

На правах рукописи



БАШМАКОВ Иван Борисович

**ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ
ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА ОГРАЖДЕНИЯ
КОТЛОВАНОВ С УЧЕТОМ ИЗБЫТОЧНЫХ ПОРОВЫХ
ДАВЛЕНИЙ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: Чл.-корр. РААСН, заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Мангушев Рашид Абдуллович

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

Шарафутдинов Рафаэль Фаритович
кандидат технических наук
НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ
«Строительство», директор.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I».**

Защита состоится «09» декабря 2025 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, аудитория 220.

Тел.: (812) 316-58-73, rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/bashmakov-ivan-borisovich-2>

Автореферат разослан «06» ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Н. Гайдо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современной практике фундаментостроения одной из актуальных задач является разработка глубоких котлованов в условиях плотной городской застройки и залегания большой толщи слабых водонасыщенных грунтов. В данных условиях производство работ зачастую невозможно без применения ограждений котлована, в т. ч. с устройством распорных систем.

Процесс конструирования ограждающих конструкций неразрывно связан с выполнением соответствующих геотехнических расчетов. По результатам расчетов определяются такие величины, как коэффициент устойчивости конструкции и расчетные усилия в ограждении котлована и в распорной системе.

В современной инженерной практике используется ряд методов расчета ограждений котлованов, в частности, аналитические, полуаналитические, построенные на принципах расчета балок на упругом основании, а также численные, реализуемые с помощью метода конечных элементов в плоской и пространственной постановках. При этом результаты расчетов, полученных различными методами, показывают неудовлетворительную сходимость.

Анализ устойчивости ограждений котлованов при их разработке и развивающихся в них усилий показывает, что наибольшее значение имеют величины активного и пассивного давлений. Эти параметры характеризуют минимально и максимально возможные давления грунта на подпорную стенку. Определение данных величин, как правило, выполняется с использованием теории предельного равновесия грунта.

При этом особое значение имеет корректная оценка прочности слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов. Среди их особенностей выделяют сравнительно низкие прочностные и деформационные характеристики и слабую фильтрационную способность. С учетом того, что разработка котлованов открытым способом занимает сравнительно небольшие промежутки времени (не более 1-2 года), при решении этих задач, необходимо учитывать неконсолидированный характер работы таких грунтов основания.

Как правило, определение величины предельных давлений на ограждение котлована с учетом образования избыточных поровых давлений выполняют с помощью параметра удельного сопротивления грунта недренированному сдвигу. Значительным недостатком данного параметра является зависимость его величины от метода определения. Таким образом, иссле-

дование особенностей активного и пассивного давлений грунта на ограждение в случае разработки котлованов при недренированном характере работы грунтов основания с использованием эффективных прочностных параметров является актуальной темой исследования.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени в отечественных и зарубежных исследованиях представлен ряд расчётных теорий, определяющих работу ограждающей конструкции в грунтовой среде в соответствии с теорией предельного равновесия.

Определением величин давлений грунтового массива на ограждение занимались Ш. Кулон, И. П. Прокофьев, Н. К. Снитко, Г. А. Дуброва, В. Ренкин, К. Терцаги, П. М. Цимбаревич, Н. П. Пузыревский, В. В. Соколовский, С. С. Голушкевич, Е. А. Гаврашенко, М. Е. Каган, В. И. Тракало, В. А. Мейстер, И. П. Прокофьев, И. В. Яропольский, Г. П. Канкян, В. И. Швей, В. В. Синельников, Р. В. Лубенов, П. И. Яковлев и др.

Наиболее распространёнными методами расчёта гибких ограждений котлованов, в т. ч. с одним уровнем распорных креплений являются графо-аналитический метод упругой линии Блюма – Ломейера и метод Якоби. Наряду с ними исследования работы ограждающих конструкций, в т. ч. на основании полевых и лабораторных экспериментов, представлены в трудах Б. Хансена, П. Роу, Г. Чеботарева, Г. Е. Лазебника, Ф. М. Шихиева, Г. А. Дубровы, Ю. М. Гончарова, Н. В. Лалетина, Н. К. Снитко, И. В. Урбана и ряда других авторов. Описание работы ограждения, основанное на методе конечных элементов, основных положениях теории сплошных сред и использовании различных моделей грунтовой среды представлено в работах Т. А. Маликовой, А. К. Бугрова, Ю. К. Зарецкого, С. Б. Ухова, Б. Фадеева, В. Г. Федоровского, А. К. Черникова, О. Зенкевича, Y. Hashash, Clough & Tsui и ряда других учёных.

Отдельно стоит отметить особенности деформирования слабых пылевато-глинистых водонасыщенных грунтов при приложении нагрузок. В работах А. Б. Будина, С. С. Вялова, С. Р. Месчана и других авторов установлено, что для них деформация с постоянной скоростью наблюдается лишь в ограниченном диапазоне напряжений. В остальных случаях характер ползучести определяется уровнем напряжений. Исследования работы оснований, сложенных данными грунтами приведены в трудах В. Н. Бронина, Р. Э. Дашко, Л. Г. Заварзина, М. С. Захарова, А. А. Каган, М. А. Лавровой, Р. А. Мангушева, К. К. Маркова, Н. Н. Соколова, С. Н. Сотникова, В. П. Сипидина, В. А. Флорина, В. М. Фурсы, А. Г. Шашкина, С. А. Яковлева, З. В. Яцкевич и др.

В 1970-е годы в рамках теории предельного равновесия грунтов (ТПРГ) сформировался отдельный раздел, посвящённый исследованию несущей способности оснований, сложенных медленно уплотняющимися водонасыщенными глинистыми грунтами. основоположниками исследований в данном направлении можно считать А. С. Строганова и Ю. И. Соловьёва, развитие их трудов представлено в работах А. М. Караулова и К. В. Королёва. Среди иностранных публикаций, посвящённых вопросам предельного равновесия водонасыщенных оснований, представляют интерес работы G. T. Houlsby & C. M. Martin, C. M. Martin & E. C. J. Hazell, C. M. Martin, C. M. Martin & D. J. White, B. W. Byrne et al.

Решения и основные выводы, полученные в трудах К.В. Королёва, определяют направление текущего исследования – необходимость учета избыточных поровых давлений при расчете активного и пассивного давлений в водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах основания.

Цель исследования – разработка метода расчета давления слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов на ограждение котлована с учётом образования избыточных поровых давлений.

Задачи исследования:

1. На основании анализа существующих методов расчёта ограждающих конструкций котлована обосновать необходимость учета в водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах основания избыточных поровых давлений для оценки активного и пассивного давлений.
2. Выполнить экспериментальное и теоретическое исследование образования избыточных поровых давлений в слабых пылевато-глинистых грунтах при сложном напряженно-деформированном состоянии.
3. Разработать методику учета давлений массива слабого пылевато-глинистого грунта на конструкции ограждений котлованов при поэтапной разработке котлована.
4. Произвести оценку достоверности разработанной методики учета давлений массива слабого пылевато-глинистого грунта на конструкции ограждений котлованов на основе сопоставления результатов расчетов с результатами геотехнического мониторинга.

Объект исследования – слабые водонасыщенные пылевато-глинистые грунты при разработке котлованов.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние системы «массив грунта – ограждение котлована» при поэтапной разработке котлована в условиях слабых пылевато-глинистых грунтов.

Рабочая гипотеза – образования избыточных поровых давлений при отрывке котлованов в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах приводит к существенному изменению значений давления на ограждающую конструкцию, которое необходимо учитывать при расчетах.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. На основании проведенных лабораторных исследований выполнена количественная оценка величин избыточных поровых давлений в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах при приложении сдвиговых нагрузок.

2. Получено и обосновано обобщение теории мгновенной прочности, учитывающее образование избыточных поровых давлений в связи с приложением сдвиговых нагрузок.

3. Предложены и решены новые задачи теории предельного равновесия грунта применительно к расчету активного и пассивного давления грунта при образовании избыточных поровых давлений в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах.

4. Предложена и обоснована методика задания параметров модели упругопластического деформирования грунта по модели Hardening Soil, позволяющая учитывать особенности образования избыточных поровых давлений в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах при выполнении численных расчетов.

5. На основе сравнительного анализа подтверждено, что разработанная методика расчета позволяет с большей точностью выполнять расчеты напряженно-деформированного состояния системы «массив грунта – ограждение котлована» при поэтапной разработке котлована в условиях слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов.

Теоретическая значимость работы. Выполнена количественная оценка величин образования избыточных поровых давлений в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах от приложенных сдвиговых нагрузок. Предложена обобщенная теория мгновенной прочности грунтов, учитывающая образование избыточных поровых давлений при приложении сдвиговых нагрузок. На ее основе разработана система дифференциальных уравнений теории предельного равновесия слабого водонасыщенного грунта и метод ее численного интегрирования. Получены новые решения теории предельного равновесия грунта в части определения величин активного и пассивного давления грунта при образовании избыточных поровых давлений в массиве водонасыщенного пылевато-глинистого грунта.

Практическая значимость диссертационной работы. На основе результатов лабораторных испытаний показано, что значение мгновенной прочности, полученное по результатам расчетов с использованием эффективных прочностных параметров и шатровых моделей грунтов, может быть значительно увеличено. Предложены аналитическая и численная методики, позволяющие выполнять расчет ограждений котлована с учетом осо-

бенностей образования избыточных поровых давлений в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах. Разработанные методики расчета давлений на ограждение котлована позволяет сократить материалоемкость конструкций ограждения котлована до 30%.

Методология и методы исследований:

1. Анализ литературных источников по определению активного и пассивного давления грунта, расчетам оснований с учетом образования избыточных поровых давлений, методам теории предельного равновесия грунта и теории мгновенной прочности грунта.

2. Лабораторные испытания слабых пылевато-глинистых грунтов в приборе трехосного сжатия по консолидировано-недренированной схеме.

3. Теоретические исследования на основе теорий предельного равновесия грунта и мгновенной прочности грунта.

4. Анализ результатов полевых исследований напряженно-деформированного состояния ограждений котлованов, выполненных на основе геотехнического мониторинга.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты серии лабораторных испытаний с определением зависимости между величинами сдвиговых нагрузок на слабые водонасыщенные пылевато-глинистые грунты и образованием в них избыточных поровых давлений. Установление корреляционной зависимости между показателем консистенции грунта I_L и коэффициентом Скемптона A_f .

2. Обобщение теории мгновенной прочности Ю.И. Соловьева, учитывающее образование избыточных поровых давлений, как в результате приложения уплотняющих, так и сдвиговых нагрузок.

3. Разработанная система дифференциальных уравнений обобщённой теории предельного равновесия водонасыщенного грунта, а также полученные на ее основе решения задачи об активном и пассивном давлении грунта.

4. Методика задания характеристик слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов для использования их в упругопластической модели Hardening soil.

5. Сопоставление результатов расчета напряженно-деформированного состояния системы «массив грунта – ограждение котлована» в условиях залегания слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах с данными геотехнического мониторинга.

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения, по пункту 5: «Разработка новых методов расчета, проектирования и испытаний высокоэффективных конструкций, способов и технологий устройства

оснований и фундаментов в особых инженерно-геологических условиях: на слабых, насыпных, просадочных, засоленных, набухающих, закарстованных, вечномёрзлых, пучинистых и других грунтах.»

Степень достоверности результатов исследований и выводов диссертационной работы подтверждаются применением основных положений и моделей механики грунтов, теории пластичности, теории предельного равновесия грунта, теории мгновенной прочности грунта, методов математического анализа, обеспечиваются достаточным объемом лабораторных и натурных данных в условиях слабых глинистых грунтов. Подтверждается достаточной сходимостью аналитического и численного решений с результатами геотехнического мониторинга.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция по геотехнике «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методы расчёта» (GFAC 2021) (г. Санкт-Петербург, 27–29 октября 2021 г.); Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция «Перспективы современного строительства» (Санкт-Петербург, 10–13 апреля 2023г.); Межвузовская научно-практическая конференция «Современные направления развития технологии, организации и экономики строительства» (Санкт-Петербург, 21 апреля 2023 г.); III Всероссийская конференция с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» (Пермь, 29–31 мая 2024 г.); Научно-техническая конференция «Современные методы проектирования, подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов» (Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 г.).

Личный вклад автора состоит в формулировании целей и задач исследования; разработке решения поставленных задач путем лабораторных и аналитических исследований слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов, формулировании основных положений и выводе математических формул обобщенной теории мгновенной прочности и обобщенной теории предельного равновесия водонасыщенных грунтов, разработке алгоритма численного решения задач об активном и пассивном давлении грунта с учетом разработанной теории и решения серии задач для построения аналитического решения, сопоставлении результатов расчетов с использованием предложенного метода с данными геотехнического мониторинга.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, в том числе 5 статей – в изданиях, утверждённых перечнем ВАК РФ и 6 статей – в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 136 наименований и 3 приложения. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность работы, её научная и практическая новизна, цель и задачи исследования.

В первой главе приведен обзор исследований особенностей строения и свойств слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов. Для них свойственны сравнительно низкие прочностные и деформационные характеристики, а также низкие коэффициенты фильтрации. При краткосрочном нагружении данные грунты практически не получают объемных деформаций, однако при длительном нагружении проявляют свойства фильтрационной консолидации и ползучести. Для корректного решения задач механики грунтов, связанных с расчетом ограждающих конструкций глубоких котлованов, необходимо учитывать обозначенные особенности слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов.

В сравнении с общим сроком строительства и эксплуатации сооружения производство работ «нулевого» цикла, в т. ч. комплекс работ по разработке котлована, занимает малый промежуток времени (до 1–2 лет). В таком случае изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива, вызванное работой ограждающей конструкции котлована, может рассматриваться без учёта особенностей консолидации основания.

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике разработано большое число аналитических методов расчёта конструкций ограждений котлованов, построенных на решении задач предельного равновесия. Отмечено, что использование различных моделей грунта без адаптации к условиям конкретной задачи может привести к существенным различиям в конечных результатах геотехнических расчетов.

Обзор научных работ по теме исследования показал, что в аналитических и численных методиках расчёта ограждающих конструкций котлованов не нашли применения решения теории предельного равновесия конкретно к слабым водонасыщенным пылевато-глинистым грунтам. Необходимость корректного учёта избыточных поровых давлений при расчете активного и пассивного давлений в обозначенных грунтовых условиях определили цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты выполненных лабораторных и теоретических исследований влияния избыточных поровых давлений на прочность слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов.

Методы оценки влияния избыточных поровых давлений на прочность глинистых грунтов.

Одним из наиболее значимых параметров в расчетах ограждений котлована является прочность массива грунта. В механике грунтов для оценки прочности водонасыщенных грунтов с учетом образования избыточных поровых давлений наиболее широко применяются теории А. Скемптона и Ю. И. Соловьева.

Теория Скемптона получена на основе исследования работы водонасыщенных грунтов в условиях трехосного консолидированно-недренированного (КН) сжатия. По результатам выполненных им экспериментов было получено, что величина избыточных поровых давлений зависит от прикладываемых к образцу грунта уплотняющих и сдвиговых нагрузок.

Для условий трехосного КН сжатия грунта данная зависимость была представлена А. Скемптоном следующим образом:

$$\Delta u = B \cdot (\Delta \sigma_3 + A \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)), \quad (1)$$

где: $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_3$ – приращения главных полных напряжений в образце грунта, кПа; B и A – коэффициенты, отвечающие за развитие избыточных поровых давлений при действии соответственно уплотняющих и девиаторных (формоизменяющих) нагрузок.

Необходимо отметить, что параметр Скемптона A не являлся линейным на протяжении всего испытания. В связи с этим особую важность представляет параметр Скемптона A при разрушении – A_f .

Существенным недостатком данной теории является затруднительность её применения в практических расчетах, в связи с отсутствием прямой зависимости между прочностью массива грунта и величинами параметров A_f и B . В простейшем случае для трехосного КН испытания при $B = 1$ закон прочности Кулона-Мора может быть представлен в виде:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c' \cdot \cot(\varphi')} = \frac{\sin(\varphi')}{1 + 2 \cdot A_f \cdot \sin(\varphi')}, \quad (2)$$

где: σ_1 , σ_3 – главные полные напряжения, c' , φ' – эффективные прочностные параметры водонасыщенного грунта.

Указанного выше недостатка лишена теория мгновенной прочности (ТМП) Ю.И. Соловьева. Данная теория применяет формулу для оценки величины избыточных поровых давлений в виде:

$$\Delta u = \beta \cdot \Delta \sigma, \quad (3)$$

где: $\Delta \sigma$ – приращение среднего значения полных напряжений, β – коэффициент мгновенного порового давления, аналогичный коэффициенту Скемптона B .

Путем сопоставления выражений (1) и (3) можно установить, что тео-

рия А. Скемптона эквивалентна теории Ю.И. Соловьева при значении коэффициента $A = 1/3$. При этом в соответствии с результатами лабораторных экспериментов А. Скемптона значение коэффициента A может быть различным на протяжении испытания. Для различных типов глинистых грунтов значение данного коэффициента при разрушении A_f может изменяться в диапазоне от $-0,5$ до $1,5$ и являться отдельным параметром грунта.

Лабораторное определение параметра A_f заключается в фиксации в трехосных КН испытаниях образцов глинистого грунта значений $\Delta\sigma_1$ и Δu . Если испытание проводится при постоянном боковом обжатии ($\Delta\sigma_3 = 0$), то:

$$A_f = \Delta u / \Delta\sigma_1 . \quad (4)$$

Определение избыточных поровых давлений в процессе испытания с достаточной точностью не всегда представляется возможным, поэтому предложен альтернативный подход к определению параметра A_f . Предварительно выполняется серия трехосных консолидировано-дренированных (КД) испытаний для определения эффективных прочностных параметров c' и φ' . Затем на основе результатов КН испытаний определяется значение A_f с использованием зависимости:

$$A_f = \frac{\sigma_3 + c' \cdot \cot(\varphi')}{\Delta\sigma_1} - \frac{1 - \sin(\varphi')}{2 \cdot \sin(\varphi')} . \quad (5)$$

Учет упругопластического упрочнения грунтов основания влияет на результаты численного определения параметра A_f . В моделях грунтового основания Modify Cam Clay, Soft Soil и Hardening Soil учет недренированного поведения сводится к добавлению к матрице жесткости грунта матрицы жесткости несжимаемой жидкости, т.е. исключения объемных деформаций. Для сравнения результатов было выполнено численное моделирование КН трехосного испытания глинистого грунта с использованием различных моделей (рис. 1).

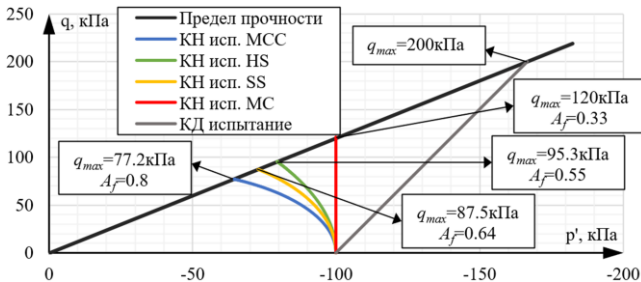


Рисунок 1. Сводный график численного моделирования консолидировано-недренированных трехосных испытаний (КН) с использованием различных моделей грунта: q_{max} – предельный девиатор загрузки, A_f – параметр Скемптона

На основе численных экспериментов и математического анализа может быть сделан вывод, что при использовании моделей с шатровыми поверхностями упрочнения значение A_f зависит от соотношения между модулем деформации и модулем упругости, от параметров прочности и непосредственно от математического описания шатровой поверхности. Очевидно, что в данном случае параметр A_f не может быть скорректирован в соответствии с результатами лабораторных испытаний. Сделан вывод, что недренированная прочность грунта в полных компонентах напряжений при оценке образования избыточных поровых давлений с помощью современных моделей упругопластического деформирования определяется заложенными в них эмперическими зависимостями.

Экспериментальные исследования

Для оценки фактических значений параметра A_f слабых пылевато-глинистых грунтов была выполнена серия лабораторных испытаний. При лабораторных исследованиях использовались приборы для осесимметричного трехосного сжатия, оснащенные рабочей камерой типа Б, которая обеспечивает жесткую фиксацию штампа к нагрузочной раме, что позволяет проводить как изотропные, так и анизотропные стадии консолидации и реконсолидации глинистого грунта (рис. 2).



Рисунок 2. Прибор трехосного сжатия

Испытания проводились по КД и КН схемам при трех различных уровнях давления консолидации. Результаты испытаний на стадии девиаторного нагружения образцов из одного монолита грунта представлены на рис. 3.

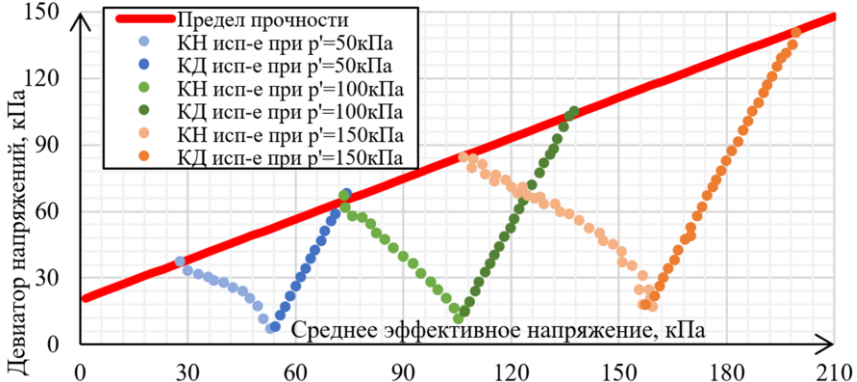


Рисунок 3. Траектории эффективных напряжений образцов при консолидированно-дренированных (КД) и консолидированно-недренированных (КН) трехосных испытаниях

При КН испытаниях траектории эффективных напряжений при девиаторном нагружении имеют тенденцию к снижению средних эффективных напряжений, что может быть связано с процессами контракции, вызывающими рост избыточных поровых давлений. При этом данное явление приводит к существенному снижению фактической прочности грунта.

Точки разрушения $q_f(p_f)$ образцов при КД и КН испытаниях имеют незначительный разброс вдоль линии предела прочности Кулона-Мора (см. рис. 3).

Вычисленные на основании результатов испытаний при давлении бокового обжатия $p' = 50; 100$ и 150 кПа значения параметра A_f составили $1,02; 0,83$ и $0,88$ соответственно. Таким образом, для корректной оценки мгновенной прочности слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов необходим учет образования избыточных поровых давлений при приложении сдвиговых нагрузок.

Для возможности учета рассмотренного эффекта в отсутствие данных трехосных КН испытаний была получена корреляционная зависимость между параметром A_f и показателем текучести слабого водонасыщенного пылевато-глинистого грунта I_L . Корреляционная зависимость получена на основе 125 испытаний грунтов, отобранных на различных площадках г. Санкт-Петербург (рис. 4).

$$A_f = 0,9439 \cdot I_L \quad (6)$$

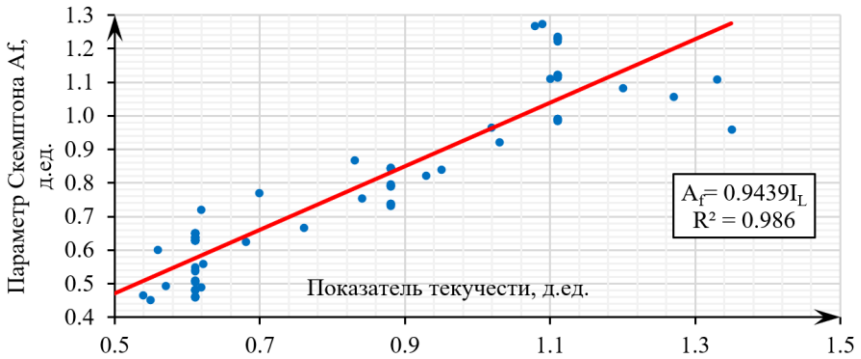


Рисунок 4. Зависимость коэффициента Скемптона A_f от показателя текучести грунта I_L

Обобщение теории мгновенной прочности

В теории мгновенной прочности Ю. И. Соловьёва вводятся параметры мгновенной прочности консолидирующейся среды ρ и κ , определяемые в соответствии с выражениями:

$$\sin(\rho) = (1 - \beta) \cdot \sin(\varphi'), \quad \kappa = \frac{1}{\cos(\rho)} \cdot (\sigma'_0 \cdot \beta \cdot \sin(\varphi') + c' \cdot \cos(\varphi')), \quad (7)$$

при этом закон Кулона-Мора принимает вид:

$$\tau = \sigma \cdot \sin(\rho) + \kappa \cdot \cos(\rho), \quad (8)$$

где σ'_0 – начальное (до начала разработки котлована) среднее эффективное напряжение в грунте, кПа.

Для учета выявленных выше особенностей слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов был предложен следующий обобщенный закон образования избыточных поровых давлений:

$$\Delta u = \alpha \cdot \beta \cdot \Delta \tau + \beta \cdot \Delta \sigma_3, \quad (9)$$

где: β – то же, что и в классической ТМП; α – коэффициент, учитывающий особенности образования избыточных поровых давлений при девиаторном нагружении (значение $\alpha = 1$ соответствует классической ТМП).

Путем ряда математических преобразований получены модифицированные выражения для определения параметров мгновенной прочности консолидирующейся среды ρ и κ :

$$\sin(\rho) = A \cdot (1 - \beta) \cdot \sin(\varphi'), \quad (10)$$

$$\kappa = \frac{A}{\cos(\rho)} \cdot (\sigma'_0 \cdot \beta \cdot \sin(\varphi') \cdot B + c' \cdot \cos(\varphi')), \quad (11)$$

где: $A = 1 / (1 + (\alpha - 1) \cdot \beta \cdot \sin(\varphi))$, $B = 1 + (\alpha - 1) \cdot (1 - K_0) / (1 + K_0)$, K_0 – коэффициент начального бокового давления.

Приведенное обобщение ТМП позволяет получить решения для более высоких значений параметра Скемптона A_f , характерных для слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов.

Для определения введенного коэффициента α в полном тексте диссертации разработан расчетный метод. В условиях простого сдвига для недренированного поведения грунта, принимая допущение, что уплотнение грунта происходило изотропно, и исходя из закона Терцаги, будет иметь место следующая зависимость:

$$\alpha = \sqrt{3} \cdot \left(A_f - \frac{1}{3} \right) + 1. \quad (12)$$

Полученная формула соответствует в том числе и условиям упругости (при $A_f = 1/3$ по формуле (12) $\alpha = 1$).

В третьей главе представлены разработанные методики численного и аналитического решения задач об активном и пассивном давлении грунта с использованием обобщенной теории мгновенной прочности, приведено выполненное сопоставление результатов решений.

На основе введенного закона образования поровых давлений (9) была получена система дифференциальных уравнений обобщенной теории предельного равновесия водонасыщенного грунта в виде:

$$\begin{cases} dx = dz \cdot (\lambda \pm \mu), \\ d\bar{\sigma} \pm 2 \cdot \bar{\sigma} \cdot \tan(\rho) \cdot d\lambda = \gamma_{sb} \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\beta}{1 - \beta} \right) \cdot (dz \mp \dots) \end{cases}, \quad (13)$$

где $K = \frac{\alpha + K_0 \cdot (2 - \alpha)}{2}$, λ – угол между осью z и направлением напряжения σ_1 ;

$\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ – угол между направлением напряжения σ_1 и поверхностью скольжения; γ_{sb} – удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды.

Для дальнейшего решения задач методом характеристик теории предельного равновесия грунта (ТПРГ) в тексте диссертации приведена конечно-разностная аппроксимация полученной системы дифференциальных уравнений. Дальнейшие расчеты выполнялись в соответствии с расчетными схемами, приведенными на рис. 5.

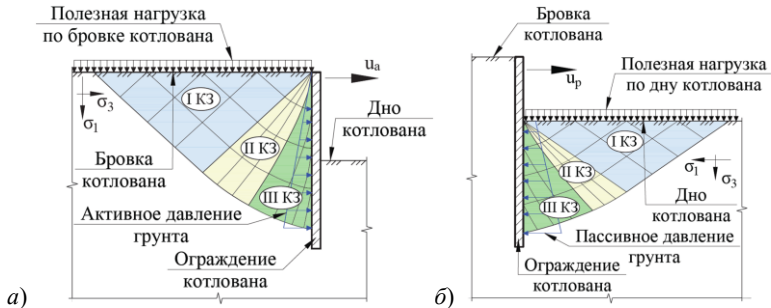


Рисунок 5. Расчетная схема для определения: *a* – активного; *б* – пассивного давлений грунта на ограждение котлована

Результаты выполненных расчетов по определению активного и пассивного давлений грунта для задачи при $\beta = 1$ и $\alpha = 3$ приведены на рис. 6. Не смотря на полностью неконсолидированный характер работы массива грунта, в нем существуют эффективные напряжения, которые приводят к возникновению трения на контакте массива грунта с ограждением котлована. На рис. 6 линии соответствуют полученным поверхностям скольжения первого и второго семейства, изополя – полученным величинам напряжений.

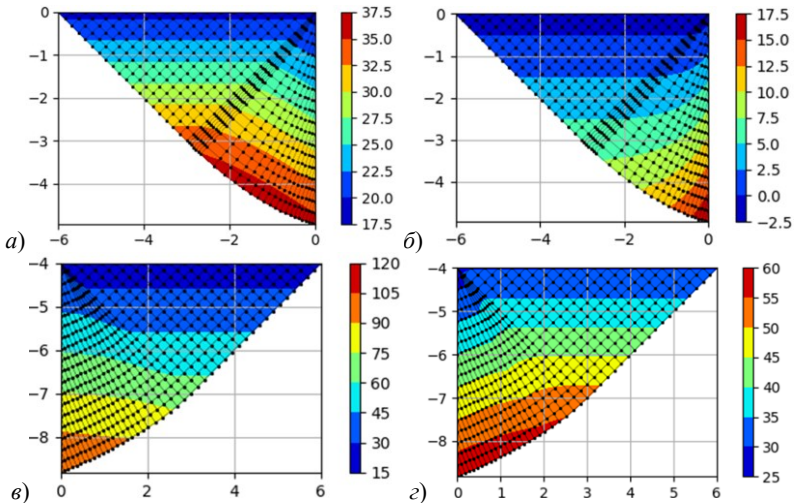


Рисунок 6. Результаты численного решения задач об активном (*a*, *б*) и пассивном (*в*, *г*) давлении грунта. Приведенные изополя соответствуют величинам полных (*a*, *в*) и эффективных (*б*, *г*) горизонтальных напряжений

Результаты расчетов величин активного и пассивного давлений грунта, выполненных в соответствии с разработанным алгоритмом, приведены на рис. 7. В соответствии с полученными результатами, активное давление грунта прямо пропорционально предложенному коэффициенту α , а пассивное давление – обратно пропорционально. Зависимость данных величин от коэффициента β носит менее однозначный характер. Активное давление грунта в уровне бровки котлована прямо пропорционально коэффициенту β , в то время, как его влияние на угол наклона эпюры зависит от величины коэффициента α . Пассивное давление грунта прямо пропорционально коэффициенту β при $\alpha = 1$ и обратно пропорционально при $\alpha = 3$.

На основании полученных результатов предложена инженерная методика определения активного и пассивного давлений грунта в случае образования избыточных поровых давлений, использующая формулы:

$$\begin{aligned} P_{A,und}(z) &= \gamma_{sb} \cdot z \cdot K_{A,\gamma,und} + q \cdot K_{A,q,und} - 2 \cdot c \cdot K_{A,c,und} \\ P_{P,und}(z) &= \gamma_{sb} \cdot z \cdot K_{P,\gamma,und} + \sigma_{zg,0} \cdot K_{P,g,und} + q \cdot K_{P,q,und} + 2 \cdot c \cdot K_{P,c,und} \end{aligned} \quad (14)$$

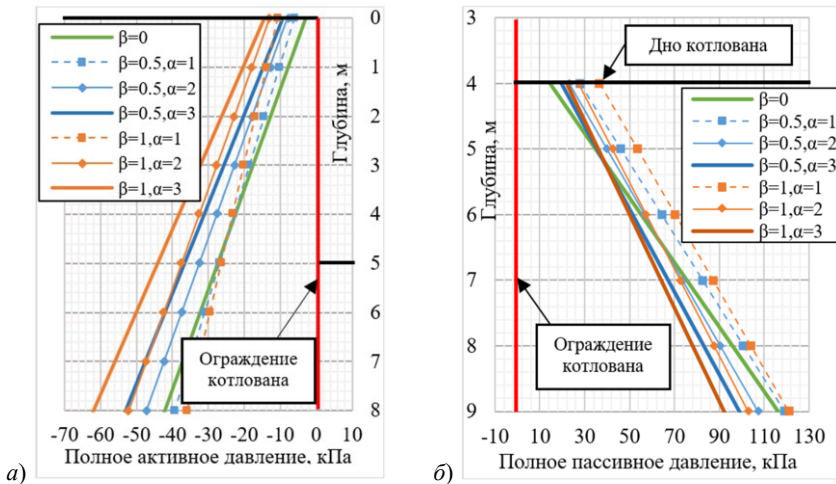


Рисунок 7. Графики результатов расчета активного давления при образовании избыточных поровых давлений при $\varphi = 20^\circ$, $c = 5$ кПа, $q = 20$ кПа.

Для определения коэффициентов $K_{A,\gamma,und}$, $K_{A,q,und}$, $K_{A,c,und}$, $K_{P,\gamma,und}$, $K_{P,g,und}$, $K_{P,q,und}$, $K_{P,c,und}$, в формуле (16), составлены таблицы, приведенные в полном тексте диссертации. Значения коэффициентов определяются в зависимости от значений параметров φ' , δ , α , β , K_0 . При составлении таблиц были рассмотрены диапазоны значений φ' от 5 до 30 градусов, δ от 0 до φ , K_0 от $(1 - \sin\varphi)$ до 1, а также значения $\alpha = 1, 2$ и 3; $\beta = 0,33, 0,67$ и 1.

На следующем этапе работы была разработана методика задания параметров модели грунтового основания *Hardening Soil*, позволяющая выполнять численные расчеты с учетом выявленных особенностей образования избыточных поровых давлений в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах. Разработанная методика предполагает задание различных параметров для материалов массива грунта и контактных элементов, моделирующих работу на контакте «массив грунта – ограждение котлована». Параметры модели сведены в табл. 1.

Табл. 1. Метод задания характеристик модели *Hardening soil*

Параметр модели	Модель массива грунта	Модель контактных элементов
Drainage type	Undrained B	Drained
$S_{u,ref}$	$A \cdot (\sigma'_0 \cdot \sin(\varphi') \cdot B + c' \cdot \cos(\varphi'))^*$	-
$S_{u,inc}$	$\gamma_{sb} \cdot \frac{1 + K_0}{2} \cdot A \cdot \sin(\varphi') \cdot B^*$	-
y_{ref}	Координата точки, относительно которой вычислено σ_0	-
c'_{ref}	-	$c_{конт}$ – КОНТ. сцепление
φ'	-	δ – угол конт. трения

* величины параметров А и В определяются в соответствии с формулами (10) и (11)

На рис. 8-9 приведен пример сопоставления результатов расчета в программном комплексе *Plaxis 2D* с решениями на основе теории предельного равновесия грунтов. Предложенный метод задания параметров модели *Hardening Soil* позволяет получить удовлетворительную сходимость с результатами аналитических решений.

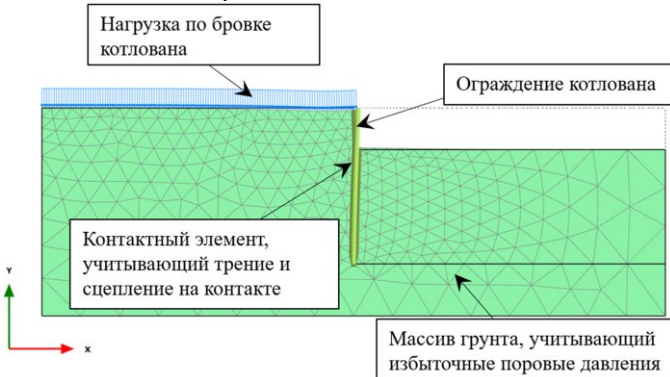


Рисунок 8. Основные элементы расчетной схемы при использовании разработанной методики численных расчетов

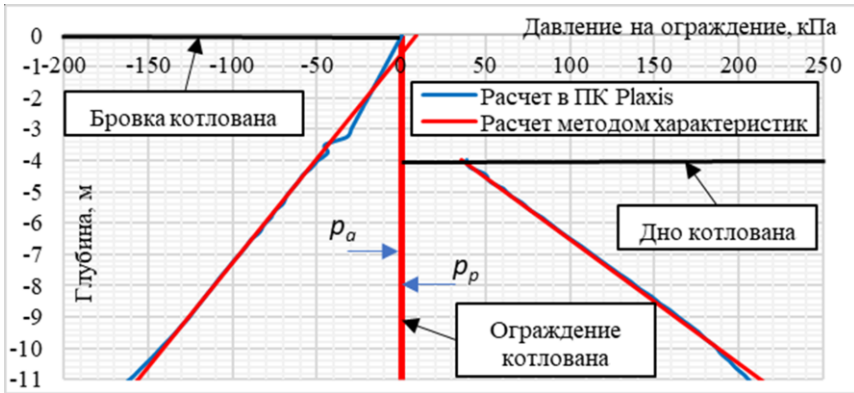


Рисунок 9. Сопоставительный график величин активного и пассивного давлений по результатам расчета методом характеристик и по результатам расчета методом конечных элементов

В четвертой главе представлено сопоставление результатов расчета НДС ограждения котлована разработанным методом с материалами натуральных наблюдений.

На объекте нового строительства в Центральном районе Санкт-Петербурга проект предполагал разработку котлована глубиной 3,6 м в непосредственной близости к существующим объектам культурного наследия. С целью контроля напряжений, возникающих в арматуре конструкции ограждения котлована на разных этапах его разработки, было предусмотрено измерение усилий в арматуре конструкции «стена в грунте», представляющей собой ряд бурокасательных свай. Тензометрические датчики были установлены в одной несущей свае ограждающей конструкции.

Для оценки усилий в ограждающих конструкциях котлована выполнены расчеты в программном комплексе Plaxis с использованием модели Hardening Soil в стандартной постановке (дренированный расчет по рекомендованным параметрам прочности) и в постановке по разработанной методике. С учетом ограниченного во времени процесса производства работ нулевого цикла и наличия в основании большой толщи слабых грунтов рассмотрено недренированное поведение глинистых грунтов основания. Сопротивление недренированному сдвигу определялось по табл. 1.

По результатам выполненных расчетов, разработанный метод расчета показывает значительно более высокую сходимость с результатами геотехнического мониторинга, чем стандартный метод расчета.

Сопоставление результатов выполненных расчетов с данными геотехнического мониторинга приведено на рис. 10.

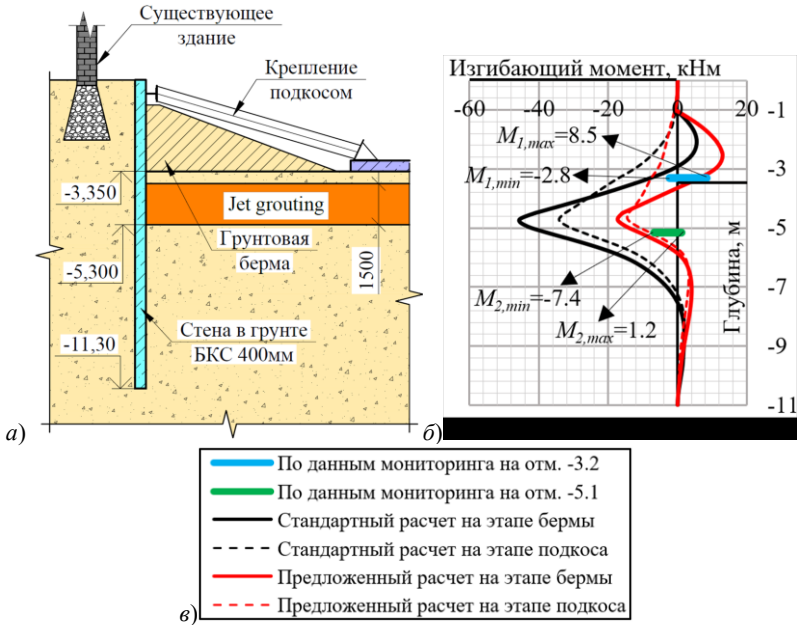


Рисунок 10. а) схема разработки котлована на рассматриваемом объекте строительства; б) результирующий график сопоставления натуральных данных с результатом расчетов различными методами; в) схема обозначений на графике Б

Контроль фактических изгибающих моментов, возникающих в ограждении котлована, необходим не только для предотвращения аварийных ситуаций, но и для оценки соответствия результатов теоретических расчетов действительности. В современной практике контроль изгибающих моментов в стене в грунте, как правило, производится по данным датчиков усилий. Для полноценного анализа характера работы конструкции на изгиб необходима установка значительного числа датчиков, что требует значительных финансовых затрат. Зачастую программа геотехнического мониторинга предусматривает установку инклинометрических трубок непосредственно в конструкцию стены в грунте. Такой метод установки позволяет вести оценку горизонтальных смещений конструкции по высоте с достаточно высокой точностью. Нами была предложена методика оценки фактических изгибающих моментов в ограждении котлована на основании данных инклинометрических наблюдений. Такой подход позволяет снизить расходы на установку датчиков усилий.

Функция горизонтальных смещений $w(x)$ может быть найдена на основании данных инклинометрических наблюдений. Обработка натуральных

данных методом наименьших квадратов позволила получить искомую функцию в виде полинома пятой степени.

На основании функции $w(x)$, учитывая нелинейный характер работы железобетона, производится построение результирующей эпюры изгибающих моментов. При этом для достижения соответствия между полученными усилиями и жесткостями конструкции выполняется пошаговое приближение решения.

С помощью разработанной методики анализа данных инклинометрического мониторинга была выполнена оценка фактических величин изгибающих моментов на объекте в Московском районе Санкт-Петербурга. На рис. 11 приведено сопоставление полученных результатов обработки натуральных данных с результатами расчетов различными методами.

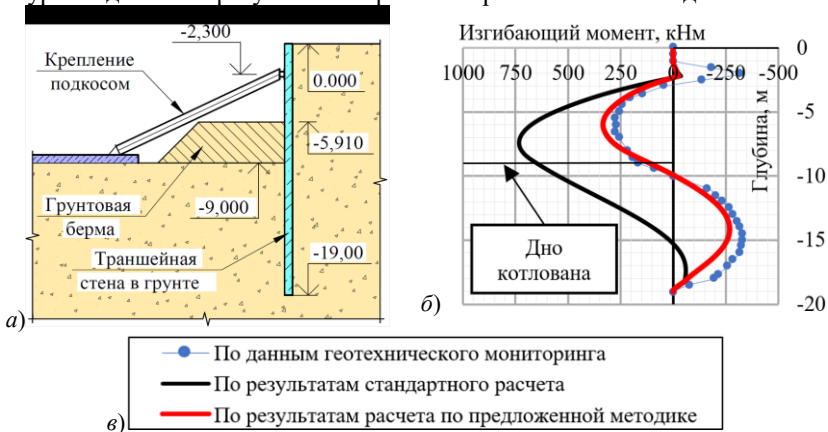


Рисунок 11. а) схема разработки котлована на рассматриваемом объекте нового строительства; б) результирующий график сопоставления натуральных данных с результатом расчетов различными методами; в) схема обозначений на графике Б

Результаты выполненных расчетов и сопоставления с материалами наблюдений было подтверждено, что предложенный метод расчета обеспечивают удовлетворительную сходимость с данными геотехнического мониторинга – расхождение не превышает 15%.

С целью оценки экономического эффекта от учета образования избыточных поровых давлений в слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах при расчетах ограждений котлована были выполнены сравнительные расчеты при различных глубинах котлованов. Рассмотренные инженерно-геологические условия и варианты глубин и конструкций ограждения котлована приведены на рис. 12.

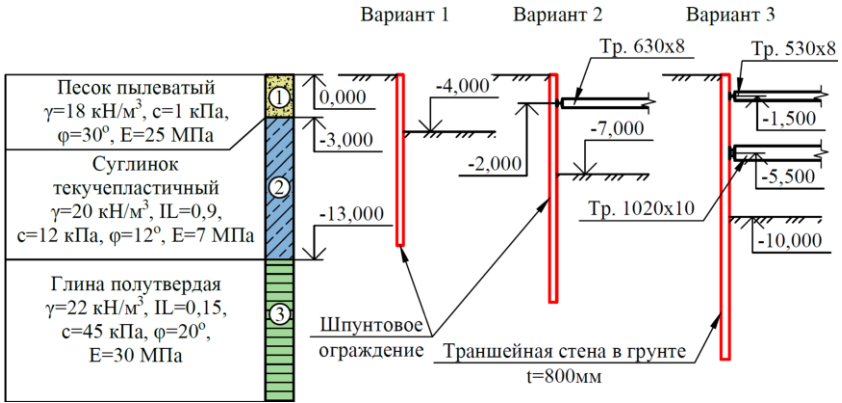


Рисунок 12. Инженерно-геологические условия и расчетные варианты для оценки экономического эффекта от учета образования избыточных поровых давлений

При использовании различных расчетных постановок использовались одинаковые распорные системы котлованов, а также рассматривались аналогичные конструкции ограждений (для вариантов 1 и 2 – шпунтовое ограждение, для варианта 3 – траншейная стена в грунте толщиной 800 мм). По результатам расчетов определялась требуемая длина ограждения котлована для обеспечения устойчивости и требуемый профиль шпунтового ограждения / армирование стены в грунте по результатам вычисления усилий в ограждающей конструкции. Результаты выполненных расчетов сведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты сопоставительных расчетов с использованием стандартной и разработанной расчетных методик

№	По результатам стандартного расчета		По результатам расчета по предложенной методике		Снижение материалоемкости
	Длина ограждения, м	Профиль шпунта/Рабочее арм. СВГ	Длина ограждения, м	Профиль шпунта/Рабочее арм. СВГ	
1	15	VL 605A	12	VL 603A	36%
2	16	Л5	14	Л4	32%
3	20	Ø36/ш.150мм	18	Ø28/ш.150мм	10%/ 45%*

* в числителе – снижение расхода бетона, в знаменателе – арматуры.

По результатам выполненных расчетов показано, что учет образования избыточных поровых давлений позволяет сократить материалоемкость конструкций ограждения котлована на 30–45%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ существующих исследований показывает необходимость учета недренированного поведения слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов при расчете давления грунта на ограждения котлованов. При этом точные решения теории предельного равновесия грунтов для оценки активного и пассивного давлений грунта при реализации активного и пассивного давлений отсутствуют.

2. В ходе экспериментальных исследований поведения слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов зафиксированы снижение эффективных напряжений всестороннего обжатия и рост избыточных поровых давлений при приложении сдвигающих нагрузок в недренированных условиях, что приводит к снижению сопротивления сдвигу образцов грунта. Снижение эффективных давлений обжатия образцов грунта при сдвиге количественно оценивается с помощью коэффициента порового давления Скемптона A_f . На основании экспериментальных исследований предложена корреляционная зависимость позволяющая выполнить оценку коэффициента порового давления Скемптона в зависимости от показателя консистенции грунта I_L .

3. На основании существующих методов расчета разработано и математически формализовано обобщение теории предельного равновесия водонасыщенного грунта, учитывающее зависимость величин избыточных поровых давлений от действующих сдвиговых нагрузок. Установлено качественное и количественное влияние избыточных поровых давлений на величину и характер распределения давления слабого водонасыщенного пылевато-глинистого грунта на ограждение котлована. Проведенные расчеты показали, что образование избыточных поровых давлений приводит к существенному росту величины активного давления, наиболее существенно зависящего от полезной нагрузки по бровке котлована. Анализ пассивного сопротивления выявил изменение характера его распределения по глубине: наблюдается замедление роста давления по глубине и формирование нового компонента – давления от веса вынуженного грунта. Предложена и верифицирована методика адаптации параметров расчетных схем метода конечных элементов (МКЭ) для учета выявленных особенностей.

4. Сопоставление результатов расчетов ограждения котлована с данными геотехнического мониторинга показало, что использование предложенной методики оценки активного и пассивного давлений слабого водонасыщенного пылевато-глинистого грунта показывает удовлетворительную сходимость с данными геотехнического мониторинга, расхождения в рассмотренных случаях не превысило 15%.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в ВАК:

1. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полунин В.М., **Башмаков И.Б.**, Паскачева Д.А. Математическое моделирование работы плитных элементов при совместной работе с грунтовым основанием в условиях плоской деформации // Жилищное строительство. – 2024. – № 11. – С. 37–46. – DOI: 10.31659/0044-4472-2024-11-37-46.

2. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Осокин А.И., Калач Ф.Н., **Башмаков И.Б.** Обеспечение безопасного строительства в условиях плотной городской застройки исторического центра г. Санкт-Петербурга с использованием мониторинга (на примере Шуваловского дворца) // Геотехника. – 2023. – Т. XV, № 4. – С. 44–59.

3. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., **Башмаков И.Б.**, Паскачева Д.А., Кравченко П.А. Влияние механизма упрочнения на результаты расчета ограждений котлована в условиях Санкт-Петербурга // Строительство: наука и образование. – 2025. – Т. 15, Вып. 1. – Ст. 6. – DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.6.

4. Полунин В.М., Дьяконов И.П., **Башмаков И.Б.**, Болотов Д.А. Решение задачи установившейся фильтрации грунтовых вод методом конечных элементов // Геотехника. – 2023. – Т. XV, № 4. – С. 6–17. – DOI: 10.25296/2221-5514-2023-15-4-6-17.

5. Mangushev, R. A. Numerical modeling of pit excavation with account for regional peculiarities of mechanical behavior of foundation soils / R. A. Mangushev, **I. V. Bashmakov**, D. A. Paskacheva // Construction and Geotechnics. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – P. 56-67.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

6. **Bashmakov, I.V.** (2023). Analytical methods for calculating passive ground pressure in the construction of ground berms. In CRC Press eBooks (pp. 1009–1014). <https://doi.org/10.1201/9781003299127-141>

7. Mangushev, R. A., Diakonov, I., **Bashmakov, I.**, & Paskacheva D. (2023). Calculation method of determining the earth pressure on the diaphragm wall considering the undrained soil behavior. In CRC Press eBooks (pp. 1015–1021). <https://doi.org/10.1201/9781003299127-142>

8. Dyakonov, I.P., **Bashmakov, I.**, Zavodchikova, M. B., & Cheremhina, A. (2023). Reverse analysis of geotechnical monitoring results for the estimation of the diaphragm walls stress-strain. In CRC Press eBooks (pp. 1022–1027). <https://doi.org/10.1201/9781003299127-143>

9. Osokin, A., Paramonov, M., Dyakonov, I. V., & **Bashmakov, I.** (2023). Determination of the bending moment in the diaphragm wall by inclinometric

observations. E3S Web of Conferences, 371, 02015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102015>

10. Kuznetsov, A., **Bashmakov, I.**, Murashova, D., & Savikov, R. (2023). Taking into account technological features of the diaphragm wall for deep pits. E3S Web of Conferences, 371, 02013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102013>

11. Mangushev, R. A., **Bashmakov, I.**, Paskiacheva, D., & Kvashuk, A. (2023). MATHEMATICAL MODELING OF UNDRAINED BEHAVIOR OF SOILS; . International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 19(1), 97–111. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2023-19-1-97-111>

Публикации в прочих изданиях:

12. Дьяконов, И. П. Оценка приведенных прочностных характеристик свайно-грунтового массива при расчете пассивного давления грунта / Дьяконов И. П., **Башмаков И. Б.**, Шеина Н. А. // Components of Scientific and Technological Progress. – 2024. – № 5(95). – С. 8-15.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 07.10.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 112.

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

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