

**МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ АРХИТЕКТУРНО – СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи  
УДК627.82:628.16.067

Магистрант: **Худойкулиев Фахриддин Фарходович**

Тема диссертационной работы: **«Влияние неоднородности и анизотропности грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин»**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание академической степени магистра по направлению

**5А340701 - «Гидротехнические сооружения»**

Согласовано с начальником  
отдела магистратуры

\_\_\_\_\_ Хаджаев Р.М.

Работа рассмотрена и допускается  
к защите

Зав. Кафедрой

«ГС, О и Ф»

к.т.н., Тошхуджаев.А.

\_\_\_\_\_

Научный руководитель:

к.т.н., и.о.проф. Файзиев Х.

\_\_\_\_\_

**Ташкент – 2018 год**

**МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**  
**ТАШКЕНТСКИЙ АРХИТЕКТУРНО – СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

Факультет: Строительство зданий  
и сооружений

Магистрант: Худойкулиев Ф.Ф

Кафедра: ГС, О и Ф

Научный руководитель:

к.т.н. и.о. проф Файзиев Х

Учебный год: 2016-2018 гг

Специальность: 5А340701

«Гидротехнические сооружения»

**АННОТАЦИЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Данная тема обусловлена тем, что существующие методы расчёта устойчивости грунтовых плотин до настоящего времени не в полной мере учитывают анизотропные и неоднородные свойства грунта тела, что сказывается на условиях строительства и эксплуатации плотин, а в ряде случаев является причиной их разрушений и аварий.

Отсюда, в соответствии с требованиями закона Республики Узбекистан принятый в 20 августа 1999 года «О безопасности гидротехнических сооружений» возникает задача обеспечения устойчивости грунтовых плотин при неоднородности и анизотропии грунтов, а также разработке новых методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин учитывающий неоднородность и анизотропию грунтов тело плотины.

Учитывая неоднородность и анизотропии грунтов при расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин, приведет к повышению надежности и уменьшению стоимости строительство грунтовых плотин.

**Цели и задачи диссертационного исследования:** Цель исследования - усовершенствовать и апробировать методику расчета устойчивости откосов, применительно к грунтовым плотинам с учетом анизотропии и нестационарности процесса.

### **Задачи исследования:**

- анализ существующих методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин;
- анализ влияния отдельных факторов (в том числе коэффициента фильтрационной анизотропии) на формирование фильтрационного режима грунтовых плотин и основные параметры фильтрационного потока: положение депрессионной поверхности, величины фильтрационных градиентов и расходов;
- анализ влияния фильтрационной анизотропии на устойчивость откосов грунтовых плотин в том числе при сработке водохранилища.

**Объект и предмет диссертационного исследования:** объектом диссертационного исследования являются грунтовые плотины, а также предметом исследования является устойчивость откосов грунтовых плотин при неоднородности и анизотропии грунтов тело плотины.

### **ABSTRACT of Master's thesis**

This topic is due to the fact that the existing methods for calculating the stability of ground dams to date do not fully take into account the anisotropic and heterogeneous properties of the soil of the body, which affects the conditions of construction and operation of dams, and in some cases is the cause of their destruction and accidents.

Hence, in accordance with the requirements of the law of the Republic of Uzbekistan, the adoption of the "On the Safety of Hydraulic Structures" on August 20, 1999, the problem arises of ensuring the stability of ground dams with heterogeneity and anisotropy of soils, as well as the development of new methods for calculating the stability of slope dams, taking into account the heterogeneity and anisotropy of soils.

Goals and objectives of the dissertation: The purpose of the study is to improve and test the methodology for calculating the stability of slopes, with reference to ground dams, taking into account the anisotropy and nonstationarity of the process

taking into account the heterogeneity and anisotropy of soils in calculating the stability of slopes of soil dams, the construction of ground dams will increase reliability and reduce costs.

Objectives of the study:

- analysis of existing methods for calculating the stability of slopes of subsoil dams;
- analysis of the influence of individual factors (including the coefficient of filtration anisotropy) on the formation of the filtration regime of ground dams and the main parameters of the filtration flow: the position of the depression surface, the magnitude of the filtration gradients and costs;
- analysis of the influence of filtration anisotropy on the stability of slopes of soil dams, including when reservoirs are being operated.

The object and subject of the dissertation research: the object of the dissertation research is the ground dams, and the stability of the slopes of the earth dams with the heterogeneity and anisotropy of the soils of the body of the dam is also the subject of the study.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....		
Глава I.	Обзор существующих методов оценки устойчивости откосов грунтовых плотин	
1.1.	Краткий обзор наиболее распространенных методов оценки устойчивости грунтовых откосов	
1.2.	Обзор методов поиска наиболее опасной поверхности сдвигов	
Заключение по главе I.....		
Глава II.	Методы расчета неустановившейся фильтрации грунтовых плотинах с учетом анизотропности грунта	
2.1	Постановка решения плоской нестационарной фильтрационной задачи с учётом анизотропии грунтов	
2.2.	Численный метод решения плоской нестационарной фильтрационной задачи с учётом анизотропии грунтов	
2.3.	Методы расчета неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах с учетом фильтрационного анизотропия грунта	
Заключение по главе II.....		
Глава III.	Оценка влияние фильтрационной анизотропии грунтов на устойчивости откосов грунтовых плотин и мероприятия по повышению устойчивости их откосов	

3.1.	Учет гидродинамических сил при расчете устойчивости откоса	
3.2.	Расчет устойчивости верхового откоса грунтовых плотин с учетом фильтрационной анизотропии грунта	
3.3.	Мероприятие по повышению устойчивости откосов грунтовых плотин в анизотропных грунтах	
3.3.1.	Методы дренирования верховой упорной призмы плотин	
3.3.2.	Дренирование верховой упорной призмы с помощью различных конструкций дренажей	
Заключение по главе III.....		
	Список использованных литератур	
	Приложения	

## Предисловие

В соответствии с постановлением президента Узбекистана Мирзиёева Ш.М. от 30.05.2017 «Программа мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы» намечены целый ряд мер по сокращению энергоемкости, внедрению энергосберегающих технологий и систем в отраслях экономики и социальной сфере .

В Республике в последние годы реализуется широкий комплекс мер по обеспечению энергосбережения в отраслях экономики и социальной сфере.

В рамках принятой Программы мер по дальнейшему развитию гидроэнергетики на 2017-2021 годы предусматривается дальнейшее развитие гидроэнергетического потенциала Республики на основе строительства 42 новых и модернизации 32 действующих гидроэлектростанций, с расширением к 2025 году мощностей экологически чистой гидроэнергии республики в 1,7 раза. Главной целью программы станет увеличение доли возобновляемых источников энергии в сфере электроснабжения, а также совершенствование и модернизация уже существующих мощностей. Для этого предполагается изучение и внедрение новых технологий с учетом мирового опыта.

При производстве электрической и тепловой энергии практически не используется имеющийся достаточно высокий потенциал возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой и биогазовой, гидроэнергии малых естественных и искусственных водотоков).

В целях расширения использования возобновляемых источников энергии, сокращения энергоемкости производства, целевого внедрения в практику отечественных научно-технических разработок и исследований передовых апробированных международных энергосберегающих технологий, реализации приоритетных направлений в этой сфере,

определенных Стратегией действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах:

1. Одобрить разработанную Министерством экономики, Министерством сельского и водного хозяйства, Академией наук Республики Узбекистан, АО «Узбекэнерго» и АО «Узбекгидроэнерго» Программу мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы включающую:

- целевые параметры по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики

перечень инвестиционных проектов по развитию возобновляемой энергетики

- комплекс мер по развитию использования возобновляемых источников энергии и повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы ;

- целевые параметры снижения энергоемкости и экономии топливно-энергетических ресурсов в отраслях экономики на 2017-2021 годы график внедрения энергоэффективных насосов и электродвигателей в насосных станциях водохозяйственных организаций Министерства сельского и водного хозяйства Республики Узбекистан на 2017-2021 годы

## **Введение**

### **Обоснованность и актуальность диссертационного исследования:**

В настоящее время использование богатейших гидроэнергетических ресурсов нашей страны невозможно осуществить без проектирования и строительства большого числа грунтовых водоподпорных сооружений. Они же необходимы и для решения других водохозяйственных задач, в частности, для создания водоемов и водохранилищ с целью водозабора, орошения, обводнения или в качестве оградительных дамб каналов и регулиционных сооружений русел рек, а также при формировании накопителей промышленных отходов и т. д.

Грунтовые плотины составляют около 85 % всех проектируемых и построенных в мире плотин. В Узбекистане доля грунтовых плотин составляет более 90 %. Причем из всех построенных в мире плотин только лишь 1-2 % составляют плотины высотой более 100 м. Широкое распространение в настоящее время грунтовых плотин в качестве водоподпорных сооружений обусловлено возможностью использования для возведения тела плотины дешевых местных грунтов, появлением мощных машин и механизмов для разработки, транспортирования и укладки грунтов, возможностью строительства плотин в сложных инженерно-геологических и сейсмических условиях и др.

В тоже время нередки случаи повреждений или разрушений грунтовых плотин, в том числе и с катастрофическими последствиями и человеческими жертвами. При этом наибольшее число разрушений грунтовых плотин (около 53 %) относится к земляным плотинам высотой от 15 до 30 м. К основным причинам разрушений и повреждений земляных плотин относятся фильтрационные деформации грунтов тела и оснований плотин, вызванные во многих случаях их анизотропной водопроницаемостью. В связи с этим актуальное значение приобретают вопросы разработки более надежных методов фильтрационного расчета и проектирования земляных плотин с

учётом анизотропной водопроницаемости материала тела плотины, возникающей как результат технологических особенностей их возведения.

Существующие методы расчёта устойчивости грунтовых плотин до настоящего времени не в полной мере учитывают анизотропные и неоднородные свойства грунта тела, что сказывается на условиях строительства и эксплуатации плотин, а в ряде случаев является причиной их разрушений и аварий.

Отсюда, в соответствии с требованиями закона Республики Узбекистан принятый в 20 августа 1999 года «О безопасности гидротехнических сооружений» возникает задача обеспечения устойчивости грунтовых плотин при неоднородности и анизотропии грунтов, а также разработке новых методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин учитывающий неоднородность и анизотропию грунтов тело плотины.

Учитывая неоднородность и анизотропии грунтов при расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин, приведет к повышению надежности и уменьшению стоимости строительство грунтовых плотин.

**Объект и предмет диссертационного исследования:** объектом диссертационного исследования является грунтовые плотины, а также предметом исследования является устойчивость откосов грунтовых плотин при неоднородности и анизотропии грунтов тело плотины.

**Цели и задачи диссертационного исследования:** Цель исследования - усовершенствовать и апробировать методику расчета устойчивости откосов, применительно к грунтовым плотинам с учетом анизотропии и нестационарности процесса.

**Задачи исследования:**

- анализ существующих методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин;
- анализ влияния отдельных факторов (в том числе коэффициента фильтрационной анизотропии) на формирование фильтрационного режима грунтовых плотин и основные параметры фильтрационного потока:

положение депрессионной поверхности, величины фильтрационных градиентов и расходов;

- анализ влияния фильтрационной анизотропии на устойчивость откосов грунтовых плотин в том числе при сработке водохранилища.

**Научная новизна заключается в:**

- выявлении зависимости анизотропии грунтов от коэффициента фильтрации.

- решении задачи по расчету устойчивости откосов грунтовых плотин, при изменении водонасыщения слагающих их грунтов.

**Основные вопросы и гипотеза исследования:** основной вопрос заключается в выявлении недостатков существующих методов определения устойчивости откосов грунтовых плотин, с последующим уточнением методов определения устойчивости откосов грунтовых плотин при неоднородности и анизотропности грунтов. Гипотеза исследования рассмотрение и учет неоднородности и анизотропности грунтов при решении плоских гидротехнических задач может привести к повышению устойчивости откосов и снижению стоимости строительства грунтовых плотин.

**Обзор (анализ) литературы по теме диссертационного исследования:**

Теоретическую базу диссертационного исследования составляют работы отечественных и зарубежных авторов в области гидротехнического строительства.

Основными источниками, раскрывшими теоретические основы расчета устойчивости грунтовых плотин, явились работы Павловского Н.Н, Аскоченского А.А, Недрига Н, Чаплыгина С.А, К. Терцаги, Кочина П.Я, Рассказов Л.Н, Анискин Н.А, Желанкин, В.Г, Малаханов В.В, Корчневский В.Ф, Муратова М.Х, Шабан Х, Дружинин Н.И, Хусандходжаев Ф.З, Бакиев М.Р, Хусандходжаев У.И, Файзиев Х, Пославский В.В. Петров Г.Н, Полубаринова-Кочина П.Я, Чугаев Р.Р, Красильников Н.А, Натариус Я.И,

Сапегин Д.Д, Гуреев А.М, Маслов Н.Н, Янгиев А, Бедретдинов, М.А. Волинов, Н.К. Голубев, Н.В. Лебедев. Покровский Г.И, Аликин В.Г, На основе работ «Гидравлический справочник», «Курс гидравлики» Павловский Н.Н, «Расчет устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига грунта» Чугаев Р.Р, «Гидротехнические сооружения» Недрига В.П, «Гидротехнические сооружения. Глухие плотины, водосливные плотины» Чугаев Р.Р, «Гидротехнические сооружения» Розанов Н.П, «Грунты и основание гидротехнических сооружений» Иванов П.Л, «Гидротехнические сооружения проектирование и расчет» И.И. Кириенко, Ю.А. Химерик, «Гидротехнические сооружения» Х.Файзиев и У. Хусанходжаев «Проектирование гидротехнических сооружений » Волков И.М, Кононенко И.К, Федичкин И.К «Проектирование речных гидроузлов на не скальных основаниях» Вошинин А.П, Гришин М.М, Лихачев В.П, подробно рассмотрены теории фильтрации и устойчивость откосов грунтовых плотин.

Международный опыт по устойчивости откосов грунтовых плотин рассмотрен на основе работ «Design of small dams» Ake Nilsson, «Modelling groundwater changes due to fluctuating dam discharge» Muniram Budhu, D.N. Contractor, «Earth and Rock-Fill Dams: General Design and Construction Considerations» U. S. Army Corps of Engineers, «Dams and Appurtenant Hydraulic Structures» Ljubomir Tanchev, а также статей Shivakumar S «Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method», Li, G. and Desai, C.«Stress and Seepage Analysis of Earth Dams», «Hydraulic and stability analyses of earth dams» J.D. Fenton.

Отечественный опыт в Республики Узбекистан рассмотрен на основе статей в периодической печати Файзиева Х, Хусанходжаева У.И, Бакиева М.Р, Янгиева А.

Также был рассмотрен ряд законодательных документов, регулирующих возведение и укрепление грунтовых плотин. Такими документами явились: закон «О безопасности гидротехнических

сооружений», положения Кабинета Министров РУз о Государственной инспекции по контролю и надзору за техническим состоянием и безопасностью работы крупных и особо важных водохозяйственных объектов при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

**Характеристики методик, примененных в исследованиях:**

- Обзор и анализ специальной литературы;
- Будет использован численный метод – для анализа влияния отдельных факторов (в том числе коэффициента фильтрационной анизотропии) на формирование фильтрационного режима грунтовых плотин и основные параметры фильтрационного потока.
- Обобщение научных и практических результатов исследования.

**Теоретическое и практическое значение результатов диссертационного исследования:** Результаты научного исследования могут быть использованы как в будущих исследованиях, так и сегодня, при изучении курса “Гидротехническое строительство ” и “Производство гидротехнических работ”, а также в учебно-методической работе строительных ВУЗов Узбекистана.

Практическая значимость моей исследовательской работы заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы в проектных организациях для проектирования грунтовых плотин в Средней Азии.

Немаловажно отметить, что если использовать результаты работы при проектировании грунтовых плотин стоимость строительства и эксплуатации грунтовых плотин снижается в несколько раз, а также результаты исследования могут быть использованы для создания нормативных баз.

**Структура и объем диссертационного исследования:** Диссертация состоит из содержания, введения, трех глав с выводами, заключения и списка использованной литературы, которая включает аналитические таблицы, схемы. В приложении дан список принятых сокращений, словарь терминов, перечень таблиц, рассмотренных в исследовании. Объем диссертации составляет 77 страниц.

Вводная часть состоит из обоснованности темы магистерской диссертации и ее актуальности, объекта и предмета исследования, целей и задач, научной новизны, основных вопросов и гипотез исследования, обзора (анализа) литературы по теме, характеристики методик, примененных в исследовании, теоретических и практических значений результатов, характеристики структуры работы.

Основная часть будет состоять из 3 глав:

В первой главе рассматривается краткий обзор расчётов устойчивости откосов грунтовых плотин.

Во второй главе изложены расчёты анизотропной фильтрации методом МКР и приведены результаты расчетов неустойчивившейся фильтрации при анизотропии грунтов

В третьей главе приводится анализ влияния анизотропии грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин. Приведены рекомендации по укреплению откосов грунтовых плотин.

## **Глава I. Обзор существующих методов оценки устойчивости откосов грунтовых плотин**

### **1.1. Обзор и анализ наиболее распространенных методов оценки устойчивости грунтовых откосов**

Современные методы, применяемые для расчёта устойчивости можно разделить на две отдельные группы, в зависимости от существующих гипотез, которые лежат в основе определения предельно-напряжённого состояния поверхности сдвига плотины.

К первой группе можно отнести методы, которые основаны на гипотезе предельно-напряжённого состояния во всей призме обрушения, которые подробно изучены в трудах Ренкина, В.Й.Новоторцева [55], В.В.Соколовского [71], С.С.Голушкевича [24], В.Г.Березанцева [13] и др. По этому методу фильтрационные силы определяются для каждого элемента сетки сопряженных поверхностей сдвига.

Ко второй группе можно отнести методы, основанные на гипотезе исходной формы поверхности сдвига грунта, вдоль которой и возникает предельно – напряжённое состояние. При этом, в значительном количестве работ освещён метод основанный на круглоцилиндрической поверхности сдвига. Эти методы получили широкое применение в трудах ряда авторов, к ним можно отнести: В.Феллениуса [98], К.Терцаги [75], Г.Крея [39], А.А.Ничипоровича [54], Д.Тейлора [72], И.В.Федорова [97], Н.Н.Маслова [44]. А.Л.Можевитинова [49], Р.Р.Чугаева [105] и других. В этих методах воздействие фильтрации можно определить отдельно для каждого рассматриваемого элемента сдвигаемой призмы и вводятся в исходную систему дифференциальных уравнений, которые описывают его равновесие в предельно допустимом состоянии.

Наиболее актуальным на сегодняшний день является метод второй группы, очень распространённый в инженерной практике. Данные методы

опираются на предположение о достижении предельно – допустимого сопротивления грунта сдвигу исключительно на поверхности обрушения. В данных методиках поверхность обрушения зачастую предполагается круглоцилиндрической или плоской, или произвольной в некоторых случаях. Для уточнения закона распределения нормального напряжения по поверхности обрушения, что особенно важно при неоднородности строения грунта, тело обрушения разделяется на плоские отдельные элементы..

На рис 1.1 представлена расчетная схема для методов, в которых допускается, что неустойчивая часть грунтового массива ограничена снизу круглоцилиндрической поверхностью (методы Терцаги, Крея, весового давления и др.).

На выделенный  $i$ -й элемент тела обрушения шириной  $b_i$  действуют силы:  $G_i$  – вес элемента, включающий вес грунта и воды в порах;  $W_{i-1}$  и  $W_i$  – равнодействующие давления воды, действующего по боковым граням рассматриваемого элемента;  $u$  – давление воды, действующее на подошву элемента;  $T_{i-1}$  и  $T_i$  – вертикальные составляющие силы взаимодействия между элементами;  $E_{i-1}$  и  $E_i$  – горизонтальные составляющие силы взаимодействия между элементами;  $\sigma_i$  и  $\tau_i$  – соответственно нормальные и касательные напряжения, действующие по подошве элемента.

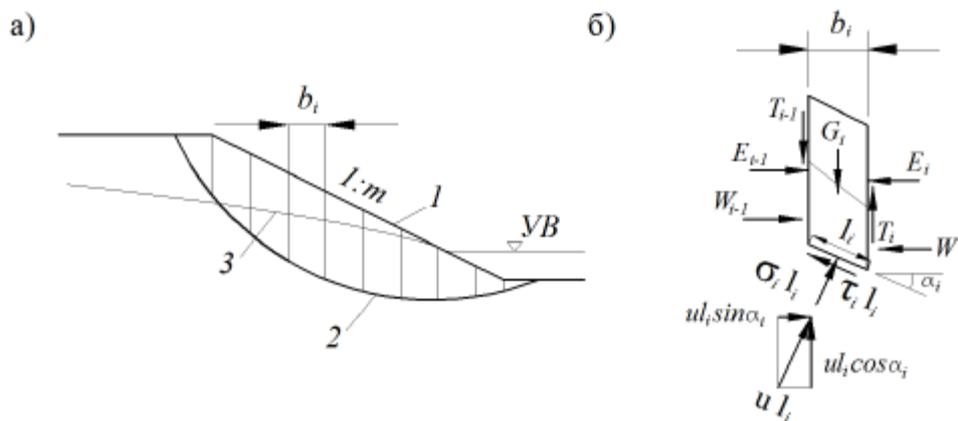


Рис 1.1 – Общая расчетная схема для методов, вычисленных для круглоцилиндрических поверхностей обрушения: а – профиль грунтового массива; б – система сил, действующих на произвольный элемент тела обрушения; 1 – профиль поверхности, ограничивающей грунтовый массив, 2 – профиль поверхности обрушения (дуга окружности), 3 – профиль поверхности грунтовых вод.

**В методе Терцаги** [47] принято  $E_{i-1} = E_i = T_{i-1} = T_i = 0$ , а также считается, что силы  $W_{i-1}$ ,  $W_i$  и горизонтальная составляющая силы давления  $ul_i$  взаимно уравновешена, т. е.

$$W_i - W_{i-1} = ul_i \sin \alpha_i \quad (1.1)$$

где  $l_i$  – длина профиля подошвы  $i$ -го элемента.

Система учитываемых в этом методе сил, действующих на произвольный  $i$ -й элемент, представлена на рис.1.2.

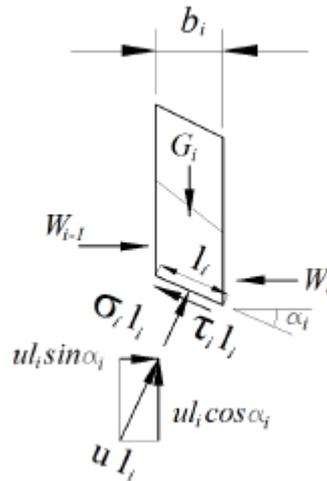


Рис.1.2 – Схема действующих на  $i$ -й элемент сил в методе Терцаги

Коэффициент запаса можно определить как отношение момента предельных реактивных сил  $M_{\text{п}}$  к моменту действующих реактивных сил  $M_{\text{д}}$ , уравновешивающих момент активных сил  $M_{\text{а}}$ . Данные моменты рассчитываются относительно горизонтальной оси круглоцилиндрической поверхности, ограничивающей тело обрушения.

$$k = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{а}}} = \frac{\int_l r \tau_{\text{пр}} dl}{\int_l r \tau dl} \quad (1.2)$$

где  $\tau_{\text{пр}}$  – предельные касательные напряжения;  $\tau$  – действующие касательные напряжения;  $l$  – длина дуги окружности радиусом  $r$  (профиля поверхности сдвигов).

Из уравнения равновесия проекций сил на нормаль к подошве элемента получается выражение для определения нормального усилия, действующего на подошву  $i$ -го элемента:

$$\sigma_i l_i = (G_i - u b_i) \cdot \cos \alpha_i \quad (1.3)$$

Допущение  $T_{i-1} = T_i = 0$  указывает на то, что вертикальные площадки являются главными, т.е., перемещение отсеков относительно друг друга отсутствует.

Касательное напряжение по подошве элемента достигает своего предельного значения по Кулону, которое при воздействии нормальном напряжением  $\sigma_i$  определяется зависимостью:

$$\tau_{\text{при}} = \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i \quad (1.4)$$

где  $\operatorname{tg} \varphi_i$ ,  $c_i$  – параметры механической прочности грунта для  $i$ -го элемента.

Уравнение равновесия моментов активных и реактивных сил относительно центра окружности, ограничивающий профиль тела обрушения, имеет следующий вид:

$$M_a - M_d = r \sum_n G_i \sin \alpha_i - r \sum_n \tau_i l_i = 0 \quad (1.5)$$

Коэффициент запаса в методе Терцаги находится с помощью:

$$k = \frac{M_{\text{п}}}{M_a} = \frac{\sum_n [(G_i u b_i) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i]}{\sum_n G_i \sin \alpha_i} \quad (1.6)$$

При численном решении уравнения выполняется разделение призмы обрушения на ряд элементарных столбов. Выражение для  $K_3$ , обобщающее формулы, введенные в программу «РУЗО» в моей работе записано в следующем виде:

$$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot G_i \cdot \cos \alpha_i - v_i N_i - U_i) \operatorname{tg} \varphi_i + \frac{C_i \Delta b_i}{\cos \alpha_i}}{\frac{1}{r} \sum M_{\text{акт}}} \quad (1.7)$$

где,  $r$  – радиус поверхности скольжения;

$\Sigma M_{\text{акт}}$  – суммарный момент поверхностных и объемных сил, воздействующих на призму обрушения;

$G$  – вес  $i$  – того элементарного столба  $\Delta b_i$  с учетом воды, площадка скольжения в диапазоне которого имеет уклон  $\alpha_i$ ;

$N_i = \gamma_b h_b \frac{\Delta b_i}{\cos \alpha_i}$  – равнодействующая гидродинамического давления на

подошве  $i$  – того элемента в условиях сложившейся фильтрации;

$U_i$  – равнодействующая избыточного порового давления по подошве  $i$  – этого элемента;

$\mu_i$  и  $\nu_i$  – коэффициенты, которые отражают в принятых мной методах учет действия элементов между собой, соответственно, твердой и жидкой фазами.

Расчеты устойчивости откосов на электронной вычислительной машине (ЭВМ) определяется с использованием программы «РУЗО» проведены при направленном поиске центра самой опасной поверхности скольжения применительно к формуле И.Ф.Федорова, в которой учет гидродинамического действия для установившегося режима фильтрации произведен в наиболее строгой форме. Результат, полученный по методу «весового давления», используются в сопоставительных целях для заранее установленного диапазона изменений  $K_3$  при учете взаимодействия сил между элементами.

Итоговый момент активных сил  $\sum M_{акт}$ , входящий в знаменатель формулы, может быть выражен в виде:

$$\sum M_{акт} = \sum M_Q + \sum M_S \quad (1.8)$$

где,  $\sum M_Q$  – суммарный момент от действия нагрузок, соответствующих статической работы сооружения (силы тяжести, гидростатическое давление воды со стороны верхнего бьефа);

$\sum M_S$  – суммарный момент от сейсмических сил в пределах призмы обрушения.

В нынешней практике проектирования сейсмические инерционные нагрузки вычисляются по принятому в ШНК 2.06.11-04 спектральному

методу и рассматривают как дополнительно приложенные к проверяемому откосу расчетные статические нагрузки. Связи с этим предполагается, что сооружения, являющиеся системами со многими степенями свободы, терпят от действия сейсмических нагрузок упругие перемещения по нормальным составляющим элементам различных форм соответственных колебаний.

Спектральный метод позволяет выставлять максимальные значения сейсмических сил по каждой из рассматриваемых форм колебаний. Результаты сейсмических сил находятся как среднеквадратичные значения суммы действующих нагрузок по заданным формам колебаний. Поэтому данный метод даёт оценку искомых нагрузок сооружения по верхнему пределу.

В результате этого, без учета нелинейных свойств материалов значения сейсмических сил оказались необоснованно завышенными, особенно на уровне самого гребня плотин. Новыми нормами это обстоятельство частично учитывается, но, тем не менее, даже по ним превышение сейсмических нагрузок на гребне (по отношению к основанию сооружения) доходят до 2,5 раза.

Такая разница в интенсивностях колебаний тела плотины не подходит реальному распределению сейсмических ускорений по высоте сооружения и не подтверждается данными исследований поведения более 20 плотин Средней Азии, претерпевших землетрясения силой 5-8 баллов неоднократно [18].

Как показали экспериментальные изучения, сейсмостойкости грунтовых плотин, приведенные методом сейсмозрывных воздействий интенсивностью 6-10 баллов на модели Нурекской плотины высотой 6,3 м, натурных частей ряда плотин высотой 4,5-7 м, параметры сейсмических колебаний на высоте заметно отличаются от принятых по нормам. Обобщенный динамический коэффициент изменяется в пределах  $1 \leq \mu(z) \leq 2,0$ . Поэтому в основу моих

расчетов были приняты как нормативные, так и фактические эпюры  $\mu(z) = 2,0$ .

При расчетах на сейсмические нагрузки для проверки устойчивости откосов согласно ШНК 2.06.11-04 рекомендуется применять расчетные ускорения в  $a_{kj}^P$  точках «к» сооружения

$$a_{kj}^P = Ak_1 k_2 \sqrt{\sum_{i=0}^n [k_\psi \beta_i \eta_{ikj}]^2}, \quad (1.9)$$

где,  $A$  – коэффициент, значения которого в соответствии с расчетной сейсмичностью принимается 7, 8, 9 баллов – 0,1; 0,2; 0,4;

$k_1$  – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений, равный 0,25;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий конструктивные решения зданий и сооружений и равный в данном случае 1;

$k_\psi$  – для грунтовых сооружений при сейсмичности площадки строительства 7 и 8 баллов равно 0,7; для сейсмичности 9 баллов – 0,65;

$\eta_i$  – коэффициент  $i$  формы колебаний;

$\beta(\tau)$  – коэффициент динамичности для периода.

Рассчитанная по формуле (1.9) безразмерная эпюра распределяющее ускорение по высоте сооружения используется при расчетах устойчивости откосов; при этом сейсмическая сила выявляется умножением ускорения на вес грунта в данной точке отсека.

## 1.2. Обзор методов поиска наиболее опасной поверхности сдвигов

Самой опасной поверхностью обозначают поверхность сдвигов, которой подходит наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости откоса. В наиболее распространённых способах например круглоцилиндрические поиск опасной поверхности сдвигов производится чаще всего перебором достаточно большого числа назначаемых поверхностей известной формы [42, 48, 49, 50, 51].

Как демонстрирует вычисления, самый опасный поверхность может выклиниваться у подошвы откоса или проходить ниже этой подошвы, захватывая основание (рис. 1.3). Положение опасной поверхности (с захватом или без захвата основания), определяющееся соотношением значений параметров прочности грунта, заранее предсказать не возможно. Поэтому при выполнении расчетов приходится рассматривать обе упомянутые возможности, за исключением случаев, в которых захват основания невозможен из-за весьма большой прочности грунта основания, например скального.

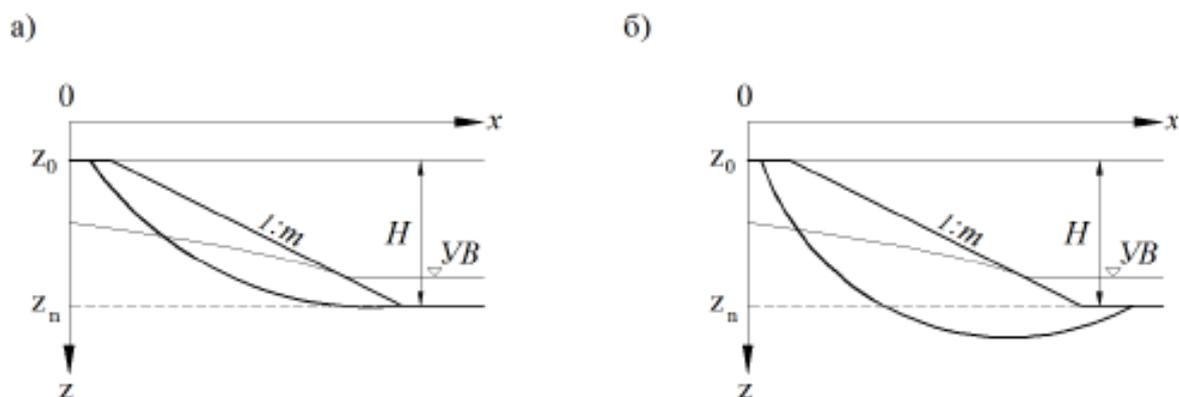


Рис. 1.3 – Возможные варианты положения опасной поверхности сдвигов: а – без захвата основания, б – с захватом основания

Способ нахождения опасной поверхности сдвигов зависит от формы этой поверхности. Для круглоцилиндрических поверхностей отыскивают координаты центра и радиус окружности, дуга которой является профилем

этой поверхности. Для поверхностей других форм находят координаты характерных точек профиля этих поверхностей, например, точек пересечения с профилем поверхности грунтового массива.

Существует множество предложений по вычислению радиуса и координат центра дуги окружности – профиля наиболее опасной круглоцилиндрической поверхности. Разные ведомства разработали свои предложения и указания по вычислению упомянутых параметров. В основе их лежит один и тот же принцип: ограничение области поиска координат центра окружности заданного радиуса [22, 23, 48] и сканирование в этой области по двум ортогональным направлениям до выявления поверхности, которой соответствует наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости. Далее, значение радиуса получает приращение, и процесс сканирования повторяется. Вычислительный процесс заканчивается, когда определяется радиус окружности, соответствующий минимальному значению коэффициента запаса.

В качестве параметров при поиске наиболее опасной поверхности вместо координат центра окружности могут выступать координаты точек пересечения профилей поверхности обрушения, с одной стороны, и поверхности грунтового массива, с другой. При этом, координаты этих точек связаны между собой положением на поверхности грунтового массива. Поэтому по-прежнему в расчете фигурируют три параметра: радиус окружности и по одной координате для каждой точки пересечения.

Последний вариант поиска опасной поверхности легко распространяется и на другие формы поверхности сдвигов, в том числе и с большим числом параметров.

## **Выводы по главе 1**

1. Использование в инженерных расчетах большого числа методов для устойчивости откосов грунтовых плотин свидетельствует о сложности задачи и незавершенности процесса поиска ее решения, которое удовлетворяло бы исследователей.
2. Метод Федорсова нынешнее время считается самым оптимальным вариантом для решения задач расчета устойчивости откосов грунтовых плотин. В этом методе учитывается все происходящие явление в теле грунтовых плотин.
3. Трудоемкость выполнения расчета устойчивости откосов грунтовых плотин в ручную, вынудила инженеров и исследователей созданию программ для расчета в ЭВМ.
4. Необходимо и в дальнейшем развивать методику и программы расчета устойчивости откосов для получения более полного решения множества практических задач.

## **Глава II. Методы расчета неустановившейся фильтрации грунтовых плотинах с учетом анизотропности грунта**

### **2.1. Постановка решения плоской нестационарной фильтрационной задачи с учетом анизотропии грунтов**

Как правило, одним из основных воздействий на гидротехнические сооружения является фильтрация. Это явление вызывает такие последствия, как потери воды из водохранилищ, силовое воздействие на сооружение в виде фильтрационных сил, фильтрационные потери, как в плотинах, так и в основаниях. На практике чаще рассматривается изотропная фильтрация, характеризующаяся одинаковой проводимостью грунта по направлению координатных осей:  $K_x$ ,  $K_y$  - коэффициенты фильтрации грунта, соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях. Однако в некоторых случаях необходимо решать анизотропную задачу. Фильтрационная анизотропия может проявляться в грунтах основания: примерами такой анизотропной среды могут являться девонские глины (р. Свирь), среднеазиатские лессовидные суглинки и др. Гораздо чаще анизотропия проявляется непосредственно в теле грунтовых плотин, что может быть вызвано особенностями физико-механических свойств уложенных в тело плотины грунтов (возможность сегрегации) и технологией процесса возведения. Большинство грунтовых плотин по способу производства работ относятся к насыпным, в процессе возведения которых грунты в теле плотины могут приобретать анизотропную структуру. При этом проницаемость грунта в горизонтальном направлении может во много раз превышать его проницаемость в вертикальном направлении. На степень анизотропии оказывают влияние как физико-механические свойства самого грунта, так и технология его укладки.

В данной работе для решения задач анизотропной фильтрации используется численный метод конечных разностей (МКР). Программный комплекс, позволяющий решить задачу нелинейной, неустановившейся безнапорной фильтрации в неоднородной анизотропной среде разработан на

кафедре «Гидротехнических сооружений, основания и фундаменты» ТАСИ, совместно с преподавателями кафедры «Прикладная математика и компьютерный анализ» НУУз имени М. Улугбека. Особенностью решения задачи безнапорной фильтрации является то, что положение свободной поверхности фильтрационного потока в исследуемой области (в плотинах, бортах основания) заранее неизвестно и для численного решения не хватает одного из граничных условий. Поэтому при решении начальные положения кривой депрессии при установившейся фильтрации определяются заранее для каждого типа плотины, известными формулами. Это решение позволяет получить картину распределения напоров в плотине и основании, а также получить характер изменения напорной функции во времени.

В данной работе рассматривается задача неустановившейся фильтрации в недеформируемой среде. Теория неустановившегося движения несжимаемой жидкости в недеформируемой пористой среде, полностью насыщенной жидкостью, получила меньшее развитие, чем теория установившейся фильтрации в основном в связи с большими трудностями при решении задач.

На сегодняшний день качественно более высокий уровень решения подобных задач достигается с помощью численных методов и, прежде всего, с помощью метода конечных разностей (МКР).

Математическая формулировка рассматриваемой краевой задачи анизотропной неустановившейся фильтрации в общем случае описываются трехмерными линейными и нелинейными уравнениями параболического типа при различных краевых условиях разного рода. С учетом симметричности по некоторым пространственным осям рассматриваемой трехмерной области, их можно привести двумерным, в частности к прямоугольной области  $\Omega = \{ a \leq x \leq b, c \leq y \leq d, t_n \leq t \leq t_k \}$ , в следующем виде

$$A_0 \frac{\partial U}{\partial t} = A_1 \frac{\partial}{\partial x} \left( A_2 \frac{\partial}{\partial x} U \right) + A_3 \frac{\partial}{\partial y} \left( A_4 \frac{\partial}{\partial y} U \right) + A_5 \frac{\partial U}{\partial x} + A_6 \frac{\partial U}{\partial y} + F \quad (2.1)$$

при граничных условиях

$$g_{11} \frac{\partial U}{\partial x} + g_{12} U(a, y, t) = \varphi_1(y, t), \quad c \leq y \leq d, \quad (2.2)$$

$$g_{21} \frac{\partial U}{\partial x} + g_{22} U(b, y, t) = \varphi_2(y, t), \quad c \leq y \leq d, \quad (2.3)$$

$$g_{13} \frac{\partial U}{\partial y} + g_{14} U(x, c, t) = \varphi_3(x, t), \quad a \leq x \leq b, \quad (2.4)$$

$$g_{23} \frac{\partial U}{\partial y} + g_{24} U(x, d, t) = \varphi_4(x, t), \quad a \leq x \leq b, \quad (2.5)$$

и начальным условием

$$U(x, y, t)|_{t=0} = \psi(x, y) \quad (2.6)$$

где коэффициенты  $A_k$  ( $k = \overline{0,6}$ ) и функция  $F$  могут быть функциями  $t, x, y, U, U_x$  и  $U_y$ , в частности постоянные, которые используются для описания вид уравнения (2.1); коэффициенты  $g_{ij}$  - используются с помощью комбинаций чисел  $\{0,1\}$ , для описания различных граничных условий, по которым можно получить 16 видов граничных условий;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  и  $\psi$  - заданные непрерывные функции, в частности постоянные физические величины. Предположим, что заданные функции удовлетворяют всем условиям, при которых существует единственное решение поставленной задачи.

Для решения данной задачи (2.1)-(2.6), которая в общем случае является нелинейной, можно применить различных численных методов решения и методов линеаризации. Согласно этому основной целью является создание алгоритма и программы для численного решения данной задачи. С помощью вычислительных экспериментов предполагается численное моделирование отдельно взятых фильтрационных задач.

## 2.2 Численный метод решения плоской нестационарной фильтрационной задачи с учетом анизотропии грунтов

Для численного моделирования поставленной задачи (2.1)-(2.6) применяется метод переменных направлений (МПН). Для этого сначала непрерывная область  $\Omega$  приводится к дискретной  $\Omega_{hl\tau}$ , с постоянными шагами по осям  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Ot$   $h = (b - a) / (m - 1); l = (d - c) / (n - 1); \tau = (t_k - t_n) / (p - 1)$ , соответственно. В результате в узловых точках  $x_i = a + (i - 1)h$ ,  $y_j = c + (j - 1)l$  и  $t_s = t_0 + (s - 1)\tau$  функции  $U(t, x, y)$   $U(t_s, x_i, y_j) = U_{ij}^s$  и  $U'_x = \frac{\partial U}{\partial x}$  можно аппроксимировать соответственно используя следующие

правых, левых или симметричных конечно-разностных видах

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=x_i} &= \frac{U(t_s, x_{i+1}, y_j) - U(t_s, x_i, y_j)}{x_{i+1} - x_i} = \frac{U_{i+1j}^s - U_{ij}^s}{h}, \\ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=x_i} &= \frac{U(t_s, x_i, y_j) - U(t_s, x_{i-1}, y_j)}{x_i - x_{i-1}} = \frac{U_{ij}^s - U_{i-1j}^s}{h}, \\ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=x_i} &= \frac{U(t_s, x_{i+1}, y_j) - U(t_s, x_{i-1}, y_j)}{x_{i+1} - x_{i-1}} = \frac{U_{i+1j}^s - U_{i-1j}^s}{2h}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

А также производные по  $y$  заменяется по следующему:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=y_j} &= \frac{U(t_s, x_i, y_{j+1}) - U(t_s, x_i, y_j)}{y_{j+1} - y_j} = \frac{U_{ij+1}^s - U_{ij}^s}{l}, \\ \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=y_j} &= \frac{U(t_s, x_i, y_j) - U(t_s, x_i, y_{j-1})}{y_j - y_{j-1}} = \frac{U_{ij}^s - U_{ij-1}^s}{l}, \\ \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=y_j} &= \frac{U(t_s, x_i, y_{j+1}) - U(t_s, x_i, y_{j-1})}{y_{j+1} - y_{j-1}} = \frac{U_{ij+1}^s - U_{ij-1}^s}{2l}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Используя этих производных второго порядка  $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$  тоже

можно заменить по следующему:

$$\left. \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right|_{x=x_i} = ((U'_x)_{x=x_{i+1}} - (U'_x)_{x=x_i}) / h = \frac{U^s_{i+1j} - 2U^s_{ij} - U^s_{i-1j}}{h^2}, \quad (2.9)$$

$$\left. \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right|_{y=y_j} = ((U'_y)_{y=y_{j+1}} - (U'_y)_{y=y_j}) / l = \frac{U^s_{ij+1} - 2U^s_{ij} - U^s_{ij-1}}{l^2}.$$

В уравнениях  $\frac{\partial U}{\partial t}$  можно заменить конечными разностями

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U^{s+1}_{ij} - U^s_{ij}}{\tau} \quad (2.10)$$

Нелинейные функции  $F$  в правой части уравнения (2.1), можно привести на линейные, используя метод Пикара или Ньютона. Есть еще много методов линеаризации, но в практике больше всего принимают эти. По методу Пикара значения нелинейных функций принимается из предыдущего слоя по времени. Для итерационного случаях из предыдущей итерации. Это условно можно выразить в следующем виде:

$$F(t, x, y, U, U_x, U_y) \approx F(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s) \quad (2.11)$$

По методу Ньютона, если нелинейность выражается только по  $U$ , то тогда её линеаризует по следующему:

$$F(t, x, y, U, U_x, U_y) \approx F(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s) + \\ + F_U(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s)(U_{ij}^{s+1} - U_{ij}^s) \quad (2.12)$$

Создаваемом алгоритме решения поставленной задачи можно внести некоторый параметра  $\mu$  так, чтобы по желанию иметь возможность использование в обоих методах, то есть по значению  $\mu$  можна было выбрать способ линеаризации. Тогда выражения функции  $F$  имеет следующий вид:

$$F(t, x, y, U, U_x, U_y) \approx F(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s) + \\ + \mu F'_U(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s)(U_{ij}^{s+1} - U_{ij}^s) \quad (2.13)$$

В результате которого, при  $\mu=0$  получим линеаризации по методу Пикара, а при  $\mu=1$  по методу Ньютона. Если нелинейность относится к  $U_x, U_y$  то тогда их тоже линеаризуется таким же образом:

$$\begin{aligned}
F(t, x, y, U, U_x, U_y) &\approx F(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s) + \\
&+ \mu (F'_{U_x}(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s) ((U_x)_{ij}^{s+1} - (U_x)_{ij}^s) + \\
&+ F'_{U_y}(t_s, x_i, y_j, (U)_{ij}^s, (U_x)_{ij}^s, (U_y)_{ij}^s) ((U_y)_{ij}^{s+1} - (U_y)_{ij}^s))
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Для численного решения поставленных задач целесообразно применить абсолютно устойчивых неявных схем. Для этого применяя метод конечных разностей с переменными направлениями (МПН), как сначала применяя неявную схему по переменной  $x$ , а по переменной  $y$  расчет ведётся по предыдущему слою. А именно, полученные по  $t$  слой  $(s)$ - $(s+1)$  решается разделив на две части с помощью дополнительно введенного промежуточного слоя  $(s+1/2)$ . Принимая во внимание сущность МПН, сначала по направлению  $x$  расчеты по неявной схемы выполняется в промежуточных слое  $(s+1/2)$ :

$$\begin{aligned}
A_{0ij}^s \frac{U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^s}{\tau} &= \frac{1}{h} A_{1ij}^s \left[ A_{2i+1j}^s \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}}{h} - A_{2ij}^s \frac{U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{h} \right] + \\
&+ A_{3ij}^s \frac{1}{l} \left[ A_{4ij+1}^s \frac{U_{ij+1}^s - U_{ij}^s}{l} - A_{4ij}^s \frac{U_{ij}^s - U_{ij-1}^s}{l} \right] + A_{5ij}^s \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{2h} + \\
&+ A_{6ij}^s \frac{U_{ij+1}^s - U_{ij-1}^s}{2l} + F_{ij}^s + \mu F_{U_{ij}}^s \left( U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^s \right)
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Тогда точно также вид уравнения по переменной  $y$  в  $s+1$  имеет вид:

$$\begin{aligned}
A_{0ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij}^{s+1} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}}{\tau} &= \frac{1}{h} A_{1ij}^{s+\frac{1}{2}} \left[ A_{2i+1j}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}}{h} - A_{2ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{h} \right] + \\
&+ A_{3ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{1}{l} \left[ A_{4ij+1}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij+1}^{s+1} - U_{ij}^{s+1}}{l} - A_{4ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij}^{s+1} - U_{ij-1}^{s+1}}{l} \right] +
\end{aligned} \tag{2.16}$$

$$+A_{5ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{2h} + A_{6ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij+1}^{s+1} - U_{ij-1}^{s+1}}{2l} + F_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + \mu F_{Uij}^{s+\frac{1}{2}} \left( U_{ij}^{s+1} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} \right).$$

Для реализации расчетов по данному методу МПН учитывается влияние весовых коэффициентов, введением в расчетах параметра  $\xi_{ij}$ , где  $i=\overline{1,2}; j=\overline{1,2}$ .

Это будет массив вида  $\xi = \begin{pmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} \\ \xi_{21} & \xi_{22} \end{pmatrix}$ , которая обеспечивает выполнить

расчеты по чисто неявным схемам  $\xi = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ , симметричным схемам

$\xi = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$  или с другими как  $\xi = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$  или  $\xi = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ . Обычно,

для весового параметра  $\xi_{ij}$  требуется чтобы, выполнялись условия  $\xi_{11} + \xi_{12} = 1$  и  $\xi_{21} + \xi_{22} = 1$ .

В результате данного изменения по оси Ох имеем

$$\begin{aligned} A_{0ij}^s (U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^s) &= \xi_{11} \frac{\tau}{h} A_{1ij}^s \left[ A_{2i+1j}^s \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}}{h} - A_{2ij}^s \frac{U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{h} \right] + \\ &+ \xi_{12} \frac{\tau}{l} A_{3ij}^s \left[ A_{4ij+1}^s \frac{U_{ij+1}^s - U_{ij}^s}{l} - A_{4ij}^s \frac{U_{ij}^s - U_{ij-1}^s}{l} \right] + \xi_{11} \tau A_{5ij}^s \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{2h} + \\ &+ \xi_{12} \tau A_{6ij}^s \frac{U_{ij+1}^s - U_{ij-1}^s}{2l} + \tau \left[ F_{ij}^s + \mu F_{Uij}^s \left( U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^s \right) \right] \end{aligned} \quad (2.17)$$

и по осью Оу

$$\begin{aligned} A_{0ij}^{s+\frac{1}{2}} (U_{ij}^{s+1} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}) &= \xi_{21} \frac{\tau}{h} A_{1ij}^{s+\frac{1}{2}} \left[ A_{2i+1j}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}}{h} - A_{2ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{h} \right] + \\ &+ \xi_{22} \frac{\tau}{l} A_{3ij}^{s+\frac{1}{2}} \left[ A_{4ij+1}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij+1}^{s+1} - U_{ij}^{s+1}}{l} - A_{4ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij}^{s+1} - U_{ij-1}^{s+1}}{l} \right] + \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$+\xi_{21}\tau A_{5ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}}{2h} + \xi_{22}\tau A_{6ij}^{s+\frac{1}{2}} \frac{U_{ij+1}^{s+1} - U_{ij-1}^{s+1}}{2l} + \tau \left[ F_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + \mu F_{Uij}^{s+\frac{1}{2}} \left( U_{ij}^{s+1} - U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} \right) \right].$$

Теперь, если запишем коэффициенты  $U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}}$ ,  $U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}$  и  $U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}}$ , в компактном виде то получится системы уравнений следующего вида

$$A_{ij}^s U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}} + C_{ij}^s U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + B_{ij}^s U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} = D_{ij}^s \quad (2.19)$$

Здесь  $i = \overline{2, m-1}$ ;  $j = \overline{2, n-1}$ ;  $A_{ij}^s$ ,  $C_{ij}^s$ ,  $B_{ij}^s$  и  $D_{ij}^s$ -определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} A_{ij}^s &= \xi_{11} \frac{\tau}{h^2} \left( A_{1ij}^s A_{2ij}^s - \frac{h}{2} A_{5ij}^s \right), \\ C_{ij}^s &= - \left[ A_{0ij}^s + \xi_{11} \frac{\tau}{h^2} A_{1ij}^s (A_{2i+1j}^s + A_{2ij}^s) \right] + \tau \mu F_{Uij}^s, \\ B_{ij}^s &= \xi_{11} \frac{\tau}{h^2} \left( A_{1ij}^s A_{2i+1j}^s + \frac{h}{2} A_{5ij}^s \right); \\ D_{ij}^s &= -A_{0ij}^s U_{ij}^s - \xi_{12} \frac{\tau}{l^2} A_{3ij}^s \left[ A_{4ij+1}^s (U_{ij+1}^s - U_{ij}^s) - \right. \\ &\quad \left. - A_{4ij}^s (U_{ij}^s - U_{ij-1}^s) \right] - \xi_{12} \frac{\tau}{2l} A_{6ij}^s (U_{ij+1}^s - U_{ij-1}^s) - \tau (F_{ij}^s - \mu F_{Uij}^s U_{ij}^s). \end{aligned}$$

Используя это, решения системы (2.19) ищем в следующем виде

$$U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} = \alpha_i^s U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} + \beta_i^s \quad (i = m-1, m-2, \dots, 3, 2; j = \overline{2, n-1}) \quad (2.20)$$

обычно  $\alpha_i^s$  и  $\beta_i^s$  называются коэффициентами прогонки. Для определения их значений в (3.20) принимаем  $i = i-1$  и получим

$$U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}} = \alpha_i^s U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + \beta_i^s$$

Эти величины поставим в уравнение (2.19) и получим,

$$A_{ij}^s \alpha_{i-1}^s U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + A_{ij}^s \beta_{i-1}^s + C_{ij}^s U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + B_{ij}^s U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} = D_{ij}^s \quad (2.21)$$

Из этого получим

$$\left( A_{ij}^s \alpha_{i-1}^s + C_{ij}^s \right) U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} = -B_{ij}^s U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} + D_{ij}^s - A_{ij}^s \beta_{i-1}^s$$

$$U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} = -\frac{B_{ij}^s}{C_{ij}^s + A_{ij}^s \alpha_{i-1}^s} U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} + \frac{D_{ij}^s - A_{ij}^s \beta_{i-1}^s}{C_{ij}^s + A_{ij}^s \alpha_{i-1}^s}$$

Получим формулы для определения коэффициентов прогонки

$$\alpha_i^s = -\frac{B_{ij}^s}{C_{ij}^s + A_{ij}^s \alpha_{i-1}^s}, \quad (2.22)$$

$$\beta_i^s = \frac{D_{ij}^s - A_{ij}^s \beta_{i-1}^s}{C_{ij}^s + A_{ij}^s \alpha_{i-1}^s} \quad (i = \overline{2, m-1}, j = \overline{2, n-1}) \quad (2.23)$$

Здесь значения  $\alpha_1^s$  и  $\beta_1^s$  должны быть известным. Их значения определяются по граничным условиям переменных  $x$ . В частности, для граничных условий первого рода (задача Дирихле)  $\alpha_1^s = 0$  и  $\beta_1^s = U_{1j}^s = \varphi_1$ .

Аналогично, из (2.18) упростив коэффициентов  $U_{ij-1}^{s+1}, U_{ij}^{s+1}, U_{ij+1}^{s+1}$  получим уравнения следующего вида

$$A_{ij}^{s+\frac{1}{2}} U_{ij-1}^{s+1} + C_{ij}^{s+\frac{1}{2}} U_{ij}^{s+1} + B_{ij}^{s+\frac{1}{2}} U_{ij+1}^{s+1} = D_{ij}^{s+\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

где

$$\begin{aligned} A_{ij}^{s+\frac{1}{2}} &= \xi_{22} \frac{\tau}{l^2} (A_{3ij}^{s+\frac{1}{2}} A_{4ij}^{s+\frac{1}{2}} - \frac{l}{2} A_{6ij}^{s+\frac{1}{2}}), \\ C_{ij}^{s+\frac{1}{2}} &= -A_{0ij}^{s+\frac{1}{2}} - \xi_{22} \frac{\tau}{l^2} A_{3ij}^{s+\frac{1}{2}} \left( A_{4ij+1}^{s+\frac{1}{2}} + A_{4ij}^{s+\frac{1}{2}} \right) + \tau \mu F_{U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}}, \\ B_{ij}^{s+\frac{1}{2}} &= \xi_{22} \frac{\tau}{l^2} \left( A_{3ij}^{s+\frac{1}{2}} A_{4ij+1}^{s+\frac{1}{2}} + \frac{l}{2} A_{6ij}^{s+\frac{1}{2}} \right), \\ D_{ij}^{s+\frac{1}{2}} &= -A_{0ij}^{s+\frac{1}{2}} U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - \xi_{21} \frac{\tau}{h^2} A_{1ij}^{s+\frac{1}{2}} \left[ A_{2i+1j}^{s+\frac{1}{2}} \left( U_{i+1j}^{s+1} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}} \right) - \right. \\ &\quad \left. - A_{2ij}^{s+\frac{1}{2}} \left( U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}} \right) \right] + \frac{\tau \xi_{21}}{2h} A_{5ij}^{s+\frac{1}{2}} \left( U_{i+1j}^{s+\frac{1}{2}} - U_{i-1j}^{s+\frac{1}{2}} \right) - \tau \left( F_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - \mu F_{U_{ij}^{s+\frac{1}{2}}} U_{ij}^{s+\frac{1}{2}} \right) \end{aligned}$$

Здесь тоже как в предыдущем случае решение систем уравнений (2.17) ищем в виде:

$$U_{ij}^{s+1} = \alpha_j^{s+\frac{1}{2}} U_{ij+1}^{s+1} + \beta_j^{s+\frac{1}{2}} \quad (i = \overline{2, m-1}; j = \overline{n-1, n-2, \dots, 2}) \quad (2.25)$$

А прогоночные коэффициенты определяем по следующим формулам

$$\alpha_j^{s+\frac{1}{2}} = -\frac{B_{ij}^{s+\frac{1}{2}}}{C_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + A_{ij}^{s+\frac{1}{2}}\alpha_{j-1}^{s+\frac{1}{2}}}, \quad (2.26)$$

$$\beta_j^{s+\frac{1}{2}} = \frac{D_{ij}^{s+\frac{1}{2}} - A_{ij}^{s+\frac{1}{2}}\beta_{j-1}^{s+\frac{1}{2}}}{C_{ij}^{s+\frac{1}{2}} + A_{ij}^{s+\frac{1}{2}}\alpha_{j-1}^{s+\frac{1}{2}}} \quad (i = \overline{2, m-1}, j = \overline{2, n-1}) \quad (2.27)$$

Здесь тоже значения  $\alpha_1^{s+\frac{1}{2}}$  и  $\beta_1^{s+\frac{1}{2}}$  находят из граничных условий (2.3) по переменной  $u$ . Трехточечная аппроксимация в граничных условиях задачи (2.1)-(2.6) имеет сходимость  $o(h^2)$  это имеют следующий вид

$$g_{11} \frac{-U_{3j}^{s+\frac{1}{2}} + 4U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} - 3U_{1j}^{s+\frac{1}{2}}}{2h} + g_{12}U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} = \varphi_{1j}, \quad (2.28)$$

И при (2.15)  $i=1$

$$U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} = \alpha_1^s U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} + \beta_1^s \quad (2.29)$$

Если в формуле (2.19) принимать  $i=2$  то с помощью уравнений (2.28) - (2.29) получим следующие системы уравнения

$$\begin{cases} A_{2j}^s U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} + C_{2j}^s U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} + B_{2j}^s U_{3j}^{s+\frac{1}{2}} = D_{2j}^s \\ U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} = \alpha_1^s U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} + \beta_1^s \\ g_{11} \left( -U_{3j}^{s+\frac{1}{2}} + 4U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} - 3U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} \right) + 2hg_{12}U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} = 2h\varphi_{1j}^s, \end{cases} \quad (2.30)$$

Из этих уравнений находят  $U_{1j}^{s+\frac{1}{2}}, U_{2j}^{s+\frac{1}{2}}, U_{3j}^{s+\frac{1}{2}}$ . Из (2.30-1)

$$B_{2j}^s U_{3j}^{s+\frac{1}{2}} = D_{2j}^s - A_{2j}^s U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} - C_{2j}^s U_{2j}^{s+\frac{1}{2}}$$

поставим в уравнения (2.30-3) и получим

$$g_{11} \left( -D_{2j}^s + A_{2j}^s U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} + C_{2j}^s U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} + 4B_{2j}^s U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} - 3B_{2j}^s U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} \right) + 2hg_{12}B_{2j}^s U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} = 2hB_{2j}^s \varphi_{1j}^s$$

Отсюда

$$U_{1j}^{s+\frac{1}{2}} = -\frac{g_{11} (C_{2j}^s + 4B_{2j}^s)}{g_{11} (A_{2j}^s - 3B_{2j}^s) + 2hg_{12}B_{2j}^s} U_{2j}^{s+\frac{1}{2}} + \frac{2hB_{2j}^s \varphi_{1j}^s + g_{11} D_{2j}^s}{g_{11} (A_{2j}^s - 3B_{2j}^s) + 2hg_{12}B_{2j}^s}$$

Из уравнения (2.30-2)

$$\alpha_{1j}^s = -\frac{g_{11}(C_{2j}^s + 4B_{2j}^s)}{g_{11}(A_{2j}^s - 3B_{2j}^s) + 2hg_{12}B_{2j}^s}, \quad (2.31)$$

$$\beta_{1j}^s = \frac{2hB_{2j}^s\varphi_{1j}^s + g_{11}D_{2j}^s}{g_{11}(A_{2j}^s - 3B_{2j}^s) + 2hg_{12}B_{2j}^s} \quad (2.32)$$

Теперь по переменным  $x$  значений функции в правых границах необходимо определить через  $g_{ij}$  для этого при  $i = m-1$  используем уравнений (2.19), (2.20) и (2.3) :

$$\begin{cases} A_{m-1j}^s U_{m-2j}^{s+\frac{1}{2}} + C_{m-1j}^s U_{m-1j}^{s+\frac{1}{2}} + B_{m-1j}^s U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} = D_{m-1j}^s \\ U_{m-1j}^{s+\frac{1}{2}} = \alpha_{m-1}^s U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} + \beta_{m-1}^s \\ g_{21} \frac{3U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} - 4U_{m-1j}^{s+\frac{1}{2}} + U_{m-2j}^{s+\frac{1}{2}}}{2h} + g_{22} U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} = \varphi_{2j}^s, \end{cases} \quad (2.33)$$

Для определения  $U_{m-2j}^{s+\frac{1}{2}}$  из (2.33-1) находим

$$U_{m-2j}^{s+\frac{1}{2}} = \left( D_{m-1j}^s - C_{m-1j}^s U_{m-1j}^{s+\frac{1}{2}} - B_{m-1j}^s U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} \right) / A_{m-1j}^s$$

Поставляя это в (2.33-3),

$$g_{21} \left( 3U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} - 4U_{m-1j}^{s+\frac{1}{2}} + \frac{D_{m-1j}^s - C_{m-1j}^s U_{m-1j}^{s+\frac{1}{2}} - B_{m-1j}^s U_{mj}^{s+\frac{1}{2}}}{A_{m-1j}^s} \right) + 2hg_{22} U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} = 2h\varphi_{2j}^s,$$

получим:

$$\left( 3g_{21}A_{m-1j}^s - g_{21}B_{m-1j}^s + 2hg_{22}A_{m-1j}^s \right) U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} - \left( 4g_{21}A_{m-1j}^s + g_{21}C_{m-1j}^s \right) U_{m-1j}^{s+\frac{1}{2}} + g_{21}D_{m-1j}^s = 2hA_{m-1j}^s \varphi_{2j}^s,$$

из (2.33-2)

$$\begin{aligned} & \left( 3g_{21}A_{m-1j}^s - g_{21}B_{m-1j}^s + 2hg_{22}A_{m-1j}^s \right) U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} - \left( 4g_{21}A_{m-1j}^s + g_{21}C_{m-1j}^s \right) \alpha_{m-1}^s U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} - \\ & - \left( 4g_{21}A_{m-1j}^s + g_{21}C_{m-1j}^s \right) \beta_{m-1}^s + g_{21}D_{m-1j}^s = 2hA_{m-1j}^s \varphi_{2j}^s, \end{aligned}$$

имеем

$$U_{mj}^{s+\frac{1}{2}} = \frac{2hA_{m-1j}^s \varphi_{2j}^s - g_{21}D_{m-1j}^s + g_{21}(4A_{m-1j}^s + C_{m-1j}^s)\beta_{m-1}^s}{g_{21}(3A_{m-1j}^s - B_{m-1j}^s) + 2hg_{22}A_{m-1j}^s - g_{21}\alpha_{m-1}^s(4A_{m-1j}^s + C_{m-1j}^s)} \quad (2.34)$$

Точно также по переменный у тоже определяется граничные значения.

Включая,

$$\alpha_1^{s+\frac{1}{2}} = -\frac{g_{13} \left( C_{i2}^{s+\frac{1}{2}} + 4B_{i2}^{s+\frac{1}{2}} \right)}{g_{13}A_{i2}^{s+\frac{1}{2}} - 3g_{13}B_{i2}^{s+\frac{1}{2}} + 2g_{14}lB_{i2}^{s+\frac{1}{2}}}, \quad (2.35)$$

$$\beta_1^{s+\frac{1}{2}} = -\frac{2lB_{i2}^{s+\frac{1}{2}}\varphi_{3i} + g_{13}D_{i2}^{s+\frac{1}{2}}}{g_{13}A_{i2}^{s+\frac{1}{2}} - 3g_{13}B_{i2}^{s+\frac{1}{2}} + 2g_{14}lB_{i2}^{s+\frac{1}{2}}} \quad (2.36)$$

получается значение функции

$$U_{in}^{s+1} = \frac{2lA_{in-1}^{s+\frac{1}{2}}\varphi_{4i} - g_{23}D_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} + g_{23} \left( 4A_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} + C_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} \right) \beta_{n-1}^{s+\frac{1}{2}}}{g_{23} \left( 3A_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} - B_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} \right) + 2g_{24}lA_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} - g_{23} \left( 4A_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} + C_{in-1}^{s+\frac{1}{2}} \right) \alpha_{n-1}^{s+\frac{1}{2}}} \quad (2.37)$$

Расчетный процесс можно вести по времени или итерационно. По времени известно, что расчеты ведутся только по слоям времени и линеаризация осуществляется по предыдущем слоям по времени. Но для итерационного случая расчеты осуществляются на каждом слое по времени. Поэтому данный итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не выполняется условие

$$\max_{ij} \left\{ \left| U_{ij}^{(k+1)s+1} - U_{ij}^{(k)s+1} \right| \right\} < \varepsilon \quad (2.38)$$

где  $0 < \varepsilon < 1$ ,  $k$ -номер итерационного слоя,  $k=0,1,2,\dots$ .

### 2.3. Анализ влияния анизотропии на фильтрационный режим плотин и оснований

Рассматривалась однородная земляная плотина с дренажной призмой в нижнем бьефе с непроницаемым основанием. Начальная глубина верхнего бьефа равна 22 м; заложении верхового откоса  $m=3$ ; заложении низового откоса  $m_2=2$ . Задача решалась для двух вариантов проницаемости грунта: для варианта изотропного грунта с  $K_x / K_y = 1$  и анизотропного с  $K_x / K_y = 4.0, 8.0$  и  $K_y / K_x = 4.0, 8.0$  коэффициент водоотдачи грунта тела плотины  $\mu=0.02; 0,2$ ; скорость сработки уровня воды в водохранилище  $\vartheta = 0.5; 1.0; 5.0$  м/сут, уровень нижнего бьефа принимался неизменным и равным  $H_2=3$ м. В качестве начального условия принималось решение фильтрационной задачи для установившегося режима при глубинах верхнего и нижнего бьефа равных соответственно 22 и 3м. Расчетная схема показано в рисунке 2.1

Расчетами определены положения кривой депрессии фильтрационного потока. Результаты расчета представлены в табл. 2.1-2.6 и на рис. 2.2.-2.7.

Изотропная нестационарная задача. Было принято –  $K_x=K_y=1$ . Расчет сделаны для трёх вариантов скорости сработки: при скорости сработки водохранилища  $\vartheta = 0.5$  м/сут; 1 м/сут и при скорости сработки водохранилища  $\vartheta = 5$  м/сут. Результаты решения данной нестационарной задачи при  $\mu= 0.02$ ,  $\vartheta = 0.5$  м/сут представлены в табл. 2.1 и на рисунке. 2.2, при  $\mu=0.2$ ,  $\vartheta = 0.5$  м/сут в табл. 2.5. При  $\mu= 0.2$ ,  $\vartheta = 1.0$  м/сут в табл. 2.17 и на рисунке. 2.18. За начальный момент времени ( $t=0$ ) принимался момент начала сработки. При этом верхний бьеф наполнен, и распределение фильтрационного напора в плотине соответствует стационарному случаю. В качестве расчетных моментов времени приняты моменты, когда уровни верхнего бьефа равны целому количеству метров: 20, 18, 16, 14, 12, 10, 8,6,4,2 и 0. При скорости сработки  $\vartheta = 1.0$  м/сут шаг по времени равен 1 суткам. При скорости сработки  $\vartheta = 0.5$  м/сут шаг по времени равен 2 суткам, а при скорости  $\vartheta = 5.0$  м/сут шаг времени равен 4.4 суткам.

При нестационарной изотропной фильтрации во время сработки до отметки 4.0 метра со скоростями  $\vartheta = 0.5$  м/сут (рисунок 2.2 ) происходит достаточно плавное снижение депрессионной кривой. Первые 2-ое суток после начала сработки депрессионная кривая на верховом откосе сопрягается с отметкой верхнего бьефа с нулевым уклоном. На 3-й сутки в глубине верхового клина плотины образуется область с несколько более высоким давлением, чем на поверхности. Это приводит к появлению движения, направленного к поверхности верхового откоса. На 4-сутки после начала сработки депрессионная кривая в верхней ее части приобретает уклон в сторону верхового откоса. При дальнейшем снижении уровня верхнего бьефа происходит запаздывание снижения депрессионной кривой вблизи верхового откоса. Движение фильтрационного потока, в пределах всего верхового клина начиная с момента времени  $t=4$  часам и до  $t=20$  направлено в сторону верхнего бьефа. При увеличении скорости сработки водохранилища до  $\vartheta = 1.0$  м/сут (рис.2.13) картина принципиально схожа с рассмотренной выше: начиная с момента времени  $t=1$  суток и до сработки воды до отметки 10,0 в пределах верхового клина движение фильтрационного потока направлено в сторону верхнего бьефа.

Анизотропная нестационарная задача. Для анизотропной задачи соотношения коэффициента фильтрации был принят изменяющийся в пределах  $K_x / K_y = 4,8$  и  $K_y / K_x = 4.8$  Задача решено при  $\mu = 0.02, 0.2$  и при  $\vartheta = 0,5, 1,0, 5,0$  м/сут. Результаты решения данной нестационарной задачи для  $\mu = 0,02$  представлены в таблице 2.2-2.6, и на рисунках 2.3- 2.7, при скорости сработки водохранилища  $\vartheta = 0.5$  м/сут , в таблице 2.15-2.16 и на рисунках 2.14-2.17 при скорости сработки водохранилища  $\vartheta = 1.0$  м/сут.

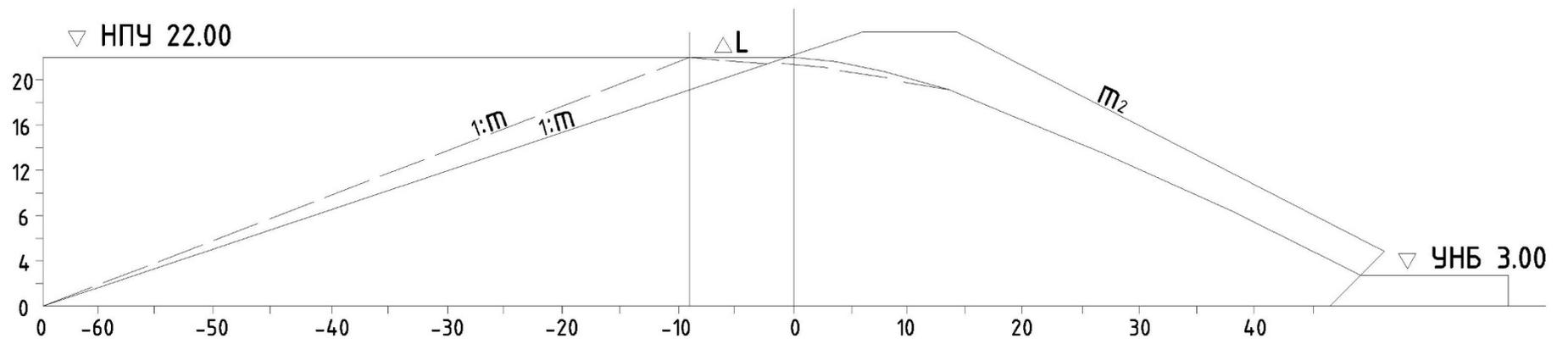


Рисунок 2.1 Расчетная схема фильтрации

Для  $\mu = 0,2$  соответственно в таб. 2.7-2.11 и рис. 2,8-2,12, в таб. 2,17-2,18 для скоростей сработки 0.5 ,1.0 , 5.0 м/сут.

Однако при больших скоростях сработки уровня воды в верхнем бьефе (3-5м/сут и более) возможно значительное отставание кривой депрессии от уровня воды верхнего бьефа и появления опасного гидродинамического давления воды направленного в сторону верхового откоса. Однако в водохранилищных плотинах снижения воды с такими скоростями практически не бывают (кроме аварийных случаев). Снижения воды с такими скоростями возможны на плотинах ГАЭС работающих в пиковом режиме, где в сутки происходит снижения и наполнения уровня воды в верхнем бьефе.

Представленные на рисунках картины позволяют проследить динамику изменений положения депрессионной поверхности, градиентов и скоростей фильтрационного потока, происходящих при сработке водохранилища. При нестационарной анизотропной фильтрации во время сработки до отметки 4,0 метра со скоростей  $\vartheta = 0,5$  м/сут при  $K_x/K_y = 4$ , (рисунок 2.4 ) происходит достаточно плавное снижение депрессионной кривой. Первые 2-ое суток после начала сработки депрессионная кривая на верховом откосе сопрягается с отметкой верхнего бьефа с практически нулевым уклоном. При  $K_x/K_y = 8$  и 10 (рисунок 2.5) во всех случаях движения воды практически всегда направлена в сторону нижнего бьефа. В отличие от изотропной фильтрации при такой же скорости сработки, больший отток воды по горизонтальному направлению приводит к тому, что депрессионная кривая для всех расчетных моментов времени имеет пологую форму с уклоном в сторону нижнего бьефа. Скорость снижения депрессионной кривой вблизи поверхности верхового откоса почти равна (с небольшим запаздыванием) скорости снижения уровня верхнего бьефа. По сравнению с изотропной фильтрацией мы имеем более равномерное изменение фильтрационного напора в расчетной области, меньшие градиенты и меньшие величины фильтрационных гидродинамических сил, направленных сторону

поверхности верхового откоса. Очевидно, это более благоприятная с точки зрения устойчивости верхового откоса картина, нежели в случае изотропной фильтрации. Тогда учет анизотропной нестационарной фильтрации в расчетах устойчивости верховых откосов грунтовых плотин при сработке водохранилища создает более благоприятные условия с точки зрения устойчивости верхового откоса.

Таблица 2.1. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	0,5	0	0,02	1,92	1,92	1	1

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=44	0	1,82	2,67	3,2	3,53	3,71	3,79	3,77	3,66	3,48	3,22
T=40		2,56	3,4	3,93	4,26	4,43	4,48	4,42	4,25	3,99	3,63
T=36			4,61	5,05	5,32	5,43	5,42	5,3	5,07	4,73	4,26
T=32			6,16	6,48	6,65	6,68	6,6	6,41	6,1	5,68	5,12
T=28				8,15	8,21	8,16	7,99	7,72	7,34	6,84	6,2
T=24				10,01	9,97	9,82	9,57	9,22	8,76	8,18	7,47
T=20					11,89	11,65	11,31	10,88	10,34	9,69	8,9
T=16					13,95	13,62	13,2	12,69	12,07	11,35	10,5
T=12						15,73	15,23	14,63	13,94	13,15	12,23
T=8						17,95	17,37	16,7	15,93	15,06	14,07
T=4							19,62	18,85	17,99	17,03	15,95
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

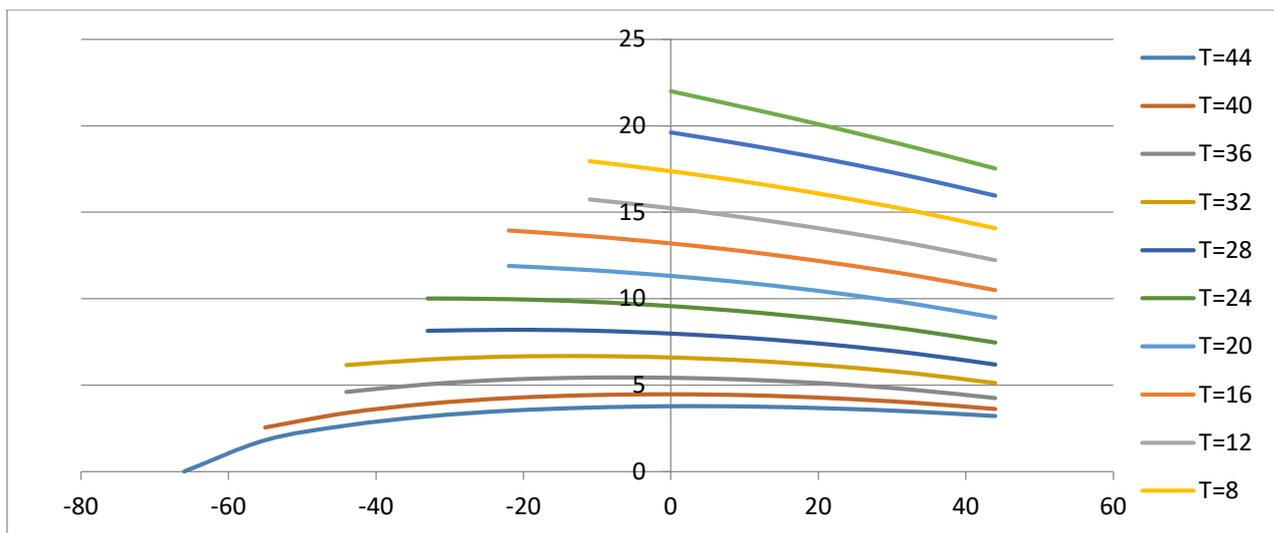


Рисунок 2.2. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=1$

Таблица 2.2. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	$K_x/K_y$	$K_y/K_x$
22	3	118	0,5	0	0,02	7,68	1,92	4	0,25

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=44	0	0,93	1,48	1,86	2,15	2,37	2,54	2,67	2,78	2,87	2,95
T=40		2,19	2,53	2,78	2,96	3,07	3,15	3,18	3,18	3,14	3,09
T=36			4,13	4,21	4,24	4,23	4,17	4,07	3,93	3,75	3,52
T=32			5,99	5,93	5,83	5,69	5,5	5,27	4,99	4,66	4,27
T=28				7,85	7,63	7,37	7,07	6,72	6,31	5,85	5,31
T=24				9,92	9,59	9,23	8,81	8,35	7,84	7,26	6,59
T=20					11,69	11,22	10,71	10,15	9,54	8,85	8,08
T=16					13,9	13,35	12,75	12,1	11,38	10,6	9,73
T=12						15,59	14,9	14,17	13,37	12,5	11,54
T=8							17,93	17,17	16,35	15,47	14,52
T=4								19,54	18,64	17,69	16,66
T=0									22	20,97	19,89

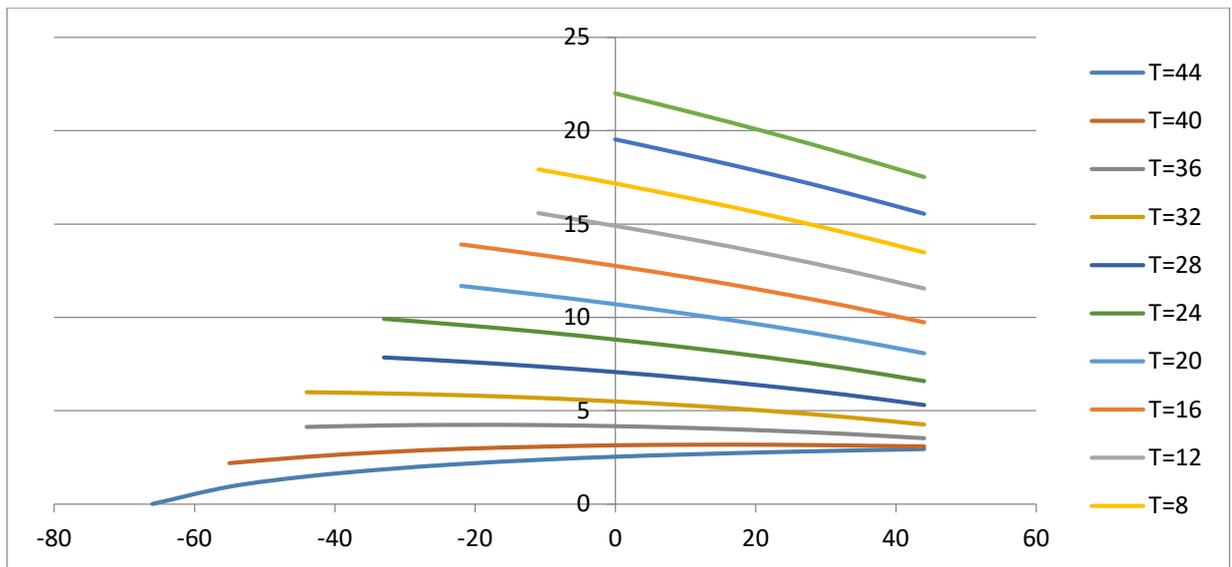


Рисунок 2.3. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=4$

Таблица 2.3. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	0,5	0	0,02	15,36	1,92	8	0,125

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=44	0	0,72	1,2	1,56	1,84	2,08	2,28	2,46	2,62	2,77	2,9
T=40		2,12	2,35	2,52	2,66	2,77	2,85	2,91	2,95	2,97	2,99
T=36			4,03	4,04	4,02	3,97	3,9	3,81	3,69	3,54	3,37
T=32			5,96	5,83	5,67	5,49	5,28	5,04	4,77	4,46	4,1
T=28				7,8	7,52	7,22	6,89	6,52	6,11	5,65	5,14
T=24				9,9	9,52	9,12	8,67	8,19	7,66	7,08	6,43
T=20					11,65	11,15	10,61	10,02	9,39	8,69	7,92
T=16					13,9	13,3	12,67	11,99	11,26	10,47	9,59
T=12						15,56	14,85	14,08	13,26	12,38	11,42
T=8						17,93	17,13	16,29	15,39	14,42	13,37
T=4							19,52	18,6	17,62	16,57	15,45
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

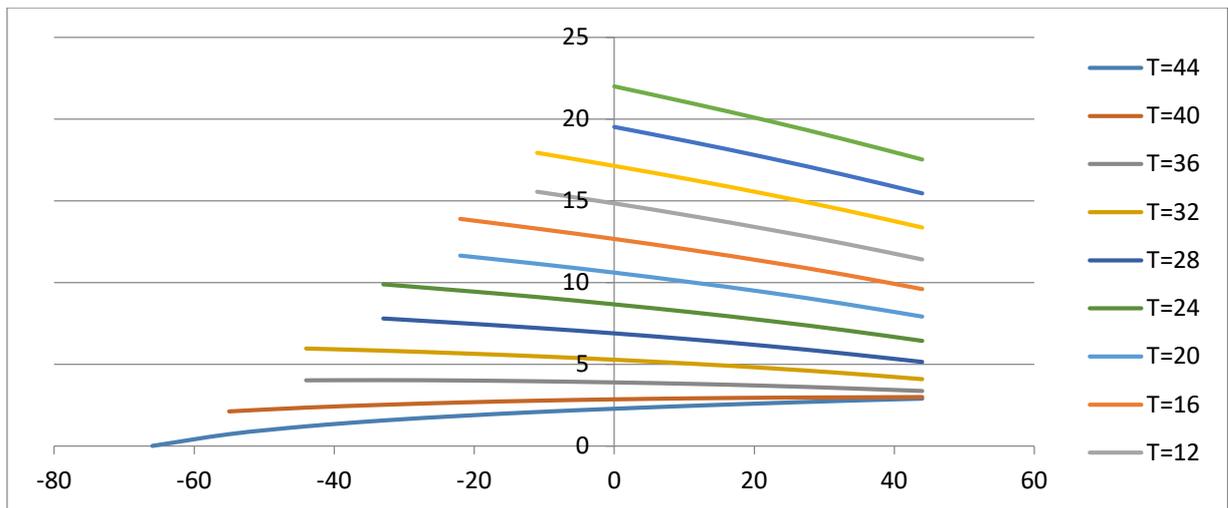


Рисунок 2.4. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=8$

Таблица 2.4. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	0,5	0	0,2	1,92	1,92	1	1

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=44	0	5,78	7,97	9,22	9,88	10,11	9,96	9,45	8,59	7,3	5,37
T=40		4,77	7,81	9,43	10,31	10,7	10,68	10,29	9,55	8,41	6,77
T=36			7,61	9,64	10,77	11,31	11,41	11,13	10,49	9,49	8,05
T=32			7,42	9,9	11,26	11,96	12,17	11,99	11,44	10,55	9,26
T=28				10,23	11,82	12,66	12,98	12,87	12,4	11,59	10,42
T=24				10,7	12,49	13,45	13,84	13,79	13,37	12,62	11,54
T=20					13,29	14,34	14,78	14,77	14,38	13,66	12,63
T=16					14,29	15,37	15,83	15,82	15,43	14,71	13,7
T=12						16,59	17,02	16,96	16,52	15,77	14,75
T=8						18,06	18,38	18,21	17,67	16,84	15,76
T=4							19,98	19,58	18,84	17,87	16,71
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

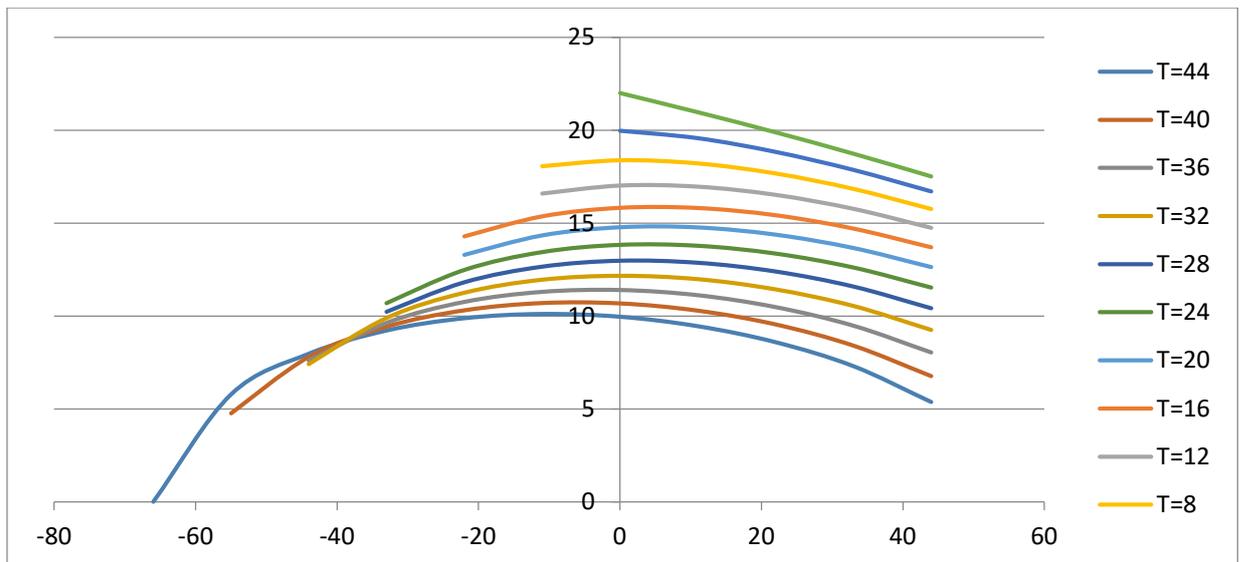


Рисунок 2.5. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=1$

Таблица 2.5. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	0,5	0	0,2	7,68	1,92	4	0,25

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=44	0	2,95	4,19	4,92	5,35	5,54	5,55	5,37	5,03	4,5	3,74
T=40		3,12	4,62	5,49	6	6,25	6,28	6,13	5,79	5,25	4,48
T=36			5,37	6,3	6,85	7,12	7,17	7,02	6,68	6,13	5,37
T=32			6,45	7,36	7,9	8,17	8,21	8,06	7,7	7,15	6,38
T=28				8,65	9,16	9,4	9,42	9,24	8,87	8,31	7,52
T=24				10,17	10,6	10,8	10,78	10,57	10,17	9,59	8,79
T=20					12,23	12,36	12,29	12,04	11,6	10,99	10,17
T=16					14,03	14,08	13,95	13,64	13,16	12,5	11,65
T=12						15,95	15,74	15,36	14,81	14,1	13,21
T=8						17,98	17,66	17,18	16,54	15,75	14,79
T=4							19,72	19,09	18,31	17,38	16,31
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

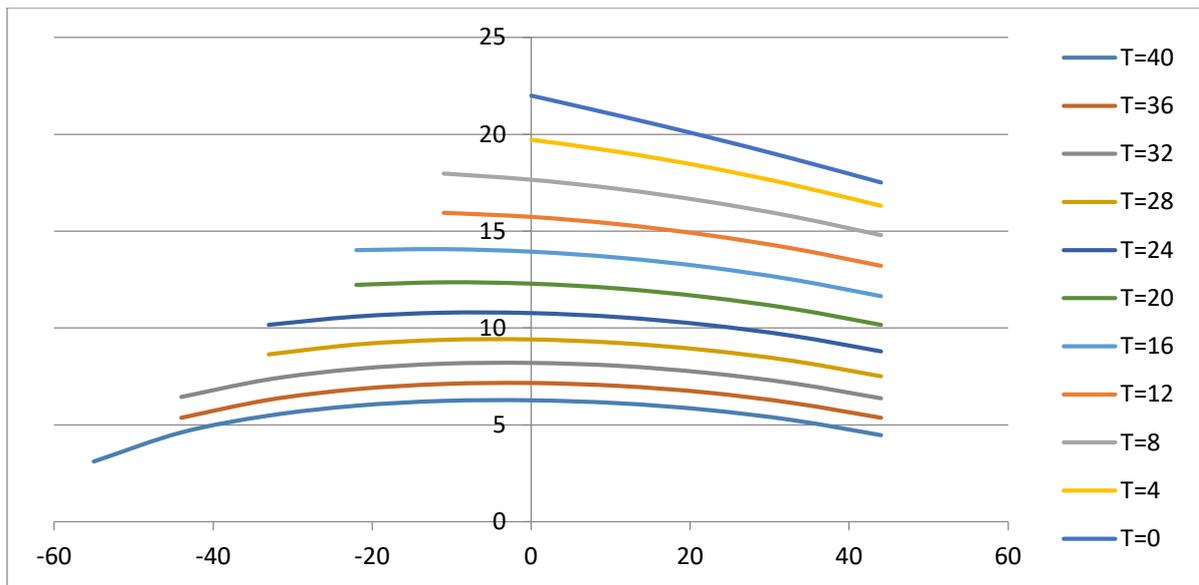


Рисунок 2.6. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=4$

Таблица 2.6. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	0,5	0	0,2	15,36	1,92	8	0,125

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=44	0	2,04	2,97	3,54	3,89	4,07	4,13	4,08	3,92	3,67	3,32
T=40		2,66	3,64	4,24	4,6	4,79	4,84	4,75	4,55	4,23	3,78
T=36			4,75	5,29	5,61	5,76	5,76	5,64	5,38	5	4,47
T=32			6,21	6,64	6,88	6,97	6,91	6,73	6,41	5,96	5,37
T=28				8,24	8,39	8,39	8,26	8,01	7,63	7,12	6,45
T=24				10,04	10,08	10	9,8	9,47	9,02	8,45	7,72
T=20					11,95	11,78	11,5	11,1	10,58	9,94	9,15
T=16					13,96	13,71	13,34	12,87	12,28	11,57	10,72
T=12						15,77	15,32	14,77	14,12	13,34	12,43
T=8						17,96	17,43	16,79	16,06	15,21	14,23
T=4							19,64	18,9	18,06	17,11	16,04
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

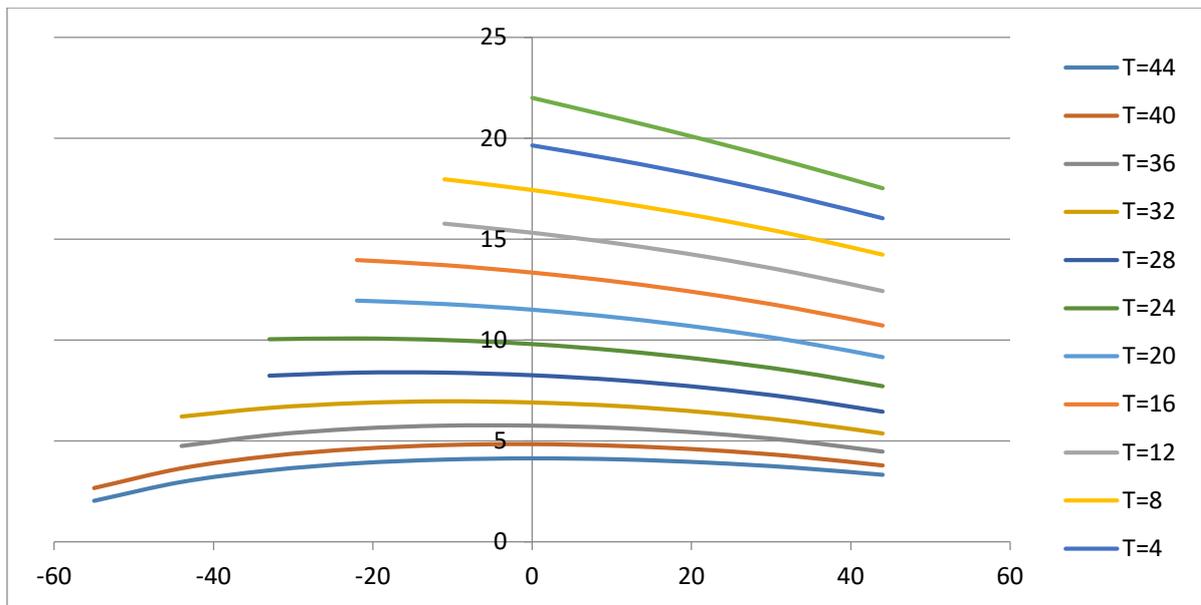


Рисунок 2.7. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=8$

Таблица 2.7. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	$K_x/K_y$	$K_y/K_x$
22	3	118	1	0	0,02	1,92	1,92	1	1

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
t=22	0	2,62	3,75	4,42	4,81	5,01	5,03	4,9	4,62	4,18	3,58
t=20		2,95	4,26	5,03	5,49	5,72	5,76	5,62	5,33	4,87	4,22
t=18			5,14	5,93	6,39	6,62	6,66	6,51	6,2	5,72	5,03
t=16			6,36	7,09	7,52	7,73	7,73	7,57	7,23	6,72	6,01
t=14				8,5	8,87	9,02	8,99	8,79	8,41	7,87	7,13
t=12				10,12	10,41	10,5	10,41	10,16	9,75	9,17	8,4
t=10					12,13	12,14	12	11,69	11,23	10,6	9,8
t=8					14,01	13,94	13,73	13,36	12,84	12,16	11,32
t=6						15,89	15,59	15,15	14,56	13,83	12,94
t=4						17,97	17,58	17,04	16,37	15,56	14,61
t=2							19,69	19,02	18,22	17,29	16,23
t=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

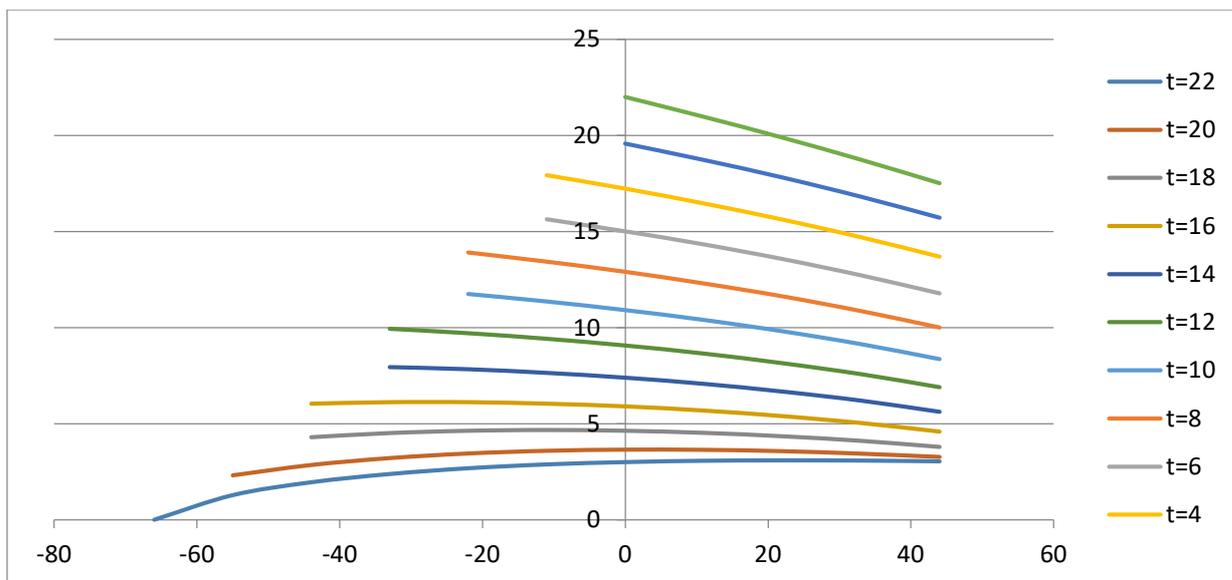


Рисунок 2.8. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=1$

Таблица 2.8. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	1	0	0,02	7,68	1,92	4	0,25

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
t=22	0	1,28	1,95	2,38	2,68	2,88	3	3,07	3,09	3,08	3,04
t=20		2,32	2,86	3,22	3,46	3,6	3,66	3,65	3,58	3,45	3,28
t=18			4,3	4,52	4,64	4,68	4,64	4,53	4,35	4,11	3,79
t=16			6,05	6,13	6,13	6,05	5,91	5,69	5,4	5,04	4,59
t=14				7,95	7,84	7,65	7,4	7,08	6,68	6,21	5,63
t=12				9,95	9,72	9,43	9,08	8,66	8,16	7,59	6,91
t=10					11,76	11,37	10,92	10,41	9,82	9,15	8,37
t=8					13,92	13,44	12,91	12,3	11,63	10,86	10
t=6						15,64	15,01	14,33	13,57	12,72	11,78
t=4						17,94	17,24	16,47	15,63	14,71	13,7
t=2							19,57	18,72	17,81	16,81	15,72
t=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

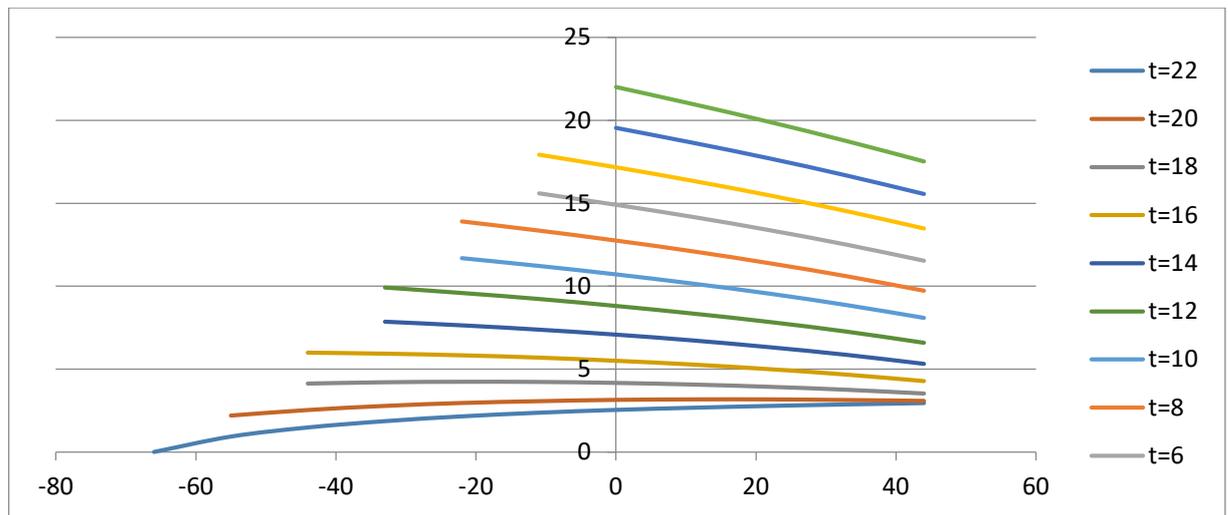


Рисунок 2.9. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=4$

Таблица 2.9. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	1	0	0,02	15,36	1,92	8	0,125

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
t=22	0	0,93	1,48	1,86	2,15	2,37	2,54	2,67	2,78	2,87	2,95
t=20		2,19	2,53	2,78	2,96	3,07	3,15	3,18	3,18	3,14	3,09
t=18			4,13	4,21	4,24	4,23	4,17	4,07	3,93	3,75	3,52
t=16			5,99	5,93	5,83	5,69	5,5	5,27	4,99	4,66	4,27
t=14				7,85	7,63	7,37	7,07	6,72	6,31	5,85	5,31
t=12				9,92	9,59	9,23	8,81	8,35	7,84	7,26	6,59
t=10					11,69	11,22	10,71	10,15	9,54	8,85	8,08
t=8					13,9	13,35	12,75	12,1	11,38	10,6	9,73
t=6						15,59	14,9	14,17	13,37	12,5	11,54
t=4						17,93	17,17	16,35	15,47	14,52	13,48
t=2							19,54	18,64	17,69	16,66	15,55
t=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

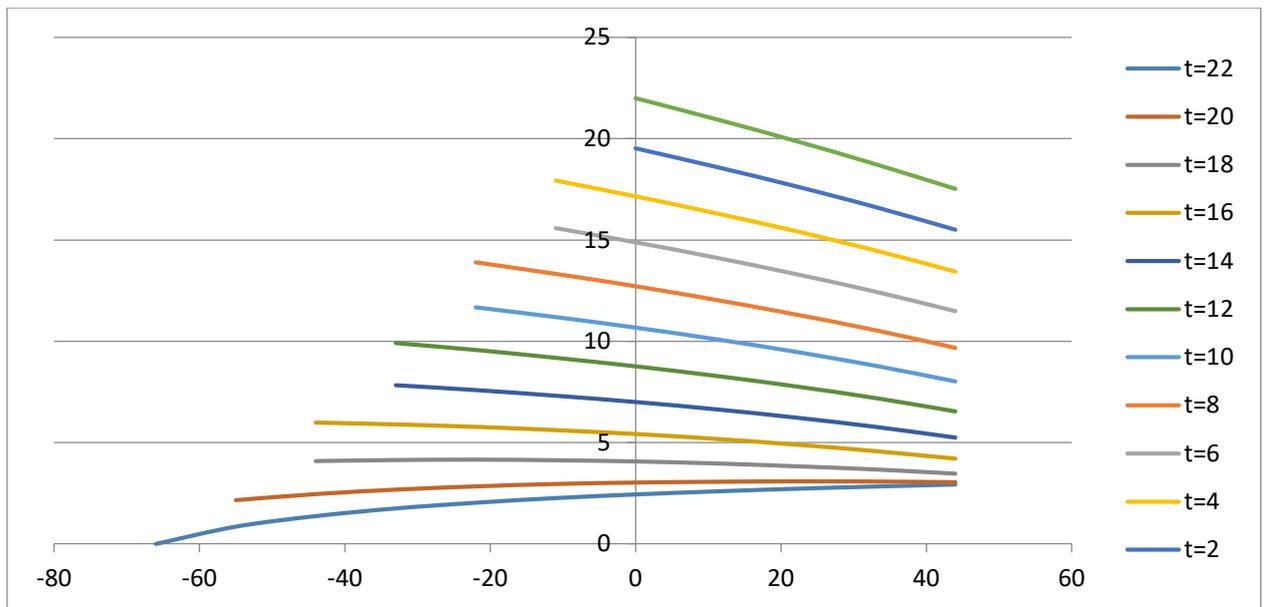


Рисунок 2.10. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=8$

Таблица 2.10. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	1	0	0,2	1,92	1,92	1	1

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
t=22	0	7,57	10,29	11,74	12,43	12,55	12,21	11,45	10,26	8,59	6,14
t=20		5,92	9,82	11,76	12,74	13,07	12,88	12,26	11,23	9,77	7,73
t=18			9,13	11,71	13,02	13,56	13,53	13,04	12,14	10,84	9,07
t=16			8,17	11,58	13,27	14,04	14,17	13,8	13,01	11,84	10,27
t=14				11,38	13,51	14,52	14,8	14,55	13,86	12,79	11,36
t=12				11,13	13,77	15,03	15,46	15,3	14,69	13,7	12,38
t=10					14,08	15,6	16,16	16,08	15,52	14,59	13,34
t=8					14,49	16,26	16,93	16,9	16,37	15,46	14,26
t=6						17,07	17,81	17,79	17,24	16,33	15,14
t=4						18,12	18,86	18,76	18,14	17,18	15,99
t=2							20,17	19,85	19,06	18	16,79
t=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

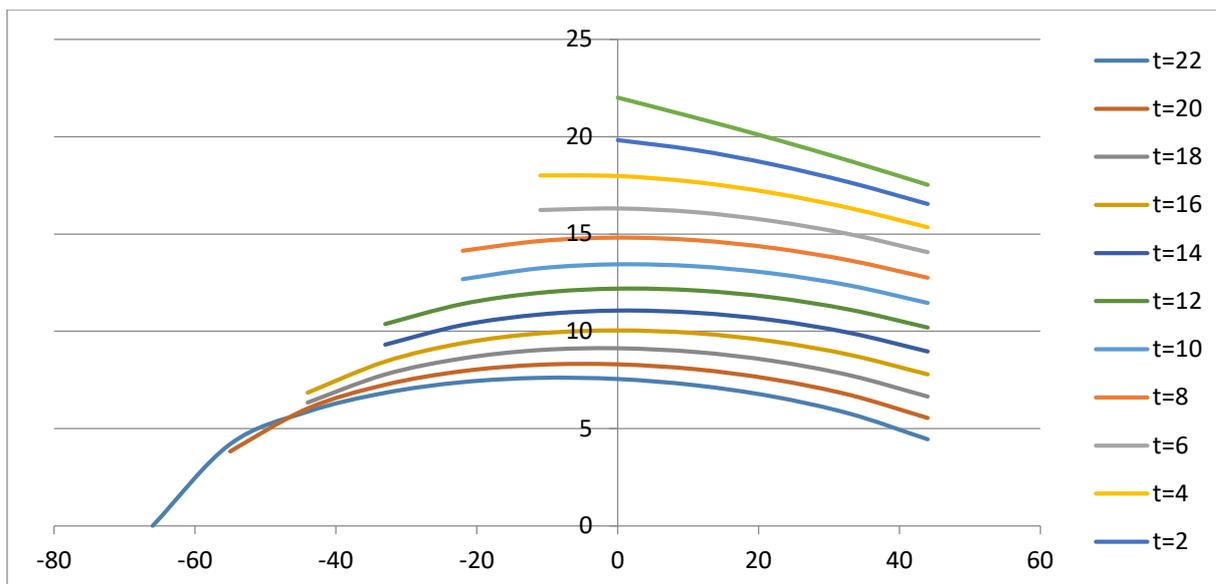


Рисунок 2.11. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=1$

Таблица 2.11. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	1	0	0,2	7,68	1,92	4	0,25

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
t=22	0	4,2	5,87	6,84	7,39	7,61	7,55	7,23	6,65	5,76	4,45
t=20		3,82	6,03	7,25	7,95	8,28	8,3	8,05	7,53	6,72	5,54
t=18			6,33	7,78	8,61	9,04	9,13	8,94	8,48	7,73	6,64
t=16			6,85	8,45	9,4	9,9	10,05	9,91	9,49	8,79	7,79
t=14				9,32	10,33	10,87	11,07	10,96	10,58	9,92	8,97
t=12				10,38	11,41	11,98	12,19	12,1	11,74	11,11	10,2
t=10					12,68	13,24	13,44	13,34	12,97	12,35	11,46
t=8					14,14	14,64	14,81	14,68	14,28	13,64	12,76
t=6						16,23	16,31	16,12	15,66	14,98	14,06
t=4						18,01	17,98	17,67	17,11	16,33	15,35
t=2							19,83	19,32	18,58	17,65	16,55
t=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

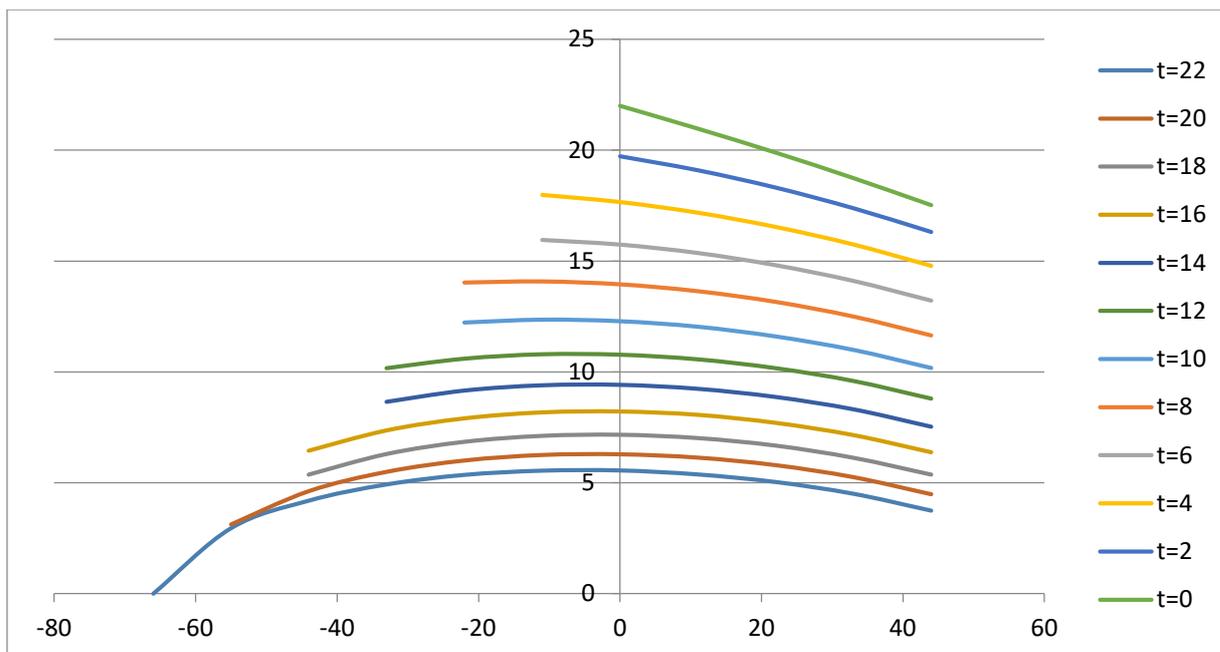


Рисунок 2.12. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=4$

Таблица 2.12. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	$K_x$	$K_y$	$K_x/K_y$	$K_y/K_x$
22	3	118	1	0	0,2	15,36	1,92	8	0,125

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
t=22	0	2,95	4,19	4,92	5,35	5,54	5,55	5,37	5,03	4,5	3,74
t=20		3,12	4,62	5,49	6	6,25	6,28	6,13	5,79	5,25	4,48
t=18			5,37	6,3	6,85	7,12	7,17	7,02	6,68	6,13	5,37
t=16			6,45	7,36	7,9	8,17	8,21	8,06	7,7	7,15	6,38
t=14				8,65	9,16	9,4	9,42	9,24	8,87	8,31	7,52
t=12				10,17	10,6	10,8	10,78	10,57	10,17	9,59	8,79
t=10					12,23	12,36	12,29	12,04	11,6	10,99	10,17
t=8					14,03	14,08	13,95	13,64	13,16	12,5	11,65
t=6						15,95	15,74	15,36	14,81	14,1	13,21
t=4							17,98	17,66	17,18	16,54	15,75
t=2								19,72	19,09	18,31	17,38
t=0									22	20,97	19,89
										18,74	17,52

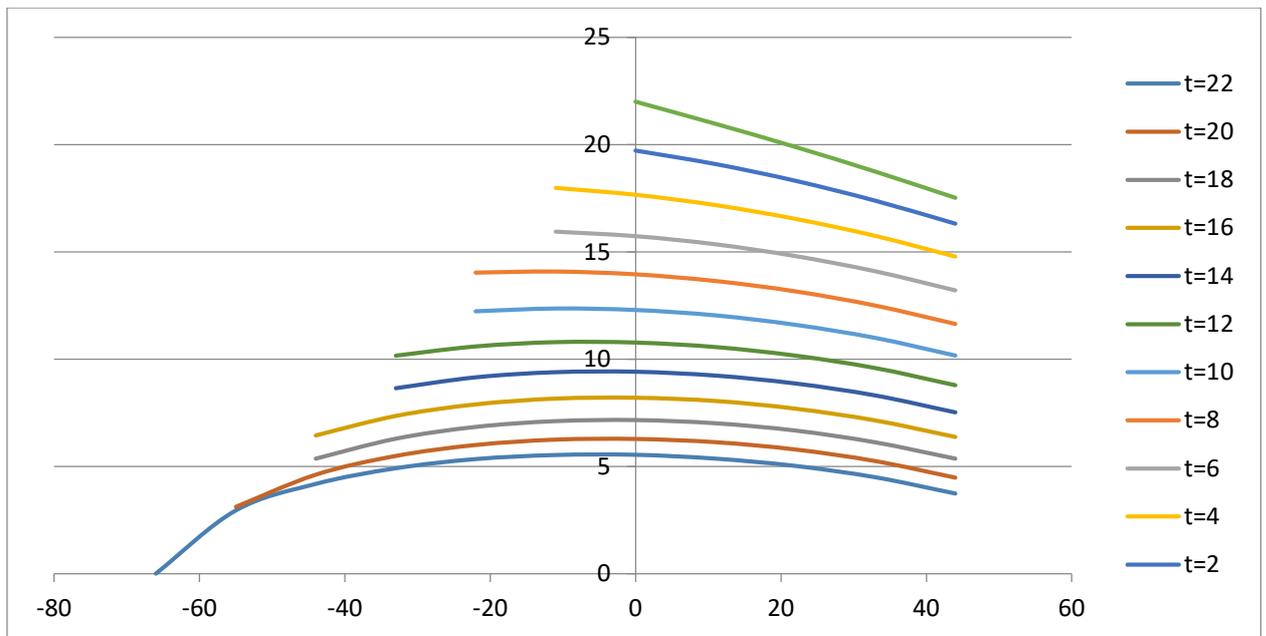


Рисунок 2.13. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=8$

Таблица 2.13. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	$K_x/K_y$	$K_y/K_x$
22	3	118	5	0	0,02	1,92	1,92	1	1

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=4,4	0	5,78	7,97	9,22	9,88	10,11	9,96	9,45	8,59	7,3	5,37
T=4		4,77	7,81	9,43	10,31	10,7	10,68	10,29	9,55	8,41	6,77
T=3,6			7,61	9,64	10,77	11,31	11,41	11,13	10,49	9,49	8,05
T=3,2			7,42	9,9	11,26	11,96	12,17	11,99	11,44	10,55	9,26
T=2,8				10,42	11,93	12,71	12,98	12,84	12,34	11,49	10,29
T=2,4				10,91	12,6	13,5	13,85	13,77	13,32	12,54	11,42
T=2					13,29	14,34	14,78	14,77	14,38	13,66	12,63
T=1,6					14,29	15,37	15,83	15,82	15,43	14,71	13,7
T=1,2						16,59	17,02	16,96	16,52	15,77	14,75
T=0,8						18,06	18,38	18,21	17,67	16,84	15,76
T=0,4							19,98	19,58	18,84	17,87	16,71
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

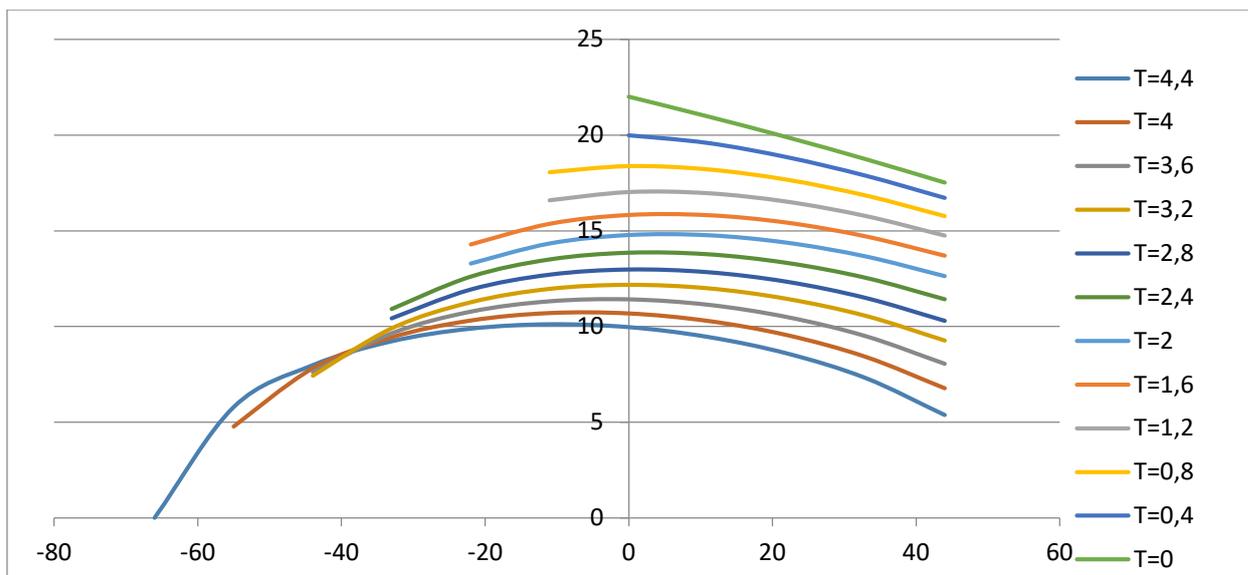


Рисунок 2.14. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=1$

Таблица 2.14. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	5	0	0,02	7,68	1,92	4	0,25

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=4,4	0	2,95	4,19	4,92	5,35	5,54	5,55	5,37	5,03	4,5	3,74
T=4		3,12	4,62	5,49	6	6,25	6,28	6,13	5,79	5,25	4,48
T=3,6			5,37	6,3	6,85	7,12	7,17	7,02	6,68	6,13	5,37
T=3,2			6,45	7,36	7,9	8,17	8,21	8,06	7,7	7,15	6,38
T=2,8				8,71	9,19	9,41	9,41	9,21	8,83	8,24	7,44
T=2,4				10,22	10,63	10,81	10,77	10,54	10,13	9,52	8,71
T=2					12,23	12,36	12,29	12,04	11,6	10,99	10,17
T=1,6					14,03	14,08	13,95	13,64	13,16	12,5	11,65
T=1,2						15,95	15,74	15,36	14,81	14,1	13,21
T=0,8							17,98	17,66	17,18	16,54	15,75
T=0,4								19,72	19,09	18,31	17,38
T=0								22	20,97	19,89	18,74

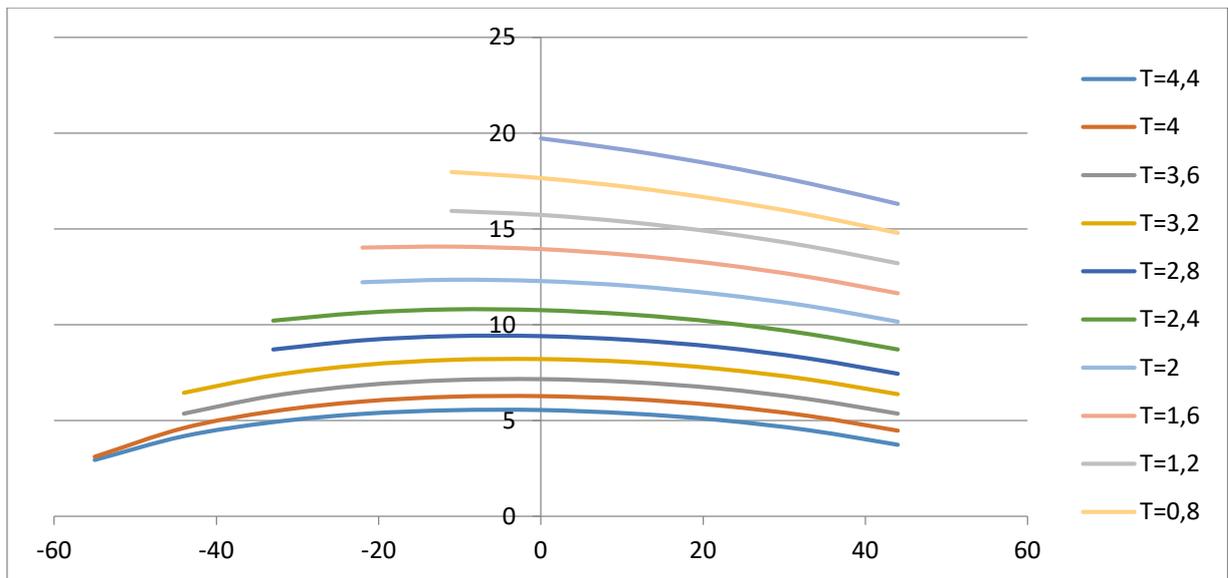


Рисунок 2.15. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=4$

Таблица 2. 15. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	5	0	0,02	15,36	1,92	8	0,125

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=4,4	0	2,04	2,97	3,54	3,89	4,07	4,13	4,08	3,92	3,67	3,32
T=4		2,66	3,64	4,24	4,6	4,79	4,84	4,75	4,55	4,23	3,78
T=3,6			4,75	5,29	5,61	5,76	5,76	5,64	5,38	5	4,47
T=3,2			6,21	6,64	6,88	6,97	6,91	6,73	6,41	5,96	5,37
T=2,8				8,26	8,39	8,38	8,24	7,98	7,59	7,06	6,39
T=2,4				10,05	10,08	9,99	9,77	9,44	8,98	8,39	7,65
T=2					11,95	11,78	11,5	11,1	10,58	9,94	9,15
T=1,6					13,96	13,71	13,34	12,87	12,28	11,57	10,72
T=1,2						15,77	15,32	14,77	14,12	13,34	12,43
T=0,8							17,96	17,43	16,79	16,06	15,21
T=0,4								19,64	18,9	18,06	17,11
T=0									22	20,97	19,89
										18,74	17,52

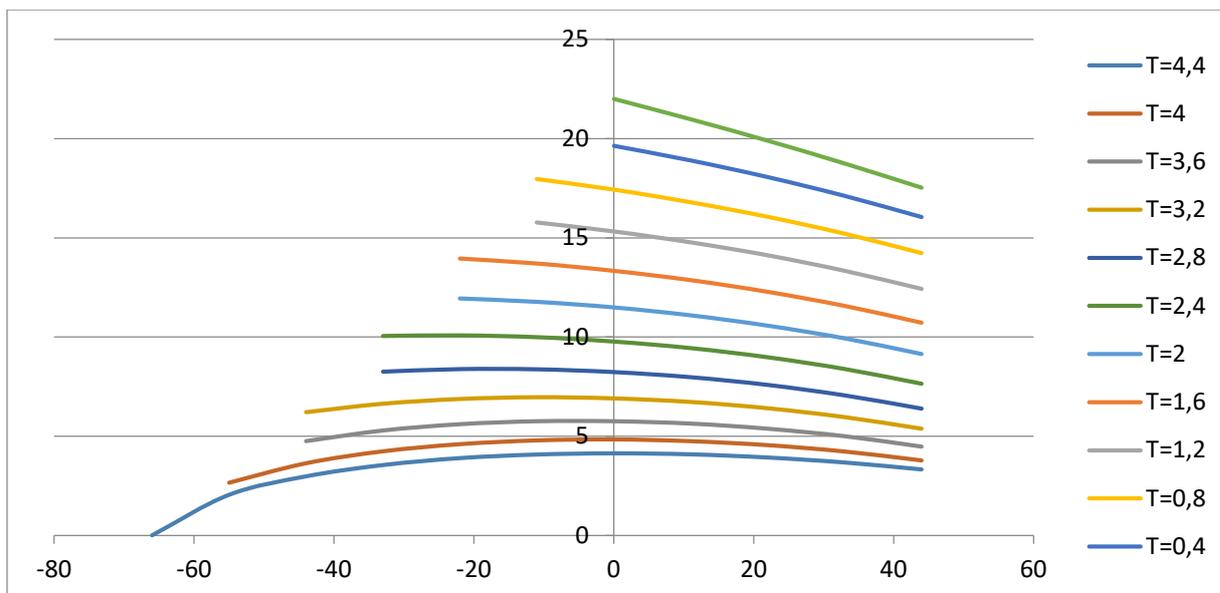


Рисунок 2.16. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=8$

Таблица 2.16. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	5	0	0,2	1,92	1,92	1	1

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=4,4	0	12,35	15,69	16,78	16,68	15,88	14,67	13,17	11,4	9,28	6,48
T=4		9,29	14,87	16,78	17,08	16,51	15,43	14,04	12,41	10,49	8,12
T=3,6			13,38	16,53	17,38	17,07	16,14	14,86	13,34	11,58	9,49
T=3,2			10,66	15,93	17,53	17,56	16,81	15,63	14,21	12,57	10,68
T=2,8				15,19	17,61	17,97	17,35	16,25	14,9	13,35	11,58
T=2,4				13,37	17,41	18,33	17,94	16,96	15,68	14,22	12,57
T=2					16,55	18,55	18,56	17,73	16,55	15,18	13,64
T=1,6					15,29	18,65	19,07	18,37	17,26	15,95	14,5
T=1,2						18,6	19,56	19,01	17,94	16,69	15,31
T=0,8						18,39	20,08	19,64	18,61	17,4	16,08
T=0,4							20,73	20,29	19,26	18,08	16,81
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

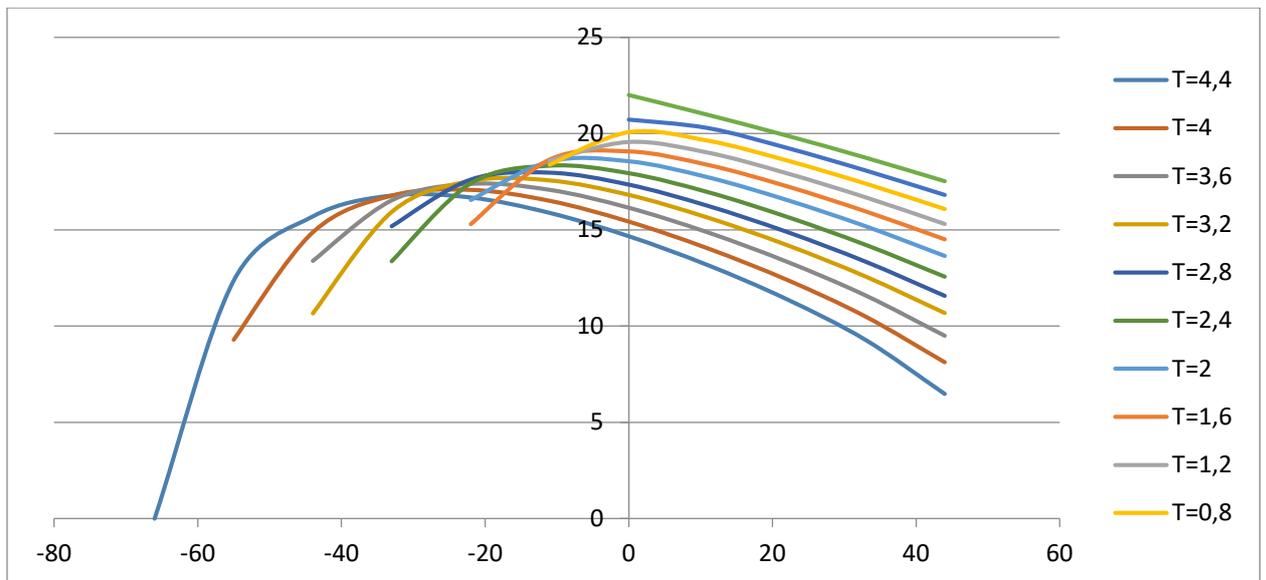


Рисунок 2.17. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=1$

Таблица 2.17. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	Kx/Ky	Ky/Kx
22	3	118	5	0	0,2	7,68	1,92	4	0,25

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=4,4	0	8,19	11,05	12,54	13,2	13,25	12,81	11,94	10,65	8,86	6,29
T=4		6,33	10,5	12,52	13,49	13,75	13,48	12,75	11,61	10,04	7,91
T=3,6			9,67	12,39	13,73	14,22	14,11	13,52	12,52	11,12	9,26
T=3,2			8,45	12,15	13,92	14,67	14,72	14,26	13,37	12,11	10,45
T=2,8				12,07	14,22	15,15	15,32	14,93	14,11	12,92	11,37
T=2,4				11,66	14,39	15,61	15,94	15,66	14,92	13,81	12,38
T=2					14,37	16,02	16,59	16,44	15,8	14,79	13,46
T=1,6					14,57	16,57	17,28	17,21	16,6	15,62	14,36
T=1,2						17,25	18,08	18,03	17,42	16,45	15,21
T=0,8						18,15	19,03	18,93	18,26	17,26	16,03
T=0,4							20,23	19,93	19,11	18,03	16,8
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

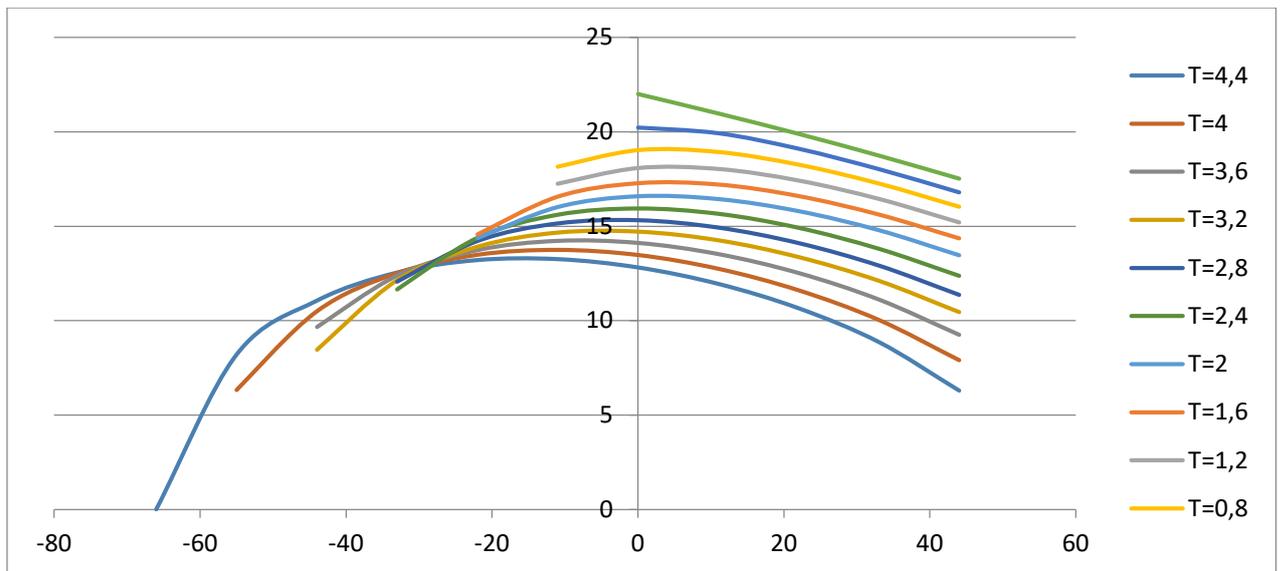


Рисунок 2.18. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=4$

Таблица 2.18. Результаты расчета определения положения кривой депрессии при

H1	H2	Lx	V1	V2	$\mu$	Kx	Ky	$K_x/K_y$	$K_y/K_x$
22	3	118	5	0	0,2	15,36	1,92	8	0,125

	-66	-55	-44	-33	-22	-11	0	11	22	33	44
T=4,4	0	6,34	8,71	10,03	10,72	10,93	10,73	10,15	9,19	7,77	5,65
T=4		5,12	8,44	10,17	11,11	11,49	11,43	10,98	10,16	8,92	7,14
T=3,6			8,08	10,29	11,5	12,06	12,13	11,8	11,09	10	8,45
T=3,2			7,64	10,42	11,9	12,64	12,85	12,62	12,01	11,04	9,66
T=2,8				10,79	12,47	13,32	13,59	13,42	12,86	11,94	10,66
T=2,4				11,07	13,01	14,01	14,39	14,28	13,79	12,94	11,75
T=2					13,53	14,73	15,23	15,21	14,79	14,01	12,91
T=1,6					14,34	15,64	16,18	16,18	15,76	14,99	13,92
T=1,2						16,73	17,27	17,23	16,78	15,98	14,91
T=0,8						18,08	18,53	18,39	17,84	16,97	15,86
T=0,4							20,04	19,67	18,92	17,92	16,74
T=0							22	20,97	19,89	18,74	17,52

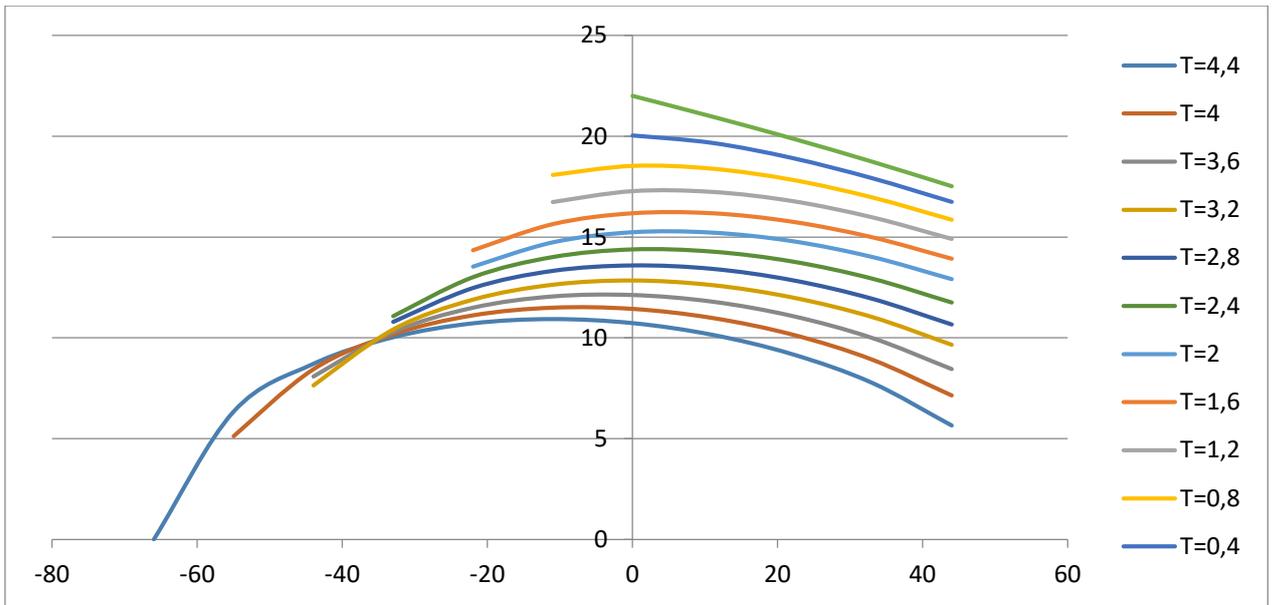


Рисунок 2.19. Расчетная положения кривой депрессии при  $K_x/K_y=8$

## **Выводы по главе 2**

1. Во многих случаях при строительстве земляных плотин грунт приобретает анизотропную (горизонтальную и наклонную) водопроницаемость. Существующие в настоящее время методы фильтрационного расчета таких анизотропных земляных плотин достаточно трудоемки и в большинстве случаев ограничиваются лишь приведением порядка проведения подобного расчета. Эти обстоятельства приводят, в ряде случаев, к авариям и разрушениям земляных плотин.
2. Методом конечных разностей дано общее решение уравнения неустановившейся фильтрации в неоднородной среде с анизотропными свойствами материалов, позволяющее решать безнапорные и напорные фильтрационные задачи с различными граничными и начальными условиями.

## Глава III. Оценка влияние фильтрационной анизотропии грунтов на устойчивости откосов грунтовых плотин и мероприятия по повышению устойчивости их откосов

### 3.1. Учет гидродинамических сил при расчете устойчивости откоса

При расчете устойчивости откосов земляных плотин данное значение имеет правильный учет влияния сил, обусловленных фильтрационным потоком, Гидродинамические силы фильтрационного потока обычно оказывают существенное влияние на работу сооружений и пренебрежение ими в ряде случаев может привести к серьезным ошибкам при проектировании. Воздействие фильтрационного потока на грунт сказывается двояким образом. Во-первых, насыщенный водой грунт имеет иные прочностные характеристики, чем грунт сухой или естественной влажности, находящийся выше депрессионной поверхности. Это различие характеристик должно учитываться в расчетах.

Во-вторых, фильтрационный поток оказывает на грунт откоса силовое воздействие в виде: объемной силы взвешивания  $W=(1-n)\gamma_w$ , направленной вертикальной вверх, и фильтрационной силы, направленной вдоль линии тока, равной по величине

$$F = \gamma_w \frac{\partial H}{\partial S} \omega \quad (3.1)$$

где  $\gamma_w$  - плотность воды;

$\frac{\partial H}{\partial S}$  - градиент напора;

$\omega$  - площадь сечения фильтрационного потока.

Способ учета влияния гидродинамических сил зависит от выбора метода расчета устойчивости откоса. Применяемые в настоящее время практические методы расчета устойчивости откосов разделяются на две группы в зависимости от гипотез, положенных в основу определения предельного напряженного состояния поверхности сдвига.

Вопрос о воздействии фильтрационных сил рассматривался многими авторами и ими предложены различные способы учета этих сил.

К числу работ в этом направлении применительно к схеме круглоцилиндрических поверхностей скольжения относятся работы: М.М.Гришина [63] П.Л. Иванова[34], Р.Р. Чугаева [105], Н.Н. Маслова [44], А.А.Ничипоровича [54], В.М.Шестакова [108],К.Терцаги [75], И.В.Федорова и В.С.Забавина [97]и др. Не приводя всех работ, посвященных в основном этому вопросу, рассмотрим лишь некоторые из них, например, такие как М.М.Гришина[63], А.И.Иванова [34], И.В.Федорова и В.С. Забавина [97].

Согласно способу М.М.Гришина [63]для определения воздействия фильтрационного потока на призму обрушения предлагается строить гидродинамическую сетку и определять элементарные фильтрационные силы для каждого элемента сетки отдельно, а затем эти элементарные силы суммировать в виде равнодействующих. Указанный способ не учитывает возможности разделения фильтрационной силы на сдвигающую и удерживающую составляющие, вследствие чего в выражении для определения коэффициента запаса устойчивости равнодействующая фильтрационных сил принимается в качестве сдвигающей силы. К недостаткам этого способа можно отнести необходимость построения гидродинамической сетки.

В способе А.И.Иванова [34] фильтрационные силы и силы взвешивания заменяются эквивалентами - контурными давлениями по границам призмы обрушения. Этот метод мало используется в практике, т.к. при его использовании требуется проведение трудоемких операций по построению эпюр горизонтальных и вертикальных составляющих фильтрационных сил.

По способу И.В.Федорова и В.С.Забавина [97]фильтрационная сила определяется для каждого расчетного отсека (рис. 3.1.). Ими предложен способ учета нормальных и касательных составляющих фильтрационных

сил при расчете устойчивости откоса. Этот метод широко применяется в практике.

Величина фильтрационных сил по этому методу определяется по формуле.

$$F_y = \gamma_w v Z_{cp} J_y \quad (3.2)$$

где  $\gamma_w$  - плотность воды;

$v$  - ширина отсека;

$Z_{cp}$  - осредненная высота отсека;

$J_y$  - градиент напора.

Рисунок

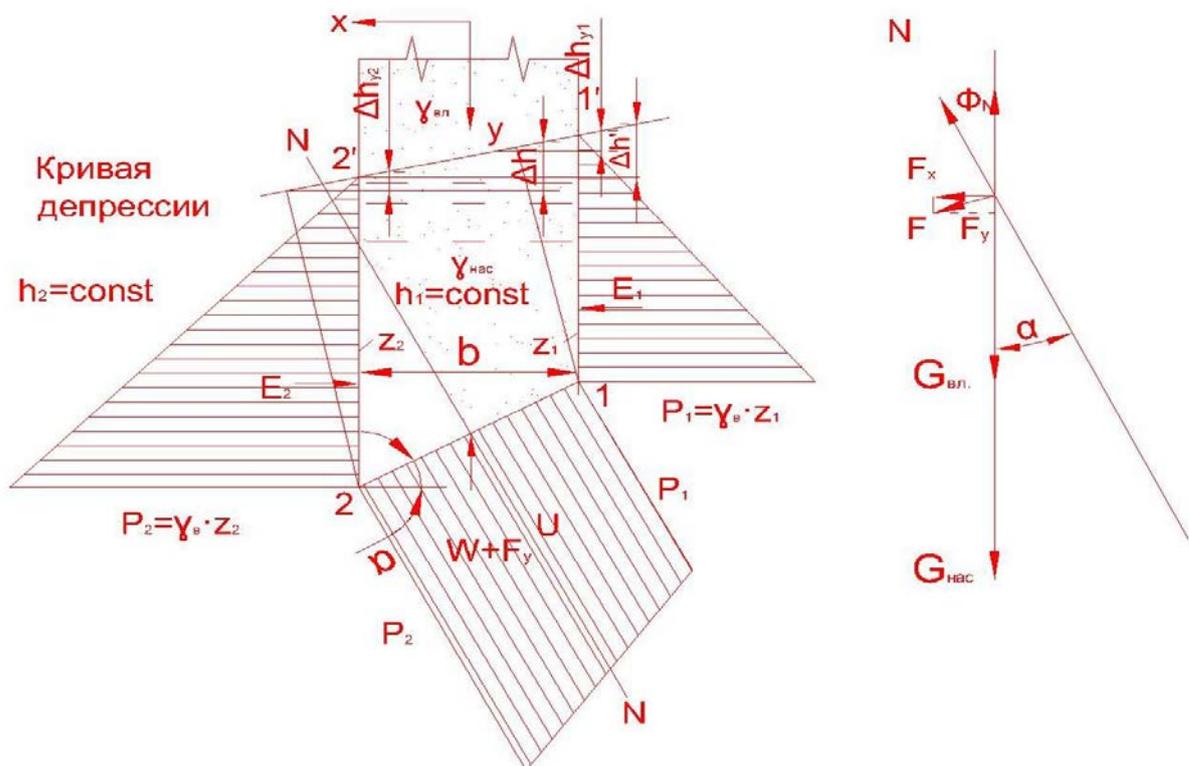


Рисунок 3. 1. Схема для учета фильтрационного воздействия воды на элемент отсека обрушения.

Найдем равнодействующую этих усилий, проектируя их на направление осей X и Y,  $\sum X = E_1 + E_2 + U \sin \alpha$ ;

$$\sum X = \frac{\gamma_B z_1^2}{2} - \frac{\gamma_B z_2^2}{2} + \gamma_B \left( \frac{z_1 + z_2}{2} \right) l \sin \alpha \quad (3.3)$$

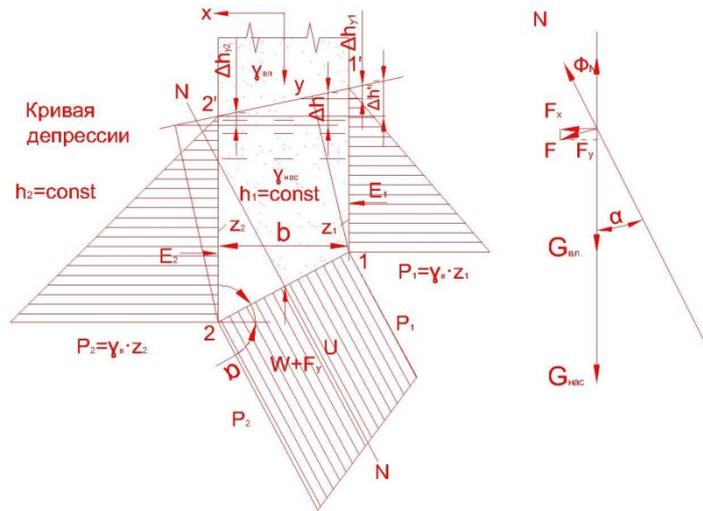


Рис.3.2. Схема для учета фильтрационного воздействия на элемент отсека обрушения

но так как  $l \sin \alpha = z_2 - z_1$  (рис. 3.1), то

$$\sum X = \frac{\gamma_B (z_1^2 - z_2^2)}{2} + \frac{\gamma_B (z_2^2 - z_1^2)}{2} = 0 \quad (3.4)$$

что является очевидным в условиях гидростатики.

Следовательно, равнодействующая имеет вертикальное направление, а ее величина равна

$$\sum Y = W = -\frac{\gamma_B (z_1 + z_2)}{2} l \cos \alpha \quad (3.5)$$

или, подставив  $l \cos \alpha = b$  и  $\frac{z_1 + z_2}{2} = z_{cp}$ , получим

$$W = -\gamma_B z_{cp} b. \quad (3.6)$$

Вследствие этого нормальное усилие, действующее на подошву элемента, будет равно<sup>1</sup>

$$\delta N = (\mathfrak{G}_{вл} + \mathfrak{G}_{нас}) \cos \alpha - \gamma_B z_{cp} b \cos \alpha \quad (3.7)$$

Однако ряд авторов [10, 11 и др.] учитывают воздействие воды на элемент отсека одной только площадью эпюры нейтральных давлений, прилегающей

к его подошве, т. е. равнодействующая имеет нормальное к подошве направление и величину  $\Phi_N = \gamma_B z_{\text{ср}} l = \gamma_B z_{\text{ср}} b / \cos \alpha$

Откуда

$$\delta N (\mathfrak{G}_{\text{вл}} + \mathfrak{G}_{\text{нас}}) \cos \alpha - \gamma_B z_{\text{ср}} b / \cos \alpha \quad (3.8)$$

В таком случае мы сталкиваемся с неуравновешенной для данного элемента горизонтальной составляющей, что противоречит условию  $F=0$  (гидростатическое состояние).

Теперь перейдем к рассмотрению той же задачи, но уже при наличии установившейся фильтрации. Для упрощения кривую депрессии и эквипотенциали будем считать в пределах элемента близкими к прямым наклонным линиям (рис. 3.2). Это дает нам право представить распределение давления воды на его контур по линейному закону, т. е. давление на глубине  $z$  будет равно  $\rho_z = \gamma_B z \cos^2 \beta$  так как величина  $\Delta h_y$  составляет  $z \sin^2 \beta$  (где  $\beta$  - наклон кривой депрессии к горизонту).

Тогда, проектируя равнодействующие гидродинамического давления по контуру элемента на оси  $X$  и  $Y$ , получаем

$$\sum X = E_1 - E_2 + U \sin \alpha; \quad (3.9)$$

$$\sum X = \frac{1}{2} (\gamma_B z_1 \cos^2 \beta) z_1 - \frac{1}{2} (\gamma_B z_2 \cos^2 \beta) z_2 + \frac{1}{2} (\gamma_B z_1 \cos^2 \beta + \gamma_B z_2 \cos^2 \beta) l \sin \alpha$$

Подставляя зависимости  $z_{\text{ср}} = \frac{z_1 + z_2}{2}$ ,

$l = \frac{b}{\cos \alpha}$  и  $z_2 = z_1 + b(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)$  можно записать

$$\sum X = \gamma_B z_{\text{ср}} \cos^2 \beta b \operatorname{tg} \beta \quad (3.10)$$

Очевидно, что величина  $b \operatorname{tg} \beta \cos^2 \beta = \Delta h_x$  (рис.3.2), т. е.  $\sum X = \gamma_B z_{\text{ср}} \Delta h_x$ , что согласуется с приведенной выше зависимостью для фильтрационной (объемной) силы

$$F_x = \gamma_B \omega I_x = \gamma_B b z_{cp} \frac{\Delta h_x}{b} = \gamma_B z_{cp} \Delta h_x \quad (3.11)$$

Спроектируем нейтральные напряжения на ось  $Y$ , тогда

$$\sum Y = -\gamma_B z_{cp} \cos^2 \beta l \cos \alpha = -\rho_{cp} b \quad (3.12)$$

Эта величина при рассмотрении объемных усилий является суммой гидродинамического взвешивания и вертикальной составляющей фильтрационной силы, т. е.

$$\sum Y = W + F_y = -\gamma_B z_{cp} b + \gamma_B z_{cp} b I_y = -\gamma_B b (z_{cp} - \Delta h_y),$$

но

$$\Delta h_y = z_{cp} \sin^2 \beta.$$

Откуда

$$\sum Y = -\gamma_B b z_{cp} \cos^2 \beta = -\rho_{cp} b. \quad (3.13)$$

Имея полную тождественность (3.12) и (3.13), можно выразить проекцию фильтрационного воздействия на нормаль к подошве элемента, т. е. найти равнодействующую нейтральных напряжений по этой подошве (рис.3.2).

$$\Phi_N = W_N + F_N = \gamma_B b z_{cp} \cos \alpha - \gamma_B b \Delta h_y \cos \alpha + \gamma_B z_{cp} \Delta h_x \sin \alpha \quad (3.12)$$

Если же считать, что эта равнодействующая определяется площадью эпюры гидродинамического давления по подошве [10 и 11], то получим

$$\Phi_N = \rho_{cp} \frac{b}{\cos \alpha} = \gamma_B z_{cp} \frac{b}{\cos \alpha} - \gamma_B \Delta h_y \frac{b}{\cos \alpha} \quad (3.13)$$

т. е. имеется расхождение с выражением (3.12). Это объясняется исключением из рассмотрения части контура элемента - его стенок.

Следует отметить, что рассмотрение элемента с построением эпюр напора по его контуру было осуществлено В. М. Шестаковым [12].

Однако полученное Шестаковым выражение (3.12) для проекции фильтрационных сил на нормаль к подошве элемента следует записывать в

виде

$$N_{cp} = z_2 I \sin \alpha + \Delta h (\cos \alpha + I \sin \alpha), * \quad (3.14)$$

Или

$$F_N = \gamma_B z_{cp} b t g \beta \sin \alpha - \gamma_B \Delta h_y b (\cos \alpha + t g \beta \sin \alpha) ** \quad (3.15)$$

Это исправление вызывается неправильной оценкой В. М. Шестаковым площадей эпюр напора на вертикальным стенкам, где он принимает разность напоров в нижней и в верхней точках  $\Delta h_y$  для обоих сечений одинаковой.

Внесенное уточнение позволяет легко установить тождественность выражений для  $F_N$ , так как  $\Delta h_x = b t g \alpha (z_{cp} - \Delta h_y)$ .

### 3.2. Расчет устойчивости верхового откоса грунтовых плотин с учетом фильтрационной анизотропии грунта

Рассмотрим устойчивость верхового откоса плотин, характеризуемой следующими данными: высота  $hn = 22$  м; заложение верхового откоса  $m_1 = 3,0$ ; плотность грунта  $\gamma_{вл} = 2,1$  т/м<sup>3</sup>, плотность взвешенного грунта  $\gamma_{взв} = 1,1$  т/м<sup>3</sup>; угол внутреннего трения грунта  $\varphi = 23^\circ$ , удельное сцепление грунта  $C = 7,5$  тс/м<sup>2</sup>.

Расчёты выполнены с учетом неустановившейся фильтрации для различной степени опорожнения бьефа.

Положение кривой депрессии, соответствующее каждой величине определено по результатам исследований.

Расчеты устойчивости откосов плотины проводились на ЭВМ ЕС-1020 по программе "РУЗО", составленной Харьковским Водоканал- проектом при научно-методической помощи ВНИИ ВОДГЕО.

Программа включает расчет по формулам: К.Терцаги [75], И.В. Федорова [97], А.А. Ничипоровича [54], и Р.Р.Чугаева [105].

Выбор этих формул обусловлен возможностью более полного учета действующих сил, включая фильтрационные и сейсмические силы.

Учитывая, что при численном решении осуществляется дискретное рассмотрение призмы обрушения путем ее деления на "  $n$  " элементарных фрагментов, выражение для коэффициента запаса устойчивости, обобщающее все формулы, введенные в программу "РУЗО.

Результаты расчета при различных скоростях сработки приведена в таблице 3.1

Таблица 3.1. Результаты расчета устойчивости верхового откоса

Скорость сработки уровня воды в верхнем бьефе в м/сут	Время снижения В сут.	$K_z$ изотроп	$K_z$ анизотроп $K_x/K_y=4$	$K_z$ анизотроп $K_y/K_x=8$
V=0.5	T=0	1,75	1,75	1,75
	T=8	1,7	1,72	1,74
	T=12	1,67	1,7	1,71
	T=24	1,48	1,49	1,51
	T=36	1,40	1,41	1,42
	T=44	1,26	1,28	1,30
V=1	T=0	1,75	1,75	1,75
	T=4	1,54	1,56	1,59
	T=6	1,52	1,53	1,55
	T=10	1,44	1,46	1,48
	T=18	1,36	1,38	1,39
	T=22	1,19	1,21	1,25
V=5	T=0	1,75	1,75	1,75
	T=0,8	1,51	1,46	1,47
	T=1,2	1,50	1,42	1,44
	T=2,4	1,46	1,43	1,46
	T=3,6	1,33	1,19	1,27
	T=4,4	1,054	0,93	0,96

Как показало результаты расчетов устойчивости верхового откоса при различных скоростях снижения уровня воды в верхнем бьефе (табл.5.)

### 3.3. Мероприятие по повышению устойчивости откосов грунтовых плотин в анизотропных грунтах

#### 3.3.1. Методы дренирования верховой упорной призмы плотин

В настоящее время существуют различные методы дренирования и защиты откоса от оползания при снижении воды верхнем бьефе. К их числу можно отнести следующие:

- 1) устройство крупнозернистого покрытия в виде пригрузки откоса (рис. 3.3. а);
- 2) дренирование откоса с помощью песчаной подсыпки в виде слоев постоянной и переменной толщины (рис. 3.3. б);
- 3) устройство вертикальных, наклонных и горизонтальных дрен в теле плотины (рис. 3.3. в, г).

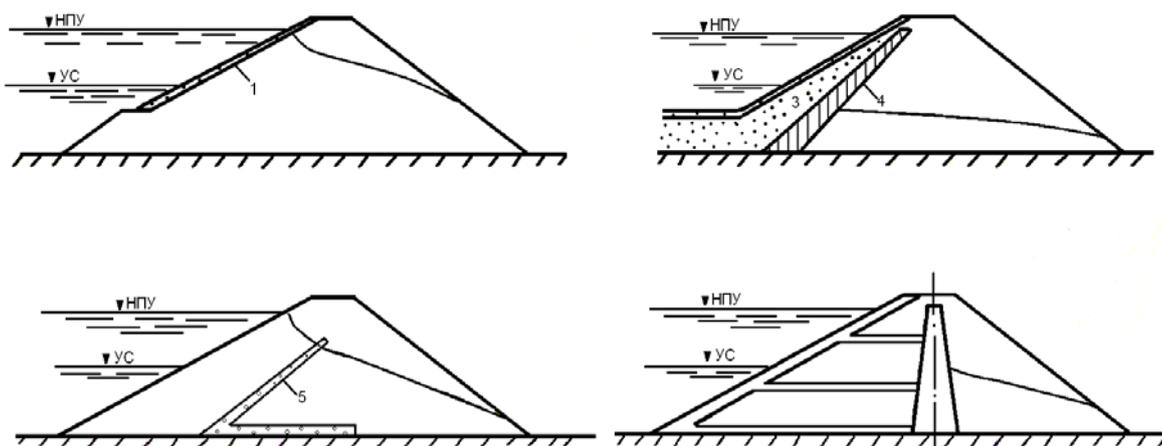


Рис. 3.3. Методы дренирования верховой призмы плотин при снижении уровня верхнего бьефа

- |                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| 1- дренажная пригрузка;      | 4- глинистый экран;        |
| 2- защитное покрытие откоса; | 5- наклонный дренаж;       |
| 3- песчаный слой;            | 6- горизонтальные дренажи. |

При снижении уровня воды верхнем бьефе результате действия фильтрационных сил в верховом откосе может произойти нарушение

местной устойчивости, т.е. произойти местный фильтрационный выпор, который можно рассматривать как начало разрушения верхового откоса. Для предотвращения указанных явлений применяются различные мероприятия, обеспечивающие прежде всего местную устойчивость фильтрующих откосов.

Необходимо сразу отметить, что устройство нефилтрующих креплений не всегда эффективно в основном по следующей причине. На контакте крепления и грунта откоса, из-за отсутствия условий для свободного выхода воды, могут возникнуть значительные выходные градиенты, способные вызвать вынос грунта и как следствие, смещение крепления и его разрушение.

Устройство же креплений по принципу дренажной пригрузки дает возможность добиться нужного эффекта. К ним относится устройство дренажных пригрузок верхового откоса из крупнозернистого материала по типу на рис. 3.3а.

При расчете местного фильтрационного выпора требуется установить толщину слоя крупнозернистого покрытия, обеспечивающую отсутствие этого разрушения. В общем виде откос указанной конструкции в условиях сработки ВБ будет находиться в состоянии предельного равновесия, если угол  $\alpha_0$ , образованный линией откоса и линией эквипотенциального поля результирующих гидродинамических сил  $\Phi_0 = \text{const}$ , будет удовлетворять равенству  $\alpha_0 = \varphi$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения материала пригрузки (рис.3.4). если же на поверхности откоса встречаются участки, характеризующиеся неравенством  $\alpha_0 > \varphi$ , то в их пределах откос будет неустойчивым. В таких случаях покрытием откоса традиционно используемой пригрузкой из крупнозернистых материалов сравнительно небольшой толщины достичь необходимого эффекта невозможно. Здесь для обеспечения устойчивости грунтов в поверхностной зоне откоса требуется уположение последних, что, однако, ведет к удорожанию плотины.

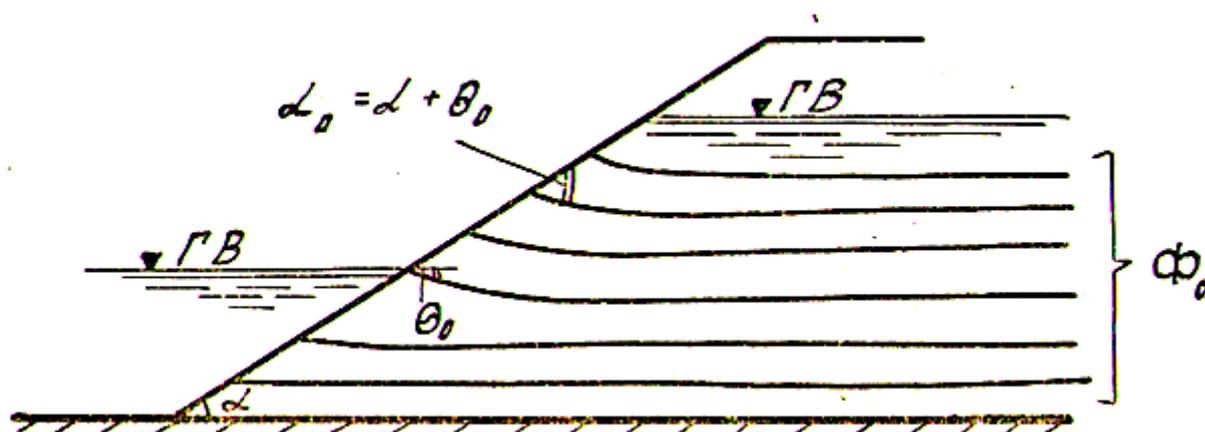


Рис. 3.4. Схема к определению возможного очага выпора с помощью функции поля результирующих сил по Чугаеву Р.Р.

В работе В.П.Недрига [37] рассмотрен метод расчета скорости понижения депрессионной поверхности под покрытием откоса плотины, вызванного снижением уровня воды в водохранилище по двух схемам очертания песчаного слоя грунта: с постоянной и переменной толщиной песчаного слоя (рис. 3.5).

Для каждой из этих схем рассмотрена неустановившаяся фильтрация в песчаном подстилающем слое как при мгновенном снижении уровня воды в водохранилище, которое может иметь место по различным причинам, включая и аварийное состояние сооружения, так и при постепенном (плавном) его понижении, соответствующем случаям нормальной работы ГАЭС или предпаводковой с работки водохранилища.

В результате расчета неустановившейся фильтрации строится совмещенный график уровней воды в водохранилище и под покрытием, по которому и определяется напор воды на покрытие. Получены расчетные зависимости для определения времени понижения уровня воды под покрытием.

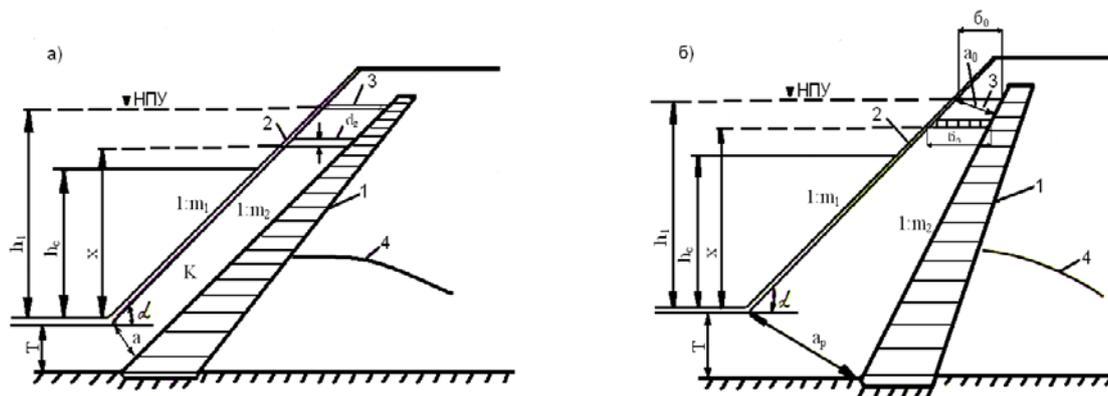


Рис. 3.5. Схемы к расчету понижения депрессионной поверхности фильтрационного потока в песчаном слое под непроницаемым покрытием откоса земляной плотины

а- покрытие с постоянной толщиной песчаного слоя;

б- покрытие с переменной толщиной песчаного слоя.

1- глинистый экран; 2- защитное покрытие откоса; 3- уровень воды под покрытием в начальный момент его понижения; 4- кривая депрессии в теле плотины.

В работе М.П.Малышева, Л.Д.Сорокоумова [28] приводятся результаты экспериментальных исследований фильтрации верхового клина напорных дамб ГАЭС с защитным слоем из песка или гравия. Авторы отмечают, что в этом случае в самом защитном слое создается неустановившийся фильтрационный поток, неблагоприятно воздействующий на плиты крепления.

Задача исследований в этом случае сводилась к следующему. Чтобы гидродинамическое давление воды за креплением откоса не могло нарушить последнее, необходимо было добиться минимального отставания депрессионной поверхности за креплением откоса при сработке уровня воды в водохранилище.

В общем случае отставание уровня за облицовкой в однослойном защитном слое при условии отвода воды из-под крепления в верхний или

нижний бьеф зависит от заложения верхнего откоса, скорости снижения уровня воды в верхнем бьефе и от коэффициента фильтрации защитного слоя. Так, например, при одинаковом заложении откоса 1: 3,5 и скорости понижения воды в верхний бьеф отставание кривой депрессии за облицовкой в защитном слое толщиной 2м составляет: при коэффициенте фильтрации материала защитного слоя 15м /сут -6м; 30м/сут -4,1м; 100м/сут - 2м;  $K=300\text{м} / \text{сут} -0,5\text{м}$ ; и 700м/сут -0,4м.

Из этого видно, что при маленьком коэффициенте фильтрации защитного слоя больше отставание кривых депрессии и следовательно, требуется увеличить толщину крепления.

### **3.3.2. Дренажное устройство верховой упорной призмы с помощью различных конструкций дренажей**

В последнее время получила широкое распространение конструкция дренажей в виде горизонтальных, наклонных или вертикальных лент, заглубленных в тело плотины. Среди них особое место занимают горизонтальные дренажи, выполняющие различные функции. Поэтому их можно разделить по условиям использования на следующие виды:

1) горизонтальные дренажи, применяемые для уменьшения порового давления и ускорения процесса консолидации в глинистых грунтах;

2) горизонтальные дренажи, применяемые с целью повышения сейсмостойкости плотин;

3) горизонтальные дренажи, применяемые для повышения устойчивости верхового откоса плотины из маловодопроницаемых грунтов при быстром снижении горизонтов воды в верхнем бьефе.

1) Горизонтальные дренажи, применяемые для уменьшения порового давления и ускорения процесса консолидации малопроницаемых грунтов.

Обычно в практике гидротехнического строительства переувлажненные грунты считаются мало пригодными для строительства плотин. Использование подобных материалов приводит к появлению в грунте избыточного порового давления, значительно снижающего устойчивость откосов. Это обусловило их применение только при строительстве низконапорных плотин высотой до 20 м. При этом для обеспечения устойчивости откосов таких плотин либо их существенно уполаживают, либо осуществляют укладку подсушенного грунта, что связано со значительными трудностями.

Одним из способов, позволяющим успешно использовать переувлажненные грунты, является устройство дренажа в теле плотины, впервые примененного в плотине ИСК в Великобритании (рис. 6.4) [53].

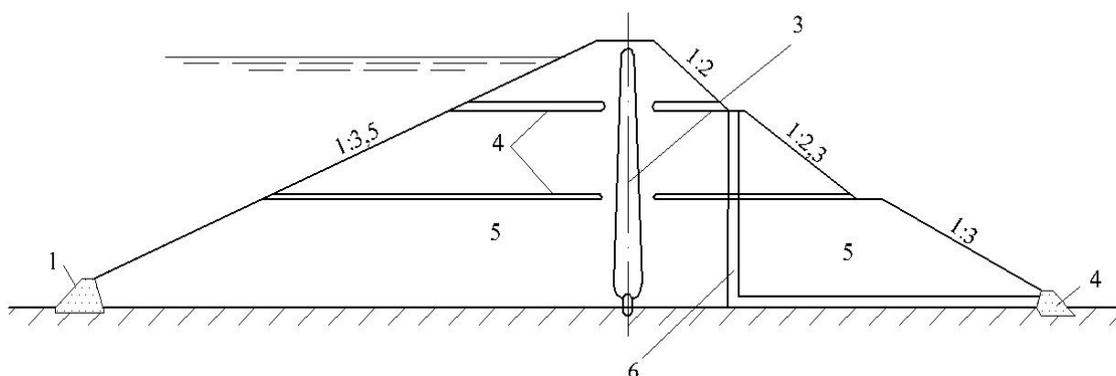


Рис. 3.6. Поперечный разрез плотины ИСК

1- верховая гравийно-песчаная упорная призма; 2- низовая гравийно-песчаная упорная призма; 3-ядро из глины; 4- горизонтальный дренаж; 5- уплотненный глинистый материал; 6- дренаж низовой призмы.

В период возведения этого сооружения было обнаружено наличие высокого порового давления в его теле из глинистого грунта. Исследования показали, что возведение сооружения с принятой интенсивностью может вызвать оползание откосов раньше достижения им полной высоты. Укладка дренирующих слоев в верховом клине плотины позволила обеспечить снижение порового давления, достаточное для успешного завершения строительства.

Устойчивости откосов плотин Тенугат и Тава также были обеспечены за счет применения горизонтальных дрен, позволившими получить минимальные значения коэффициентов запаса устойчивости соответственно 1,55 и 1,37 [90,96].

В связи с широким распространением в Великобритании глинистых грунтов при строительстве плотин в ряде современных проектов (Вест – Уотер, Сельсет, Бау-Бич, Дервент, Блеск-Эск, Киелдер, Форемарк) приняты конструкции плотин из глин с использованием дренирующих слоев.

### Выводы по главе 3

1. Расчетами устойчивости верхового откосов с учетом анизотропности грунтов установлено, что при маленких скоростях снижения откосов до 2 м/сут устойчивость верхового откоса повышается по сравнению с изотропной фильтрацией за счет более равномерного изменения фильтрационного напора в расчетной области.

2. Однако при больших скоростях сработки уровня воды в верхнем бьефе (3-5м/сут и более) возможно значительное отставание кривой депрессии от уровня воды верхнего бьефа и появления опасного гидродинамического давления воды направленного в сторону верхового откоса. Однако в водохранилищных плотинах снижения воды с такими скоростями практически не бывают (кроме аварийных случаев). Снижения воды с такими скоростями возможны на плотинах ГАЭС работающих в пиковом режиме, где в сутки происходит снижения и наполнения уровня воды в верхнем бьефе.

3. В качестве конструктивного мероприятия при анизотропности грунта можно рекомендовать при  $K_{гор.} > K_{вер.}$  –вертикальные дренажи, различные конструкции фильтрационных стаканов в откосах; при  $K_{гор.} < K_{вер.}$  одноярусные и многоярусные горизонтальные пластовые дренажи.

## Заключение

1. Использование в инженерных расчетах большого числа методов для устойчивости откосов грунтовых плотин свидетельствует о сложности задачи и незавершенности процесса поиска ее решения, которое удовлетворяло бы исследователей.
2. Метод Федорсова нынешнее время считается самым оптимальным вариантом для решения задач расчета устойчивости откосов грунтовых плотин. В этом методе учитывается все происходящие явление в теле грунтовых плотин.
3. Трудоемкость выполнения расчета устойчивости откосов грунтовых плотин в ручную, вынудила инженеров и исследователей созданию программ для расчета в ЭВМ.
4. Необходимо и в дальнейшем развивать методику и программы расчета устойчивости откосов для получения более полного решения множества практических задач.
5. Во многих случаях при строительстве земляных плотин грунт приобретает анизотропную (горизонтальную и наклонную) водопроницаемость. Существующие в настоящее время методы фильтрационного расчета таких анизотропных земляных плотин достаточно трудоемки и в большинстве случаев ограничиваются лишь приведением порядка проведения подобного расчета. Эти обстоятельства приводят, в ряде случаев, к авариям и разрушениям земляных плотин.
6. Методом конечных разностей дано общее решение уравнения неустановившейся фильтрации в неоднородной среде с анизотропными свойствами материалов, позволяющее решать безнапорные и напорные фильтрационные задачи с различными граничными и начальными условиями.
7. Расчетами устойчивости верхового откосов с учетом анизотропности грунтов установлено, что при маленких скоростях снижения откосов до 2

м/сут устойчивость верхового откоса повышается по сравнению с изотропной фильтрацией за счет более равномерного изменения фильтрационного напора в расчетной области.

8. Однако при больших скоростях сброски уровня воды в верхнем бьефе (3-5 м/сут и более) возможно значительное отставание кривой депрессии от уровня воды верхнего бьефа и появления опасного гидродинамического давления воды направленного в сторону верхового откоса. Однако в водохранилищных плотинах снижения воды с такими скоростями практически не бывают (кроме аварийных случаев). Снижения воды с такими скоростями возможны на плотинах ГАЭС работающих в пиковом режиме, где в сутки происходит снижения и наполнения уровня воды в верхнем бьефе.

9. В качестве конструктивного мероприятия при анизотропности грунта можно рекомендовать при  $K_{гор.} > K_{вер.}$  –вертикальные дренажи, различные конструкции фильтрационных стаканов в откосах; при  $K_{гор.} < K_{вер.}$  одноярусные и многоярусные горизонтальные пластовые дренажи.

## Список литературы

1. Абелев Ю.М., Абелев М.Ю. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. — 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1979. - 271 с.
2. Айрапетян Р.А. Проектирование каменно-земляных и каменно-набросных плотин. М: «Энергия»,1975, 328с.
3. Анахаев К.Н. Фильтрация в анизотропных грунтовых плотинах. Нальчик, 1998,42 с.
4. Анахаев К.Н., Ляхевич Р.А., Фильтрация в анизотропных грунтовых плотинах. Гидротехническое строительство" 2005 ,№ 4 ,с.19-22.
5. Анахаев К.Н. Совершенствование конструкции, методов расчётного обоснования и проектирования противофильтрационных устройств грунтовых плотин. Дис. ... д. т. н. (05. 23. 07). Москва. МГУП, 1997, 521с.
6. Анискин Н.А. Неустановившаяся фильтрация в грунтовых плотинах и основаниях. Вестник МГСУ 2009 -№2, с.70-79.
7. Анискин Н.А., Махса Мемарианфард. Численное моделирование анизотропной фильтрации в грунтовых плотинах.// Научно-технический журнал "Вестник МГСУ" № 4/2009.-С. 219-224.
8. Анискин Н.А., Махса Мемарианфард. Расчет фильтрации в грунтовых плотинах численным методом.//Научно-технический журнал "Вестник МГСУ" № 1/2010.-С. 169-174.
9. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. Гостехиздат, 1953, 616 с.
10. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Фильтрационные расчёты гидротехнических сооружений. М.-Л., Стройиздат, 1955, 291с.
11. Аравин В.И., Мошкова М.А. Исследование плоской неустановившегося фильтрации в неоднородных грунтах на щелевом лотке. – Трулы координационных совещаний, 1967. вып. 35, с. 351-354.

12. Бабакаев С.Н. Математическое моделирование фильтрационных процессов. Ташкент, издательство “Fanvatexnologiya”, 2011, 168стр.
13. Березанцев В. Г. Расчет оснований сооружений. Л. Стройиздат, 1970.- 207с.
14. Бугров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений. — С-Пб.: Недра, 1993. – 245с.
15. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. - М.: Мир, 1971. - 452 с.
16. Веригин Н.Н. О неустановившемся движении грунтовых вод вблизи водохранилищ. – Докл. АН СССР, 1946, 66, №6, с. 1067-1070.
17. Веригин Н.Н. Режим грунтовых вод при наполнении и сработки водохранилищ.-Гидротехническое строительство,1952,№11,с.34-37.
18. Веригин Н.Н. О течениях грунтовых вод при местной усиленной инфильтрации. Докл. АН. СССР, 1950, Т. 7, № 50.
19. Гаркави О.Я., Кремез В.С. Численный метод решения задачи нестационарной фильтрации в двухслойной среде на ЭВМ. – В к.: Гидромеханика, Киев, Наукова думка, 1974, вып. 26, с. 69-74.
20. Гаркави О.Я., Кремез В.С. Расчет нестационарной фильтрации в трехслойном пласте со слабопроницаемым средним слоем, когда кривая депрессии пересекает линию раздела верхнего и среднего слоев. – В к.: Гидромеханика, Киев, Наукова думка, 1974, вып. 26, с. 74-79.
21. Гаркави О.Я., Кремез В.С. Расчет нестационарной фильтрации в трехслойном пласте с хорошо проницаемым средним слоем.- В кН.: Гидромеханика, Киев, Наукова думка, 1975, вып. 31, с. 71-74.
22. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. // Под ред. В.П. Недриги. М.,1983, 543 с.
23. Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н. Проектирование грунтовых плотин. Энергоатомиздат, 2001, с. 345.
24. Голушкевич С.С Статика предельных состояний грунтовых масс.- М.: Гостехиздат, 1957.-288 с.

25. Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С., Муфтахов А.Ж. Защита оснований зданий и сооружений от воздействия подземных вод. - М.: Стройиздат, 1985. — 264 с., ил.
26. Дедкова М.И. Расчет неустановившейся безнапорной фильтрации методом конечных элементов. Научных трудов «Гидропроекта». Москва. 1982. с. 147-158.
27. Дмитриев Н.М. Модели фильтрации в анизотропных средах: Автореферат дис.... д. т. н. - М., 1997. - 34 с.
28. Дружинин Н. И. Изучение региональных потоков подземных вод методом электрогидродинамических аналогий. М., Недра, 1966, 336 с.
29. Дружинин Н. И. Метод электрогидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации. Под ред. В. И. Аравина. М.-Л., 1956, 275 с.
30. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. - М.: Недра, 1971.-224 с.
31. Жерновой А.Д. Развитие математической модели фильтрации в анизотропных средах. Автореферат, дис. к.т.н. - Ставрополь, 1996. - 25 с
32. Жуковский Н.Е. Теоретическое исследование о движении подпочвенных вод.ж. РФХО, 1889, Т.21,вып.1.
33. Каменский Г.Н. Уравнение неустановившегося движения грунтовых вод в конечных разностях и применения их к исследованию явлений подпора Изв.АН СССР, ОТН, 1940, № 4.
34. Иванов А.И. О расчете устойчивости откосов и оснований земляных плотин с учетом фильтрационных сил. – Гидротехническое строительство, 1940, № 1, с 21-24.
35. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. -М.: Стройиздат, 1991. - 342 с.

36. Каменский Г.Н. Уравнение неустановившегося движения грунтовых вод в конечных разностях и применения их к исследованию явлений подпора Изв.АН СССР, ОТН, 1940, № 4.
37. Коробова О.А. Комплексные исследования напряженного состояния и деформируемости анизотропных грунтовых оснований. Автореферат дис. д. т. н. - Барнаул.: Изд-во АлтГТУ, 2002. - 40 с.
38. Коробова О.А. Напряженно-деформированное состояние анизотропных грунтовых оснований (монография). - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. - 130 с.
39. Крей Г. Теория Давления земли и сопротивление грунтов нагрузке. –М.-Л.: Издательство строительной индустрии и судостроения, 1932.-294с.
40. Кремнев А.П., Вишняков Н.Н., Седун Е.А. Влияние анизотропии прочностных свойств грунтов на устойчивость откосов. Сборник статей международной научно-технической конференции.- Минск: БНТУ,2008, 261-264с.
41. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М-Л, Гостехиздат, 1947, 244 с.
42. Лукьянов В.С. Гидравлические приборы для технических расчетов, " Известия АН СССР" , Отд. Техн. наук, №2, 1939.
43. Ляхевич Р. А. Расчёт фильтрации в анизотропных плотинах. // Вопросы повышения эффективности строительства. В. 2, Нальчик, КБГСХА, 2004, 155159.
44. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1977-320с.
45. Мелентьев В.А., Филимонов В.А. Учет анизотропии фильтрационных и прочностных свойств намывных грунтов при проектировании гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 1981. - №4.-С. 23-26.

46. Меламут Д. Л. Гидромеханизация в мелиоративном и водохозяйственном строительстве. М., СИ, 1981,303 с.
47. Мелентьев В. А., Колпашников Н. П., Волнин Б. А. Намывные гидротехнические сооружения. М.: Энергия, 1973, 276 с.
48. Минков М., Стоилов К. К вопросу о роли макропор в процессе просадки лесса// Основания и фундаменты. - 1978, С. 10-13.
49. Можевитинов А.Л. Основные положения расчетов устойчивости земляных откосов (по материалам межвежомственной комиссии НТС Госстроя ). –Л.: ВНИИГ, 1970,-63с.
50. Можевитинов А.Л.,Сулейманов И.Л.-Г. Расчет неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах.-Известия ВНИИГ,Л.,1978, вып. 122,с.69-75.
51. Можевитинов А.Л., Сулейманов И.А.-Г. Критерий необходимости учета неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах при оценке устойчивости откоса. – Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1979, вып. 135, с. 24-26.
52. Мустафаев А.А. Основы механики просадочных грунтов. - М.: Стройиздат, 1978.263с.
53. Недрига В.П. Расчет неустановившейся фильтрации в намывных плотинах. – Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений. М.: Стойиздат, 1973, сб. № 5, с.30-57.
54. Ничипорович А.А. Плотины из местных материалов. М., Стройиздат 1973,320с.
55. Новотерцев В.И. Опыт применения теории пластичности к задачам об определении несущей способности оснований сооружений. – Известия ВНИИГ, 1938,вып. 22, с. 115-127.
56. Осипов В.И., Вайтекунене А.И. анизотропия механических свойств глинистых грунтов.- Инж. Геология, 1979,№4, с.106-112.

57. Отчет о НИР по программе ГНТП - А-14-28. по теме «Разработка методов расчета неустановившейся фильтрации в теле и основании грунтовых плотин с учетом режима эксплуатации водохранилища и мероприятий по повышению устойчивости их откосов». Заключительный. 2014 г.
58. Полубаринова-Кочина П.Я., Нумеров С.Н., Чарный И.А., Ентов В.М. И др. Развитие исследования по теории фильтрации в СССР. Издательство " наука " , М., 1969, 546 с.
59. Полубаринова-Кочина П.Я., О неустановившихся движениях грунтовых вод. Докл. АН СССР, 1950, т.75, № 3.
60. Полубаринова - Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977, 664 с.
61. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А. и др. Фильтрация в грунтовых плотинах в плоской и пространственной постановке. Гидротехническое строительство - 1989, №11, с.26-32.
62. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений и оснований. Гидротехническое строительство - 2000, № 11, с.2-7.
63. Рассказов Л.Н. и др. Гидротехнические сооружения (речные). Часть 1., М.: изд. АСВ, 2011. - 584с.
64. Рейфман Л. С. Опытная виброкатка лёссовых грунтов для ядра высоконапорных земляных плотин. // Гидротехническое строительство, 1964, № 8, 2428.
65. Руководство по лабораторным исследованиям физико-механических свойств грунтов при производстве инженерных изысканий для строительства. - М.: Стройизыскания, 1976. - 118 с.
66. Рыжков В.А. Исследование несущей способности быстро загружаемых анизотропных по водопроницаемости оснований. Автореферат, дис.к.т.н. - Минск: Изд-во БПИ, 1973. - 24 с.

67. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва, “Наука”, 1971, 552с.
68. Соболевский Ю.А. Водонасыщенные откосы и основания. Минск, «Высшей школа», 1975. 400 с.
69. Соколов Б.А. Влияние текстуры и влажности на анизотропию прочности глинистых грунтов.- Материалы II научной конференции МГУ, сер. Гидрогеология, М, 1975. 6с.
70. Соколов Б.А. Анизотропия глинистых грунтов со слоистой текстурой и ориентированной микротекстурой.- В кн.: грунтоведение и инженерная геология. М., Изд-во МГУ. 1977. с 17-22.
71. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – Физматгиз, 1960. – 243 с.
72. Тейлор Д. основы механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1960. – 598 с.
73. Теплицкий И.С. к вопросу о расчете неустановившейся фильтрации, описываемой уравнением Буссинеска. – Труды САНИИРИ, Ташкент, 1960, вып. 105, с. 18-33.
74. Теплицкий И.С. Неустановившаяся фильтрация в прямоугольной перемычке при быстром снижении уровня воды в верхнем бьефе. – Труды САНИИРИ, Ташкент, № 105, с. 34-39.
75. Терцаги К. Теория механика грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 507с
76. Толпаев В.А. Математические модели двумерной фильтрации в анизотропных, неоднородных и многослойных средах. Автореферат дис. д.ф-м.н., Ставрополь 2005.
77. Трофимов В.Т. Грунтоведение. - М., Изд-во МГУ, 2005. -1024с.
78. Угинчус А.А., Расчет фильтрации через земляные плотины. Госэнергоиздат. 1960, 52 с.
79. Файзиев Х., Бабакаев С., Хажиев И. Норматов М., Ахмедов И. Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в однородных грунтовых плотинах методом конечных разностей. Архитектура. Строительство. Дизайн..№3,2013. С.52-56.

80. Файзиев Х., Рахимов Ш., Норматов М. О проблеме учета фильтрационной анизотропии при фильтрационных расчетах грунтовых плотин. “Биноларни лойихалашнинг функционал асослари” Республика илмий-амалий конференция материаллари тўплами. 2015. 110-112б.
81. Файзиев Х., Бабакаев С.Н, Норматов М. У. “Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах методом конечных разностей”. Известия вузов, Строительства. Новосибирск, №1 2016. С. 43-51.
82. Файзиев Х., Бабакаев С.Н, Норматов М., Искендаров Б. Решение задач неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах с учетом анизотропной водопроницаемости грунтов численным методом. Ўзбекистонда геотехниканинг долзарб муаммолари ва уларнинг ечимлари Республика илмий-амалий анжуман материаллари. 1-қисм. ТАҚИ, 2016, 161-163б.
83. Файзиев Х, Ш., Хожиев Т., Хажиев И., Рахимов Ш. Численное решение краевой задачи неустановившейся фильтрации в грунтовых плотинах с учетом фильтрационной анизотропности грунтов методом конечных разностей. Известия вузов, Строительства. Новосибирск, № 7, 2017.
84. Файзиев Х, Хожиев Т., Хажиев И., Рахимов Ш. Расчет неустановившейся фильтрации в однородных грунтовых плотинах с учетом фильтрационной анизотропности грунтов численным методом. Меъморчилик ва қурилиш муаммолари (илмий техник журнал). №3, 2017й. СамДАҚИ.
85. Федоров И.В., Забавин В.С. Некоторые вопросы оценки устойчивости откосов.- Труды института ВОДГЕО. 1968, вып. 19, с. 52-62.
86. Феллениус В. Геотехническое исследование грунтов. Статика грунтов. – М-Л.: Стройиздат, 1933.-94с.
87. Филимонов В.А. Исследование анизотропных прочностных свойств намывных несвязных грунтов и золы.- Изв. ВНИИГ, 1974, т. 106, с. 280-286.

88. Фильчаков П. Ф. Теория фильтрации под гидротехническими сооружениями. Т. II. Киев: Изд-во АН УССР, 1960, 256 с.
89. Хамраев Б., Кропоткин М.П. Экспериментальные исследования анизотропии фильтрационных свойств лессовых грунтов // Геоэкология. - 1993. - №6. - С.70-79.
90. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. Изд. 4-е, испр. и доп., - М.: Недра, 1975. - 292 с.: ил.
91. Чарный И.А. Подземная гидромеханика. М.-Л., Гостезиздат, 1948.
92. Чарный И.А. Метод последовательной смены стационарных состояний и его приложение к задачам нестационарной фильтрации жидкостей и газов. – Известия АН, ОТН, 1949, №3, с. 323-342.
93. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения. (Теоретические основы расчета).-М: Энергия, 1967.-428с.
94. Шестаков В.М. фильтрационный расчет земляных плотин и перемычек при колебании бьефа. Гидротехническое строительство, 1953, № 7, с. 36-39.
95. Шестаков В.М. Расчет кривых депрессии в земляных плотинах и дамбах при понижении горизонта водохранилища. Гидротехническое строительство, 1954, № 4, с. 32-36.
96. Шестаков В.М. Определение гидродинамических сил в земляных сооружениях и откосах при падении уровней в бьефах. Сб."Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений", ВОДГЕО, 1956, №2, с.98-128
97. Шестаков В.М. Некоторые вопросы моделирования неустановившейся фильтрации. Сб. " Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений", ВОДГЕО, 1956, № 2, с.129-139.

98. Шестаков В.М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа.-М.: МГУ,1965.-233с.
99. Boussinesk J. Recherches theoriques sur l'ecoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le debit des sourels-journal math pures et appl. 1904, 10, №1, P. 5-78.
100. Mallet C, Pacquant J. Erdstaudamme. Berlin, 1954,345 s.
101. ReiniusE., The stability of the upstream slope of earth dams, Stockholm, 1948.
102. CedergrenH. R. Seepage, drainage, and flownets. New-York -London - Sydney -Toronto, 1977, 534 p.
103. Gonsales de Posada, Mad. D. Redondo Alvarado. Analogical simulation of the seepage through cores of earth dams on pervious foundations interrupted by an impervious cut off bifixed in on inferior stratum and in the core base. Application to a precise case. XIIIJCOLD, V. 1, Q. 48, R. 66,1979,1167-1175.



## Отзыв оппонента

на магистерскую диссертацию Худойкулиева Фахриддин на тему: «Влияние неоднородности и анизотропности грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин»

Актуальность темы. Как свидетельствует мировой опыт проектирования, существующие методы расчёта устойчивости грунтовых плотин до настоящего времени не в полной мере учитывают анизотропные и неоднородные свойства грунта тела, что сказывается на условиях строительства и эксплуатации плотин, а в ряде случаев является причиной их разрушений и аварий. Отсюда, в соответствии с требованиями закона Республики Узбекистан принятый в 20 августа 1999 года «О безопасности гидротехнических сооружений» возникает задача обеспечения устойчивости грунтовых плотин при неоднородности и анизотропии грунтов, а также разработке новых методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин учитывающий неоднородность и анизотропию грунтов тело плотины.

Оценка состава работы: Работа состоит из введения 3-х глав, выводов и рекомендаций, списка использованной литературы и т.д. На основании обзора и анализа существующей литературы в работе сформулированы решаемая в работе проблема, цели и задачи разработок и исследований. Поставленные в работе цели и задачи решались на основе теоретических исследований и по сравнению данных полученных ранее учеными мирового значения.

Оценка выбранной темы и её достоинства: Тема работы оценивается несомненно как актуальная. Достоинство её в том, что теоретические исследования показали что влияние анизотропной фильтрации на устойчивость откосов существенно имеется и их надо учесть при расчете устойчивости.

Оценка использованной литературы: Магистрант умело использовал в работе научно-техническую и справочную литературу, нормативные документы, СНИПы, материалы интернет.

Оценка способности научного мышления: В работе магистрант сумел правильно поставить проблему, цели и задачи исследований, разработал

Худойкулиев Ф. диссертацию написал качественно и в срок. Необходимо отметить его трудолюбие и научный подход к решению задач.

В целом, магистерская диссертация на тему “Влияние неоднородности и анизотропности грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин” соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, а сам Худойкулиев Фахриддин достоин присуждения ему степени магистра по специальности

5А340701 “Гидротехнические сооружения”

Научный руководитель

к.т.н. и.о.проф



Файзиев Х.

## ОТЗЫВ

научного руководителя на магистерскую диссертацию Худойкулиева Фахриддина на тему «Влияние неоднородности и анизотропности грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин» по специальности 5А340701 «Гидротехнические сооружения»

Работая над магистерской диссертацией магистрант поставил целью своей работы на основании теоретических исследований обосновать необходимость учета влияния неоднородности и анизотропности грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин для повышения их устойчивости.

В своей работе Худойкулиев Ф. решил поставленные перед собой следующие задачи:

- исследование методов расчета устойчивости откосов грунтовых плотин
- исследование влияния фильтрационной анизотропии грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин
- разработка мероприятий по повышению устойчивости откосов грунтовых плотин

Магистрант Худойкулиев Ф. получив задание на выполнение диссертации, во время приступил к работе. Поставил себе цель и задачи исследований и поэтапно начал разрабатывать вопросы. Он изучал данные исследований и по результатам их предложил вариант метода расчета устойчивости откосов.

Выводы и предложения диссертанта обоснованы существующими методиками и нормативами.

В работе он использовал современную техническую литературу, нормативные документы, данные Интернета.

методику исследований и исходя из полученных результатов исследований оценил влиянию неоднородности и анизотропности грунтов на устойчивость откосов, что показывает его способность к творческому научному мышлению.

Оценка научной обоснованности выводов и рекомендаций: Все выводы и рекомендации в работе с точки зрения гидравлики фильтрационных потоков и гидротехники научно обоснованы.

Оценка качества оформления работы, таблиц, графиков, чертежей. Таблицы, графики, чертежи в работе и сама диссертация оформлены в соответствии с требованиями, предъявляемыми к магистерским диссертациям.

Недостатки работы: В работе не приведены расчеты устойчивости откосов в полном мере.

Какие предложения автора работы рекомендуется внедрить в производство или в учебный процесс: мероприятия по повышению устойчивости откосов грунтовых плотин в анизотропных грунтах можно учесть при проектировании грунтовых плотин

Общее заключение по работе. Представленная на рецензию магистерская диссертация на тему «Влияние неоднородности и анизотропности грунтов на устойчивость откосов грунтовых плотин» соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, поэтому считаю, что её можно представить к защите, а её автор Худойкулиев Фахриддин заслуживает степени магистра технических наук по специальности 5А340701 «Гидротехнические сооружения»

Рецензент:  
к.т.н. кафедры  
«ГС, О и Ф»  
ТАСИ



С.М. Нарбаев