

На правах рукописи



БРЫКСИН ВИТАЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА В
АКТИВНОЙ ЗОНЕ НА ГИБКИЕ ПОДПОРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ИХ
ДЕФОРМАЦИЙ**

Специальность 2.1.2– Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича» (НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ Строительство»).

Научный руководитель: Кандидат технических наук
Колыбин Игорь Вячеславович

Официальные оппоненты: **Цимбельман Никита Яковлевич**
доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
Университет» (ДВФУ),
департамент геоинформационных технологий,
профессор, и.о. директора

Ким Марина Семёновна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет» (ВГТУ),
кафедра строительных конструкций, оснований и
фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ),
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «22» апреля 2026 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НИЦ Строительство» по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «__» февраля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 54.1.002.01,
кандидат технических наук



Смирнова Л. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время при расчете гибких подпорных конструкций в грунте, как правило, используются классические методы определения бокового давления грунта на конструкцию, исходящие из предпосылок теории предельного равновесия. При этом предельные величины давления грунта на гибкую стенку (активного и пассивного давления) не зависят от характера и интенсивности деформаций подпорной конструкции.

Многочисленные результаты лабораторных экспериментов и натурных измерений свидетельствуют о том, что фактические эпюры давления грунта на гибкие подпорные стены отличны от прямолинейной формы и зависят от деформаций конструкции. Несмотря на значительное количество имеющихся теоретических и экспериментальных исследований, на текущий момент вопрос определения бокового давления грунта на гибкие подпорные стенки ещё окончательно не решен и нормативно не регламентирован.

Актуальность работы обусловлена необходимостью определения бокового давления грунта и расчета внутренних усилий в гибких подпорных конструкциях с учетом его перераспределения в зависимости от характера и интенсивности их деформаций.

Степень разработанности темы исследования

Проблемой определения давления грунта на подпорные конструкции занимались:

Алексеев А.Г., Ангельский Д.В. Аргунов П.П., Архангельский М.М., Безухов Н.И., Березанцев В.Г., Бескин М.Г., Беспрозованная И.М., Бринч Хансен Й, Буссинеск Ж.В., Быковский В.Н., Винклер Э., Гаргер Б.Н., Гениев Г.А., Голушкевич С.С., Гольдштейн Л.М., Гольдштейн М.Н., Гончаров Ю.М., Грошев М.Е., Гуткин Ю.М., Дуброва Г.А., Дубровский М.П., Зарецкий Ю.К., Како А., Калинович Б.Ю., Караулов А.М., Керизель Ж., Кеттер Ф., Ким М.С., Клейн Г.К., Колыбин И.В., Конюхов Д.С., Королев К.В., Кречмер В.В., Кулон Ш., Кульман К., Лазарева И.В., Лазебник Г.Е., Леви М., Ломбардо В.Н., Малиев А.С., Малышев М.В., Мангушев Р.А., Минаков Д.К., Мор О., Муллер Р.А., Новоторцев В.И., Оде И., Пек Р., Петтерсон К., Халтин С., Покровский Г.И., Понселе Ж.В., Поспехов В.С., Прокофьев И.П., Пузыревский Н.П., Раюк В.Ф., Ребхан Г., Ренкин У., Ресаль Ж., Роско Х., Роу П., Рудых О.Л., Соколовский В.В., Сахновский А.М., Синельников В.В., Снитко Н.К., Терцаги К., Урбан И.В., Усков Н.Н., Федоровский В.Г., Феллениус В., Флаат К.С., Христофоров В.С., Цагарели З.В., Цимбельман Н.Я., Чеботарев Г.П., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шихиев Ф.М., Шулятьев О.А., Энгессер Ф. и другие.

В современных нормативных документах боковое давление грунта регламентируется определять для стадии образования поверхности скольжения, что соответствует теории Кулона.

Предельные значения бокового давления на гибкую стенку при этом рассматриваются вне зависимости от величин и характера деформаций самой подпорной конструкции.

Цель работы – разработка метода расчёта бокового давления несвязного грунта в активной зоне на гибкие подпорные конструкции с учётом характера и величины их деформаций и упругопластической работы грунтового массива.

Для реализации поставленной цели в рамках работы сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Обзор и анализ существующих исследований, содержащих способы определения и законы распределения активного давления несвязного грунта на подпорные конструкции.
2. Обобщение и анализ экспериментальных исследований по определению давления грунта на гибкие подпорные конструкции.
3. Проведение экспериментальных исследований модели гибкой подпорной стенки в лабораторных условиях с учетом её работы по различным кинематическим схемам.
4. Теоретические и расчетные исследования работы гибкой подпорной стенки и влияния изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива в пределах призмы обрушения на распределение бокового давления грунта.
5. Разработка численно-аналитического метода определения бокового давления несвязного грунта с учетом его перераспределения по высоте гибких подпорных конструкций в зависимости от характера и величин их деформаций.
6. Верификация разработанного метода посредством сравнительного анализа расчётных и экспериментальных данных.

Научная новизна работы

1. Разработан численно-аналитический метод определения бокового давления несвязного грунта на гибкие подпорные конструкции, в основу которого положены аналитические зависимости, полученные в результате комплекса экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.
2. Получено дифференциальное уравнение изгиба подпорной стенки на упругом основании, в котором величина давления грунта на стену со стороны массива зависит от начального напряженного состояния в массиве, прочностных характеристик грунта и деформаций ограждающей конструкции.
3. Выделена феноменологическая модель взаимодействия несвязного грунта с деформируемой подпорной конструкцией.

Теоретическая значимость работы

1. Разработана экспериментально подтвержденная модель наклонных блоков для несвязных грунтов, которая позволяет по-новому описать механизм взаимодействия грунтового массива с ограждающими конструкциями.
2. Установлен закон распределения бокового давления грунта в активной зоне, учитывающий деформации гибких подпорных конструкций, что существенно уточняет существующие методы расчета.
3. Выявлены закономерности распределения контактных усилий на границах поверхностей скольжения (или их проекциях в допредельном состоянии), соответствующих зонам локальных смещений в пределах призмы обрушения.
4. Полученные результаты расширяют теоретические представления о работе гибких подпорных конструкций в несвязных грунтах и создают основу для совершенствования методов их проектирования.

Практическая значимость работы

1. Разработан метод, позволяющий получить уточнённые значения внутренних усилий в подпорной стенке по сравнению с традиционными расчётами, что обеспечивает более экономичное и надежное проектирование конструкций благодаря учёту реального напряжённого состояния грунтового массива.
2. Создана расчетная программа для персональных компьютеров, позволяющая достоверно определять распределение давления грунта на ограждения котлованов, величины их деформаций и внутренних усилий в элементах конструкции.
3. Разработаны и внедрены в практику проектирования рекомендации по учету перераспределения бокового давления в активной зоне для гибких подпорных стенок с верхним ярусом распорного крепления.

Методология и методы исследования

Теоретической и методологической базой для исследования являлись многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов по тематике определения активного давления грунта на подпорные конструкции и экспериментальные данные, полученные специалистами на протяжении многих лет. Экспериментальные модельные исследования выполнялись методом физического моделирования с использованием специализированного лабораторного испытательного стенда. Численные эксперименты проводились с помощью математического моделирования на ЭВМ методом конечных элементов с использованием нелинейных геомеханических моделей грунта.

Положения, выносимые на защиту

1. Феноменологическая модель взаимодействия несвязного грунта с деформируемой подпорной конструкцией, позволяющая усовершенствовать подход к расчету бокового давления на гибкие конструкции с учетом их деформаций.
2. Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, посвященных изучению закона распределения бокового давления несвязного грунта на гибкие подпорные конструкции в зависимости от их деформаций.
3. Численно-аналитический метод наклонных блоков для определения бокового давления грунта на подпорные стенки в активной зоне, учитывающий его перераспределение в зависимости от величин и характера деформаций конструкций.
4. Рекомендации, обеспечивающие учет перераспределения бокового давления в активной зоне для гибких подпорных стенок с верхним распорным креплением путем модификации классических методов расчета введением поправочных коэффициентов.

Степень достоверности основных положений диссертационной работы обеспечивается:

1. Применением общеизвестных теоретических предпосылок научных дисциплин и использованием сертифицированных геотехнических программных комплексов, апробированных при проектировании и строительстве большого числа объектов и выполнении исследований.
2. Хорошим соответствием результатов сопоставительных расчетов, основанных на предложенном методе расчета бокового давления грунта, как с экспериментальными данными прошлых лет, так и результатами собственных исследований.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- I Международный строительный конгресс «Наука. Инновации. Цели. Строительство», г. Москва, 11-13 апреля 2023 г.;
- X Международный строительный форум 100+ Techno Build, г. Екатеринбург, 3-6 октября 2023 г.;
- I Сибирская (Байкальская) международная геотехническая конференция, г. Улан-Удэ, 12-16 сентября 2025 г.;
- Научно-технический семинар Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (РОММГиФ), г. Москва, 13 марта 2025 г.

Внедрение результатов исследования

Результаты исследования были использованы при разработке нормативного документа СП 381.1325800.2018 «Сооружения подпорные. Правила проектирования» в части Приложения Н «Рекомендации по определению активного давления несвязного грунта на гибкие подпорные конструкции в зависимости от их деформаций».

Публикации

Результаты основных исследований по теме диссертации были опубликованы в 5 научных статьях, из них 3 – в рецензируемых изданиях из перечня журналов ВАК РФ, и 1 – в материалах конференции.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 235 источников, в том числе 98 на иностранных языках. Общий объем работы составляет 189 страниц, 102 рисунка и 24 таблицы.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует пунктам 3, 8 паспорта специальности 2.1.2 «Основания и фундаменты, подземные сооружения».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика диссертационного исследования, обоснована актуальность избранной темы, определены цель и задачи работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава содержит анализ современного состояния вопроса и обзор исследований, посвященных давлению грунта на подпорные конструкции. В первом разделе главы представлен обзор и анализ существующих методов определения давления грунта на подпорные конструкции. Содержанием второго раздела является анализ и обобщение экспериментальных данных о давлении грунта на гибкие подпорные стены, накопленных за предыдущие годы.

Анализ существующих методов расчёта бокового давления грунта на подпорные конструкции выявил, что нормативно-техническая литература регламентирует определение активного давления (включая расчёт гибких стенок) для стадии формирования поверхности скольжения. Данный подход основывается на теории Кулона и применяется вне зависимости от характера и интенсивности деформаций подпорной конструкции.

Такая методика для ряда расчётных схем не в полной мере адекватно описывает фактическую картину распределения давлений, что находит своё подтверждение в экспериментальных исследованиях.

Многочисленные лабораторные и натурные исследования демонстрируют несоответствие фактических эпюр бокового давления грунта на гибкие подпорные конструкции классическим теориям. Установлено, что реальное распределение давления имеет нелинейный характер и существенно зависит от величины и характера деформаций ограждения.

Комплексный анализ существующих методов расчета подтверждает отсутствие универсального решения, адекватно описывающего перераспределение бокового давления по высоте гибкой стенки в процессе её деформирования, что позволило сформулировать цель работы – разработка метода расчёта бокового давления несвязного грунта на гибкие подпорные конструкции с учётом характера и величины их деформаций и упругопластической работы грунтового массива, а также поставить задачи для её реализации.

Во **второй** главе представлены результаты экспериментальных исследований модели гибкой подпорной стенки в лабораторных условиях с учетом её работы по различным кинематическим схемам.

Экспериментальные исследования для модели гибкой подпорной стенки выполнялись методом физического моделирования с использованием специального лабораторного испытательного стенда. Конструктивно лабораторный стенд выполнен в виде лотка с

внутренними размерами: длина – 722 мм; ширина – 156 мм; высота – 536 мм, снабжённого прозрачными передними и задними стенками, что дает возможность выполнять фотофиксацию поведения модели на любом этапе испытаний и выполнять интерпретацию опытных результатов как методами цифровой обработки образов, так и на основе принципов фотограмметрии (Рисунок 1а). В качестве модели гибкой подпорной стенки применялся лист оцинкованной стали толщиной 0,35 мм, шириной 155 мм, длиной 350 мм. Распорная система моделировалась брусками из фанеры сечением 10х10 мм, длиной 310 мм.

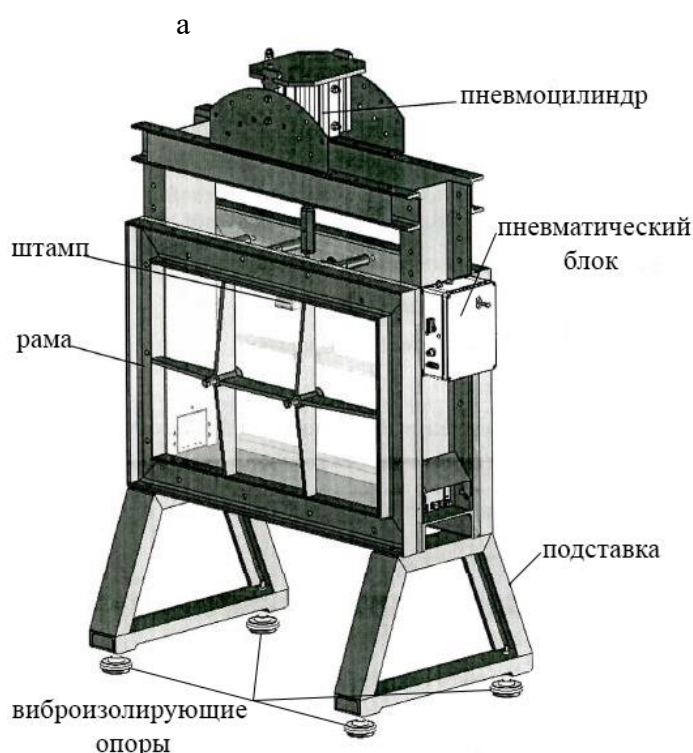


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенда (лотковой установки) (а) и общий вид лаборатории с оборудованием (б)

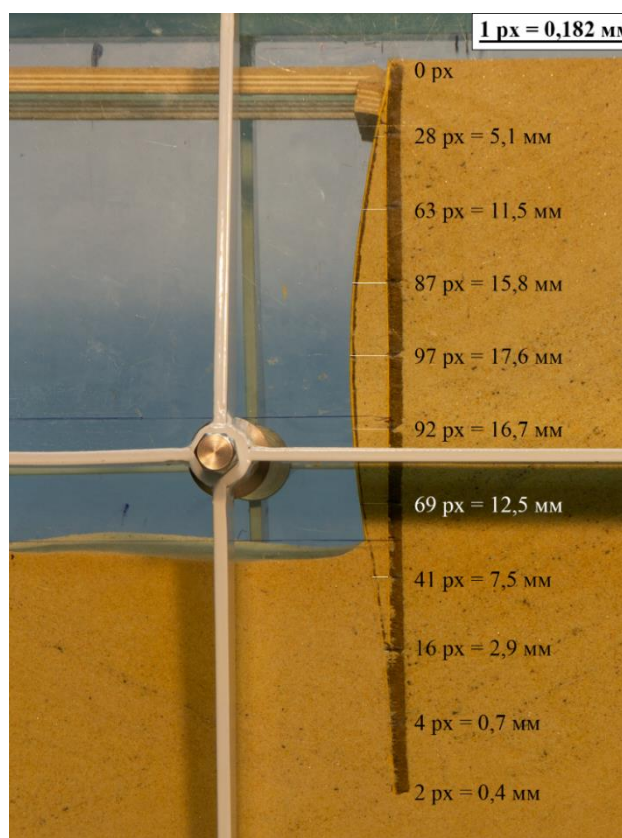
В качестве модельного грунта засыпки применялся песок средней крупности в соответствии с ГОСТ 215100-2020. Согласно ГОСТ 12536-2014 определялся гранулометрический состав песчаного грунта, применяемого в опытах, и исследовались его физические характеристики в соответствии с ГОСТ 5180-2015. Угол внутреннего трения песчаного грунта определялся путем прямого замера и составил 30° . Песок однородный, не включающий в себя пылеватых частиц. Грунт сухой, влажность минимальна, что практически исключает влияние сцепления. Плотность грунта засыпки – $1,54 \text{ г/см}^3$, плотность частиц грунта – $2,66 \text{ г/см}^3$, природная влажность – 0,001 д.е.

Экспериментальное исследование выполнялось на физической модели в песчаном грунте с соблюдением необходимых и достаточных критериев подобия для качественного анализа.

Помимо автоматизированного испытательного комплекса использовалось осветительное оборудование и цифровой фотоаппарат на штативе. Общий вид лабораторного стенда в процессе проведения экспериментальных опытов представлен ниже (Рисунок 1б).

Первая серия экспериментальных работ посвящалась качественной оценке закономерности распределения бокового давления несвязного грунта по высоте стенки в зависимости от величин и характера её деформаций. Для различных кинематических схем работы подпорной стенки – консольной и с закреплением верхнего конца – осуществлялось измерение горизонтальных перемещений конструкции с последующим перерасчетом в эпюры боковых давлений методом последовательного дифференцирования.

Перед началом и после полной разработки грунта выполнялась фотофиксация исходного положения модельной стенки и её упругой линии после деформирования. Наличие двух указанных фотоснимков позволяет произвести их совмещение для дальнейшей обработки и непосредственного измерения горизонтальных перемещений подпорной конструкции при помощи графического программного обеспечения (Рисунок 2).



px – пиксель

Рисунок 2 – Пример совмещения фотоснимков «до» и «после» экскавации. Измерение горизонтальных перемещений

Анализ эпюр бокового давления грунта, полученных дифференцированием, позволяет сделать вывод о перераспределении давления грунта вдоль стенки в зависимости от характера её

деформаций. Эпюры давлений в случае консольной схемы близки по форме и величинам к теоретически расчетной треугольной эпюре, полученной по методу Кулона (Рисунок 3а). Опыты, проведенные по схеме с закреплением верхнего конца стенки, показывают, что экспериментальные эпюры давлений грунта отличаются от расчетных, определяемых в соответствии с теорией Кулона (Рисунок 3б).

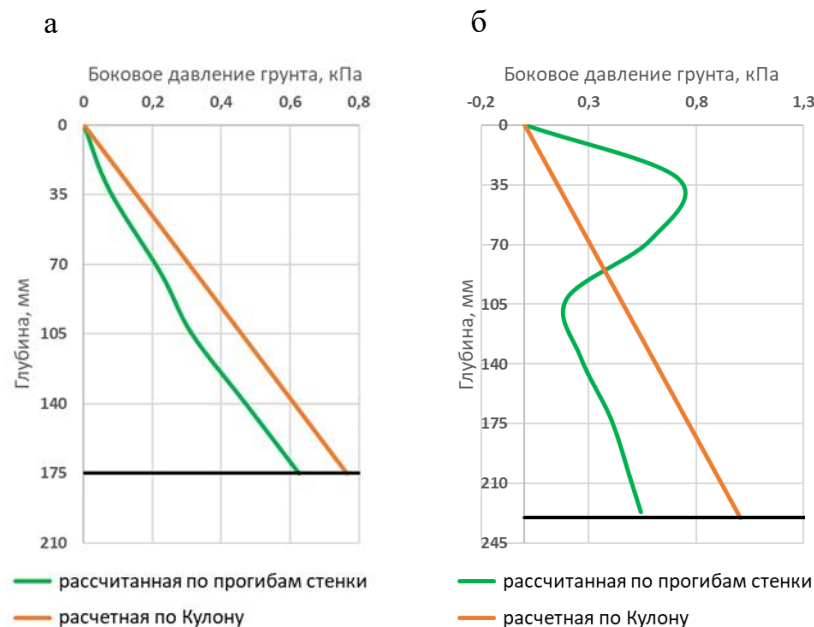


Рисунок 3 – Эпюры давления, рассчитанные по прогибам стенки в сопоставлении с эпюрой активного давления, определенной по классической теории Кулона:

а – консольная схема, б – схема с закреплением верхней части

Вторая серия опытов ставила целью определение характера деформаций грунта в пределах призмы обрушения для различных кинематических схем, соответствующих моделям первой серии. Данная серия предполагала предварительное нанесение в моделируемом массиве грунта разметочных линий, отсыпаемых из окрашенного песка (Рисунок 4а).

Экспериментальные исследования, направленные на анализ механизмов смещения грунта засыпки, показали, что различным кинематическим схемам работы подпорной конструкции соответствует определенный характер деформирования несвязного грунта в пределах призмы обрушения. Для консольной схемы происходит равномерное смещения условных блоков грунта, когда верхние слои грунта сползают по нижележащим. Иная картина наблюдается для схем работы стенки с закреплением верхнего конца, которая характеризуется максимальными смещениями грунта в пролетной части конструкции. При этом силы взаимодействия между смещаемыми слоями грунта по величинам и направлениям, очевидно, будут зависеть от характера деформаций стенки.

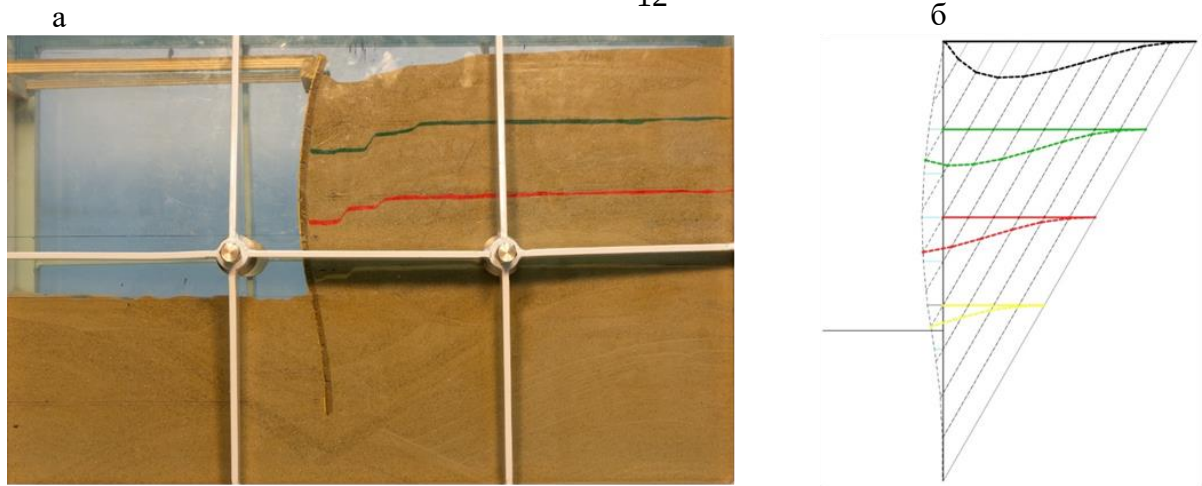


Рисунок 4 – Результаты второй серии опытных работ: а – деформированная схема, полученная для модели подпорной стенки, закрепленной в верхней части распоркой, б – геометрические построения, соответствующие схеме опыта, включающие в себя совмещение исходной, деформированной схемы подпорной стенки и массива грунта засыпки

Проделанные геометрические построения (Рисунок 4б) и их сопоставление с картиной экспериментальных исследований показали, что для разработки метода определения бокового давления грунта следует рассмотреть расчетную схему, основанную на анализе взаимодействия условных блоков грунта с учетом их локальных смещений внутри призмы обрушения в процессе деформирования конструкции. Очевидно, что для получения аналитических зависимостей между величинами бокового давления грунта и деформациями стенки необходимо проанализировать силы взаимодействия по границам смещаемых условных блоков грунта и установить связь между ними и деформациями.

В **третьей** главе представлены результаты численных исследований работы гибкой подпорной стенки.

В рамках численного эксперимента была выполнена серия расчетов для подпорной конструкции широкого диапазона изгибной жесткости: $EI=10000-1000000$ кНм². По итогам численного моделирования можно сделать заключение, что результаты конечно-элементных расчётов в целом согласуются с выводами многочисленных лабораторных и натурных экспериментов относительно закономерностей распределения бокового давления грунта в зависимости от различных кинематических условий деформирования подпорных стен. Для закрепленных стен наблюдается отклонение эпюр давления от треугольных, соответствующих классической теории.

В заключительном разделе главы исследовались величины сил взаимодействия на границах смещаемых относительно друг друга областей грунта и их зависимость от деформаций подпорной стенки. Для этого выполнялось моделирование для различных кинематических

условий работы подпорной стенки, а именно консольной схемы и схемы с закреплением верхнего конца (Рисунок 5).

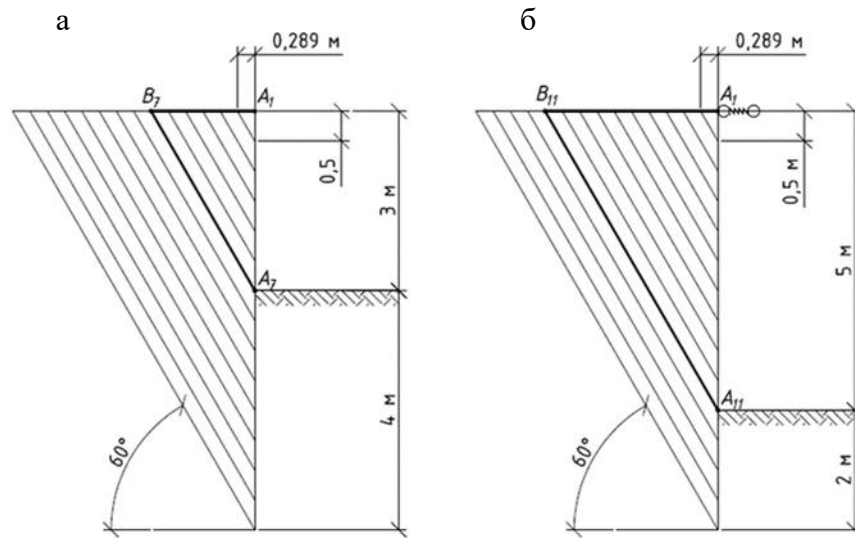


Рисунок 5 – Расчетные схемы: а – консольная схема; б – схема с закреплением верхнего конца

На основании проведенных расчетов строились зависимости значений T_i и соотношений T_i/N_i от различных видов деформаций, где

T_i – равнодействующие касательных сил на i -ой плоскости;

N_i – равнодействующие нормальных сил на i -ой плоскости;

Ниже представлены характерные графики зависимости соотношений T_i/N_i от углов поворотов стенки для схем деформирования подпорных конструкций: консольной (Рисунок 6а) и с закреплением верхнего конца (Рисунок 6б).

Основным результатом исследований в рамках данного раздела является вывод о том, что на границах наклонных блоков грунта в пределах призмы обрушения предельное состояние в общем случае не достигается. В частности, для расчётных схем с закреплённым верхним концом стенки наблюдается упругое равновесие, то есть работа массива грунта происходит на допредельной стадии. Также установлено, что для общего случая деформирования стенки может быть использована S-образная зависимость касательных усилий от углов поворота, характеризующаяся наличием двух предельных асимптот, соответствующих критическим состояниям.

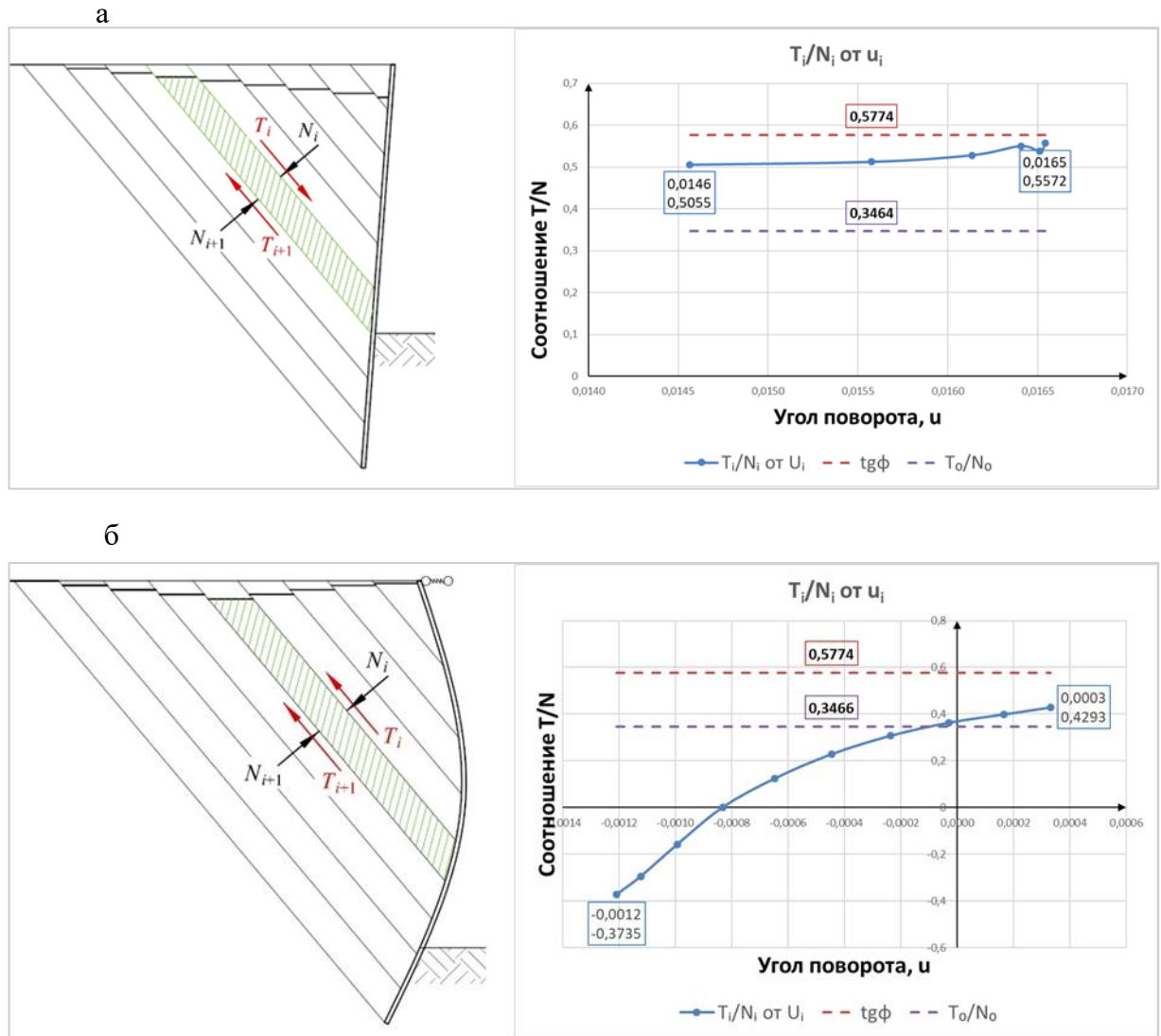


Рисунок 6 – График зависимости соотношения касательных и нормальных сил для плоскостей скольжения или их проекциям в допредельной стадии: а – консольная схема; б – схема с закреплением верхнего конца; линия T_0/N_0 – постоянная величина соотношения касательных и нормальных сил для состояния покоя; линия $tg \phi$ – постоянная величина соотношения касательных и нормальных напряжений в предельном случае

Четвёртая глава посвящена разработке нового метода расчета бокового давления грунта в активной зоне на гибкие подпорные конструкции в зависимости от их деформаций. В основу метода положено аналитическое решение, полученное в результате комплекса экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

С целью разрешения противоречия между результатами определения активного давления грунта по классическим методам и данными экспериментальных исследований была выдвинута идея феноменологической модели взаимодействия несвязного грунта с гибкой подпорной конструкцией (Рисунок 7). Модель подразумевает определение величин давления грунта на подпорную стенку в зависимости от её деформаций (Рисунок 7 а, б, в). Суть модели заключается том, что в отличие от классических теорий в пределах призмы обрушения существуют локальные

смещения наклонных блоков и, как следствие, перераспределение давлений по высоте стенки в зависимости от характера и величин этих локальных смещений. Направления и величины сил взаимодействия между наклонными блоками (Рисунок 7 г, д, е), определяющие степень и характер распределения давления грунта, зависят от особенностей деформирования гибкой стенки.

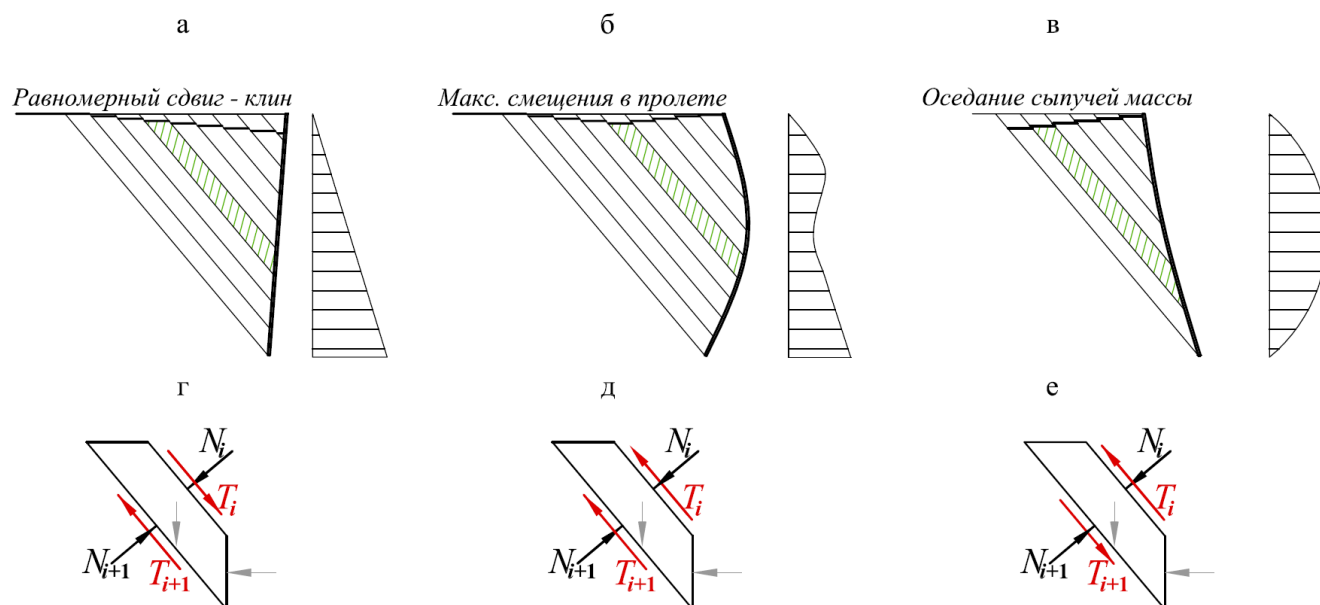


Рисунок 7 – Феноменологическая модель взаимодействия несвязного грунта с деформируемой подпорной конструкцией

Вышеописанная феноменологическая модель перемещения сыпучего грунта в пределах призмы обрушения подтверждается серией испытаний, рассмотренных во второй главе. Таким образом, модель может быть использована для разработки метода расчета, схема построения которого представлена ниже.

На рисунке Рисунок 8 представлена расчетная схема абсолютно гладкой стенки, используемая для метода наклонных блоков.

Массив грунта за подпорной стенкой разбивается на n элементарных наклонных блоков высотой λ . Блоки наклонены к горизонту под углом $\theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$, что соответствует направлению линий скольжения в схеме Кулона при активном предельном состоянии. Далее рассматриваются усилия, действующие на один такой блок (i -й блок), который передаёт давление на стенку на определённой глубине y и выделяется 6 неизвестных:

- T_i, N_i, Q_i – неизвестные равнодействующие;
- x_i, y_i – геометрические характеристики, описывающие положение равнодействующих нормальных напряжений N_i и Q_i ;
- u_i – угол поворота сечения подпорной стенки, определяющий соотношения T_i и N_i .

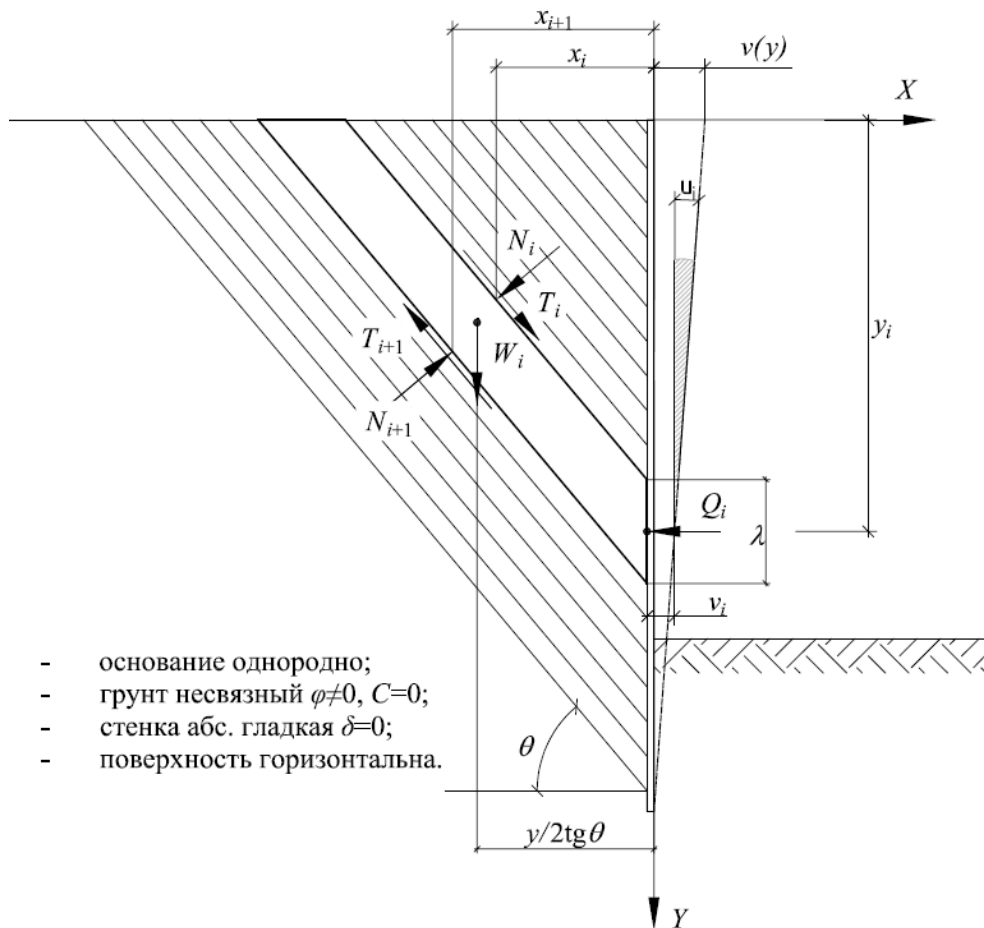


Рисунок 8 – Расчётная схема метода наклонных блоков

Угол поворота, как известно, представляет собой первую производную прогиба стенки:

$$u = \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

где v – горизонтальные смещения (прогиб) подпорной стенки.

Если решать задачу численно, при разбиении массива грунта на n блоков будем иметь $6n$ неизвестных.

Для решения задачи можно использовать:

- $3n$ уравнений равновесия элементарных блоков;
- n условий эмпирической зависимости $T(u)$;
- n уравнений изгиба балки в конечно-разностной форме;
- n допущений о приложении равнодействующих Q_i , которые ввиду малости λ можно считать приложенными в средних линиях элементарных блоков, то есть при численном подходе эпюра давлений грунта на подпорную стену заменяется кусочно-постоянной функцией.

Таким образом, для $6n$ неизвестных имеем $6n$ зависимостей, то есть задача может быть однозначно решена. Блок-схема метода приведена на рисунке 9.

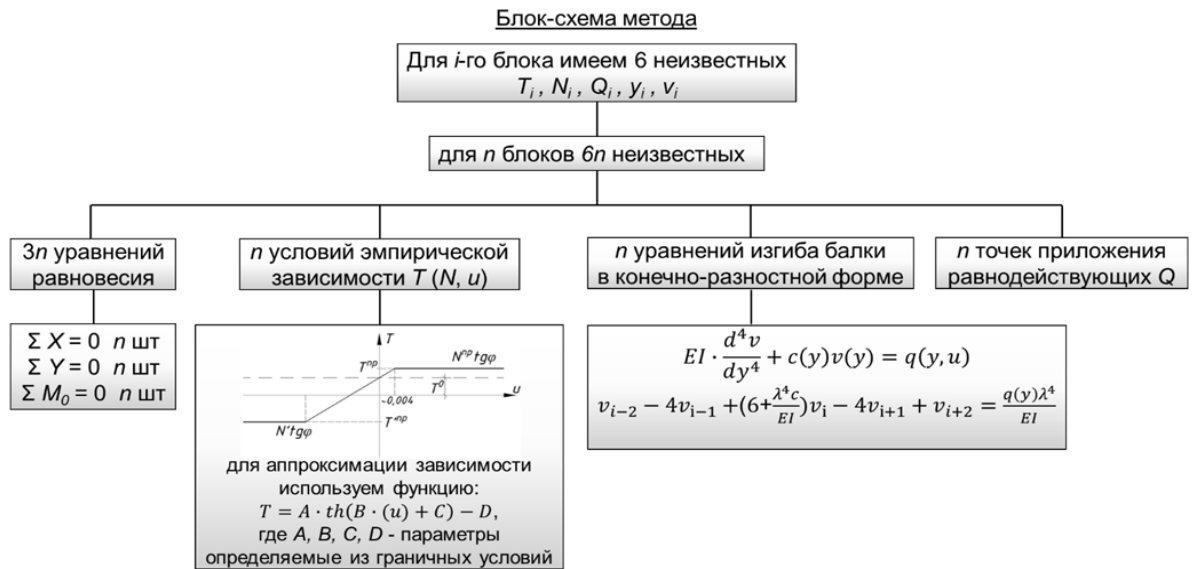


Рисунок 9 – Блок-схема метода

Для реализации предлагаемого метода определения бокового давления грунта необходимо получить дифференциальное уравнение изогнутой оси подпорной стенки, в котором внешняя распределенная нагрузка представляет собой боковое давление грунта, зависящее от начального напряженного состояния в массиве, прочностных характеристик грунта и деформаций ограждающей конструкции.

Из условий равновесия i -го элементарного блока можно выразить равнодействующую бокового давления грунта:

$$Q_i = \gamma \cdot y_i \cdot \lambda - \frac{T_{i+1} - T_i}{\cos \theta}. \quad (2)$$

Значения равнодействующих касательных сил в (2) на границах элементарных блоков зависят от характера и величины их смещения относительно друг друга. В общем случае зависимость касательных напряжений в грунте от интенсивности сдвиговых деформаций может быть представлена идеализированной кусочно-линейной зависимостью (Рисунок 10а).

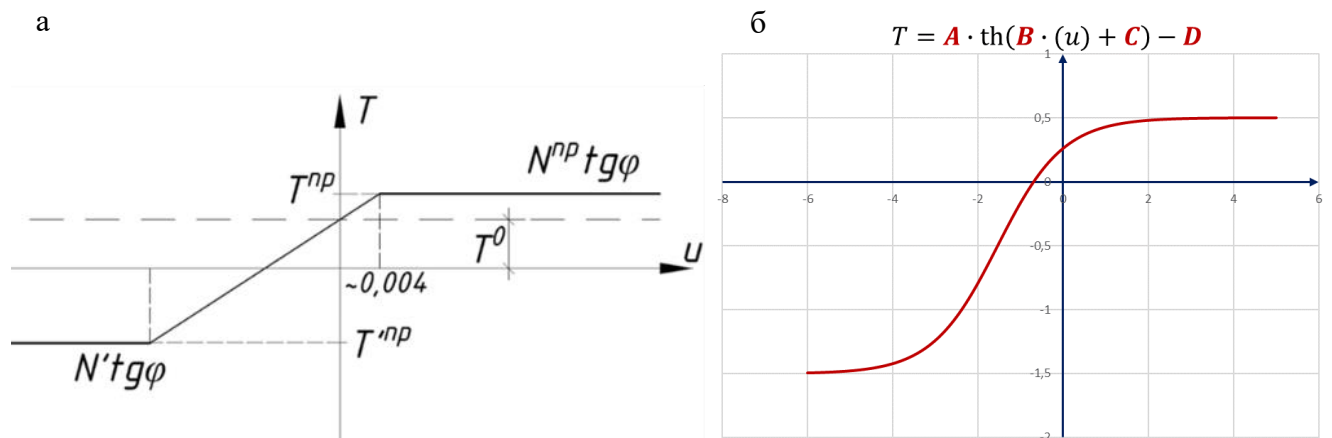


Рисунок 10 – Кусочно-линейная зависимость сил трения от угла поворота стенки $T(u)$ (а) и её аппроксимация функцией гиперболического тангенса (б)

Для аналитической аппроксимации указанной зависимости $T(u)$ удобно использовать функцию гиперболического тангенса (Рисунок 10б), в виде:

$$T = A \cdot \text{th}(B \cdot (u) + C) - D, \quad (3)$$

где A, B, C, D – искомые параметры.

Параметр амплитуды графика аппроксимирующей функции задаётся предельными значениями касательных напряжений и может быть выражен:

$$A = \frac{T_{i+1}^{\text{np}} + T_{i+1}'^{\text{np}}}{2}. \quad (4)$$

Различная степень обжатия наклонных блоков для каждой схемы деформирования приводит к различию в предельном сопротивлении сдвигу правой и левой ветвей. Это проявляется в виде смещения ветвей вдоль оси ординат, которое количественно характеризуется параметром D :

$$D = A - T_{i+1}^{\text{np}}. \quad (5)$$

Для случая состояния покоя ($u = 0$), получаем параметр горизонтального смещения для графиков C :

$$C = \text{arth}\left(\frac{T^0 + D}{A}\right). \quad (6)$$

Наконец, параметр «растяжения» графика B определяется из критерия наступления предельного состояния, который предполагает асимптотическое приближение графика. Его расчет основан на условии, что при малых углах поворота $u \approx 0,001-0,005$ величина T стремится к своему предельному значению T_{np} .

В конечном итоге зависимость (3) для произвольного i -го блока грунта приобретает вид:

$$T_i = A_i \cdot \text{th}(B_i \cdot (u) + C_i) - D_i, \quad (7)$$

где T_i соответственно равнодействующая сил трения на верхней грани наклонного i -го блока грунта. Для нижней грани блока выражение аналогично.

Подставляя (7) в (2) мы получим выражение для определения равнодействующей бокового давления грунта Q_i в пределах высоты наклонного блока:

$$Q_i = \gamma \cdot y_i \cdot \lambda - \frac{A_{i+1} \cdot \text{th}(B_{i+1} \cdot (u) + C_{i+1}) - D_{i+1} - A_i \cdot \text{th}(B_i \cdot (u) + C_i) - D_i}{\cos \theta} \quad (8)$$

С учетом полученных зависимостей выведем уравнение изогнутой оси балки. В общем случае запишем уравнение балки на упругом основании:

$$EI \cdot \frac{d^4 v}{dy^4} + cv(y) = q(y) \quad (9)$$

Упругое основание, описываемое коэффициентом постели или упругого отпора, будем использовать для моделирования грунта, работающего в пассивной области со стороны котлована, также используются упругие опоры, моделирующие распорки или анкера,

удерживающих стену. Общая расчетная схема метода представлена ниже (Рисунок 11)

Подставляя (8) в (9) и имея в виду, что в пределах элементарного слоя:

$$q(y) = \frac{Q}{\lambda}, \quad (10)$$

где λ – интервал разбиения по высоте стены,

получим уравнение изгиба подпорной стенки, в котором величина давления грунта на стену со стороны массива зависит от начального напряженного состояния в массиве, прочностных характеристик грунта и деформаций ограждающей конструкции.

$$EI \cdot \frac{d^4 v}{dy^4} + c(y)v(y) = q(y, T(N(u), u)) \quad (11)$$

Полученное уравнение решается численно методом конечных разностей с учетом различных краевых условий. Для реализации предложенного метода был составлен численный алгоритм и написана программа, в которой решение поставленной задачи выполняется методом последовательных приближений (итераций). Решается контактная задача взаимодействия гибкой подпорной стенки с упругим основанием, описываемым в зоне отпора грунта переменным коэффициентом постели, увеличивающимся с глубиной, а в активной зоне выражением (8).

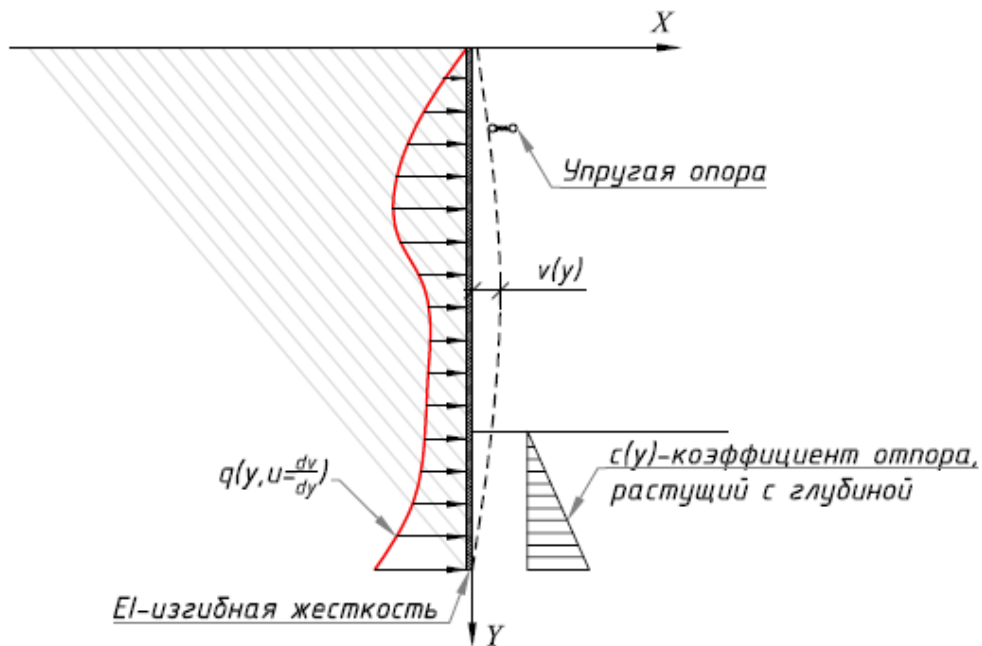


Рисунок 11 – Общая расчётная схема метода

В программе, разработанной в рамках диссертационной работы, реализованы алгоритмы, позволяющие определить боковое давление в зависимости от характера и величин деформаций подпорной стенки с учётом возникновения и перераспределения сил взаимодействия в пределах призмы обрушения грунта. Имеется возможность исследовать и контролировать практически все

расчетные величины и параметры, причем на каждой вычислительной итерации. Общий вид главного окна программы представлен на рисунке 12.

Ограждающая конструкция

Глубина котлована, y_1 м;

Заделка ниже дна котлована, y_2 м;

Жесткость на изгиб, EI кНм²;

Схема

☐ Консольная ☒ Анкерная

Распорка - Анкер

Глубина установки, h_1 м;

Жесткость, EA кН;

Длина, l_1 м;

Закрепление верхнего конца

☒ Свободный ☐ Шарнир ☐ Заделка

Закрепление нижнего конца

☒ Свободный ☐ Шарнир ☐ Заделка

Расчет **Сохранить**

Блоки **Графики**

Количество выполненных итераций = 13

Максимальное число итераций

Выход

Характеристики грунта

Удельный вес, γ кН/м³;

Угол внутреннего трения, φ град;

Сцепление, C кПа;

Коэффициент Пуассона, ν

Коэффициент пропорциональности (для определения коэффициента упругого отпора), K кН/м⁴;

Параметры расчета

Количество разбиений -

Точность -

Расчётная схема

$R = 107,8$ кН
 $x = 5,55$ м

Рисунок 12 – Общий вид главного окна программы

Разработанный метод расчета бокового давления грунта в зависимости от характера и интенсивности деформаций подпорной конструкции назван методом наклонных блоков.

В **пятой** главе с целью верификации предложенного метода выполнена серия сопоставительных расчетов с использованием метода наклонных блоков, реализованного в собственной программе. Найденные эпюры распределения бокового давления сопоставлялись с экспериментальными данными и результатами численного моделирования (Рисунок 13).

Сравнительный анализ экспериментальных данных с расчетными результатами показывает высокую степень соответствия в характере распределения бокового давления грунта. Наблюдаемое незначительное превышение расчетных значений давления над экспериментальными закономерно объясняется влиянием сил трения, возникающих на контактной поверхности между стенкой и грунтом засыпки.

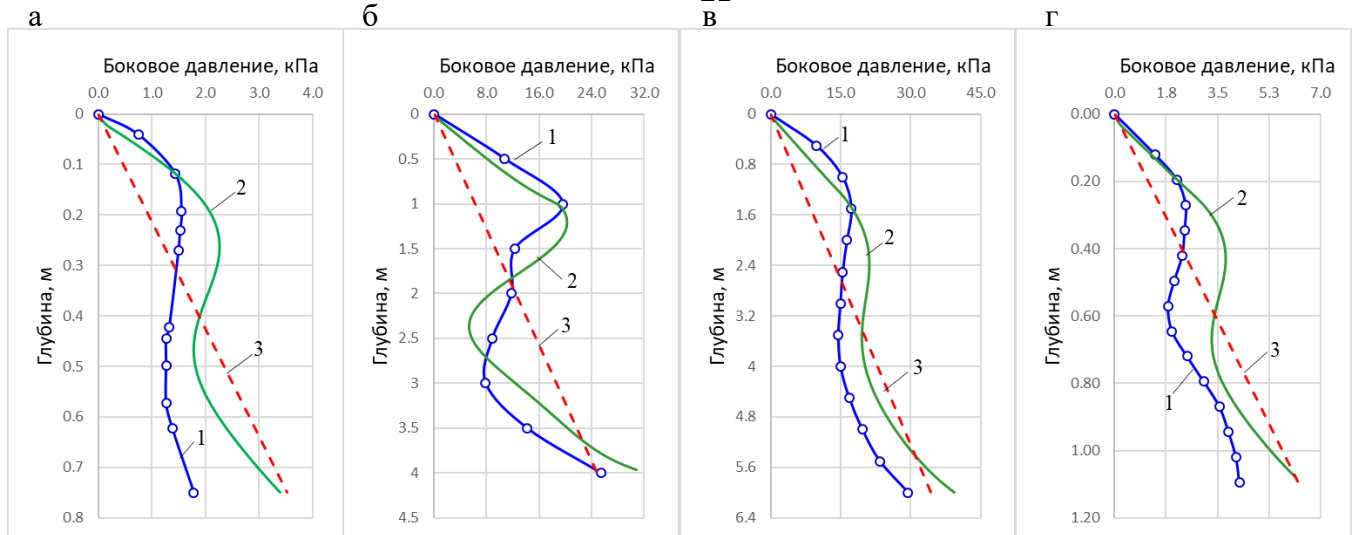


Рисунок 13 – Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными: а – П. Роу;

б – Ю.М. Гончарова; в – В.Ф. Раюка; г – Г.Е. Лазебника и Е.И. Чернышевой;

1 – опытная эпюра давления грунта; 2 – рассчитанная по методу наклонных блоков;

3 – по Кулону

Результаты сопоставления расчетов, выполненных методом наклонных блоков, и численного моделирования методом конечных элементов демонстрируют существенное сходство как в характере распределения бокового давления грунта, так и в количественных показателях давлений и перемещений подпорной конструкции. Полученные данные подтверждают возможность применения предложенного метода для определения давления на гибкие подпорные стенки, закрепленные в верхней части анкером или распоркой с учетом деформаций конструкции и взаимодействия наклонных блоков грунта.

В **шестой** главе работы предлагаются практические рекомендации по использованию результатов исследования. Методом наклонных блоков было проведено более 100 расчётов для характерных схем и конструкций, наиболее часто встречающихся в практике. Целью расчётов являлось получение таблиц поправочных коэффициентов и графиков, позволяющих определять перераспределение бокового давления грунта по высоте подпорной стенки.

В рамках главы представлен принцип работы с таблицами для определения бокового давления грунта на конкретных примерах.

Результаты проведенных вычислений показали, что расхождение между расчетами с использованием таблиц поправочных коэффициентов и методом наклонных блоков (реализованным в специализированном ПО) не превышает 3%. Такое незначительное отклонение подтверждает возможность применения табличного метода для практического применения при проектировании ограждений котлованов, стен подвалов, причальных больверков в песчаных грунтах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные, расчетно-теоретические и численные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. На основании проведенного анализа отечественных и зарубежных исследований и нормативно-технических документов, содержащих данные по проблематике настоящей работы, установлено, что при работе гибких подпорных конструкций фактические эпюры давления грунта на них отличны от прямолинейной формы и зависят не только от величин, но и от характера деформации стенок. Для кинематических схем работы подпорных конструкций с закреплённым верхним концом характерно перераспределение бокового давления грунта по высоте, проявляющееся в концентрации давления в приопорных зонах и его снижении в пролётных участках. При этом эпюра давления приобретает характерную криволинейную форму седлообразного типа. Нормативные документы предлагают определение коэффициентов давления на ограждающие конструкции без учета вышеназванных факторов и не связывают его с характером деформаций подпорных стен.

2. Проведённые в настоящем исследовании экспериментальные работы и анализ опытных данных прошлых лет позволили подтвердить выводы о перераспределении бокового давления грунта в зависимости от характера деформации подпорной стены. Наблюдаемые смещения грунта засыпки при разных кинематических схемах работы конструкции показали соответствие между их пространственным распределением и характером деформаций стенки. Полученные данные позволили разработать расчетный подход, учитывающий взаимодействие наклонных блоков грунта, их локальные перемещения в пределах призмы обрушения и специфики деформационного поведения гибкой подпорной конструкции.

3. В результате численных исследований выполнен анализ условий возникновения предельного напряженного состояния грунта, характерного для различных схем работы гибких подпорных стенок. Были установлены следующие ключевые закономерности распределения контактных усилий на границах поверхностей скольжения (или их проекциях в допредельном состоянии), соответствующих зонам локальных смещений в пределах призмы обрушения:

- принципиальное различие в характере соотношений нормальных N и касательных T усилий для различных кинематических схем работы конструкций при деформировании;
- при консольной схеме зависимость T/N от деформаций соответствует наступлению предельного состояния и демонстрирует линейный характер, что согласуется с классическими решениями теории активного давления грунта;
- для схемы с закреплённым верхним концом наблюдается сложное нелинейное поведение указанного соотношения, не соответствующее предельному состоянию;

– для всех рассмотренных случаев деформирования выявлена S-образная зависимость касательных усилий от углов поворота, характеризующаяся наличием двух предельных асимптот, соответствующих критическим состояниям.

4. Разработан и апробирован новый численно-аналитический метод определения бокового давления грунта на подпорные конструкции в зависимости от характера и величин их деформаций. В основе метода лежат уравнения равновесия и принципы механики грунтов. Практическая реализация метода учитывает экспериментальные данные о поведении гибких подпорных конструкций, включая результаты собственных лабораторных исследований и теоретических разработок. Учитывается упругопластическое поведение грунта в пределах призмы обрушения, что позволяет оценивать распределение бокового давления по высоте стенки в активной зоне. Метод позволяет получить уточнённые значения внутренних усилий: снижение изгибающих моментов в стенке на 20-25% по сравнению с традиционными расчётами и увеличение усилий в распорках на 15-20%, что соответствует экспериментальным данным и обеспечивает более экономичное и надежное проектирование конструкций за счёт учёта реального взаимодействия подпорной конструкции с упругопластическим массивом грунта.

5. Выведено дифференциальное уравнение изгиба подпорной стенки, в котором внешняя распределённая нагрузка представлена в виде бокового давления грунта, которое зависит от начального напряжённого состояния массива, прочностных характеристик грунта и деформаций ограждающей конструкции. Численное решение уравнения выполнено методом конечных разностей с использованием итерационного алгоритма на основе метода последовательных приближений, что позволило определить эпюры бокового давления грунта, перемещений и внутренних усилий в конструкциях. Результаты расчетов по разработанному методу демонстрируют хорошее соответствие с имеющимися экспериментальными данными и результатами численного моделирования с использованием конечно-элементных программ.

6. На основе разработанного численно-аналитического метода разработаны практические рекомендации по учету перераспределения бокового давления в активной зоне для гибких подпорных стенок с верхним распорным креплением. Рекомендации предполагают модификацию классических методов определения давления грунта путём введения поправочных коэффициентов: коэффициента увеличения давления $K^{on}_r = 1,45-4,00$ в верхней трети высоты пролета и коэффициента снижения давления $K^{np}_r = 0,30-0,96$ в зоне максимальных горизонтальных смещений стенки, которые учитывают перераспределение бокового давления в зависимости от относительной гибкости конструкции, прочностных и деформационных характеристик грунта.

7. Полученные решения были использованы при разработке нормативного документа СП 381.1325800.2018 «Сооружения подпорные. Правила проектирования» в части Приложения

Н «Рекомендации по определению активного давления несвязного грунта на гибкие подпорные конструкции в зависимости от их деформаций».

8. Перспективные направления дальнейших научных исследований в рамках развития настоящей работы предполагают следующие этапы:

- усовершенствование расчетной модели метода наклонных блоков за счет учета контактного трения на границе "грунт-конструкция", поверхностных нагрузок, сцепления пылевато-глинистых грунтов, фильтрационных, реологических свойств грунтов, а также факторов многослойности основания и влияния подземных вод;
- получение аналогичных зависимостей для давлений грунта в пассивной зоне;
- уточнение значений критерия мобилизации предельных значений бокового давления для различных схем закрепления стен;
- усовершенствование численных алгоритмов и развитие отечественного программного обеспечения, позволяющего решать универсальные задачи, связанные с определением бокового давления грунта на подпорные конструкции с учетом его перераспределения по высоте.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК

1. **Брыксин В.В.** Особенности деформирования модели гибкой подпорной стенки и грунта засыпки. Эксперимент в лабораторных условиях. Вестник НИЦ «Строительство». 2024;41(2):103-117.
2. **Брыксин В.В.** Учет распределения бокового давления несвязанного грунта при расчете гибких подпорных конструкций в зависимости от их деформаций. Вестник НИЦ «Строительство». 2025;46(3):144-157.
3. **Брыксин В.В.** Влияние деформаций гибких подпорных стен в несвязных грунтах на перераспределение активного давления. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2025. №5. С. 9-24.

Статьи в периодических и других изданиях

1. **Брыксин В.В.** Расчет ограждающих конструкций котлованов методом наклонных блоков. Вестник НИЦ «Строительство». 2018;17(2):35-49.

Статьи в сборниках трудов конференций

1. **Брыксин В.В.** Исследование закона распределения активного давления несвязанного грунта на ограждения котлованов в зависимости от их деформаций. Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство. Сборник тезисов докладов. Москва. 2023.