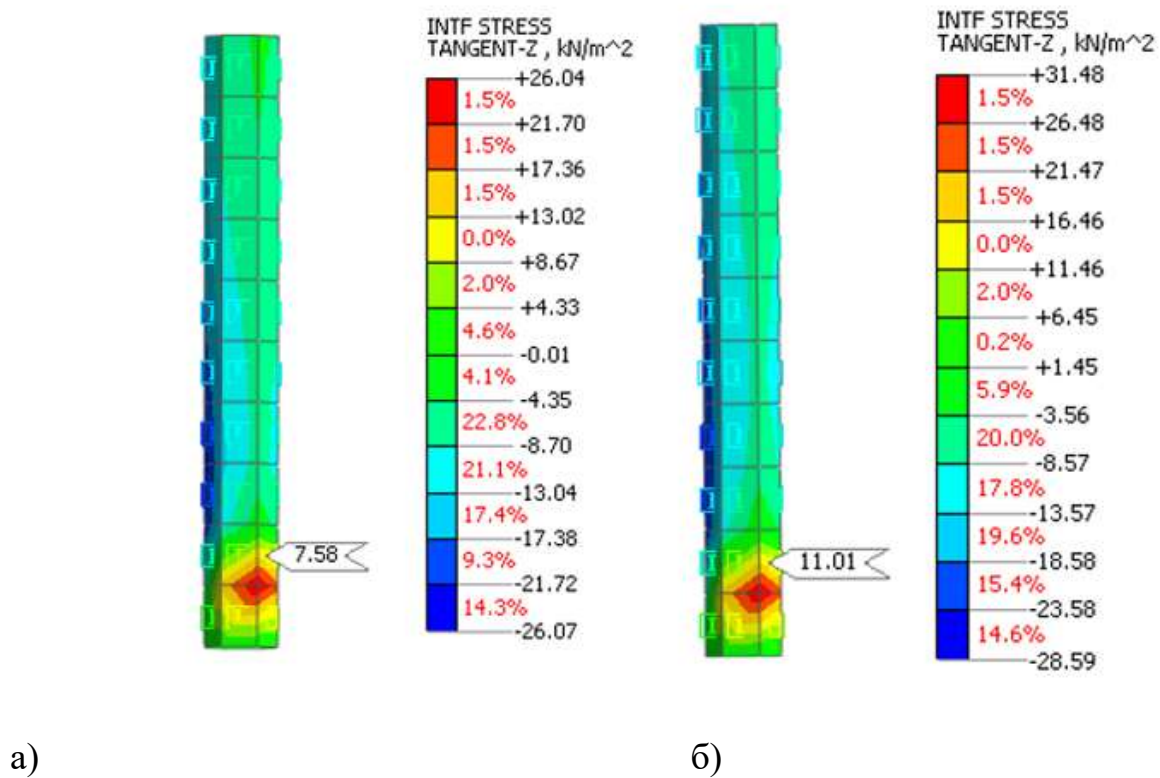


a)



б)

а – традиционный способ; б – упрощенный способ
 Рисунок 2.28 – Прогнозируемый свод обрушения: $b=6$ м, $V=10$ м



а – традиционный способ; б – упрощенный способ

Рисунок 2.29 – Касательные напряжения на боковой поверхности свай: $b=10$ м,
 $B=10$ м

Таблица 2.5 – Сравнение результатов расчетов

Сравниваемый параметр	Вариант расчетной схемы	Способ моделирования карстовой полости		Отклонение, %
		традиционный способ	упрощенный способ	
Осадка ростверка, мм	$b=6$ м, $B=5,5$ м	57,6	58,7	+1,8
	$b=6$ м, $B=10$ м	74,1	78,2	+5,2
	$b=10$ м, $B=5,5$ м	68,6	70,3	+2,4
	$b=10$ м, $B=10$ м	82,6	86,9	+4,9

Продолжение таблицы 2.5

Сравниваемый параметр	Вариант расчетной схемы	Способ моделирования карстовой полости		Отклонение, %
		традиционный способ	упрощенный способ	
Высота прогнозируемого свода обрушения, м	$b=6$ м, $B=5,5$ м	7,5	7,5	-
	$b=6$ м, $B=10$ м	9,5	9,5	-
	$b=10$ м, $B=5,5$ м	11,5	11,5	-
	$b=10$ м, $B=10$ м	12,5	12,5	-
Изменение касательных напряжений, кН/м ²	$b=6$ м, $B=5,5$ м	23,9	28,9	+17,3
	$b=6$ м, $B=10$ м	82,5	85,8	+3,8
	$b=10$ м, $B=5,5$ м	9,6	9,4	-2,0
	$b=10$ м, $B=10$ м	49,1	52,5	+6,5

Как видно из представленных результатов сравнительных расчетов (рисунки 2.27-2.29, таблица 2.5), разница в способах моделирования карстовой полости незначительная. К тому же, при моделировании с использованием упрощенного способа результаты немного завышены относительно традиционного, что идет «в запас» при выполнении большого числа вариативных расчетов [30].

2.6 Выводы по главе 2

1 Выполнена оценка применения расчетных моделей МКЭ для моделирования карстовых деформаций и установлено, что в случае наличия слоя водопорных глин под нижними концами свай над карстующимися грунтами наиболее целесообразно выполнять расчеты на карстовые деформации по типу «оседание». При этом высота «свода обрушения» к карстующимся грунтам, определяемая расчетом как область сгущения «точек пластических деформаций» над карстовой полостью, должна быть меньше мощности слоя глин, а формирование этого свода следует рассмотреть для 2-х расчетных случаев: при формировании свода ниже нижних концов свай и выше нижних концов свай.

2 Выполнена верификация расчетной модели сваи над карстовой полостью путем численного моделирования натурного эксперимента по нагружению буронабивной сваи, находящейся над карстовой полостью, статической нагрузкой и сопоставления результатов расчета с данными испытания. В качестве модели грунтового основания принята упругопластическая модель Мора-Кулона. Получена удовлетворительная сходимость результатов: график «нагрузка-осадка», распределение осевой силы по длине сваи и трения по боковой поверхности сваи. Полученные результаты обосновывают допустимость использования критерия прочности Мора-Кулона для описания поведения свайного фундамента в условиях развития карстовых деформаций.

3 Выполнен анализ, систематизация проектных решений фундаментов мостовых опор на различных объектах и классификация фундаментов опор по геометрическим параметрам и типам основания. Составлена вариативная конечно-элементная модель для выполнения численного исследования влияния образования карстовой полости под свайным фундаментом мостовой опоры на расчетные параметры, определяемые при образовании карстовых деформаций. Грунты покровной толщи на карстующимися грунтами приняты глинистыми, обеспечивающими реализацию карстовых деформаций опоры по типу «оседание».

4 Обосновано моделирование карстовой полости «упрощенным способом», когда расчетная модель ограничивается снизу кровлей карстующихся скальных грунтов, а сама полость представлена отключением связей в вертикальном направлении в пределах ее площади.

3 МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Описание методики выполнения численных расчетов

В соответствии с задачами, сформулированными в главе 1, основной целью численных исследований является:

– определить зависимость изменения касательных напряжений на боковых поверхностях свай и вертикальных напряжений в их нижней части от типа и характеристик карстовых деформаций:

– на основе выявленных закономерностей разработать аналитические решения для расчета негативных сил трения, дополнительных нагрузок на сваи и осадок фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций в основании.

Численные исследования выполняются путем математического моделирования нагружения свайного фундамента мостовой опоры при росте карстовой полости в основании нижних концов свай. Расчет выполняется в соответствии со следующей этапностью [33; 145].

1. Определение исходного напряженно-деформированного состояния грунтового массива. На данном этапе выполняется вычисление начальных напряжений в грунтовом массиве до выполнения строительства опоры моста. Общий вид модели на данном этапе и разрез представлены на рисунке 3.1.
2. Активация конструкций фундамента мостовой опоры (ростверк, сваи, интерфейсные элементы), активация расчетной нагрузки. На данном этапе моделируется строительство опоры и нагружение ее эксплуатационной нагрузкой. После завершения расчета выполняется анализ касательных напряжений на боковой поверхности свай (представлены на рисунке 3.2).

3. Отключение связей по оси Z в пределах площади карстовой полости (см. подраздел 2.4). На данном этапе моделируется рост карстовой полости в карстующихся грунтах до ее прогнозируемого диаметра. После завершения расчета выполняется повторный анализ касательных напряжений на боковой поверхности сваи в тех же элементах, что и в предыдущем этапе (изополя представлены на рисунке 3.3).

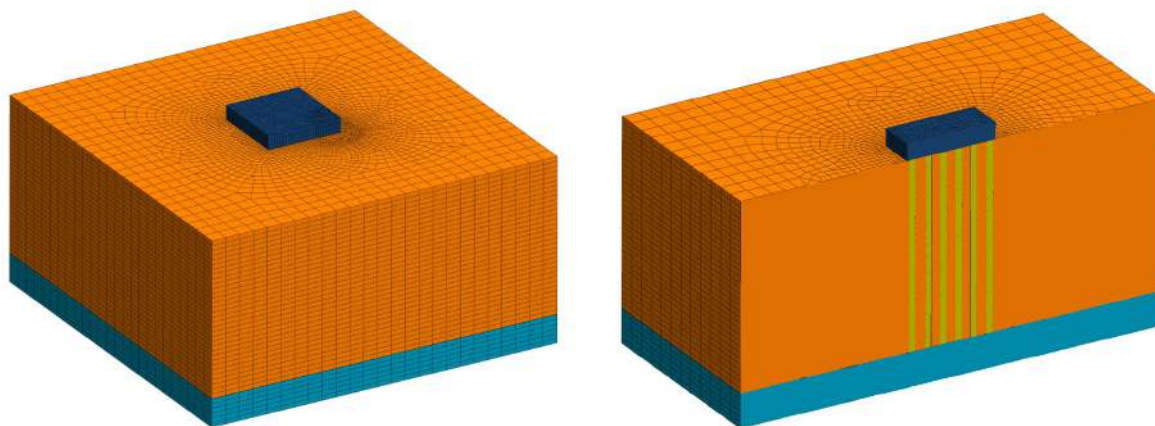


Рисунок 3.1 – Общий вид модели на начальном этапе и разрез

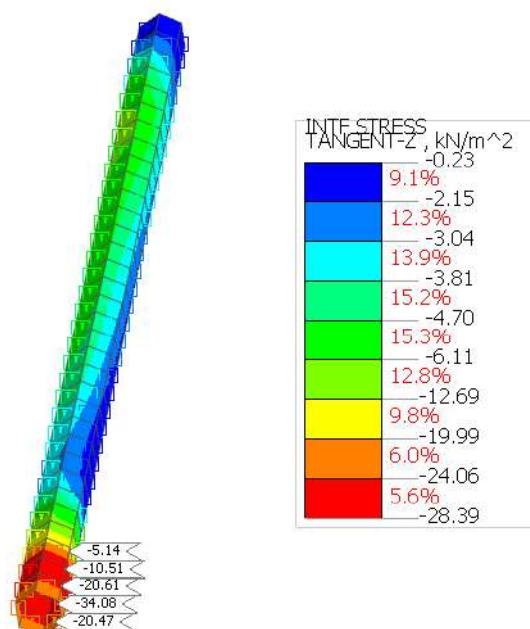


Рисунок 3.2 – Изополя касательных напряжений на боковой поверхности сваи до образования карстовой полости, кН/м²

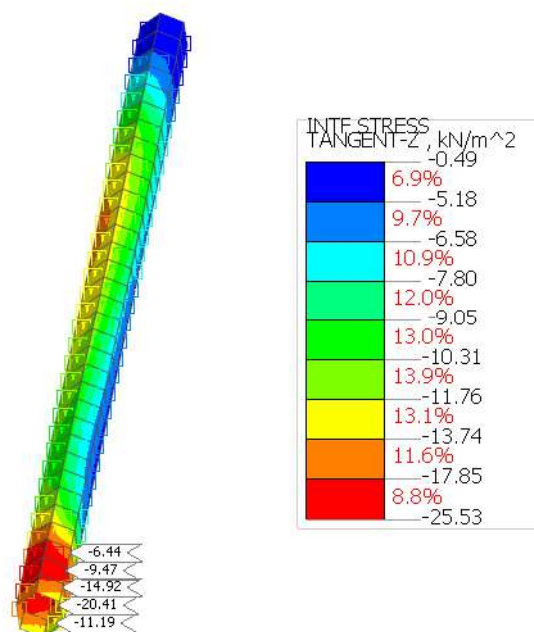


Рисунок 3.3 – Изополя касательных напряжений на боковой поверхности сваи после образования полости, кН/м²

Дополнительная нагрузка на сваю (за счет возникновения сил негативного трения на боковой поверхности свай) при образовании карстовых деформаций (P_l , кН) определяется по формуле:

$$P_l = u \sum \Delta \tau_{z,i} h_i, \quad (3.1)$$

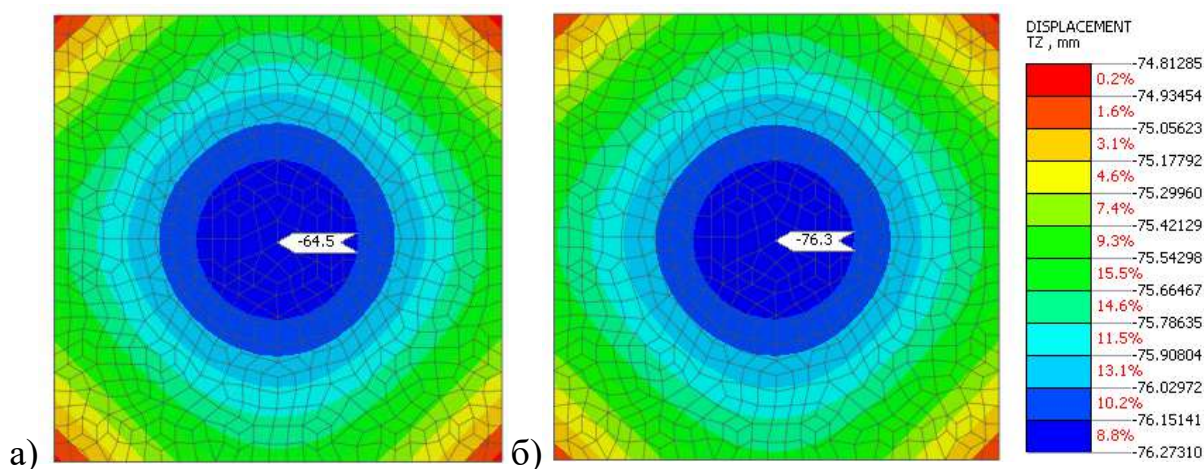
где: u – наружный периметр поперечного сечения ствола сваи, м; $\Delta \tau_{z,i}$ – изменение значения касательного напряжения на боковой поверхности сваи на рассматриваемом i -м слое по сравнению с расчетным этапом в нормальных условиях эксплуатации, кН/м²; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м. При этом, при расчете по формуле (3.1) учитываются только те слои, на которых наблюдается уменьшение τ_z или изменение его знака с «–» на «+», т.е. слои грунта, в которых реализуется негативное трение на боковой поверхности свай. [33; 145]

В процессе расчетов контролируется рост прогнозируемого свода обрушения (путем фиксации положения точек Кулона-Мора над карстовой полостью – рисунок 3.5).

Дополнительная нагрузка на сваю, реализуемая в момент образования полости за счет негативного трения на боковой поверхности свай (P_I), а также дополнительная осадка (S_I , рисунок 3.4) определяется для следующих условий:

– прогнозируемый свод обрушения над полостью формируется в глинистых грунтах над карстующимися грунтами, размеры свода – менее расстояния до нижнего конца свай: $h/b \leq 1$ (рисунок 2.11, а);

– прогнозируемый свод обрушения над полостью формируется в глинистых грунтах над карстующимися грунтами, размеры свода – выше нижних концов свай: $h/b > 1$ (рисунок 2.11, б).



а – до образования карстовых деформаций; б – после образования карстовых деформаций

Рисунок 3.4 – Изополя вертикальных перемещений ростверка

В работе отслеживается доля увеличения нагрузки на сваю $\Delta P = P/P_I$ и доля увеличения осадки свайного фундамента $\Delta S = S_I/S$, где P и S – нагрузка на сваю осадка фундамента в нормальных условиях эксплуатации до образования полости в основании свай.

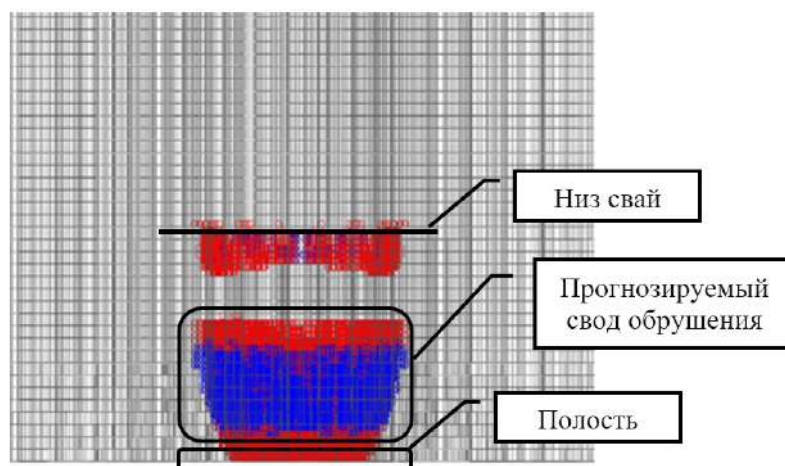
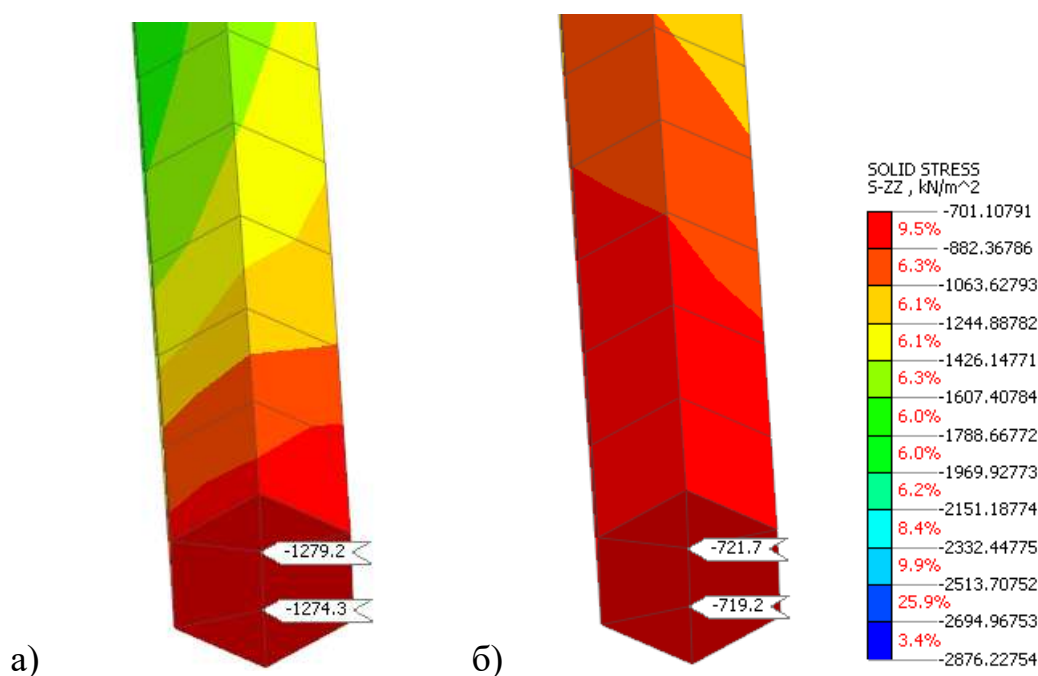


Рисунок 3.5 – Пластические точки Мора-Кулона над полостью

Анализ вертикальных напряжений в нижнем конце сваи показывает, что при образовании и росте карстовой полости в основании фундамента напряжения значительно уменьшаются (рисунок 3.6). Это говорит о том, что доля нагрузки, передаваемая на грунт под пятой сваи, снижается. Таким образом, можно считать, что торец сваи фактически исключается из работы при росте карстовой полости.



а – до образования карстовых деформаций; б – после образования карстовых деформаций

Рисунок 3.6 – Вертикальные напряжения в торце сваи

3.2 Планирование численного эксперимента

Негативное трение, возникающее на боковой поверхности свай при образовании карстовых деформаций в основании, зависит от различных факторов. В их числе могут быть: расчетный диаметр карстовой полости (B), нагрузка, передаваемая на ростверк, расстояние от низа свай до кровли карстуемых грунтов (b) и др. Оценка чувствительности величины негативного трения на варьирование расчетных параметров карстовых деформаций выполняется при помощи полного факторного эксперимента типа 2^k [3]. Основными изменяемыми факторами в эксперименте были приняты:

- нагрузка, передаваемая на сваю (x_1);
- площадь условного фундамента (x_2);
- расчетный диаметр карстовой полости (x_3);
- расстояние от низа свай до кровли карстуемых грунтов (x_4).

Параметром оптимизации в данном случае является отношение значения нагрузки, передаваемой на сваю после образования карстовых деформаций ($P+P_I$) к значению исходной нагрузки, передаваемой на сваю в обычных условиях (P). Функция отклика определяется в виде полинома 1-й степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 \quad (3.2)$$

Значения коэффициентов функции отклика определяются с помощью матрицы планирования эксперимента. Эта матрица содержит все данные об эксперименте (входные данные и результаты расчетов). Она была создана с использованием программного обеспечения Midas GTS NX. (см. таблицу 3.1).

Величиной коэффициентов $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ оценивается влияние изменяемых факторов на параметр оптимизации.

Коэффициенты полинома рассчитаны по формулам (3.3) и (3.4), матрица планирования представлена в таблице 3.1.

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad (3.3)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_j y_i}{N}, \quad j = 1 \div k, \quad (3.4)$$

где N – число опытов, $N=16$; k – число факторов, $k=4$.

Получаем следующую функцию отклика:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 \quad (3.5)$$

Таблица 3.1 – Матрица планирования численного эксперимента

x1 «+» – 280 тс «-» – 390 тс	x2 «+» – 250 м2 «-» – 80 м2	x3 «+» – 3,3 м «-» – 10,0 м	x4 «+» – 6 м «-» – 22 м	y
+	+	+	+	1,004
-	+	+	+	1,004
+	-	+	+	1,001
-	-	+	+	1,000
+	+	-	+	1,187
-	+	-	+	1,198
+	+	+	-	1,000
-	+	+	-	1,000
+	-	-	+	1,152
-	-	-	+	1,136
+	+	-	-	1,017

Продолжение таблицы 3.1

x1 «+» – 280 тс «-» – 390 тс	x2 «+» – 250 м2 «-» – 80 м2	x3 «+» – 3,3 м «-» – 10,0 м	x4 «+» – 6 м «-» – 22 м	y
-	+	-	-	1,015
+	-	+	-	1,001
-	-	+	-	1,000
+	-	-	-	1,018
-	-	-	-	1,008

$$y = 1,046 + 0,001x_1 + 0,007x_2 - 0,045x_3 + 0,039x_4 - 0,002x_1x_2 - 0,001x_1x_3 - 0,001x_1x_4 - 0,006x_2x_3 + 0,006x_2x_4 - 0,038x_3x_4 \quad (3.6)$$

Анализ коэффициентов при наличии неизвестных факторов и сравнение их между собой показывает, что наибольшее влияние на конечный результат оказывает расчетный диаметр карстовой полости. Следующим по значимости фактором является расстояния от низа свай до кровли карстующихся грунтов. Наименьшая значимость у площади условного фундамента и нагрузки на ростверк.

В соответствии с результатами факторного эксперимента расчеты фундамента опоры моста при образовании карстовых деформаций выполняются для следующих вариантов исходных данных:

- расстояние до кровли скального грунта (b): 6 м, 10 м, 14 м, 18 м, 22 м;
- расчетный размер полости за время эксплуатации (B): 3 м, 5,5 м, 7,8 м, 10 м;

После выполнения статистической обработки результатов расчета получены аналитические решения, позволяющие определить дополнительную нагрузку на сваю и осадку свайной опоры при образовании карстовых деформаций, имея в

качестве исходных данных известные значения нагрузки на сваю в условиях нормальной эксплуатации P , осадку опоры S , расстояние от кровли карстующихся грунтов до низа свай b и расчетный диаметр карстовой полости B .

3.3 Выводы по главе 3

1 Разработана методика численного исследования для определения влияния образования карстовой полости под свайным фундаментом мостовой опоры на расчетные параметры, определяемые при образовании карстовых деформаций (дополнительные нагрузки на сваи и осадки свайной опоры).

2 Методика разработана при условии формирования устойчивого «свода обрушения» над полостью и исключения «всплытия» полости подошву ростверка.

3 При помощи полного факторного эксперимента типа 2^k подтверждено, что наибольшее влияние на расчетные параметры свайного фундамента опоры моста, определяемые при образовании карстовых деформаций, оказывают расчетный диаметр карстовой полости и расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов.

4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВАЙ С ГРУНТОМ В СОСТАВЕ ФУНДАМЕНТА ОПОРЫ МОСТА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

4.1 Исследование закономерностей изменения касательных напряжений на боковой поверхности свай и вертикальных напряжений в нижнем конце свай

Численные вариативные расчеты касательных напряжений на боковой поверхности свай и вертикальных напряжений в нижнем конце свай выполнены при образовании карстовых деформаций типа «оседание» (подраздел 2.1) для 2-х расчетных случаев. Возможность развития свода над полостью в глинистых грунтах до низа свай определяется условием $h/b \leq 1$, а при развитии свода выше низа свай – $h/b > 1$ (h – высота прогнозируемого свода обрушения) [31; 32]. На рисунке 4.4 представлен график зависимости отношения h/b к отношению b/B . Из графика видно, что при отношении $b/B < 1$ (расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов меньше расчетного диаметра полости), прогнозируемый свод обрушения выходит выше, чем низ свай.

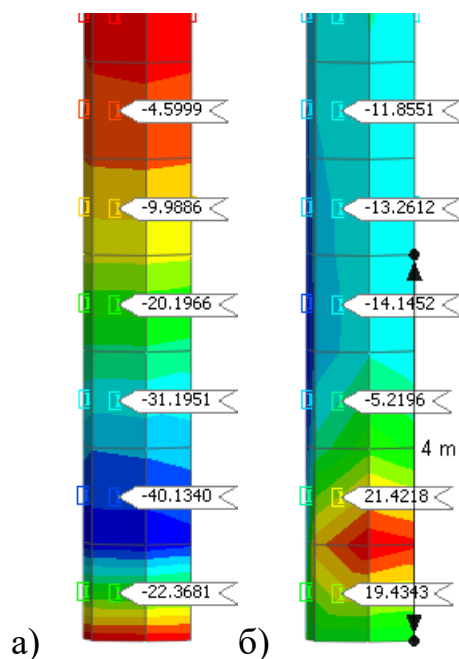
Анализ результатов выполненных расчетов позволяет заключить следующее:

- полностью исключается сопротивление грунта под нижним концом свай;
- частично исключается сопротивление грунта по боковой поверхности свай;
- сопротивление грунта по боковой поверхности свай исключается на том участке, на котором возникает эффект «негативного трения» (рисунки 3.2-3.3);
- соотношение длины участка, на котором возникает эффект «негативного трения» (l , м), к длине свай (L , м) зависит от формирования «свода

обрушения» над карстовой полостью в карстующихся грунтах прогнозируемые свод обрушения доходит до низа свай (рисунок 2.11, а) или выходит выше низа свай (рисунок 2.11, б).

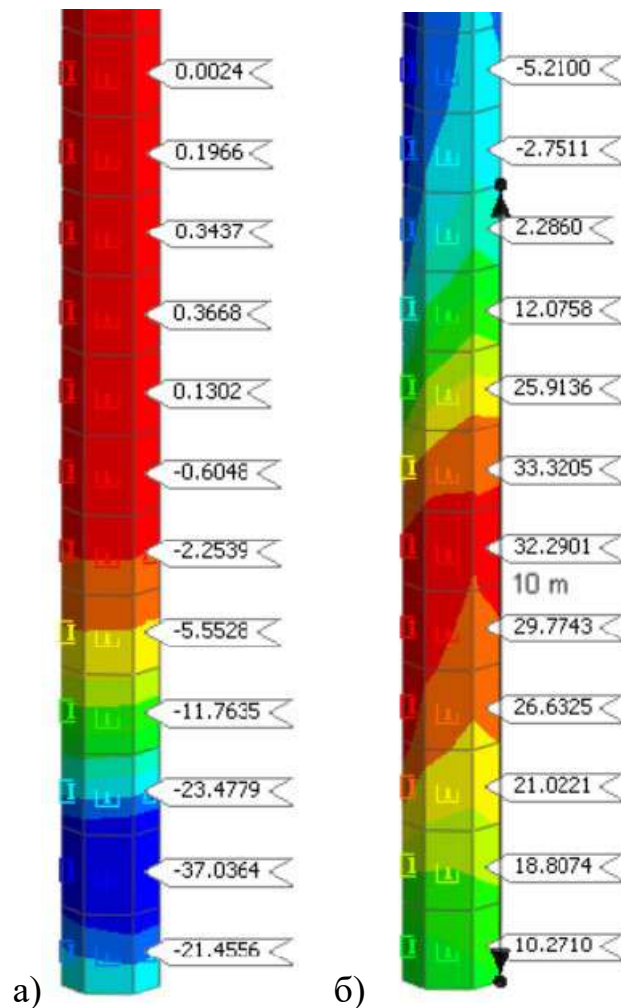
- в результате возникновения эффекта «негативного трения» на сваи, расположенные над карстовой полостью в карстующихся грунтах, передаются дополнительные нагрузки (P_I), определяемые по формуле ((3.1) (подраздел 3.1), вызывающие дополнительные осадки фундамента и снижение коэффициента жесткости свай;
- в связи с исключением сопротивления грунта по боковой поверхности сваи на участке, на котором возникает эффект «негативного трения», несущая способность свай по грунту снижается [32].

На рисунках 4.1-4.4 представлены касательные напряжения на боковой поверхности свай при $h/b \leq 1$ (рисунок 4.1) и $h/b > 1$ (рисунок 4.4). Анализ распределений касательных напряжений для этих двух случаев показывает, что соотношение l/L в первом случае можно принять равным 0,2, а во втором – 0,4.



а – до образования карстовых деформаций; б – после образования карстовых деформаций

Рисунок 4.1 – Касательные напряжения на боковой поверхности свай, тип деформаций – оседание при $h/b \leq 1$



а – до образования карстовых деформаций; б – после образования карстовых деформаций

Рисунок 4.2 – Касательные напряжения на боковой поверхности свай, тип деформаций – оседание при $h/b > 1$

На рисунке 4.3 представлены графики зависимости дополнительной нагрузки, действующей на сваю при образовании карстовых деформаций (P_1 , кН) от расчетного диаметра карстовой полости (B , м) при различных расстояниях от низа свай до кровли карстующихся грунтов (b , м).

Анализ этих графиков показывает, что с ростом диаметра полости в карстующихся грунтах дополнительная нагрузка на сваи возрастает, а с увлечением расстояния от кровли карстующихся грунтов до низа свай она снижается.

После статистической обработки результатов расчета получены аналитические зависимости для расчета дополнительных нагрузок на сваи, несущей способности свай, осадок фундаментов и коэффициента жесткости свай в зависимости от расчетных параметров карстовых деформаций (b/B) и условий формирования свода обрушения над карстовой полостью (h/b).

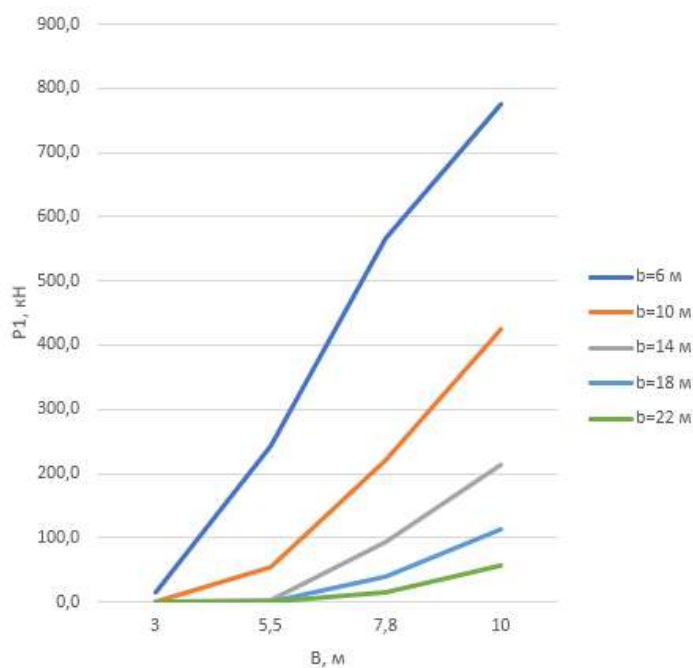


Рисунок 4.3 – График зависимости дополнительной нагрузки на сваю (P_l , кН) от диаметра полости (B , м)

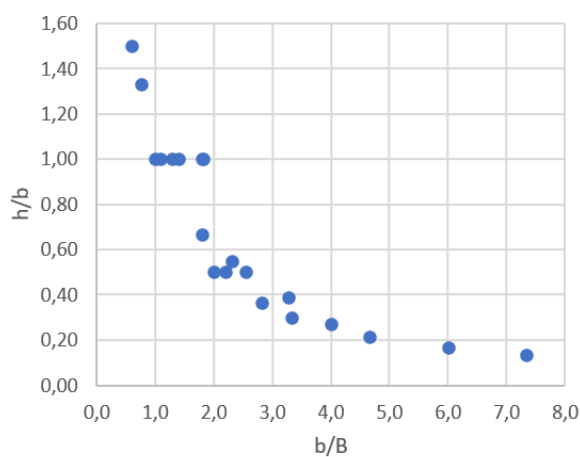


Рисунок 4.4 – Зависимость относительного расстояния от прогнозируемого верха свода обрушения до низа свай (h/b) от отношения расстояния от кровли карстующихся грунтов до низа свай к расчетному диаметру полости (b/B)

4.1 Разработка аналитических методов расчета свай фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций в основании

4.1.1. Определение расчетных параметров свайных фундаментов опор мостов при действии карстовых деформаций при $h/b \leq 1$

Расчет дополнительной нагрузки на сваю

Учитывая то, что условие $h/b \leq 1$ выполняется при $b/B > 1$ (рисунок 4.4) для анализа выбираем результаты расчета дополнительной нагрузки на сваи при $b/B > 1$. На основании этих результатов была определена зависимость между отношением исходной нагрузки на сваю в нормальных условиях эксплуатации до образования полости к дополнительной нагрузке на сваю (P/P_1) и отношением расстояния от кровли карстующихся грунтов до низа свай к расчетному диаметру полости (b/B). Зависимость получена в виде графика на рисунке 4.5.

Для определения отношения дополнительной нагрузки на сваю (P_1) к нагрузке на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, была выполнена статистическая обработка результатов расчета (рисунок 4.5) и получена аналитическая зависимость P/P_1 от b/B (формула (4.1)) [30].

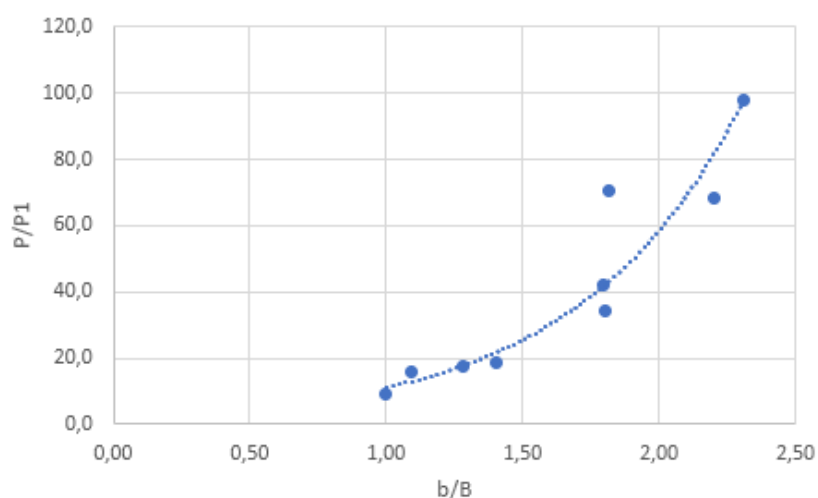


Рисунок 4.5 – График зависимости значения P/P_1 к отношению b/B

$$\frac{P}{P_1} = 2,1e^{1,7\frac{b}{B}} \quad (4.1)$$

Величина достоверного приближения составляет $R^2 = 0,9194$. Таким образом, дополнительная нагрузка на сваю P_1 определяется в зависимости от проектной нагрузки, передаваемой на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, размера полости (B) и расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов (b):

$$P_1 = P / (2,1e^{1,7\frac{b}{B}}) \quad (4.2)$$

Расчет дополнительной осадки фундамента

При возникновении карстовых деформаций по типу «оседание» и образовании устойчивого прогнозируемого свода обрушения, на ростверк передаются дополнительные осадки. По результатам вариативных численных расчетов, значения дополнительных осадок зависят от расчетного диаметра карстовой полости (B , м), расстояния от низа свай до кровли карстующихся грунтов (b , м) и от площади условного фундамента куста свай.

На рисунке ниже представлена зависимость отношения осадки ростверка после образования карстовой полости к осадке ростверка до образования карстовой полости (S_1/S) к отношению расчетного диаметра полости к расстоянию от кровли карстующихся грунтов до низа свай к (B/b) для 2 вариантов площади условного фундамента.

Была выполнена линейная аппроксимация функций по значениям коэффициентов S_1/S .

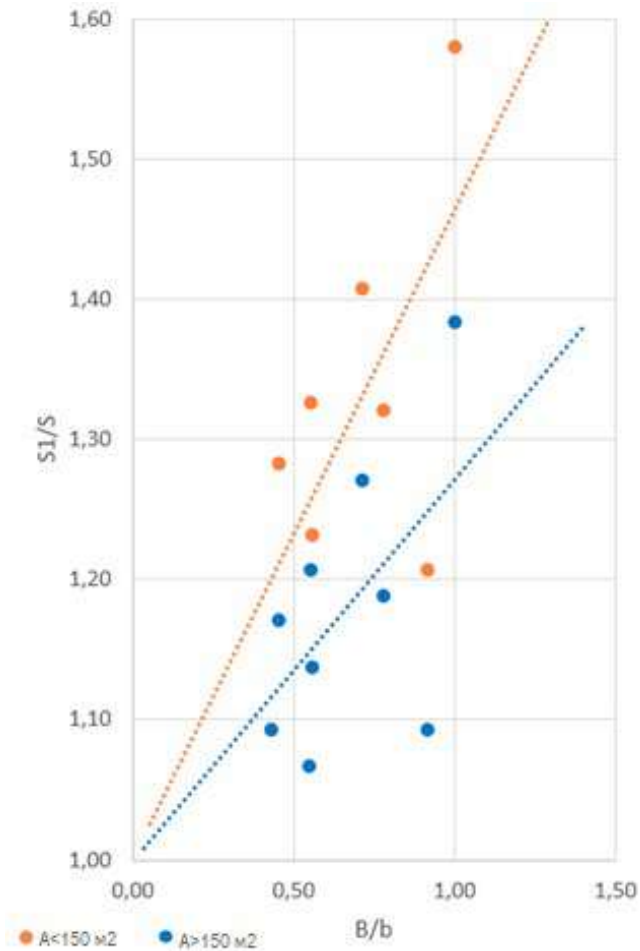


Рисунок 4.6 – График зависимости значения S_1/S к отношению B/b

Таким образом, получены следующие зависимости для определения осадки фундамента после образования полости в зависимости от числа свай в ростверке, расчетного диаметра карстовой полости и расстояния от низа свай до кровли карстующихся грунтов [54]:

- при площади условного фундамента менее 150 м^2 :

$$\frac{S_1}{S} = 0,6 \frac{B}{b} + 1, \quad (4.3)$$

- при площади условного фундамента более 150 м^2 :

$$\frac{S_1}{S} = 0,4 \frac{B}{b} + 1. \quad (4.4)$$

Используя зависимости (4.3) и (4.4) в инженерных расчетах, можно определить осадку ростверка после образования карстовой полости, зная осадку до образования полости (S), прогнозируемый размер карстовой полости в карстующихся грунтах за нормативный срок эксплуатации сооружения (B) и расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов (b) по следующим формулам:

- при площади условного фундамента менее 150 м^2 :

$$S_1 = S \left(0,6 \frac{B}{b} + 1 \right), \quad (4.5)$$

- при площади условного фундамента более 150 м^2 :

$$S_1 = S \left(0,4 \frac{B}{b} + 1 \right). \quad (4.6)$$

Расчет коэффициента жесткости свай

При расчете и конструировании фундаментов мостовых опор с применением таких расчетных комплексов, как SCAD, Лира-САПР и др., взаимодействие конструкций с основанием преимущественно описывается введением специальных одноузловых элементов конечной жесткости в местах расположения свай. Жесткость таких элементов определяется в соответствии с СП 24.13330 [97].

При образовании карстовых деформаций происходит локальное снижение жесткости грунта покровной толщи над карстовой полостью и возникновение дополнительных нагрузок на сваю, вызванных возникновением на боковой поверхности свай «негативного трения». Описать такой эффект возможно при помощи изменения характеристик одноузловых элементов конечной жесткости в пределах площади образования карстовой полости [30].

Используя формулы (4.2), (4.5) и (4.6) определим жесткость таких элементов после образования карстовых деформаций и коэффициент снижения жесткости для площади условного фундамента менее 150 м^2 :

$$\frac{P + P_1}{S_1} = \frac{P + P / (2,1e^{1,7\frac{b}{B}})}{S \left(0,6\frac{B}{b} + 1 \right)} = \frac{P}{S} \left(\frac{1 + (1 / 2,1e^{1,7\frac{b}{B}})}{0,6\frac{B}{b} + 1} \right), \quad (4.7)$$

где P/S – коэффициент жесткости свай в условиях нормальной эксплуатации.

Таким образом, коэффициент снижения жесткости k определится по формуле:

$$k = \frac{1 + 1 / (2,1e^{1,7\frac{b}{B}})}{0,6\frac{B}{b} + 1}. \quad (4.8)$$

Аналогичным образом определим коэффициент снижения жесткости свай для площади условного фундамента более 150 м²:

$$k = \frac{1 + 1 / (2,1e^{1,7\frac{b}{B}})}{0,4\frac{B}{b} + 1}. \quad (4.9)$$

4.1.2. Определение расчетных параметров свайных фундаментов опор мостов при действии карстовых деформаций при $h/b > 1$

Расчет дополнительной нагрузки на сваю

Для определения дополнительной нагрузки на сваю при образовании карстовых деформаций по типу «оседание», но при высоте образовавшегося свода в глинистых грунтах более расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов ($h/b > 1$), была выполнена серия численных расчетов, при которых карстовая полость подводилась непосредственно к низу свай. В данных расчетах выполнялась оценка изменения касательных напряжений на боковой поверхности свай при росте карстовой полости.

Очевидно, что зависимости, определенные в подразделе 4.2.1, будут не актуальны для случая, когда $h/b > 1$. На рисунке 4.7 представлен график зависимости отношения дополнительной нагрузки на сваю (P_I , кН) к исходной нагрузке на сваю (P , кН) к отношению площади полости (A_n , м) и площади свайного ростверка (A , м).

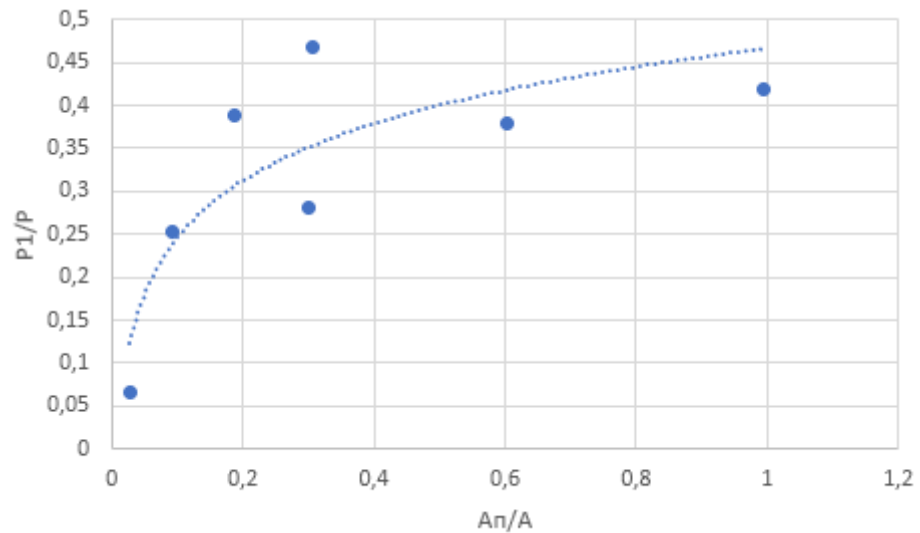


Рисунок 4.7 – График зависимости значения P_I/P к отношению A_n/A

Для определения дополнительной нагрузки на сваю (P_I) к нагрузке на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, была выполнена статистическая обработка результатов расчета (рисунок 4.7) и получена аналитическая зависимость P_I/P от A_n/A [30]:

$$\frac{P_I}{P} = 0,1 \ln \left(\frac{A_n}{A} \right) + 0,5. \quad (4.10)$$

Величина достоверного приближения составляет $R^2 = 0,7112$. Таким образом, дополнительная нагрузка на сваю P_I определяется в зависимости от проектной нагрузки, передаваемой на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, площади полости (A_n) и площади свайного ростверка (A):

$$P_I = P \left(0,1 \ln \left(\frac{A_n}{A} \right) + 0,5 \right). \quad (4.11)$$

Расчет дополнительной осадки фундамента

Значения дополнительных осадок, передаваемых на ростверк при образовании карстовых деформаций, зависят от площади карстовой полости ($A_n, м^2$), образующейся непосредственно в нижней части свай, а также площади ростверка ($A, м^2$).

На рисунке ниже представлена зависимость отношения осадки фундамента после образования карстовой полости к осадке фундамента до образования карстовой полости (S_1/S) к отношению площади полости ($A_n, м$) и площади свайного ростверка ($A, м$).

Была выполнена линейная аппроксимация функции по значениям коэффициентов S_1/S .

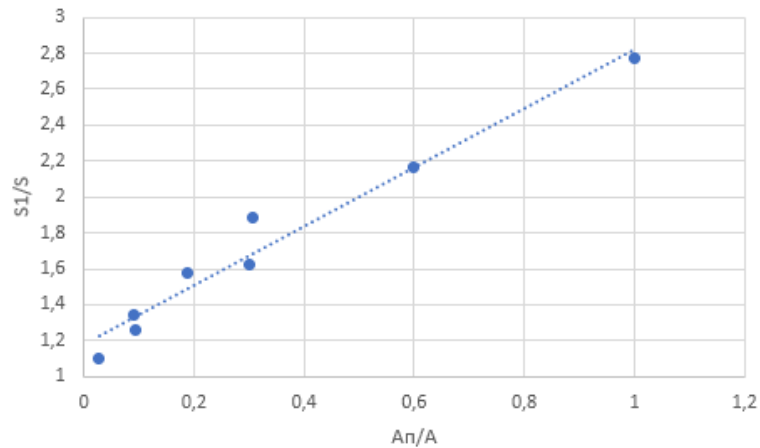


Рисунок 4.8 – График зависимости значения S_1/S к отношению A_n/A

Таким образом, получены следующие зависимости для определения осадки фундамента после образования полости под нижними концами свай в зависимости от числа свай в ростверке, прогнозируемого диаметра карстовой полости и расстояния от низа свай до кровли карстующихся грунтов [54]:

$$\frac{S_1}{S} = 1,7 \frac{A_n}{A} + 1,2. \quad (4.12)$$

Используя зависимость (4.12) в инженерных расчетах, можно определить осадку ростверка после образования карстовой полости, зная осадку до образования полости, площадь карстовой полости и площадь свайного ростверка по следующей формуле:

$$S_1 = S \left(1,7 \frac{A_{\Pi}}{A} + 1,2 \right). \quad (4.13)$$

Расчет коэффициента жесткости свай

По аналогии с предыдущим случаем, когда $h/b \leq 1$ и, используя формулы (4.11) и (4.13), определим коэффициенты жесткости свай в пределах площади образования карстовой полости после образования карстовых деформаций и коэффициент снижения жесткости:

$$\frac{P + P_1}{S} = \frac{P + P \cdot \left(0,1 \ln \left(\frac{A_{\Pi}}{A} \right) + 0,5 \right)}{S \cdot \left(1,7 \frac{A_{\Pi}}{A} + 1,2 \right)} = \frac{P}{S} \left(\frac{1 + 0,1 \ln \left(\frac{A_{\Pi}}{A} \right) + 0,5}{1,7 \frac{A_{\Pi}}{A} + 1,2} \right), \quad (4.14)$$

где: P/S – коэффициент жесткости свай в условиях нормальной эксплуатации.

Таким образом, коэффициент снижения жесткости k определится по формуле:

$$k = \frac{1 + 0,1 \ln \left(\frac{A_{\Pi}}{A} \right) + 0,5}{1,7 \frac{A_{\Pi}}{A} + 1,2}, \quad (4.15)$$

4.2 Разработка метода расчета несущей способности свай

Очевидно, что помимо возникновения дополнительной нагрузки на сваю, часть свай исключается из работы при определении несущей способности, а именно [33]:

- полностью исключается сопротивление грунта под нижним концом свай;
- частично исключается сопротивление грунта по боковой поверхности свай.

Сопротивление грунта по боковой поверхности свай исключается на том участке, на котором возникает эффект «негативного трения». В результате выполненных вариативных расчетов установлено, что в условиях при $h/b \leq 1$ соотношение длины участка исключения сопротивления грунта по боковой поверхности l , м к длине свай L , м допускается принять равным 0,2, а при $h/b > 1$ это отношение может быть принято равным 0,4 (рисунки 4.1-4.2).

Как было сказано в главе 1 и подразделе 3.1, вероятны два расчетных случая карстовых деформаций по типу «оседание»:

- 1) прогнозируемые свод обрушения доходит до низа свай: $h/b \leq 1$ (рисунок 2.11, а);
- 2) прогнозируемый свод обрушения выходит выше низа свай: $h/b > 1$ (рисунок 2.11, б).

Для определения несущей способности по грунту буронабивной свай фундамента мостовой опоры при действии карстовых деформаций по двум расчетным случаям преобразуем формулу 7.9 СП 24.13330 [98] к следующему виду:

$$F_{d,oc.1} = \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,8L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (4.16)$$

$$F_{d,oc.2} = \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,6L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (4.17)$$

где $F_{d,oc.1}$ – несущая способность по грунту одиночной сваи при оседании по первому расчетному случаю; $F_{d,oc.2}$ – то же, по второму расчетному случаю; γ_c – коэффициент условий работы свай; в случае опирания ее на глинистые грунты со степенью влажности $S_r < 0,85$ – $\gamma_c = 0,8$, в остальных случаях – $\gamma_c = 1$; $\gamma_{R,f}$ – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности свай, зависящий от способа образования скважины и условий бетонирования и принимаемый по таблице 7.6 СП 24.13330 [98]; u – периметр поперечного сечения ствола свай, м; L – длина свай, м; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола свай, кПа, принимаемое по таблице 7.3 СП 24.13330 [98]; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью свай, м.

Расчетное сопротивление на боковой поверхности (f_i), при этом, не учитывается в нижней части свай на участке длиной $0,2L$, отсчитываемом от низа свай, в соответствии со схемой на рисунке 5.1, а и $0,4L$ в соответствии со схемой на рисунке 5.1, б, где L – длина свай в грунте, м.

Так как работа свай в группе отличается от работы одиночной свай, особенности группового эффекта (эффект «обжатия» центральных свай) необходимо учитывать при определении предельного сопротивления свай фундаментов мостовых опор. Готман Н.З. и Алехин В.С. в своих работах [4; 26; 27] предложили решение по определению предельного сопротивления для свай в составе группы. Они выяснили, что при взаимодействии свай через грунтовую среду возникают дополнительные вертикальные и горизонтальные напряжения — так называемый эффект «обжатия» свай грунтом от нагрузок, передаваемых на соседние сваи.

Увеличение предельного сопротивления свай в составе группы (под пятой и вдоль боковой поверхности) характеризуется величина дополнительного «обжатия» $\sigma_{об}$.

Согласно [4], дополнительные напряжения в грунте между сваями, возникающие из-за эффекта обжатия, на элементарном i -м участке, определяются следующим образом:

$$\sigma_{z,об,i} = \sigma_{z,об,i-1} + \left(\left(\gamma \cdot \frac{h_{i-1} + h_i}{2} + \sigma_{z,об,i-1} \right) \cdot K_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \right) \cdot (h_i - h_{i-1}) \cdot \frac{4d}{a^2 - d^2}, \quad (4.18)$$

где $\sigma_{z,об,i}$, $\sigma_{z,об,i-1}$ – дополнительные напряжения в грунте в межсвайном пространстве на глубине h_i и h_{i-1} соответственно; γ – удельный вес грунта, φ – угол внутреннего трения грунта; c – удельное сцепление грунта; K_0 – коэффициент бокового давления грунта; d – диаметр свай; a – шаг свай.

При помощи математических преобразований уравнения (4.18) автором было составлено дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\sigma_{z,об}}{dh} = \gamma HB + \sigma B + D, \quad (4.19)$$

где $B = K_0 \operatorname{tg} \varphi \frac{u}{A}$, $D = c \frac{u}{A}$, u – периметр свай, A – площадь ячейки.

В результате решения уравнения (4.19) получена функция зависимости дополнительных напряжений в грунте в межсвайном пространстве от глубины, параметров свайного поля и характеристик грунта:

$$\sigma_{z,об.} = \frac{D + \gamma}{B} (e^{HB} - 1) - \gamma H. \quad (4.20)$$

Общие вертикальные напряжения в грунте между сваями с учетом эффекта «обжатия» определяются как:

$$\sigma_z = \frac{D + \gamma}{B} (e^{HB} - 1). \quad (4.21)$$

Предельное сопротивление по боковой поверхности свай определяется как:

$$\tau = \frac{D + \gamma}{B} (e^{HB} - 1) \cdot K_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (4.22)$$

При развитии в основании свай карстовой полости, сопротивление сваи под нижним концом исключается, а по боковой поверхности – частично снижается. В таком случае функция 4.21 примет следующий вид:

$$\sigma_z = \sigma_{zg} + \sigma_{z,об.}, \quad (4.23)$$

где σ_{zg} – напряжения от собственного веса грунта и $\sigma_{z,об.}$ – дополнительные напряжения от эффекта «обжатия»; σ_{zg} и $\sigma_{z,об.}$ определяются с учетом снижения сопротивления сваи при образовании карстовых деформаций.

Эффект «обжатия» боковой поверхности для свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций в основании свай предлагается учитывать по схеме на рисунке 4.9. На схеме представлена сумма вертикальных напряжений в грунте в околосвайном пространстве: σ_{zg} и $\sigma_{z,об.}$ из функции 4.23. Представленная схема учитывает исключение сопротивления сваи по боковой поверхности на участке, на котором развивается «негативное трение». Также, снижается величина обжатия $\sigma_{z,об.,2}$ по сравнению со свайей, на которую не действуют карстовые деформации.

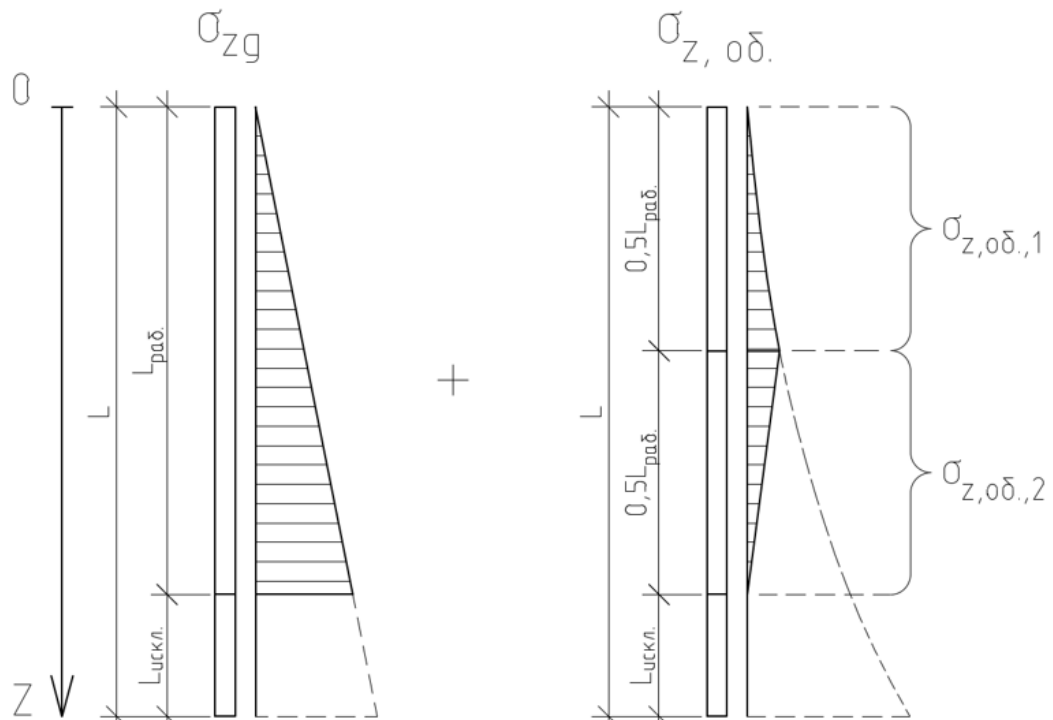


Рисунок 4.9 – Схема учета эффекта «обжатия»

С учетом схемы на рисунке 4.9 функция 4.20 в общем виде примет вид:

$$\sigma_{z,об.} = \begin{cases} \sigma_{z,об.,1} = \frac{D+\gamma}{B}(e^{zB} - 1) - z\gamma, & 0 < z \leq 0,5L_{паб.}; \\ \sigma_{z,об.,2} = -\frac{\sigma_{z,об.,1}(0,5L_{паб.})}{0,5L_{паб.}}z + 2\sigma_{z,об.,1}(0,5L_{паб.}), & 0,5L_{паб.} < z \leq L_{паб.}; \\ 0, & z > L_{паб.} \end{cases} \quad (4.24)$$

Коэффициент увеличения несущей способности сваи в составе группы при действии карстовых деформаций для двух расчетных случаев (рисунок 2.11) определяется как отношение площадей эпюр вертикальных напряжений с учетом эффекта «обжатия» (функция 4.23) и без учета (только σ_{zg}).

Определим площадь эпюры из рисунка 4.9 для оседания по первому расчетному случаю:

$$S_{\sigma z, oc.1} = \int_0^{0,8H} yH dH + \int_0^{0,4H} \sigma_{z,об.} dH + \int_{0,4H}^{0,8H} \left(-\frac{\sigma_{z,об.}(0,4H)}{0,4H} + 2\sigma_z(0,4H) \right) dH, \\ S_{\sigma z, oc.1} = 0,32\gamma H^2 - \frac{D+\gamma}{B^2}(0,4HB - e^{0,4HB} + 1) - 0,08\gamma H^2 + 0,2H \frac{D+\gamma}{B}(e^{0,4HB} - 1) - 0,08\gamma H^2. \quad (4.25)$$

Преобразуем выражение 4.25:

$$S_{\sigma z, oc.1} = 0,16\gamma H^2 - \frac{D+\gamma}{B^2}(0,4HB - e^{0,4HB} + 1) + 0,2H \frac{D+\gamma}{B}(e^{0,4HB} - 1). \quad (4.26)$$

Коэффициент увеличения несущей способности определяется следующим образом:

$$k_{Fd, oc.1} = \frac{S_{\sigma z, oc.1}}{S_{\sigma z}} = \frac{0,16\gamma H^2 - \frac{D+\gamma}{B^2}(0,4HB - e^{0,4HB} + 1) + 0,2H \frac{D+\gamma}{B}(e^{0,4HB} - 1)}{0,32\gamma H^2}, \\ k_{Fd, oc.1} = \frac{S_{\sigma z, oc.1}}{S_{\sigma z}} = 0,5 + \frac{(D+\gamma)(e^{0,4HB}(0,2HB + 1) - 0,6HB - 1)}{0,32\gamma H^2 B^2}. \quad (4.27)$$

Аналогичным образом определим коэффициент увеличения несущей способности сваи в составе группы при оседании по второму расчетному случаю:

$$k_{Fd,oc.2} = \frac{S_{\sigma z,oc.2}}{S_{\sigma z}} = 0,5 + \frac{(D + \gamma)(e^{0,3HB}(0,15HB + 1) - 0,45HB - 1)}{0,18\gamma H^2 B^2}. \quad (4.28)$$

Таким образом, несущая способность по грунту для свай в составе группы с учетом повышающих коэффициентов может быть определена следующим образом:

$$F_{d,z,oc.1} = k_{Fd,oc.1} \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,8L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (4.29)$$

$$F_{d,z,oc.2} = k_{Fd,oc.2} \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,6L} \gamma_{R,f} f_i h_i. \quad (4.30)$$

4.3 Выводы по главе 4

1 По результатам выполненных численных исследований установлены следующие закономерности взаимодействия свай с грунтом над карстовой полостью:

- сопротивление грунта по боковой поверхности сваи исключается на том участке, на котором возникает эффект «негативного трения», а сопротивление грунта под нижним концом сваи исключается полностью;
- в связи с исключением сопротивления грунта по боковой поверхности сваи на участке, на котором возникает эффект «негативного трения», несущая способность свай снижается;
- в результате возникновения эффекта «негативного трения» на сваи, расположенные над карстовой полостью в карстующихся грунтах, передаются дополнительные нагрузки, вызывающие дополнительные осадки фундамента и снижение коэффициента жесткости свай;

- длина участка, на котором возникает эффект «негативного трения», зависит от размеров сформированного «свода обрушения» над карстовой полостью в карстующихся грунтах.

2 В соответствии с методикой, изложенной в главе 3, построены графики зависимости дополнительной нагрузки на сваи, дополнительных осадок и коэффициентов жесткости свай над карстовой полостью от расчетного диаметра карстового провала, расстояния от нижних концов свай до кровли карстующихся грунтов и геометрических размеров фундамента.

3 На основе математического анализа графиков получены аналитические зависимости для определения дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициентов жесткости при образовании карстовых деформаций в основании. Аналитические зависимости для определения дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициентов жесткости свай получены для двух расчетных случаев: развитие «свода обрушения» над полостью в глинистых грунтах до низа свай и выше низа свай.

4 По результатам анализа особенностей взаимодействия свай с грунтом над карстовой полостью получено теоретическое решение для расчета несущей способности свай в зависимости от местоположения сваи в составе фундамента.

5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА МОСТОВОЙ ОПОРЫ ПРИ РАЗВИТИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

5.1 Методика расчета свайных фундаментов мостовой опоры при образовании карстовых деформаций

Параметры свайного фундамента опоры (размер, глубину заложения, расстояние между сваями, длину и форму свай) выбирают на основании результатов расчетов, выполненных в соответствии с нормативными документами, учитывая результаты инженерных изысканий, технологические особенности и условия эксплуатации [97].

Расчет свайных фундаментов опор мостов при образовании карстовых деформаций выполняется на действие особого сочетания нагрузок [101]. Расчет выполняется минимум для двух положений центра карстовых деформаций, а именно: под центральными сваями и под крайними сваями. Определение типа и параметров карстовых деформаций («провал» или «оседание, рисунок 5.1) выполняется в соответствии с рекомендациями отчетов об инженерно-геологических изысканиях, нормативной документацией и рекомендациями, представленными в данной работе.

При определении дополнительных нагрузок на «висячие» сваи при образовании карстовых деформаций по типу «оседание» («провал») свая рассматривается как попадающая в зону локальной (полной) потери несущей способности основания, частично участвует в работе (исключается из работы) свайного ростверка, при этом она воспринимает отрицательное трение оседающего вокруг нее грунта и (вместе с весом самой сваи) передает его через ростверк на остальные сваи в составе фундамента. В случае возникновения деформаций по типу «провал», свая рассматривается как попадающая в зону полной потери несущей способности основания и исключается из работы свайного ростверка. При этом не исключается

влияния веса сваи и окружающего ее грунта на соседние, не исключаемые из работы. сваи.

Расчет свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций типа «оседание», при котором на сваи действуют дополнительные нагрузки, рекомендуется выполнять в следующем порядке:

- 1) расчет свайных фундаментов на действие особого сочетания нагрузок и определение усилий, возникающих в сваях (P), и осадки фундамента (S) до образования карстовых деформаций;
- 2) определение дополнительной нагрузки на сваю P_I ;
- 3) определение предельного сопротивления сваи F_d в зоне локальной потери несущей способности основания в зависимости от места расположения сваи в фундаменте: для крайних и угловых свай по формулам (5.1) и (5.2) (для оседания по первому и второму расчетному случаю соответственно), а для обжатых свай в центральной части фундамента – по формулам (5.3) и (5.4):

$$F_{d,oc.1} = \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,8L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (5.1)$$

$$F_{d,oc.2} = \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,6L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (5.2)$$

$$F_{d,\varepsilon,oc.1} = k_{Fd,oc.1} \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,8L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (5.3)$$

$$F_{d,\varepsilon,oc.2} = k_{Fd,oc.2} \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,6L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (5.4)$$

где γ_c – коэффициент условий работы сваи; в случае опирания ее на глинистые грунты со степенью влажности $S_r < 0,85$ – $\gamma_c = 0,8$, в остальных случаях – $\gamma_c = 1$; $\gamma_{R,f}$ – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи, зависящий от способа образования скважины

и условий бетонирования и принимаемый по таблице 7.6 СП 24.13330 [97]; u – периметр поперечного сечения ствола сваи, м; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи, кПа, принимаемое по таблице 7.3 СП 24.13330 [97]; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; коэффициенты $k_{Fd,oc.1}$ и $k_{Fd,oc.2}$, увеличивающие несущую способность сваи по грунту в составе группы, зависят от физико-механических свойств грунта и от геометрических параметров свайного фундамента, определяются следующим образом:

$$k_{Fd,oc.1} = \frac{S_{\sigma z,oc.1}}{S_{\sigma z}} = 0,5 + \frac{(D + \gamma)(e^{0,4HB}(0,2HB + 1) - 0,6HB - 1)}{0,32\gamma H^2 B^2}, \quad (5.5)$$

$$k_{Fd,oc.2} = \frac{S_{\sigma z,oc.2}}{S_{\sigma z}} = 0,5 + \frac{(D + \gamma)(e^{0,3HB}(0,15HB + 1) - 0,45HB - 1)}{0,18\gamma H^2 B^2}, \quad (5.6)$$

где $B = K_0 \tan \varphi \frac{u}{A}$, $D = c \frac{u}{A}$, u – периметр сваи, A – площадь ячейки;

- 4) определение полной осадки свай и фундамента S_I при образовании карстовых деформаций;
- 5) определение сниженного по площади «оседания» коэффициента жесткости свай как отношения $(P + P_I)/S_I$;
- 6) проверка условия:

$$\gamma_n \cdot N \leq \frac{F_d}{\gamma_{c,g}}, \quad (5.7)$$

где γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый по соответствующим нормативным документам;

N – расчетная нагрузка, определяемая с учетом дополнительной нагрузки на сваю как $N = P + P_I$; F_d – предельное сопротивление грунта основания одиночной сваи, называемая в дальнейшем несущей способностью сваи и определяемая в соответствии с п.3;

$\gamma_{c,g}$ – коэффициент надежности по грунту, принимаемый равным 1,4 (в случае определения несущей способности в соответствии с п. 6.80 СП 24.13330).

- 7) расчет пролетного строения совместно со свайным фундаментом с учетом сниженных коэффициентов жесткости свай и дополнительных нагрузок на сваи по площади «оседания», расчет выполняется по I предельному состоянию;
- 8) определение максимальных нагрузок на сваи за пределами площади «оседания» с проверкой условия (5.2) и осадки пролетного строения с учетом дополнительных нагрузок при образовании карстовых деформаций с проверкой условия:

$$S_1 < S_{ult}, \quad (5.8)$$

где S_1 – полная осадка свайного фундамента после образования карстовых деформаций, м;

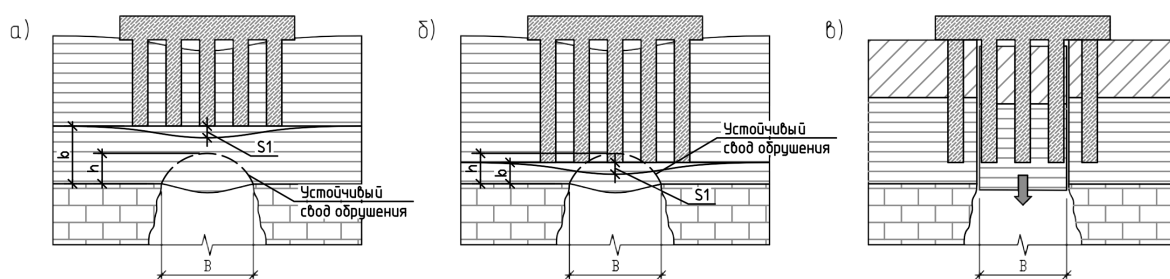
S_{ult} – предельно допустимая абсолютная осадка мостовой опоры, м; допуски по просадкам (предельным осадкам) принимаются в соответствии с соответствующей нормативной документацией.

Определение размеров площади «оседания» выполняется в соответствии с рекомендациями, представленными в данной работе.

Расчет дополнительной нагрузки на сваю, осадок фундамента и коэффициентов жесткости свай при образовании карстовых деформаций по типу «оседание» может быть выполнен численно с применением верифицированных геотехнических программ.

Расчет дополнительных нагрузок на сваи и осадок свай при образовании карстовых деформаций по типу «оседание» выполняется для 2-х расчетных случаев образования устойчивого «свода обрушения» над прогнозируемой за срок эксплуатации карстовой полостью, а именно ниже концов свай (рисунок 5.1, а) и в уровне выше концов свай (рисунок 5.1, б) без выхода под подошву ростверка. Определение

размеров устойчивого «свода обрушения» выполняется, как правило, в осесимметричной постановке с применением верифицированных геотехнических программ.



а, б – тип карстовых деформаций «оседание», в – тип карстовых деформаций «провал»;

б – расстояние от кровли карстующихся грунтов до низа свай, h – высота прогнозируемого свода обрушения, B – расчетный диаметр карстовой полости

Рисунок 5.1 – Расчетные схемы

Дополнительная нагрузка P_1 определяется по формуле (5.9) в соответствии со схемой на рисунке 6.1, а, и по формуле (5.10) в соответствии со схемой на рисунке 6.1, б.

$$P_1 = P / (2,1e^{1,7\frac{b}{B}}), \quad (5.9)$$

$$P_1 = P \left(0,1 \ln \left(\frac{A_n}{A} \right) + 0,5 \right). \quad (5.10)$$

где b – расстояние от кровли карстующихся грунтов до низа свай, м; B – расчетный диаметр полости, м; A_n – площадь «оседания», м²; A – площадь условного фундамента, м², определяется в соответствие с п. 7.4.7 СП 24.13330 [97].

Осадка после возникновения карстовых деформаций S_1 определяется по формуле (5.11) при площади условного фундамента менее 150 м², по формуле (5.12) при площади условного фундамента более 150 м² в соответствии со схемой на рисунке 5.1 (а) и по формуле (5.13) в соответствии со схемой на рисунке 5.1 (б):

$$S_1 = S \left(0,6 \frac{B}{b} + 1 \right), \quad (5.11)$$

$$S_1 = S \left(0,4 \frac{B}{b} + 1 \right), \quad (5.12)$$

$$S_1 = S \left(1,7 \frac{A_{II}}{A} + 1,2 \right). \quad (5.13)$$

Коэффициенты жесткости свай k_s , сниженные по площади «оседания», определяются по формуле (5.14) в соответствии со схемой на рисунке 5.1 (а) и по формуле (5.15) в соответствии со схемой на рисунке 5.1 (б):

$$k_s = \frac{P}{S} \left(\frac{1 + 1 / (2,1 e^{1,7 \frac{b}{B}})}{0,6 \frac{B}{b} + 1} \right), \quad (5.14)$$

$$k_s = \frac{P}{S} \left(\frac{1 + 0,1 \ln \left(\frac{A_{II}}{A} \right) + 0,5}{1,7 \frac{A_{II}}{A} + 1,2} \right). \quad (5.15)$$

Расчет свайного фундамента опоры с учетом дополнительных нагрузок при образовании карстовых деформаций типа «провал» выполняется в следующей последовательности:

- 1) определение дополнительной нагрузки на сваю P_I в зоне «провала»;
- 2) расчет свайного фундамента совместно с пролетным строением с учетом сниженных коэффициентов жесткости свай в зоне «провала» и дополнительных нагрузок на сваи;
- 3) определение максимальных нагрузок на сваи вокруг зоны «провала» с проверкой условия (5.7) и осадки пролетного строения от дополнительных нагрузок при образовании карстовых деформаций с проверкой условия (5.8).

Дополнительные нагрузки на сваи при образовании карстовых деформаций по типу «провал» определяются по формуле:

$$P_1 = \gamma_c u \sum \gamma_{R,f} f_i h_i. \quad (5.16)$$

При этом сопротивления грунта f_i принимают по таблице 7.3 СП 24.13330 [97] со знаком «минус».

Жесткость свай в зоне «провала» не учитывается (коэффициент жесткости свай принимается равным нулю). Совместные расчеты пролетного строения, опоры и свайного фундамента проводятся в стандартном программном обеспечении для расчета конструкций типа SCAD, Лира-САПР и др. При этом учитываются снижение коэффициентов жесткости свай и дополнительные нагрузки на сваи.

При определении дополнительных нагрузок на сваи «стойки», прорезающие покровную толщу, карстующиеся грунты и заглубленные в монолитные скальные грунты, свая рассматривается как попадающая в зону локальной потери несущей способности основания, при этом она воспринимает отрицательное трение оседающего вокруг нее грунта. Расчет свай выполняется по первому предельному состоянию в соответствии с требованиями СП 24.13330 [97]. Дополнительные нагрузки на сваи определяются по результатам численного расчета с учетом зон разуплотненных грунтов и полостей в покровной толще и карстующихся грунтах.

5.2 Рекомендации по выполнению численных расчетов

Численный расчет сводится к моделированию нагружения свайного фундамента опоры (первичная расчетная схема) и процесса образования полости в карстующихся породах (вторичная расчетная схема).

Расчет и анализ НДС системы «основание-сооружение» допускается выполнять с применением программного комплекса, реализующего метод конечных элементов (МКЭ).

Расчеты, выполненные с использованием метода конечных элементов, позволяют:

- определить контуры прогнозируемого свода обрушения в покровной глинистой толще на участках со сложной структурой («оседание» или «провал»);
- получить значения дополнительных нагрузок на сваи и ростверк фундаментов мостовых опор;
- оценить влияние процессов карстообразования на проектируемые фундаменты и пролетные строения мостовых переходов.

При выполнении расчетов грунты моделируются с использованием моделей сплошной среды, таких как модель Мора-Кулона или модель упрочняющегося грунта, и рассматриваются как нелинейно-деформируемые тела.

Рекомендуется выполнять расчеты в пространственной постановке. В таком случае моделируемая карстовая полость задается по расчетному диаметру за время эксплуатации сооружения.

Размеры расчетной области модели определяются на основании ожидаемого характера НДС грунтового массива. Они должны быть выбраны таким образом, чтобы не оказывать влияние на результаты расчетов.

В расчетной модели задаются следующие граничные условия:

- узлы на вертикальных боковых границах области закреплены от горизонтальных смещений;
- на нижней границе области — закрепление от вертикальных и горизонтальных смещений. Нижней границей расчётной области считается отметка, которая соответствует границе разведанной зоны массива основания;
- боковые границы расчётной области выбираются так, чтобы перемещения узлов грунта на краях модели не превышали 1 мм;
- верхняя граница области предполагает свободные перемещения узлов.

При соответствующем обосновании допускается назначать граничную область по низу модели в соответствии с «упрощенным способом», описанным в п. 2.4 данной работы. При упрощенном способе модель снизу ограничивается кровлей карстующихся грунтов, а карстовая полость моделируется исключением связей по вертикали для узлов в пределах ее площади.

Расчеты необходимо выполнять с учетом проектных решений и нагрузок, определяемых в соответствии с требованиями соответствующих нормативных документов.

Диаметр карстовой полости, вводимой в расчет, назначают с учетом найденных в процессе изысканий полостей (заполненных и незаполненных), а также с учетом возможности растворения в процессе эксплуатации сооружения карстующейся породы по формуле:

$$B = B_0 + VT, \quad (5.17)$$

где B_0 – начальный размер карстовой полости, пустоты, трещины, м, определяемый по результатам бурения и данным геофизических исследований, при отсутствии этих значений B_0 рекомендуется принимать равным не менее 1,5 м; V – максимальная среднегодовая скорость роста полости (растворения) карстующихся пород, см/год, определяемая с учетом инженерно-геологических изысканий (п. 6.12.7 СП 22.13330 [96]); T – расчетный срок эксплуатации сооружения.

Буронабивные сваи моделируются при помощи объемных конечных элементов. Несовместность деформаций на контакте «свая-грунт» описывается путем использования специальных «интерфейсных» (контактных) элементов. Характеристики таких элементов должны назначаться в соответствии с таблицей 7.6 СП 24.13330 [97]. После проведения статических испытаний свай на действие вдавливающей нагрузки параметры контактных элементов должны быть уточнены для соответствия

Расчет фундамента с «висячими» сваями при образовании карстовых деформаций выполняют в несколько этапов:

- сначала расчетная область загружается собственным весом грунта и определяют начальное напряжённое состояние грунтового массива;
- затем моделируется проектируемое сооружение с учетом действующих нагрузок на основание;
- определяются касательные напряжения на боковой поверхности свай и осадки фундамента до возникновения процесса карстовых деформаций;
- моделируется полость в карстующихся породах;
- определяются касательные напряжения на боковой поверхности свай и осадок фундамента после образования карстовых деформаций.

Дополнительная нагрузка на «висячую» сваю P_l , кН, определяется по формуле:

$$P_l = u \sum \Delta \tau_{z,i} h_i, \quad (5.18)$$

где u – наружный периметр поперечного сечения ствола свай, м; $\Delta \tau_{z,i}$ – изменение значения касательного напряжения на боковой поверхности свай на рассматриваемом i -м слое по сравнению с расчетным этапом в нормальных условиях эксплуатации, кН/м²; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью свай, м.

При этом, при расчете по формуле (5.18) учитываются только те слои, на которых наблюдается уменьшение τ_z или изменение его знака с «–» на «+».

Расчет фундамента со сваями «стойками» при образовании карстовых деформаций выполняют в несколько этапов:

- сначала расчетная область загружается собственным весом грунта и определяют начальное напряжённое состояние грунтового массива;

- затем моделируется проектируемое сооружение с учетом действующих нагрузок на основание;
- определяются касательные напряжения на боковой поверхности сваи и осадки фундамента до возникновения процесса карстовых деформаций;
- моделируются полости и зоны разуплотнения в покровной толще и карстующихся породах, размером в соответствии с отчетом об инженерно-геологических изысканиях;
- определяются касательные напряжения на боковой поверхности сваи и осадок фундамента после образования карстовых деформаций.

Дополнительная нагрузка на сваю «стойку» P_1 определяется по формуле (5.18).

Для сваи «стойки» допускается выполнять расчеты в осесимметричной постановке.

5.3 Пример расчета

Выполним расчет свайного фундамента мостовой опоры по предлагаемой методике. Объект является одним из мероприятий общегородской программы дорожно-мостового строительства в городе Москве, направленной на улучшение условий движения транспорта на улично-дорожной сети [84; 85].

Путепровод располагается в Северо-Восточном административном округе на территории района Ярославский и входит в состав направленных съездов со строящейся Северо-Восточной Хорды. Ниже приведена краткая характеристика инженерно-геологических условий на площадке.

В геологическом строении района работ на глубину до 50 метров присутствуют четвертичные отложения различного происхождения, залегающие на верхне-среднеюрских отложениях и на толще верхнего карбона [84].

Четвертичная система.

Голоцен. Современное звено.

Техногенные отложения (tIV).

На застроенных участках отложения перекрыты и частично замещены техногенными образованиями, которые представлены строительными и промышленными отходами, а также перемешанными техногенными образованиями.

Почвенно-растительный слой залегает с поверхности, перекрывая четвертичные отложения и насыпные грунты.

Плейстоцен.

Верхнее звено - Среднее звено

Отложения представлены песками (с преобладанием средней фракции средней плотности), реже – суглинками.

В некоторых местах встречаются линзы и прослои гравийно-галечникового материала.

Водно-ледниковые отложения времени отступления ледника (f,lgIIms)

Отложения состоят преимущественно из песков, реже – из глин. Пески в основном мелкие глинистые. По разрезу встречаются линзы разнозернистых песков с гравием и галькой.

Нижнее звено.

Донской горизонт. Ледниковые отложения – основная морена (gQIdns).

Ледниковые отложения залегают на отдельных участках под аллювиальными образованиями. Они представлены преимущественно суглинками с включениями неравномерно распределенного обломочного материала.

Ильинский-донской горизонты. Сетуньско-донская свита (f,lgIst-dns).

Водно-ледниковые, аллювиальные и озерные отложения образуют нерасчлененный комплекс. Они подстилают среднечетвертичные отложения и отложения донской морены. В этом комплексе преобладают флювиогляциальные отложения, которые распространены повсеместно. Эти отложения представлены песками, с прослоями супесей, суглинков и глин. Пески являются разнозернистыми. Супеси и суглинки являются плотными, местами слоистыми, а глины – с органическими остатками.

Юрская система.

Верхний отдел.

Представлен алевроитистыми глинами, встречаются обломки аммонитов. Присутствуют мелкие водонасыщенные пески, встречаются прослои суглинка. Глины легкие, твердые, с включениями остатков фауны, щебня известняка.

Каменноугольная система.**Верхний отдел.****Дорогомиловская серия.**

Представлена известняками, иногда разрушенными до муки; глинами и мергелями с прослоями известняков; переслаивающимися известняками и доломитами. Также присутствуют глинисто-мергелистые породы с незначительными прослоями органогенных известняков.

Карстово-суффозионные процессы могут проявляться или уже проявляются на площадке изысканий. Это связано с геологическим строением, рельефом поверхности и гидрогеологическими условиями территории, а также с возможными неблагоприятными воздействиями природного и/или техногенного характера.

Карстовые процессы на площадке изысканий могут быть связаны с наличием в геологическом разрезе растворимых и водопроницаемых карбонатных толщ, которые переслаиваются с глинами. По составу карстующихся пород на участке возможен карбонатный тип карста; по времени образования – древний; по условиям

Согласно картографическим данным, район работ находится на границе неопасной и потенциально опасной зон.

В результате оценки степени опасности карстово-суффозионных процессов по критериям «Инструкции...» [59] и табл. 6.16 СП 22.13330.2016 [95] район выполнения работ является неоднородным: выделяются неопасные, потенциально опасные и опасные участки.

Применительно к оценке карстовой опасности район характеризуется следующими инженерно-геологическими условиями [84]:

- при рекогносцировке местности не обнаружены проявления карста на поверхности земли;

– наиболее неблагоприятными для наземного строительства в отношении карста и связанных с ним карстово-суффозионных процессов являются известняки, в том числе элювиированные, измайловской подсвиты яузской свиты дорогомилловской серии (СЗизм).

– при бурении в толще известняков отмечались интервалы (до 1,0 м) быстрой проходки бурового инструмента, однако значительных по размеру полостей не зафиксировано;

– по результатам геофизических исследований методом отраженных волн не обнаружены скоростные аномалии, которые могли бы свидетельствовать о наличии карстовых полостей диаметром 3 метра и более;

– водоупор юрских глин распространен не повсеместно и имеет переменную мощность от 0,3 до 12,1 м. На участках расположения форм избирательной доледниковой эрозии встречаются также участки полного отсутствия юрского водоупора.

– градиент вертикальной фильтрации надюрского водоносного комплекса (абсолютная отметка установившегося уровня ≈ 140) и измайловского водоносного горизонта (абсолютная отметка установившегося уровня ≈ 135) имеет переменное значение, но не превышает 1,0.

Рассмотрим посадку эстакады на инженерно-геологический разрез (рисунки 5.2-5.3). Согласно посадке, сваи заглублены в слой водоупорных глин, перекрывающих карстующиеся известняки.

Определим расчетный диаметр карстовой полости по формуле (5.17) (расчетный срок эксплуатации сооружения – 70 лет, среднегодовая скорость растворения карстующихся известняков – 2 см/год):

$$B = 1,5 + 0,02 \cdot 70 = 2,9 \text{ м.}$$

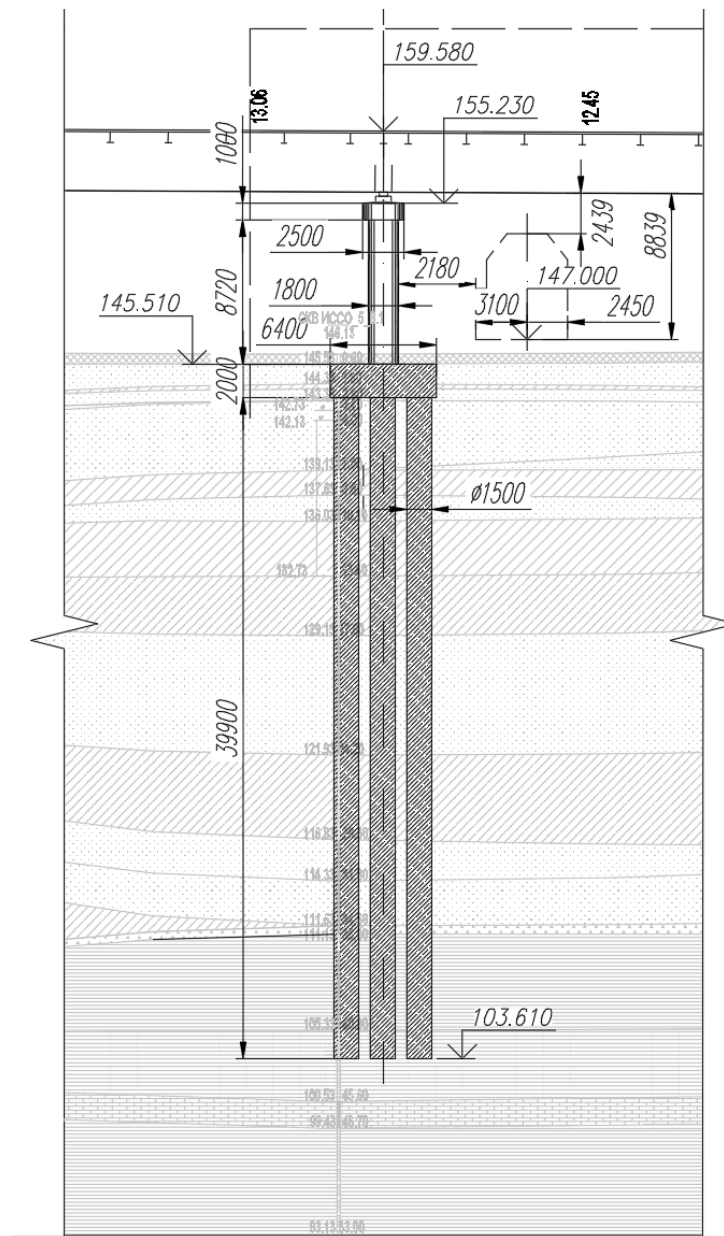


Рисунок 5.2 – Фрагмент посадки опоры на инженерно-геологический разрез [85]

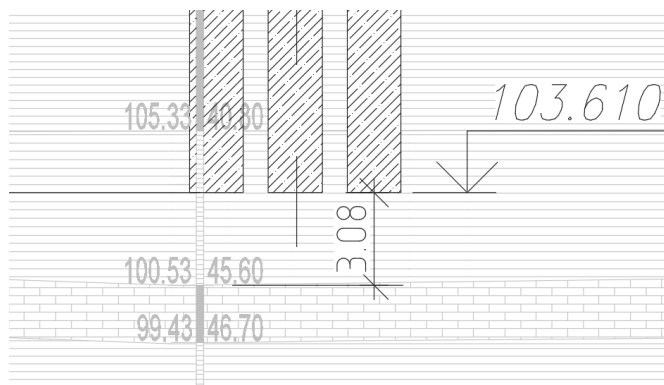


Рисунок 5.3 – Расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов [85]

Фундамент опоры состоит из семи буронабивных свай длиной 39,9 м диаметром 1,5 м. Сваи объединены монолитным шестиугольным ростверком (рисунок 5.4).

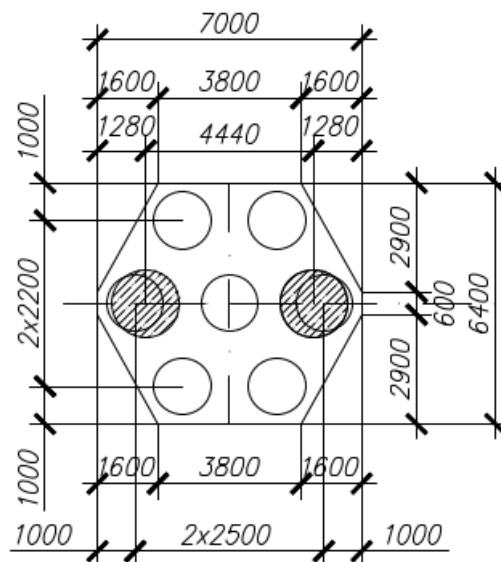
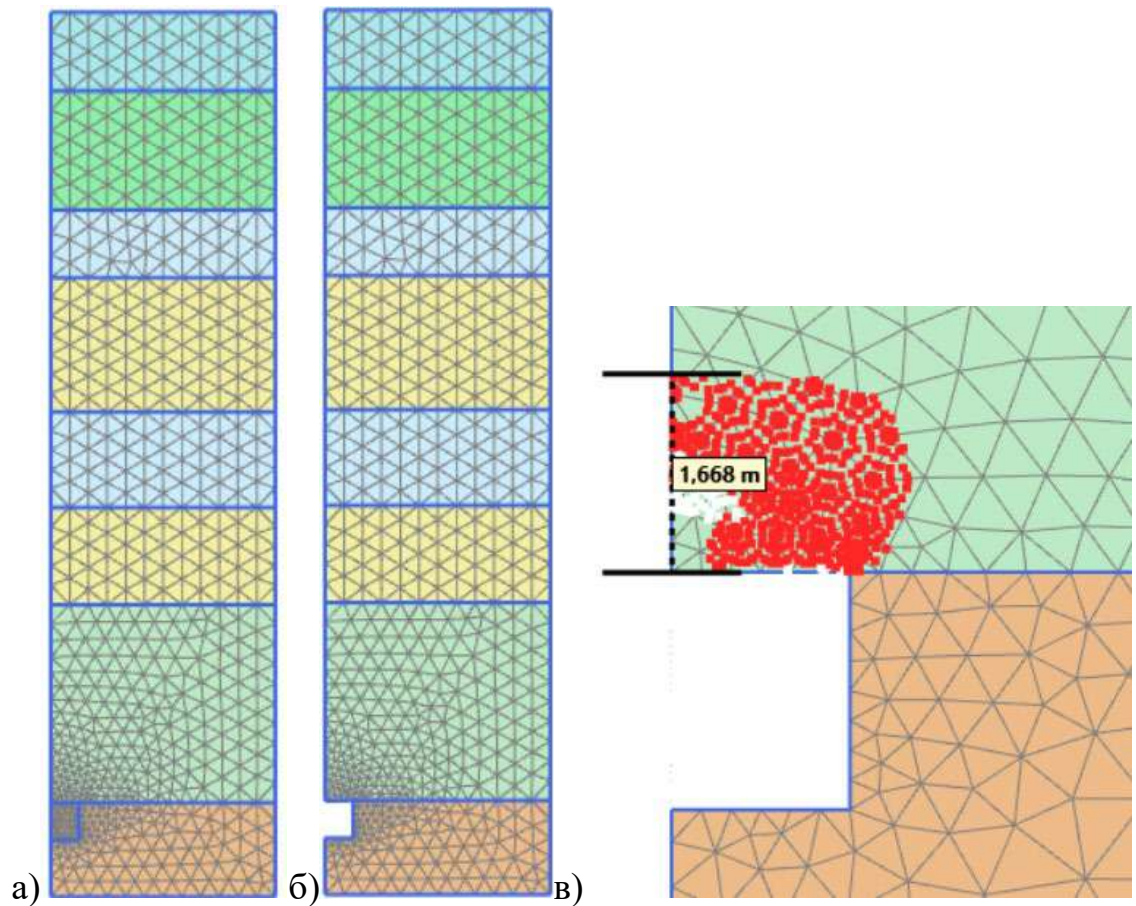


Рисунок 5.4 – План опоры [85]

Как видно из рисунка 5.3, расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов составляет: $103,61 - 100,53 = 3,08$ м. Выполним определение высоты прогнозируемого свода обрушения с использованием численных расчетов. Расчет выполним в программном комплексе Plaxis 2D в осесимметрично постановке (согласно методике, описанной в подразделе 5.1). Для описания поведения грунтов воспользуемся упруго-пластической моделью Мора-Кулона.

Расчет происходит в 2 этапа (рисунок 5.5, а, б):

- 1) формирование исходного напряженно-деформированного состояния грунтового массива;
- 2) моделирование карстовой полости в известняках путем деактивации конечных элементов под покровной толщей в пределах радиуса полости ($R = 1,45$ м).



а – конечно-элементная модель на начальной стадии, б – конечно-элементная модель на стадии образования полости, в – зона пластических деформаций в кровле над карстующимися грунтами

Рисунок 5.5 – Определение высоты прогнозируемого свода обрушения

В результате расчета определяется положение прогнозируемого свода обрушения, которое совпадает с областью сгущения пластических точек Мора-Кулона.

Как видно из рисунка 5.5, в – высота прогнозируемого свода обрушения составляет 1,7 м. Из этого определяется тип карстовых деформаций – «оседание» по типу 1, так как прогнозируемый свод обрушения не выходит к низу свай.

Несущая способность сваи по грунту – 1779 тс, допускаемая нагрузка – 1270 тс, действующая нагрузка на голову сваи (согласно проекту) – 628 тс.

Несущая способность сваи по грунту с учетом карстовых деформаций – 731 тс, допускаемая нагрузка – 522 тс, действующая нагрузка на голову сваи (особое сочетание) – 475 тс.

Определим дополнительную нагрузку, действующую на сваю при образовании карстовых деформаций по формуле (5.9):

$$P_1 = P / \left(2,1 e^{1,7 \frac{b}{B}} \right) = 475 / \left(2,1 e^{1,7 \frac{3}{3}} \right) = 41 \text{ тс} \quad (5.19)$$

Выполним проверку условия (5.7), для этого определим значение расчетной нагрузки на сваю с учетом дополнительной:

$$N = P + P_1 = 475 + 41 = 516 \text{ тс}, \quad (5.20)$$

$$\gamma_n \cdot N = 516 \text{ тс} < \frac{F_d}{\gamma_{c,g}} = \frac{731}{1,4} = 522 \text{ тс}. \quad (5.21)$$

Условие выполняется, несущая способность сваи по грунту обеспечена.

Для подтверждения полученного вывода об обеспечении несущей способности сваи по грунту при действии карстовых деформаций выполним численный расчет в пространственной постановке.

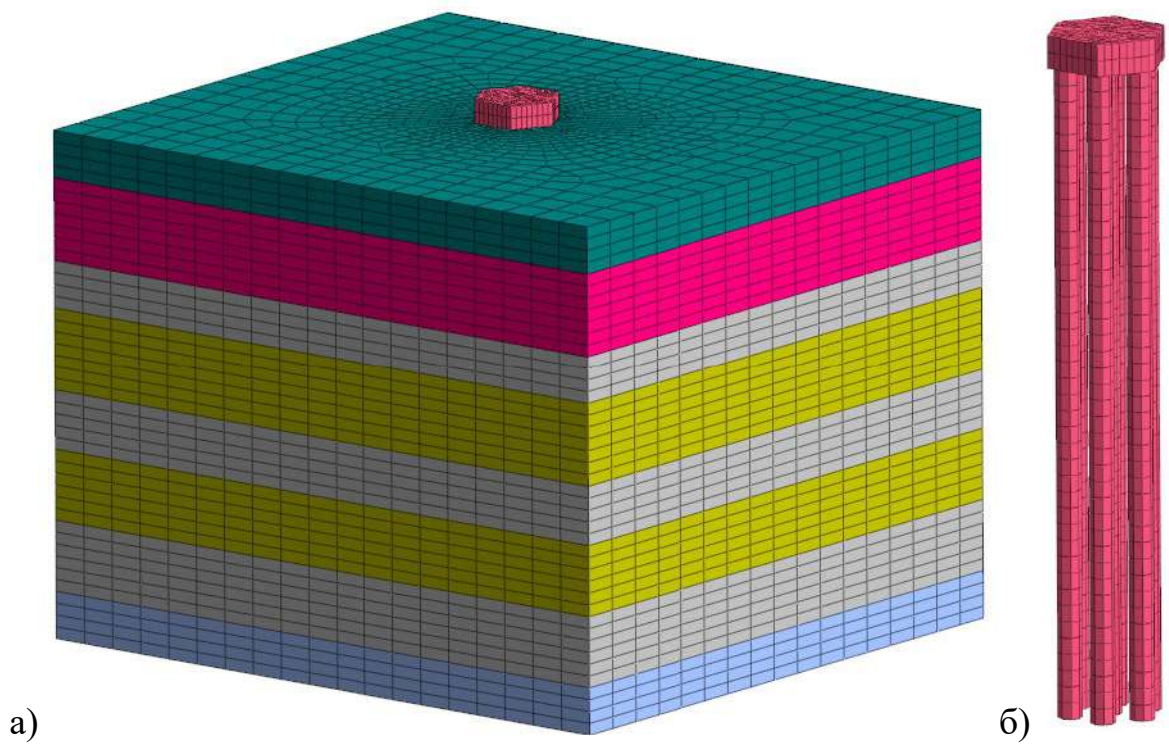
Расчет выполнен в программном комплексе Midas GTS NX с учетом следующих предпосылок:

- 1) поведение грунтов описывается упруго-пластической моделью Мора-Кулона, поведение бетона свай и ростверка – линейно упругой моделью;
- 2) конструкция фундамента опоры принята в соответствии с проектом (рисунки 5.2-5.4);
- 3) напластование инженерно-геологических элементов принято в соответствии с геологической скважиной, пробуренной для данной опоры;

- 4) несовместность деформаций свай и грунта на их контакте учтена введением специальных интерфейсных элементов в соответствии с п.9.16 СП 22.13330.2016 [95];
- 5) размер расчетной области по вертикали ограничен кровлей скальных карстующихся грунтов, прогнозируемая карстовая полость представлена отсутствием закрепления по оси Z узлов в ее пределах (в соотв. с подразделом 2.4);
- 6) размер расчетной области по горизонтали определен из условия отсутствия влияния его на результаты расчета.

Расчет выполнен в соответствии с этапностью, рекомендованной в подразделе 5.2:

- 1) формирование исходного напряженно-деформированного состояния грунтового массива;
- 2) моделирование проектируемого фундамента с учетом действующих на него нагрузок (рисунок 5.6);
- 3) определение касательных напряжений на боковой поверхности свай (рисунок 5.8, а);
- 4) моделирование полости в карстующихся породах (рисунок 5.7);
- 5) определение касательных напряжений на боковой поверхности свай (рисунок 5.8, б).



а – общий вид модели; б – проектируемый фундамент

Рисунок 5.6 – Конечно-элементная модель

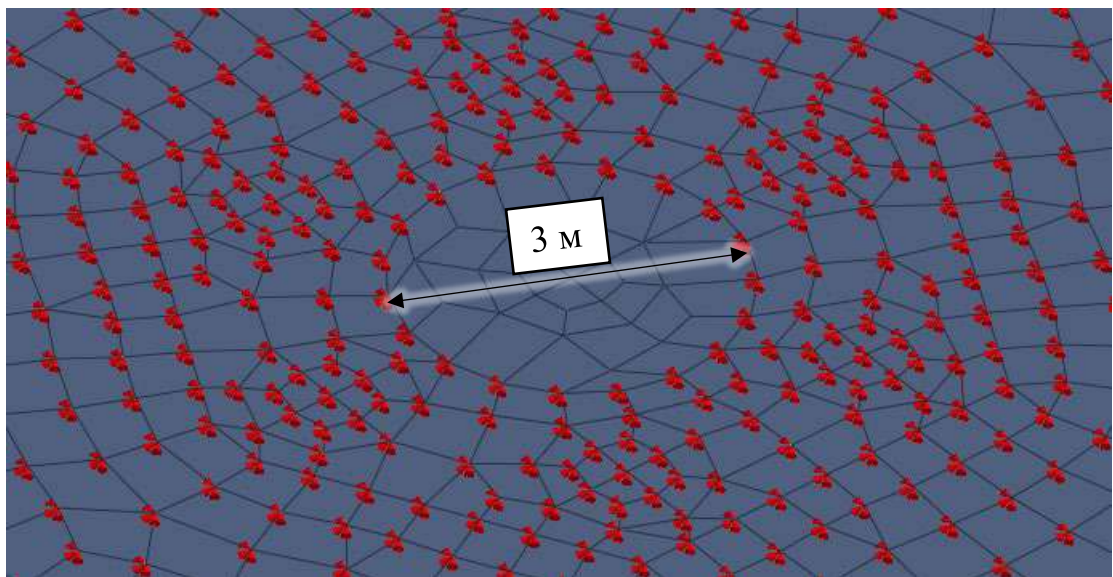
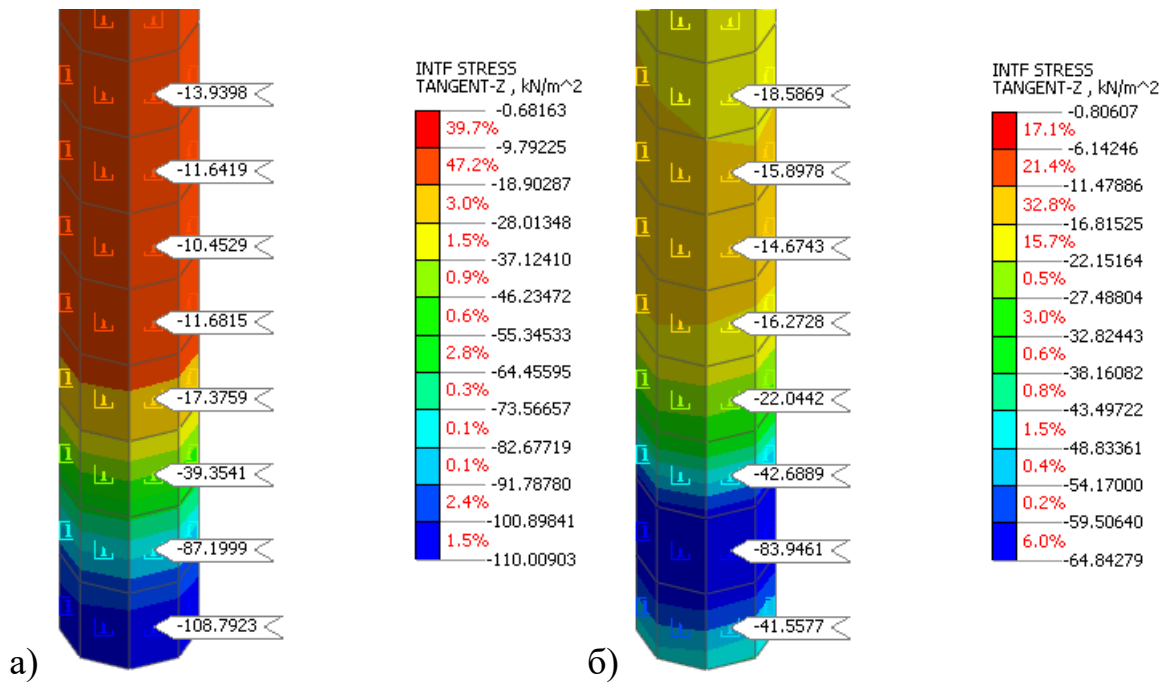


Рисунок 5.7 – Моделирование полости



а – до образования полости, б – после образования полости

Рисунок 5.8 – Касательные напряжения на боковой поверхности, кН/м²

В результате анализа касательных напряжений на боковой поверхности сваи на различных стадиях по формуле (5.18) определим дополнительную нагрузку, передаваемую на сваю при действии карстовых деформаций:

$$P_1 = u \sum \Delta \tau_{z,i} h_i = 4,71 \cdot ((87,2 - 83,9) \cdot 1 + (108,8 - 41,6) \cdot 1) = 332,1 \text{ кН} = 33,2 \text{ тс} \quad (5.22)$$

Сравним значения дополнительной нагрузки, определенные аналитическим (формула (5.19)) и численным (формула (5.22)) расчетом:

$$41 < 31,2; \frac{41 - 31,2}{41} \cdot 100\% = 19\%.$$

Расхождение между результатами составляет менее 20%, что говорит о достаточном запасе надежности, который обеспечивает предлагаемое аналитическое решение.

5.4 Выводы по главе 5

1 По результатам выполненных численных и теоретических исследований разработана методика расчета свайного фундамента опоры моста на закарстованных территориях, учитывающая возможность возникновения карстовых деформаций 2-х типов («оседание» и «провал»).

2 Разработаны рекомендации по выполнению численных расчетов свайных фундаментов опор на карстоопасных площадках, учитывающие особенности взаимодействия свай с грунтом над карстовой полостью.

3 Приведен пример расчета свайного фундамента опоры моста над карстовой полостью, в котором выполнено сопоставление аналитического и численного решений для определения дополнительной нагрузки на сваи опоры. Расхождение результатов расчетов составило 19%, при этом результат аналитического расчета превысил результат численного расчета. Данный результат подтверждает достоверность предложенных аналитических решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основании анализа нормативных методов расчета и проектирования свайных фундаментов мостовых опор на закарстованных территориях установлено, что традиционно выполняются расчеты только на карстовые деформации типа «провал», когда часть свай в зоне провала исключается из работы фундамента. Однако, когда под нижними концами свай над карстующимися грунтами залегают глинистые грунты, карстовая полость формируется под нижними концами свай и не «всплывает» под подошву ростверка, поэтому все сваи фундамента включаются в работу, но с учетом особенностей их взаимодействия с грунтом над полостью. В данном случае возникают карстовые деформации по типу «оседание».

2 При возникновении карстовых деформаций по типу «оседание», вызванных ростом полости в карстующихся грунтах в основании свай фундамента, на сваи передаются дополнительные нагрузки, в том числе за счет «негативного трения» на боковой поверхности свай, а несущая способность свай над полостью снижается. Для учета этих факторов выполнены численные и теоретические исследования, и разработана новая методика расчета свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций по типу и «провал» и «оседание».

3 На основании нормативной документации и сопоставления результатов численных расчетов с результатами натурных экспериментов (глава 2) обосновано использование компьютерных программ, реализующих метод конечных элементов и теорию прочности Мора-Кулона для выполнения численных исследований.

4 Для выполнения численных исследований систематизированы проектные решения фундаментов мостовых опор на различных объектах, составлена трехмерная вариативная конечно-элементная модель, обоснованы и сформулированы расчетные требования, обеспечивающие реализацию карстовых деформаций по типу «оседание», а также новые упрощенные методы задания граничных условий по нижней грани конечно-элементной модели. На основании факторного

эксперимента обоснованы варьируемые исходные данные: расчетный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах и расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов.

5 Численные исследования выполнены с использованием верифицированных программных комплексов в соответствии с разработанной методикой (глава 3), в которой предложены методы определения негативного трения и дополнительных нагрузок на сваи над карстовой полостью по результатам численных расчетов.

6 По результатам численных исследований получены аналитические зависимости для определения дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициентов жесткости при образовании карстовых деформаций в основании свай.

7 По результатам анализа особенностей взаимодействия свай с грунтом над карстовой полостью в составе группы свай получено теоретическое решение для расчета несущей способности свай.

8 По результатам выполненных исследований разработана новая методика расчета свайного фундамента опоры моста на закарстованных территориях, учитывающая возможность возникновения карстовых деформаций двух типов («оседание» и «провал»), разработаны рекомендации по выполнению численных расчетов свайных фундаментов опор на карстоопасных площадках, учитывающие особенности взаимодействия свай с грунтом над карстовой полостью. Разработанная методика включена в нормативный документ «Методика учета нагрузок, воздействующих на фундаменты опор мостовых сооружений высокоскоростной железнодорожной линии при образовании карстовых деформаций», разработанная НИИОСП им. Н.М. Герсевича – АО «НИЦ «Строительство».

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является расширение области исследования, а именно: учет влияния дополнительных видов нагружения ростверков (момент, горизонтальная сила); учет влияния карстующихся прослоек скальных грунтов, прорезаемых сваями, на несущую способность и дополнительные нагрузки на сваи при действии карстовых деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббасов П.А. Некоторые результаты исследований призматических, профилированных и клиновидных свай с грунтом основания / П.А. Аббасов, В.И. Федоров // Технология строительного производства и организация строительства: Тр. Дальневосточного политехн. ин-та. – 1975. – Т. 106. – С. 25-34.
2. Адерхолд Г. Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий / Г. Адерхолд; ред. Е.В. Копосов; пер. В.В. Толмачев. – Монография. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. – 112 с.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
4. Алехин В.С. Взаимодействие свай в составе групп и определение предельного сопротивления основания : Автореф. Дисс...канд. техн. наук / В.С. Алехин. – М., 2020.
5. Ананьев В.П. Инженерная геология / В.П. Ананьев, В.И. Коробкин. – М.: Высшая школа, 1973. – 300 с.
6. Андрейчук В.Н. Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий / В.Н. Андрейчук. – Черновцы: Прут, 1999. – 52 с.
7. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска: монография / А.В. Аникеев. – М.: РУДН, 2017. – 328 с.
8. Ашпиз Е.С. Паспортизация участков пути / Е.С. Ашпиз, А.Н. Савин // Мир транспорта. – 2012. – Т. 10. – № 5. – С. 20-23.
9. Ашпиз Е.С. Численные критерии оценки надежности карстоопасных участков железнодорожного пути / Е.С. Ашпиз, А.Н. Савин // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути:

Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – 2016. – С. 41-45.

10. Барвашов В.А. К расчету осадок грунтовых оснований, представленных различными моделями / В.А. Барвашов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1977. – № 4. – С. 25-27.

11. Барвашов В.А. Метод расчета жесткого свайного ростверка с учетом взаимного влияния свай / В.А. Барвашов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – № 3. – С. 27-28.

12. Барвашов В.А. Трехпараметрическая модель грунтового основания, учитывающая необратимые структурные деформации грунта / В.А. Барвашов, В.Г. Федоровский. – 1978. – № 4. – С. 17-20.

13. Бартоломей А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А.А. Бартоломей, И.И. Омельчак, Б.С. Юшков. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.

14. Бартоломей А.А. Основы расчета ленточных свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам / А.А. Бартоломей. – М.: Стройиздат, 1982. – 223 с.

15. Бахолдин Б.В. Исследование несущей способности пирамидальных свай / Б.В. Бахолдин, Н.Т. Игонькин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1978. – № 3. – С. 13-16.

16. Бахолдин Б.В. О методике расчета свайных кустов / Б.В. Бахолдин, Д.Е. Разводовский // Тр. 111 Междунар. конф. по проблемам свайного фундаментостроения. – 1992. – С. 105-108.

17. Безволев С.Г. Совершенствование расчета осадок основания методом послойного суммирования / С.Г. Безволев, В.Г. Федоровский, В.Ф. Александрович // Гидротехническое строительство. – 1991. – № 10.

18. Березанцев В.Г. Расчет оснований и сооружений / В.Г. Березанцев. – Л.: Стройиздат, 1970. – 207 с.

19. Глушков И.В. Применение геотехнических методов закрепления грунтового массива на закарстованных территориях / И.В. Глушков, Р.Э. Борисов // Химия. Экология. Урбанистика. – 2020. – № 3. – С. 34-39.

20. Готман А.Л. Исследование вертикально нагруженных буронабивных свай в глинистых грунтах и их расчёт по данным статического зондирования / А.Л. Готман, О.А. Глазачев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 2. – С. 5-13.
21. Готман А.Л. Опыт реконструкции здания в Уфе в условиях повышенной карстовой опасности / А.Л. Готман, Н.З. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2001. – № 3. – С. 24-26.
22. Готман А.Л. К вопросу расчета параметров уплотненного околосвайного грунта / А.Л. Готман // Тр. VI Междунар. конф. по проблемам свайного фундаментостроения. – 1998. – С. 67-71.
23. Готман А.Л. Исследование НДС свай на границе карстового провала / А.Л. Готман, Р.Н. Магзумов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 4. – С. 125-132.
24. Готман А.Л. Метод расчета свайных ленточных фундаментов при образовании карстового провала / А.Л. Готман, Р.Н. Магзумов // Вестник МГСУ. – 2014. – № 2. – С. 74-83.
25. Готман А.Л. Сваи и свайные фундаменты. Избранные труды / А.Л. Готман. – Уфа: УГНТУ, 2015. – 384 с.
26. Готман Н.З. Расчет предельного сопротивления основания сваи в составе групп / Н.З. Готман, В.С. Алехин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 8-13. – № 1. – С. 2020.
27. Готман Н.З. Определение предельного сопротивления основания сваи в составе группы свай / Н.З. Готман, В.С. Алехин, Ф.В. Сергеев // Вестн. Пермского нац. иссл. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2017. – № 3. – С. 13-21.
28. Готман Н.З. Расчет мощности сцементированных грунтов как мера противокарстовой защиты зданий и сооружений / Н.З. Готман, Р.Р. Вагапов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 4. – С. 119-125.
29. Готман Н.З. Исследование работы свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала / Н.З. Готман, Д.А. Давлетьяров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 2. – С. 2-7.

30. Готман Н.З. К вопросу о моделировании основания свайных фундаментов над растущей карстовой полостью / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междуна-родной научно-технической конференции.* – 2022. – С. 55-60.
31. Готман Н.З. Применение численных расчетов оснований при проектировании карстозащит-ных мероприятий / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // *Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении: материалы науч.-техн. конф. с иностранным участием.* – 2019. – С. 24-29.
32. Готман Н.З. Расчет свайных фундаментов мостовой опоры с учетом образования карстовых деформаций в основании / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 2023. – № 5. – С. 2-8.
33. Готман Н.З. Численные исследования взаимодействия основания и буронабивных свай фундамента мостовой опоры при возникновении карстовых деформаций / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // *Construction and Geotechnics.* – 2021. – № 4. – С. 5-18.
34. Готман Н.З. Расчет фундаментов зданий с заглубленной подземной частью на закарстованных территориях / Н.З. Готман, М.З. Каюмов // *Вестник гражданских инженеров.* – 2010. – № 4. – С. 68-72.
35. Готман Н.З. Численное моделирование роста карстовой полости в карстующихся грунтах / Н.З. Готман, М.З. Каюмов // *Известия вузов. Строительство.* – 2011. – № 5. – С. 107-111.
36. Готман Н.З. Параметрические исследования перераспределения нагрузок в свайном плитном фундаменте / Н.З. Готман, М.И. Макарьев // *Тр. междунар. семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям.* – 2000. – С. 174-178.
37. Готман Н.З. Об учете совместной работы здания и основания при расчете свайных фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях / Н.З. Готман // *Тр. 111 Междунар. конф. по проблемам свайного фундаментостроения.* – 1992. – С. 117-118.

38. Готман Н.З. Определение параметров свайного поля свайно-плитного фундамента / Н.З. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2003. – № 3. – С. 2-6.
39. Готман Н.З. Расчет карстозащитных фундаментов зданий и сооружений / Н.З. Готман // Вестн. Пермского нац. иссл. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2015. – № 4. – С. 19-35.
40. Готман Н.З. Расчет несущей способности свай в свайном поле / Н.З. Готман // Тр. междунар. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – 2001.
41. Готман Н.З. Расчет противокарстовых фундаментов зданий и сооружений / Н.З. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – № 1. – С. 20-25.
42. Готман Н.З. Расчет свай в фундаментах, проектируемых на карсте / Н.З. Готман // Эффективные фундаменты, сооружаемые без выемки грунта: Тез. докл. научно-техн. конф. – 1995.
43. Готман Н.З. Расчет свайно-плитных фундаментов из забивных свай с учетом образования карстового провала : Автореф. Дисс...канд. техн. наук / Н.З. Готман. – М., 2004.
44. Готман Н.З. Применение многосекционной тензосваи для исследования работы сваи в слабых грунтах / Н.З. Готман, И.Б. Рыжков // Вопросы фундаментостроения. Механика грунтов: Тр. НИИпромстроя. – 1983. – С. 67-70.
45. Готман Н.З. Способ определения несущей способности свай / Н.З. Готман // А. с. 1178849 СССР. Оpubл. в Б. И. – 1985. – № 34.
46. Готман Н.З. Математическое моделирование взаимодействия свай с грунтом в сплошном свайном поле / Н.З. Готман, Д.М. Шапиро, Р. Гузеев // Тр. междунар. семинара по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям. – 2000. – С. 171-174.
47. Григорян А.А. Свайные фундаменты зданий и сооружений на просадочных грунтах / А.А. Григорян. – М.: Стройиздат, 1984. – 160 с.
48. Григорян А.А. Несущая способность буронабивных свай на площадках строительства Волгодонского завода тяжелого машиностроения / А.А. Григорян,

И.И. Хабибуллин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1977. – № 2. – С. 13-16.

49. Девальтовский Е.Э. Исследование работы свайных фундаментов с учётом их взаимодействия с межсвайным грунтом : Автореф. Дисс...канд. техн. наук / Е.Э. Девальтовский. – Л., 1982. – 226 с.

50. Дорошкевич Н.М. Инженерные методы расчёта свайных фундаментов при различных схемах нагружения / Н.М. Дорошкевич, В.В. Знаменский, В.И. Кудинов // Вестник МГСУ. – 2006. – № 1. – С. 119-131.

51. Дорошкевич Н.М. Исследование напряжений в грунте при свайных фундаментах : Автореф. Дисс...канд. техн. наук / Н.М. Дорошкевич. – М., 1959. – 22 с.

52. Дорошкевич Н.М. Влияние параметров свайных фундаментов на несущую способность сваи в группе / Н.М. Дорошкевич, В.И. Кудинов, Е.М. Грязнова // Специальные строительные работы / ЦБНТИ. – 1988. – № 5. – С. 20-22.

53. Дорошкевич Н.М. Работа кустов свай в слабых водонасыщенных грунтах / Н.М. Дорошкевич, Б.А. Сальников // Строительство и архитектура: Мат-лы к симпозиуму молодых ученых и специалистов г. Новосибирска. – 1969. – С. 16-35.

54. Евдокимов А.Г. Расчет осадок свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций / А.Г. Евдокимов // Аспирантские чтения. Сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ). Выпуск 4. Под общей редакцией Т.В. Шепитько. – 2021.

55. Евдокимов А.Г. Расчет свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций / А.Г. Евдокимов // Аспирантские чтения. Сборник научных статей аспирантов ИПСС РУТ (МИИТ). Выпуск 3. Под общей редакцией Т.В. Шепитько. – 2020.

56. Зарецкий Ю.К. Расчет буронабивных свай по предельным состояниям / Ю.К. Зарецкий, М.И. Карабаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – № 5. – С. 12-15.

57. Зарецкий Ю.К. Нелинейная механика грунтов и перспективы ее развития / Ю.К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – № 5. – С. 12-15.
58. Ильичев В.А. Принципы проектирования оснований и фундаментов высотных зданий, учитывающие их геотехнические особенности. / В.А. Ильичев, В.П. Петрухин, В.И. Шейнин // Современное высотное строительство. – 2007. – С. 156-160.
59. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. – М., 1984.
60. К определению размера полости в скальном массиве, необходимого для образования провала в вышележащей грунтовой толще / В.И. Шейнин [и др.] // Вестник НИЦ Строительство. – 2023. – № 1. – С. 72-85.
61. К расчёту комбинированных плитно-свайных фундаментов / В.Г. Федоровский [и др.] // Новые технологии в строительстве. – 2008. – № 1. – С. 59-72.
62. Карст Башкортостана / Р.Ф. Абдрахманов [и др.]. – Уфа: Информреклама, 2002. – 384 с.
63. Каюмов М.З. Взаимодействие плитного фундамента заглубленного сооружения с основанием над карстовой полостью : Автореф. Дисс...канд. техн. наук / М.З. Каюмов. – М., 2012.
64. Ковалев В.А. О расчете параметров карстового провала / В.А. Ковалев, А.Б. Патрикеев // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 10. – С. 36-41.
65. Ковалев В.А. Проектирование на закарстованных территориях / В.А. Ковалев, А.Б. Патрикеев, И.А. Пастухова // НИИОСП. Вчера, сегодня, завтра: Труды VII Петрухинских чтений. Под редакцией И.В. Колыбина, О.А. Шулятьева. – 2023. – С. 96-112.
66. Ковалев В.А. К оценке параметров карстовой опасности с использованием рекомендаций СП 22.13330.2016 / В.А. Ковалев, А.Б. Патрикеев, В.И. Шейнин // Вестник НИЦ Строительство. – 2019. – № 1. – С. 35-45.

67. Кравченко Г.М. Имитационное 3D моделирования карстовых процессов / Г.М. Кравченко, А.М. Матвейкин // Молодой исследователь Дона. – 2019. – № 5. – С. 48-53.
68. Лалетин Н.В. О методике расчета свайных оснований на действие осевой вертикальной нагрузки / Н.В. Лалетин // Тр. совещания по механике грунтов, основаниям и фундаментам. – 1956. – С. 96-117.
69. Магзумов Р.Н. Расчет свайных ленточных фундаментов на карстоопасных основаниях с учетом горизонтального давления при обрушении грунта на границах провала : Автореф. Дисс...канд. техн. наук / Р.Н. Магзумов. – М., 2014.
70. Мангушев Р.А. К методике инженерного расчета свайно-плитного фундамента / Р.А. Мангушев, Р.Н. Кондратьева // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций). – 2016. – Т. 12. – № 1. – С. 110-116.
71. Мангушев Р.А. Расчет плитно-свайного фундамента / Р.А. Мангушев, А.Б. Фадеев // Вестник гражданских инженеров. – 2007. – № 2. – С. 11-14.
72. Мирсаяпов И.Т. Проектирование свайно-плитного фундамента высотного здания с учетом влияния ветровых воздействий на сейсмостойкость грунтового основания / И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева // Жилищное строительство. – 2015. – № 5. – С. 88-91.
73. Мирсаяпов И.Т. Численные исследования осадок оснований глубоких фундаментов высотных зданий / И.Т. Мирсаяпов, Д.М. Нуриева // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 4. – С. 183-190.
74. Мулюков Э.И. О строительном карстоведении / Э.И. Мулюков // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: тр. междунар. науч.-техн. конф. – 2006. – Т. 2. – С. 92-97.
75. О работе острия и боковой поверхности отдельных свай и свайных фундаментов / А.В. Пилягин [и др.] // Геотехника Поволжья-99. – 1999. – С. 68-71.

76. Опыт расчета и конструирования фундаментов высотных зданий в глубоких котлованах в сложных инженерно-геологических условиях / А.З. Тер-Мартirosян [и др.] // Вестник МГСУ. – 2008. – № 2. – С. 119-128.

77. Пилягин А.В. Расчет по деформациям ленточных однорядных свайных фундаментов из пирамидальных и призматических свай с учетом упругопластических свойств грунта / А.В. Пилягин, В.Е. Глушков // Геотехника Поволжья-IV: Тез. докл. научно-техн. конф. – 1989. – С. 42-44.

78. Пилягин А.В. Напряженно-деформированное состояние основания свай при испытании статическим нагружением / А.В. Пилягин, А.Б. Шукенбаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2001. – № 3. – С. 2-6.

79. Поверхностные деформации в условиях покрытого карста: комплексирование методов оценки морфометрических параметров в инженерных целях / С.В. Щербаков [и др.] // Инженерная геология. – 2018. – Т. 8. – № 6. – С. 38-51.

80. Подольский В.А. Численный метод моделирования развития деформации при вероятном образовании карстовых полостей / В.А. Подольский, В.М. Логачева, Н.П. Панчуков // Известия ТулГУ. Науки о земле. – 2021. – № 1. – С. 283-289.

81. Пономарев А.Б. Основы исследований и расчета фундаментов из полых конических свай / А.Б. Пономарев. – М.: АСВ, 2005. – 160 с.

82. Пономарев А.Б. Верификация результатов численного и аналитического расчета осадки одиночной сваи на аргиллитоподобных глинах / А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 2. – С. 11-13.

83. Пономарев А.Б. О напряженно-деформированном состоянии и несущей способности аргиллитоподобных глин и песчаников / А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2018. – № 3. – С. 2-6.

84. Проектная документация. «Строительство эстакад основного хода, эстакад-съездов Ярославского шоссе, разворотного путепровода, железнодорожных эстакад... в рамках строительства Северо-Восточной хорды». Подраздел 2. Инженерно-геологические изыскания.

85. Проектная документация. «Строительство эстакад основного хода, эстакад-съездов Ярославского шоссе, разворотного путепровода, железнодорожных эстакад... в рамках строительства Северо-Восточной хорды». Технологические и конструктивные решения мостов и опор.

86. Проектная документация. «Участок Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали „Москва – Казань – Екатеринбург“ (ВСМ 2)» ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ для разработки проектной документации. Раздел 2. Инженерно-геологические и геотехнические изыскания (в том числе геофизические исследования). Подраздел 1. Технический отчет по инженерно-геологическим и геотехническим изысканиям.

87. Проектная документация. «Участок Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали „Москва – Казань – Екатеринбург“ (ВСМ 2)». Технологические и конструктивные решения мостов и опор.

88. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление / М.М. Протодяконов. – 3-е изд., испр. – М.: Госгориздат, 1933. – 127 с.

89. Разводовский Д.Е. Взаимодействие свай и грунта в составе большеразмерных кустов и свайных полей : Автореф. дисс ... канд. техн. наук / Д.Е. Разводовский. – М., 1999.

90. Разработка предложений по устройству сигнализации и наблюдениям за поведением закарстованных оснований: отчет о научноисследовательской работе (промежуточ.) / Ш.Р. Незамутдинов [и др.]. – Уфа: НИИпромстрой, 1984. – 102 с.

91. Расчёт и проектные решения по геотехнике при строительстве Центрального ядра ММДЦ «Москва-Сити» / В.А. Ильичев [и др.] // 70 лет НИИОСП им. Н. М. Герсевича: Сб. научн. тр. – 2001. – С. 61-69.

92. Расчет фундаментов мелкого заложения на закарстованных основаниях / Ш.Р. Незамутдинов [и др.] // Механика грунтов и фундаментостроение: Тр. 3-й Украинской научно-техн. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – 1977. – Т. 1.

93. Семенов В.В. Расчет комбинированных свайно-плитных фундаментов с использованием контактной модели / В.В. Семенов, Д.Ю. Чунюк // Вестник МГСУ. – 2006. – № 1. – С. 133-135.
94. Соколов В.Н. Микромир глинистых пород / В.Н. Соколов // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 3. – С. 56-64.
95. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3).
96. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3).
97. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 (с Изменениями N 1, 2, 3).
98. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 (с Изменениями N 1, 2, 3).
99. СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.
100. СП 453.1325800.2019 Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства.
101. СП 499.1325800.2021 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования.
102. Тер-Мартirosян А.З. Взаимодействие длинной сваи конечной жесткости с окружающим грунтом и ростверком / А.З. Тер-Мартirosян, З.Г. Тер-Мартirosян, Чинь Туань Вьет // Вестник МГСУ. – 2015. – № 9. – С. 72-83.
103. Тер-Мартirosян З.Г. Напряженно-деформированное состояние в грунтовом массиве при его взаимодействии со свайей и фундаментом глубокого заложения / З.Г. Тер-Мартirosян // Вестник МГСУ. – 2006. – № 1. – С. 38-49.
104. Толмачев В.В. Экспериментальные исследования деформаций рыхлых водонасыщенных пород над карстовыми полостями в связи со строительством на сильно закарстованных территориях: научный отчет / В.В. Толмачев, Р.Б. Давыдько. – Дзержинск: ПНИИИС, 1977. – 133 с.

105. Толмачев В.В. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий / В.В. Толмачев. – Стройиздат. – М., 1986. – 176 с.
106. Толмачев В.В. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий / В.В. Толмачев. – Стройиздат. – М., 1986.
107. Толмачев В.В. Методы оценки карстовой опасности для строительных целей: состояние и перспективы / В.В. Толмачев // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2012. – № 4. – С. 354-363.
108. Толмачев В.В. Инженерное карстоведение / В.В. Толмачев, Ф. Ройтер. – М.: Недра, 1990. – 151 с.
109. Травкин А.И. Прогноз карстоопасности и районирование закарстованных территорий (на примере центральной части г. Уфы) : Автореф. дисс ... канд. геол.-мин. наук / А.И. Травкин. – М., 1989. – 264 с.
110. Улицкий В.М. Основы совместных расчетов зданий и оснований / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин. – СПб.: Геореконструкция, 2014. – 328 с.
111. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов. – 4. – М.: Высшая школа, 2007. – 556 с.
112. Фадеев А.Б. Кустовой эффект при работе свайных фундаментов на вертикальную нагрузку / А.Б. Фадеев, Е.Э. Девальтовский // Ускорение научно-технического прогресса в фундаментостроении: Сб. научн. тр. в 2 т. под общ. ред. В. А. Ильичева. – 1987. – Т. 2. Методы проектирования эффективных конструкций оснований и фундаментов. – С. 33-34.
113. Фадеев А.Б. Особенности работы свай при групповом их расположении / А.Б. Фадеев, Е.Э. Девальтовский // Труды 11 Всес. конф. “Современные проблемы свайного фундаментостроения в СССР”. – 1990. – С. 4-5.
114. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987.
115. Фадеев А.Б. Решение осесимметричной смешанной задачи теории упругости и пластичности методом конечных элементов / А.Б. Фадеев, А.Л. Прегер // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 4. – С. 26-27.

116. Фадеев А.Б. Сопоставительный анализ предельного состояния одиночной и кустовой сваи / А.Б. Фадеев // Вопросы устройства оснований и фундаментов в слабых и мерзлых грунтах: Сб. трудов ЛИСИ. – 1982. – С. 30-37.

117. Федоровский В.Г. Методика расчета фундаментных плит на нелинейно-деформируемом во времени основании / В.Г. Федоровский, С.Г. Безволев, О.М. Дунаева // Нелинейная механика грунтов: Тр. 1V российской конф. с ин. участ. – 1993.

118. Федоровский В.Г. Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов / В.Г. Федоровский, С.Г. Безволев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1994. – № 3. – С. 11-15.

119. Федоровский В.Г. Осадки круглых и кольцевых фундаментов: прогноз и сопоставление с данными натурных наблюдений / В.Г. Федоровский, М.П. Дохнянский // Тр. 11 Балт. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – 1988. – Т. 2. – С. 99-106.

120. Федоровский В.Г. Расчет свай и свайных кустов на горизонтальную нагрузку по модели линейно-деформируемого полупространства / В.Г. Федоровский, С.В. Курило, Н.А. Кулаков // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1988. – № 4. – С. 20-23.

121. Хоменко В.П. Карстово-обвальные провалы «простого» типа: полевые исследования / В.П. Хоменко // Инженерная геология. – 2009. – № 4. – С. 40-48.

122. Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз / В.П. Хоменко; ред. Р.С. Зиангиров. – М.: Наука, 1986. – 93 с.

123. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Ленанд, 2020. – 640 с.

124. Чунюк Д.Ю. Расчет комбинированных свайно-плитных фундаментов : Автореф. дисс ... канд. техн. наук / Д.Ю. Чунюк. – М., 2002. – 136 с.

125. Шапиро Д.М. Упругопластический расчет несущей способности свай / Д.М. Шапиро, Н.Л. Зоценко, С.В. Беда // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – С. 34-39.

126. Шапиро Д.М. Расчетное моделирование нагружения буронабивных свай осевой силой / Д.М. Шапиро, Н.Н. Мельничук // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных условиях / Труды международной научнотехнической конференции. Том 1. – 2006. – С. 155-164.

127. Шапиро Д.М. Об уточнении метода расчета свайного фундамента как условного массивного / Д.М. Шапиро // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1974. – № 1. – С. 28.

128. Шапиро Д.М. Теория и расчётные модели оснований и объектов геотехники: Монография / Д.М. Шапиро. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – 164 с.

129. Шашкин А.Г. О высотном строительстве в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / А.Г. Шашкин // Геотехника. – 2014. – № 1. – С. 4-16.

130. Шейнин В.И. Сравнение результатов расчетного прогноза осадок и кренов высотного здания и значений, получаемых по данным геотехнического мониторинга / В.И. Шейнин, Е.П. Сарана, С.А. Артемов // Юбил. сб. НИИОСП. – 2011. – С. 391-407.

131. Шейнин В.И. Сравнение результатов расчетного прогноза осадок и кренов высотного здания и значений, получаемых по данным геотехнического мониторинга / В.И. Шейнин, Е.П. Сарана, С.А. Артемов // Юбил. сб. НИИОСП. – 2011. – С. 391-407.

132. Шулятьев О.А. Особенности взаимодействия свай с грунтом и между собой в условиях свайного поля / О.А. Шулятьев, И.А. Боков // Вестник НИЦ «Строительство». НИИОСП им. Н. М. Герсевича. Геотехника и подземное строительство. – 2014. – № 10. – С. 166-176.

133. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий / О.А. Шулятьев. – 2. – М.: АСВ, 2020. – 442 с.

134. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий / О.А. Шулятьев // Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 202-244.

135. Шулятьев О.А. Взаимодействие забивных свай с грунтом и между собой в составе свайного поля / О.А. Шулятьев, Харичкин // Численные методы расчётов в практической геотехнике: сб. ст. научно-технич. конф. СПбГАСУ. – 2012. – С. 228-234.

136. Экспериментальные исследования осадок свайных кустов под действием вертикальной нагрузки / Н.М. Дорошкевич [и др.] // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. – 1971.

137. Bai H.J. A method for calculating the safety rock thickness of pile bearing strata with considering deadweight of karst cave roof / H.J. Bai, et al // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2021.

138. Broms B.B. Methods of calculating the ultimate bearing capacity of piles in summary / B.B. Broms // *Swedish Geotechnical Inst Reprints & Repts*. – 1970. – № 35. – С. 1-11.

139. Combined Pile-Raft Foundation and Energy Piles – Recent Trend in Research and Practice / R. Katzenbach [и др.] // *Int. Conf. on Deep Foundations / CPRF and Energy Piles*. – 2009. – С. 3-20.

140. Feng Z. Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundations of Highway Bridges under the Coupling of Steep Slope and Karst / Z. Feng, et al // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Т. 198.

141. Feng Z. Prediction of bearing capacity of pile foundation in karst area based on model of metabolic GM (1,1) / Z. Feng, et al // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Т. 189.

142. Feng Z. Study on the Influence of Karst Size on the Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation / Z. Feng, et al // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – Т. 780.

143. Gotman N.Z. Application of static sounding for pile calculation in soft soil / N.Z. Gotman // *Int. symposium on cone penetration testing: SGF Report*. – 1995. – Т. 2. – С. 553-556.

144. Gotman N.Z. CPT for the bases deformability evalatuion / N.Z. Gotman // *Proc. 1st Int. Conference on site characterization*. – 1998. – С. 1057-1062.

145. Gotman N.Z. Determination of additional load on the bridge foundation pile under karst deformation / N.Z. Gotman, A.G. Evdokimov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1928(012058).
146. Gotman N.Z. Account of structure and bedding interaction under conditions of carst formation / N.Z. Gotman, A.L. Gotman // Proc. XI th EurCSMFE. – 1995. – T. 6. – C. 6.33-6.38.
147. Gotman N.Z. Design of piled-raft foundation as a three-component system “pile-soil-raft” / N.Z. Gotman, A.L. Gotman, D.M. Shapiro // Proc. XV th ICSMFE. – T. 2. – C. 1039-1042.
148. Katzenbach R. Recommendations for the design and construction of piled rafts / R. Katzenbach, C. Moormann // 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul). – 2001. – C. 927-930.
149. Midas GTS NX Analysis Reference. Chapter 4. Materials.
150. Randolph M.F. Efficient design of piled raft / M.F. Randolph, P. Clancy // Proc. Of 2-nd Int. Geot. Sem. on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Chent. – C. 119-130.
151. Randolph M.F. Design Methods For Pile Groups and Piled Rafts / M.F. Randolph // 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (New Delhi). – 1994. – № 13. – C. 61-82.
152. Randolph M.F. Analysis of deformation of vertically loaded piles / M.F. Randolph, C. Wroth // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 1978. – C. 1465-1488.
153. Terzaghi K. Evaluation of coefficient of subgrade reaction / K. Terzaghi // Géotechnique. – 1955. – T. 5. – C. 297-326.
154. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics / K. Terzaghi. – New York: Wiley and Sons Inc., 1943. – 510 c.
155. Waltham T. Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction / T. Waltham, F. G. Bell, M. G. Culshaw. – 2005. – 383 c.