

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина»**

На правах рукописи



Хасан Марва

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ НИЗКОЙ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ**

4.1.5. Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Научный руководитель д.т.н., профессор
Заслуженный деятель науки РФ
Кузнецов Е.В.

Краснодар 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛАХ.....	11
1.1 Анализ эксплуатации мелиоративных каналов.....	11
1.2 Анализ пропускной способности водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах.....	15
1.3 Анализ движения наносов в мелиоративных каналах.....	21
1.4 Анализ технологической схемы управления водными ресурсами на Верхне-Кубанской оросительной системе	23
1.5 Выводы по 1 главе.....	27
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	28
2.1 Методология исследований.....	28
2.2 Обоснование формы и размеров физических моделей водоподпорного сооружения, лабораторная установка.....	29
2.3 Разработка физических моделей усовершенствованных водоподпорных сооружений.....	31
2.3.1 Методика исследования коэффициента расхода водоподпорных сооружений	35
2.3.1.1 Исследование коэффициента расхода с применением ПИ-теоремы и метода наименьших квадратов.....	37
2.3.2 Схема опыта движения наносов через усовершенствованные водоподпорные сооружения	38
2.3.2.1 Методика исследования движения наносов на водоподпорных сооружениях	40
2.3.3 Методика исследования уровней в верхнем бьефе водоподпорного сооружения.....	42

2.4 Методика натурных исследований водоподпорного сооружения на Новокубанском канале.....	43
2.5 Выводы по 2 главе.....	49
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВОДОПОДПОРНОГО СООРУЖЕНИЯ.....	50
3.1 Исследование коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения методом наименьших квадратов	50
3.2 Расчетные зависимости для определения коэффициента расхода усовершенствованных водоподпорных сооружений	52
3.3 Выводы по 3 главе	61
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАНОСОВ ЧЕРЕЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ ВОДОПОДПОРНОЕ СООРУЖЕНИЕ.....	63
4.1 Расчетные зависимости по движению наносов.....	64
4.2 Результаты опытов движения наносов через водоподпорное сооружение.....	66
4.2.1 Исследование распределения донных наносов у водоподпорного сооружения.....	66
4.2.2 Исследование процента пропуска наносов через физические модели водоподпорных сооружений в нижний бьеф канала.....	69
4.3 Исследование уровня свободной поверхности в верхнем бьефе водоподпорного сооружения	76
4.3.1 Влияние геометрических параметров усовершенствованного водоподпорного сооружения на изменение уровня в верхнем бьефе.....	77
4.3.2 Расчет длины кривой свободной поверхности L_t в верхнем бьефе канала.....	80
4.3.3 Влияние кривой свободной поверхности на размещение насосных станций в верхнем бьефе водоподпорного сооружения.....	84

4.4 Выводы по 4 главе.....	86
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ НОВОКУБАНСКОГО КАНАЛА И РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРХНЕ-КУБАНСКОЙ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	89
5.1 Модернизированная технологическая схема и алгоритм управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы.....	89
5.2 Оценка эксплуатационной надежности при внедрении водоподпорного сооружения.....	94
5.3 Экономическая оценка внедрения водоподпорного сооружения на Новокубанском канале	101
5.4 Выводы по 5 главе.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....	108
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ 8.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ 9.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 10.....	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях дефицита водных ресурсов и маловодья на реках юга России одной из основных проблем становится обеспечение надёжной водоподачи на оросительные системы. Особенно эта проблема проявляется на мелиоративных системах, где водоподача осуществляется по магистральным каналам протяжённостью более 50 км с относительно небольшими расходами воды до $10 \text{ м}^3/\text{с}$, что характерно для Верхне-Кубанской оросительной системы. Длительная эксплуатация каналов в бассейне р. Кубань приводит к отложению наносов, зарастанию русел и снижению пропускной способности, увеличению эксплуатационных издержек и, как следствие, снижению водообеспеченности мелиорируемых земель. Традиционные способы регулирования уровней и расходов воды на магистральных каналах часто не обеспечивают эффективного пропуска наносов из верхнего в нижний бьеф, что усугубляет проблему заиления и требует частых и дорогостоящих ремонтно-восстановительных мероприятий. В связи с этим возрастает потребность в разработке и внедрении усовершенствованных водоподпорных сооружений, способных обеспечивать расчётные гидравлические параметры потока при одновременном беспрепятственном пропуске наносов.

Перспективным направлением решения данной проблемы является применение подпорно-пропускных полигональных водосливов, конструктивные особенности которых позволяют поддерживать командные уровни, расчётные расходы и предотвращать заиление каналов.

Исследование выполнялось в рамках тематического плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ в 2021–2025 гг. (регистрационный номер №121032300049-7).

Степень разработанности темы. В связи с дефицитом стока рек, низкими уровнями воды в каналах и низкой водообеспеченностью оросительных систем интерес к проектированию водоподпорных сооружений для управления водными

ресурсами возрастает. Значительный вклад в изучение и усовершенствование водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах внесли учёные: В. А. Большаков, Н. Н. Павловский, Е. Г. Филиппов, Р. Р. Чугаев и др. Движение наносов на водосливах и в каналах изложено в трудах ученых А. Брамса, В. Н. Гончарова, К. В. Гришанина, Е. А. Замарина, Н. С. Знаменской и др. Изучению вопросов эксплуатации оросительных систем посвящены труды учёных: В. Н. Щедрина, М. С. Григорова, В. И. Ольгаренко, Ю. М. Косиченко, Е. В. Кузнецова, Б. С. Маслова, И. В. Ольгаренко, А. А. Пахомова, Ю. П. Полякова и др.

Цель исследования – совершенствование водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах при низкой водообеспеченности для повышения надёжности и эффективности эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы.

Задачи исследования:

установить основные причины снижения надёжности эксплуатации мелиоративных каналов и эффективности управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы;

выполнить физическое моделирование и разработать физические модели усовершенствованных водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов для повышения пропускной способности мелиоративных каналов;

установить зависимость коэффициента расхода от геометрических и гидравлических параметров для физических моделей усовершенствованных водоподпорных сооружений;

разработать регрессионную модель пропуска наносов в зависимости от скорости потока для усовершенствованных водоподпорных сооружений;

разработать модернизированную технологическую схему и алгоритм управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы;

установить эксплуатационную надёжность и определить технико-экономическую оценку эффективности усовершенствованных водоподпорных сооружений.

Объект исследования. Усовершенствованное водоподпорное сооружение на Новокубанском канале Верхне-Кубанской оросительной системы. Физические модели усовершенствованных водоподпорных сооружений.

Предмет исследования. Закономерности гидравлической связи водообеспеченности канала с геометрическими и гидравлическими параметрами усовершенствованного водоподпорного сооружения.

Методология и методы исследования опираются на физическое моделирование с использованием математического и регрессионного анализа движения потока, насыщенного наносами, для повышения пропускной и транспортирующей способности усовершенствованного водоподпорного сооружения, повышения водообеспеченности на мелиоративном канале. Для обеспечения научной достоверности учитывались государственные и отраслевые стандарты.

Научная новизна результатов исследования:

- усовершенствованное водоподпорное сооружение в виде подпорно-пропускного полигонального водослива с геометрическими параметрами, обеспечивающими наилучшие условия транспортировки наносов из зоны подпора и устойчивый подпорный уровень в верхнем бьефе для гарантированного водозабора на мелиоративные системы;
- новые эмпирические зависимости коэффициента расхода от гидравлических и геометрических параметров усовершенствованного водоподпорного сооружения;
- регрессионная модель процента пропуска наносов в зависимости от скорости воды через водоподпорное сооружение, позволяющие прогнозировать интенсивность очистки мелиоративных каналов от донных отложений;
- модернизированная технологическая схема и алгоритм управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы для магистральных каналов с малыми расходами.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит в получении новых аналитических и экспериментальных зависимостей коэффициента расхода от геометрических и гидравлических параметров усовершенствованного водоподпорного сооружения, а также в установлении закономерностей транспортировки наносов в верхнем бьефе усовершенствованного водоподпорного сооружения, дополняющих теорию гидравлического расчёта мелиоративных каналов.

Практическая значимость состоит в:

- повышении надёжности эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы, обеспечиваемой увеличением пропускной способности русла Новокубанского канала до 83 %, повышением транспортирующей способности потока при устройстве усовершенствованного водоподпорного сооружения с углом 30° и снижении толщины донных отложений наносов до 8-10 см;

- повышении водообеспеченности Новокубанского канала дополнительным объёмом воды до 6,72 тыс. м³ и увеличением максимального показателя пропуска наносов до 51,4 % путем устройства усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива;

- обеспечении эффективной эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы путем внедрения модернизированной технологической схемы управления водными ресурсами с дополнительной подпиткой Новокубанского канала расходами из р. Кубань, позволяющей вовлечь в сельскохозяйственный оборот и гарантированно обеспечить водой ранее лимитированные по водному фактору 2400 га орошаемых земель, что позволит повысить валовой сбор продукции и рентабельность аграрного производства;

- экономическом эффекте от внедрения усовершенствованного водоподпорного сооружения на Новокубанском канале при очистке от наносов равном 1,14 млн руб. (в ценах 2026 г.), сроке окупаемости капиталовложений 6 лет и индексе доходности 1,98.

Усовершенствованное водоподпорное сооружение внедрено на водозаборном участке Новокубанского канала Верхне-Кубанской оросительной системы (Акт внедрения от 15.08.2024 г., Новокубанский филиал ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз»).

Положения, выносимые на защиту:

- физические модели усовершенствованных водоподпорных сооружений для повышения пропускной способности мелиоративных каналов;
- новые эмпирические зависимости коэффициента расхода от гидравлических и геометрических параметров усовершенствованного водоподпорного сооружения;
- регрессионная модель процента пропуска наносов в зависимости от скорости потока для усовершенствованных водоподпорных сооружений;
- технологическая схема и алгоритм управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы для магистральных каналов с малыми расходами;
- технические эксплуатационные параметры и технико-экономическая оценка эффективности усовершенствованного водоподпорного сооружения.

Степень достоверности результатов подтверждается значительным объемом опытных данных, теорией гидравлики, совпадением результатов исследования с данными Ю. М. Косиченко, Е. Г. Филиппова, их обработкой методами математической статистики с использованием программных продуктов MS Excel, AutoCAD и внедрением полученных результатов.

Апробация результатов. Результаты исследований доложены и обсуждены на ежегодных научных конференциях ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ (г. Краснодар, 2018–2020 гг.); на Всероссийской научно-практической конференции ФГБНУ «РосНИИПМ» (г. Новочеркасск, 2021 г.); на Международных научно-практических конференциях (г. Уфа, 2022 г.).

Личный вклад автора заключается в: разработке элементов модернизированной схемы и алгоритма управления Верхне-Кубанской оросительной системой; физических моделей водоподпорных сооружений; получении новых формул для коэффициента расхода и процента пропуска наносов; проведении натурных исследований на водоподпорном сооружении на Новокубанском канале.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 1 статья в международных базах данных. Общий объем публикаций составляет 4,1 п. л., из них автору принадлежит 2,3 п. л.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы и приложений. Работа представлена на 156 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок, 14 таблиц, список литературы, включающий 118 источников.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛАХ

1.1 Анализ эксплуатации мелиоративных каналов

Эксплуатации оросительных систем посвящены труды ученых В. Н. Щедрина, В. И. Ольгаренко, Е. В. Кузнецова, И. В. Ольгаренко и др., которые приходят к выводу о том, что техническое состояние мелиоративных систем ухудшается со временем, снижаются эксплуатационные характеристики и т. д. Все это приводит к падению урожайности сельскохозяйственных культур [1, 11, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 49, 50, 52, 53, 55, 57, 58, 69 70, 71, 72, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 87, 88, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 118].

Важной задачей при эксплуатации мелиоративных систем является обеспечение качественного функционирования всех элементов сети, особенно каналов. В процессе эксплуатации подпорных сооружений пропускная способность мелиоративных каналов с течением времени уменьшается. Это связано с появлением наносов и растительности на дне, нижних частях откосов каналов и перед водоподпорными сооружениями [29, 37, 59, 69, 73, 86, 100, 116]. Донные наносы распределяются неравномерно: преимущественно их концентрация находится перед водоподпорными сооружениями, в местах соединения канала с другими видами сооружений [13, 16, 49].

Заращение живого сечения каналов негативно сказывается на пропускной способности. При таких условиях мелиоративная система не сможет своевременно обеспечивать водой культуры. Это ведёт к снижению глубин в каналах, нестабильному водозабору и, как следствие, к нарушению эксплуатации насосных станций и подаче воды на орошение [19, 27, 29, 35, 39, 59, 67, 75, 95, 96, 100]. В связи с этим основной задачей является выбор наиболее адаптированных конструкций подпорных сооружений, которые будут обеспечивать высокую

эффективность их работы на каналах за счет повышения водообеспеченности и увеличения пропускной способности, создания условия гидравлического удаления наносов и пропуска их в нижний бьеф мелиоративных каналов. К мелиоративным сооружениям относятся водоподпорные сооружения, которые являются составной частью водохозяйственного комплекса, влияющие на рациональное использование водных ресурсов [13, 17, 62, 75, 82, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97]. Водоподпорные сооружения, создающие подпоры уровней в реках, озерах и каналах используются в различных целях: мелиорации, гидроэнергетики, обводнения пастбищ и др. В случае перелива воды через пороги водоподпорных сооружений их называют водоподпорными сооружениями в виде подпорно-пропускных водосливов (подпорно-пропускной водослив) [13, 16, 60].

В настоящее время на оросительных каналах существует многообразие типов и конструкций водоподпорных сооружений, которые отображают специфику водохозяйственных задач, особенности мелиоративного и водохозяйственного строительства [11, 20, 21, 22, 25, 47, 51, 68, 72, 76, 77, 78, 83]. Они создают и поднимают уровень воды в каналах до необходимых отметок для целей мелиорации, но при этом недостаточно выполняют рациональное водопользование и не эффективно обеспечивают гидравлический пропуск наносов из верхнего в нижний бьеф, что влияет на нормальную работу насосных станций, ирригационного оборудования, уровень экологического состояния каналов и плодородие почв, следовательно, не обеспечивают планируемую урожайность сельскохозяйственных культур на оросительных системах [3, 4, 51, 94, 100].

Устойчивое функционирование водоресурсных систем можно определить, как оптимальное использование того, что доступно из этих ресурсов, без их растраты, истощения или загрязнения, а также как обеспечение непрерывного роста и доступности этих ресурсов, т.е. использовать все методы, способы и мероприятия, которые в совокупности приводят к рациональному использованию водных ресурсов.

Низкая эффективность водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах способствует образованию других проблем водохозяйственного комплекса

(мелиоративные каналы, водоприемники, деривационные каналы гидроэлектростанций и т. д.), к которым можно отнести нерациональное водопользование, неудовлетворительное качество воды в водных объектах, ухудшение технического состояния, что приводит к дефициту водных ресурсов на мелиоративных системах [9, 10, 11, 27, 43, 58, 62, 73, 92, 95, 116].

Мелиоративные каналы, сопряженные с пропуском паводков и больших расходов, испытывают значительные повышения уровня и скорости течения в проводящей сети. Это приводит к размыванию грунта дна и откосов каналов, а также к отложению наносов у порогов подпорно-пропускных водосливов [2, 4, 5, 18, 19, 22, 28]. Со временем количество наносов в мелиоративных каналах увеличивается, и в межень при малых скоростях потока пропускная способность каналов уменьшается, каналы постепенно заилятся и «умирают». Постепенное заиливание и закупорка пор грунтов, формирующих плоскость русла каналов, приводит к снижению гидравлической проводимости по смоченному периметру. В практике гидротехнического строительства на мелиоративных каналах очистка от заиления является основной проблемой при эксплуатации, так как механическая очистка требует существенных затрат.

Ученые Абдулмажидов Х. А. [3] и Карапетян М. А. [29] описали состояние оросительных каналов при отложении наносов и заилении. Они отмечают, что отложение наносов в каналах каждый год увеличивается, а в некоторые периоды года может возрасти в 2-3 раза, при этом со временем уменьшается площадь живого сечения на 5-8 %. Авторы предложили ежегодную очистку каналов, которую следует выполнять каждые 3-5 лет. На наш взгляд, это, не выход из сложившегося положения. Необходимо изменить режим работы каналов, введя дополнительные устройства в виде водосливов или струенаправляющих форм каналов, которые будут обеспечивать гидравлическую очистку набегающим потоком.

Данные ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз» показывают, что значительная часть расходов на мелиорацию — это затраты на эксплуатацию насосных станций и расчистку каналов [12].

Накопление наносов у водозаборных сооружений, расположенных на оросительных каналах, приводят к снижению глубин в каналах, нестабильному водозабору и, как следствие, нарушению эксплуатации насосных станций и подачи воды на орошение. Наносы попадают в напорные трубопроводы, засоряют фильтры и насадки дождевальных машин, это приводит к заилению всей оросительной сети [46, 97, 100]. Таким образом, нагрузка на мелиоративные насосные станции увеличивается, и это приводит к повышению энергозатрат на подачу воды в оросительную сеть, вследствие чего эффективность и качество орошения резко снижаются.

Хецуриани Е. Д. [100, 116, 117] отмечает, что проблемы осложняются ещё и при попадании водорослей в конструкции оросительных систем. В таком случае нагрузка на работу насосных станций может достигать до 70 %. Процесс энергосбережения снижается до 57 %, а дождевальные аппараты, которые устанавливают на дождевальную машину, засоряются до 25 %. Все эти факторы отражаются на потенциальной урожайности культур.

Таким образом, у водозаборов донные наносы и др., как правило, частично перекрывают водозаборные окна насосных станций, вследствие чего меняются гидравлические характеристики насосного оборудования и всасывающих трубопроводов вплоть до полной остановки насосных станций [60, 92, 100].

Выбор места расположения водозаборных сооружений на мелиоративных каналах в целом связан с рядом условий, таких как геологические и гидрогеологические, топографические условия местности. В этой связи, выбор места расположения всасывающих труб на мелиоративных каналах является сложной задачей, поскольку это важно при проектировании мелиоративных систем. Всасывающие трубы мелиоративной насосной станции должны быть расположены в том месте, где может быть обеспечена допустимая вакуумметрическая высота всасывания на мелиоративном канале у подпорно-пропускного водослива, а также, где колебания уровня минимальны, что позволит

снизить отрицательные воздействия наносов на механические узлы насосного оборудования, трубопроводы, затраты на электроэнергию.

Это позволит увеличить срок эксплуатации оросительных систем [43, 100]. Вопрос определения места расположения всасывающих труб насосных станций при дефиците оросительной воды в мелиоративных каналах у водоподпорных сооружений остаётся практически нерешённым, что является дальнейшей задачей исследования.

1.2 Анализ пропускной способности водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах

Водоподпорные сооружения проектируются из подпорно-пропускных водосливов практического профиля, т.к. это сопряжено с их высокой пропускной способностью и надёжной формой для устойчивости в канале. Подпорно-пропускные водосливы практического профиля являются одними из важнейших сооружений, предназначенных для управления расходами воды и уровнями на мелиоративных каналах. Они выгодно отличаются от других типов подпорно-пропускных водосливов по следующим параметрам: по коэффициенту расхода, сопряжению бьефов, устойчивости в руслах в связи с водосливной формой и рядом других параметров. Коэффициента расхода водоподпорного сооружения связан с пропускной способностью, а также со многими факторами, которые определяются конструктивными особенностями сооружения, гидравлическими условиями течения в каналах [6, 7, 8, 13, 16, 23, 60, 68, 81, 83, 90, 92, 93, 98, 115].

Пропускная способность водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного водослива зависит от коэффициента расхода m ; коэффициента напора водослива $\varepsilon_n = 0,7 + 0,185H/\delta$, где δ – ширина порога водослива; коэффициент формы $\varepsilon_\phi = 1 + r/H$, где H – полный напор на гребне подпорно-пропускного водослива, r – радиус скругления входного ребра; коэффициента подтопления ε_n и коэффициента бокового сжатия $\varepsilon_{сж} = 1 - 0,1\zeta H_0/b$, где ζ – коэффициент формы береговых устоев.

Расход рассчитывается по общей зависимости:

$$Q_{\text{общ}} = m \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{\frac{3}{2}} \cdot \varepsilon_H \cdot \varepsilon_{\phi} \cdot \varepsilon_n \cdot \varepsilon_{\text{сж}}. \quad (1.1)$$

Значения коэффициента расхода m в зависимости от относительной шириной порога подпорно-пропускного водослива H/δ и величины заложения верхового откоса θ для подпорно-пропускного водослива трапецевидной формы, при θ меньше 0,5 и относительной высоты водоподпорного сооружения P/H больше 3 колеблются от 0,33 до 0,42 [6, 7].

Большаков В. А. и Петраш А. Д. [68] предложили формулу (1.2) для определения коэффициента расхода для подпорно-пропускного водослива трапецевидной формы с верховым откосом при P/H от 0.5 до 2, в виде:

$$m = \left(\frac{\delta}{H} \right) / (Z \cdot \frac{\delta}{H} - R), \quad (1.2)$$

где Z и R – параметры коэффициентов, которые связны с заложением верхового откоса.

Уравнение (1.2) позволяет исследовать влияние ширины порога и угла наклона верховой грани водослива, но при этом не включают влияние углов боковых стенок и длины водосливного фронта на m .

Французский ученый Базен [6] проводил экспериментальные исследования подпорно-пропускного водослива с различными заложениями верхового и низового откоса, со скруглёнными частями горизонтальной части порога, а также с разнообразной шириной порога, при этом он учитывал различные гидравлические характеристики и геометрические фторы порога.

В результате Базен пришел к следующим выводам:

- значения коэффициента расхода увеличиваются с уменьшением сжатия потока над водоподпорным сооружением и заложением низовой грани, а также с увеличением заложения верховой грани;
- коэффициент расхода падает с уменьшением угла закругления, соединяющего горизонтальную часть порога с передней и задней частями подпорно-пропускного водослива;

- при повышении значения ширины горизонтальной части порога коэффициент расхода уменьшается;

- подтопление струи наступает при увеличении заложения низовой грани.

Значения коэффициента расхода по результатам исследований Базена изменяются в широких пределах от 0,330 до 0,521. Результаты Базена можно использовать при конструировании водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных водосливов с криволинейной формой очертания для эксплуатации на мелиоративных каналах с большими расходами.

Академик Павловский Н. Н. [60] классифицировал водоподпорные сооружения в виде подпорно-пропускных водосливов по ширине и высоте порога и определил величину коэффициента расхода водоподпорного сооружения для высоких порогов, который составил 0,45. Для порогов средней высоты коэффициент расхода колебался в пределах 0,43-0,44, а для низких порогов коэффициент расхода находился в пределах 0,37-0,40.

Павловский Н. Н. считал, что имеются сложности при определении коэффициента расхода водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного водослива практического профиля из-за наличия большого количества форм, отличных от классической прямоугольной формы.

Дерюгин Г. К. [23, 31] изучил коэффициент расхода водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного водослива практического профиля, с тонкой стенкой и с широким порогом. По результатам экспериментов автор получил зависимости, позволяющие определять коэффициент расхода водоподпорного сооружения графически в зависимости от относительной ширины порога $\frac{\delta}{H_0}$ с учетом рекомендаций Базена, Смысловым В. В. и Гальпериной Р. С., в виде:

$$m = 10^d \left(\frac{\delta}{H} \right)^r, \quad (1.3)$$

где $d = -0,428 + 0,033 \cdot \operatorname{ctg} \alpha - (0,002 - 0,005 \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \cdot H/p$; $r = 0,126 + 0,24 \cdot H/p$;
 α – угол напорного откоса.

В формуле (1.3) не учитывается влияния длины водосливного фронта и угла боковых стенок на коэффициент расхода.

Филиппов Е. Г. [84] исследовал расход и пропуск наносов через разнообразные сооружения: водослив Крампа; водослив-расходомер САНИИРИ; лоток Вентури и лоток Прандтля. Он получил формулы для определения расхода воды в лотках и через водосливы. Для водослива Крампа при расходе от $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ до $50 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ получил новую формулу для определения расхода прямоугольного подпорно-пропускного водослива:

$$Q = 1.96C_n b h^{1.5}, \quad (1.4)$$

где C_n – коэффициент скорости, который колебался от 1,003 до 1,217; b – ширина порога подпорно-пропускного водослива Крампа; h – напор над водоподпорным сооружением.

Филиппов Е. Г. получил формулу для определения расхода расходомером САНИИРИ, расположенном на трапецеидальном канале при относительной ширине порога h/P меньше двух, количестве наносов до 50 г/л и заложении верхового откоса меньше 1:3, в виде:

$$Q = k[(b + tg \alpha)h] \sqrt{2gh}^{1.5}, \quad (1.5)$$

где k – коэффициент расхода, который колебался от 0,374 до 0,404.

Филиппов Е. Г. получил, что водосливы практического профиля пропускают наносы через порог лучше, чем остальные типы водосливов и лотки.

Следует отметить, что коэффициент скорости и коэффициент расхода в формуле (1.4) и (1.5) зависят от относительной высоты водоподпорного сооружения $h/(h+P)$ и h/P , но при этом коэффициент расхода не учитывает влияния угла верхового и низового откоса.

Однако, Петраш А. Д., Большаков В. А., Недрига В. П., Маккавеев В. М., Коновалов И. М. и др. [6, 7, 11, 68] в своих работах писали, что величина

коэффициента расхода трапецеидального подпорно-пропускного водослива практического профиля зависит от углов верхового и низового откоса.

Ашур Амар [7] исследовал подпорно-пропускные полигональные водосливы практического профиля с изменением угла наклона верхового и низового откоса 30° ; 45° ; 60° и 90° в зависимости от относительной ширины порога $\frac{\delta}{H} = 0,2-1,5$ и относительной высоты водоподпорного сооружения $\frac{p}{H} = 0,25-3,0$ для свободного и подтопленного истечения.

Автор определил факторы, которые влияют на значения коэффициента расхода. Им получено уравнение зависимости коэффициента расхода от относительной высоты подтопления $\frac{\Delta}{H}$, относительной высота водослива $\frac{p}{H}$, относительной ширины порога $\frac{\delta}{H}$, заложения верного откоса ($З_B$) и низового откоса ($З_H$), которое имеет вид:

$$m = f\left(\frac{\Delta}{H}; \frac{p}{H}; \frac{\delta}{H}; З_B; З_H\right). \quad (1.6)$$

В случае свободного истечения Ашур Амар получил эмпирическую формулу для определения коэффициента расхода, которая имеет вид:

$$m = 0,48 \left(\frac{1}{1+\delta/H}\right)^{0,371} \cdot \left(\frac{1}{1+p/H}\right)^{-0,028} \cdot (З_B + 1)^{0,008} \cdot (З_H + 1)^{-0,001}. \quad (1.7)$$

Уравнение (1.7) связывает коэффициент расхода водоподпорного сооружения с наклоном верхнего и низового откосов водослива, а также с высотой и шириной порога. Но как видно из уравнения (1.7) автор не изучал влияние углов боковых стенок водоподпорного сооружения и длины полигонального водосливного фронта на коэффициент расхода.

Ашур Амар считает, что влияние двух последних факторов (углов наклона грани подпорно-пропускного водослива в верхнем и нижнем бьефах) мало и ими можно пренебречь, но надо отметить, что автор рассматривал высокие водосливы.

В своей работе Кашарин Д. В. [31] рассмотрел вопрос о значениях коэффициента расхода на каналах с гибкими регулирующими водосливами. Автор использовал обобщенную формулу коэффициента расхода, в которой значения коэффициента расхода находились в диапазоне от 0,420 до 0,445 при расходах, которые изменялись от $10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ до $45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

На основании полученных экспериментальных данных и с учетом рекомендации ученых Базена, Ребекка и Р. Р. Чугаева была получена формула (1.8) для определения коэффициента расхода в зависимости от относительной высоты порога $\frac{H}{P}$, в виде:

$$m = 0,4235 + 0,0034 \frac{H}{P} - 0,051 \left(\frac{H}{P} \right)^2. \quad (1.8)$$

Однако формула Кашарин Д. В. не учитывает влияние скорости набегающего потока на коэффициент расхода.

Из анализа эксплуатации водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных водосливов следует, что они наиболее адаптированы к использованию на мелиоративных каналах:

- имеют более высокую пропускную способность в отличие от других типов водоподпорных сооружений, что является основным параметром для пропуска наносов;

- можно использовать в качестве управления расходов из-за их высокой надёжности:

При анализе эксплуатации водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных водосливов на каналах не установлено применение на практике полигональных подпорно-пропускных водосливов прямолинейной формы в плане для управления расходами и повышением пропускной способности, а также не имеется данных о пропуске наносов через порог подпорно-пропускного полигонального водослива.

1.3 Анализ движения наносов в мелиоративных каналах

Изучению движению наносов в каналах, на водоподпорных сооружениях, галереях и шлюзах посвящены труды следующих ученых: К. В. Гришанина, Н. С. Знаменской, А. В. Караушева, М. В. Шмакова, П.С Ржаковской, А. В. Караушев, и др., которые внесли значительный вклад в развитие гидравлики, мелиорации и в другие области науки и практики [2, 4, 5, 12, 14, 17, 22, 25, 26, 30, 49, 50, 51, 72, 116]. Водозаборные сооружения, расположенные на оросительных каналах, должны обеспечивать благоприятные условия для работы насосной станции и предотвращать попадание наносов, мусора, водорослей и других предметов в насосную станцию. Особенно это проявляется на мелиоративных каналах с небольшой глубиной, где отложения наносов и грязь забивают всасывающие трубы, уменьшают живое сечения каналов, что приводит к выходу из строя насосов и прекращению работы насосной станции (НС). Водозаборное сооружение должно располагаться на канале с благоприятными гидравлическими режимами речного потока. Гидравлический режим должен обеспечить устойчивое сохранение речного потока у сооружений, необходимые глубины и беспрепятственный пропуск наносов в нижний бьеф канала. Для достижения вышеуказанных целей, прежде всего необходимо было изучить движение наносов через водоподпорные сооружения на мелиоративных каналах.

Как известно, наносы в реках и мелиоративных каналах делятся на взвешенные и донные наносы. Взвешенные наносы переносит поток во взвешенном состоянии, а донные перемещаются по дну потока через скольжение, сальтацию и перекачивание [12, 17, 24]. К основным типам наносов Эйнштейн Х. и Великанов М. А. добавили тип «придонных наносов» [14].

Гришанин К. В. исследовал «новый» тип наносов, которые в свою очередь отделяются от дна из-за водных потоков и водоворотов и преодолевают расстояния, превышающие их диаметр в 3-4 раза. Этот тип наносов считается важным, но недостаточно изученным [14, 25].

В случае изменения одного из гидравлических элементов водного потока, как, например, скорости, глубины или же другого параметра, непосредственно

наблюдается изменение условий движения наносов. Взвешенные наносы со временем могут превратиться во влекомые наносы, а влекомые перестают двигаться или переходят во взвешенное состояние [11, 12, 17, 25, 26, 27, 68, 86].

Именно на этом эффекте основывался ученый Эри при расчете веса частиц P , переходящих из состояния донных отложений в состояние взвешенных отложений в зависимости от скорости воды в канале v и коэффициента, зависящего от формы и удельного веса частицы K . Вес частиц наносов, находился по формуле:

$$P = Kv^6. \quad (1.9)$$

Следует отметить, что при определении веса P движения наносов в реках и каналах находилось без наличия в них гидротехнических сооружений.

Ли М. А. [48] разработал новую конструкцию, позволяющую точно контролировать количество наносов, присутствующих в поливной воде горных рек. Ли проводил эксперименты в Казахском научно-исследовательском институте с помощью новой конструкции «Пескогравелиловка». Она состоит из шнекового механизма, соединенного приводом с водяным колесом, и содержит установленную в подводящем русле канала наносоперехватывающую галерею.

Ли пришел к выводу, что эта конструкция работает эффективно при улавливании крупных отложений в оросительной воде с наименьшими затратами энергии.

Кхарел Б. [46] изучал мутность рек в Китае и Непале, а также влияние наносов в речной воде на работу насосных станций всасывающих и перекачивающих труб. Кхарел пришел к выводу, что наносы, присутствующие в поливной воде, негативно влияют на насосы и приводят к износу футеровок насосных труб после 3 лет эксплуатации [19, 24, 38, 46, 67, 100].

Хецуриани Е. Д. изучил водозаборные сооружения для сельскохозяйственных районов юга России и выявил основные проблемы, которым подвергаются водозаборы. Он установил влияние концентрированных наносов и грязи в воде рек и каналов на работу НС. Хецуриани Е. Д. [100]. разработал мягкие наплавные водозаборные сооружения, которые забирают оросительную воду без наносов в

зависимости от глубины и скорости движения воды в месте расположения водозабора и угла между водозаборной трубой и осью течения воды в канале.

Новая конструкция состоит из подвижного и неподвижного вертикальных экранов по глубине водного потока, которые удерживаются в задаваемом положении по глубине и в плане системами поверхностных и заглублённых поплавков, соединенных гибкими связями и якорными устройствами. Мягкая наплавная конструкция была разработана с фильтром типа «ерш» для очистки воды от сине-зелёных водорослей, а также для отпугивания мальков рыб [100].

Как показывает литературный обзор выполненных исследований, в области мелиоративной практики, не применяются водоподпорные сооружения полигональной формы в плане, которые за счет управления расходом у порога водоподпорного сооружения создают условия для повышения пропускной способности и при этом захватывают частички наносов с потоком.

На практике в качестве водоподпорных сооружений используются, как правило, подпорно-пропускные водосливы с вертикальной водосливной стенкой, у которой откладывается большое количества наносов, которые затрудняют эксплуатацию мелиоративных каналов.

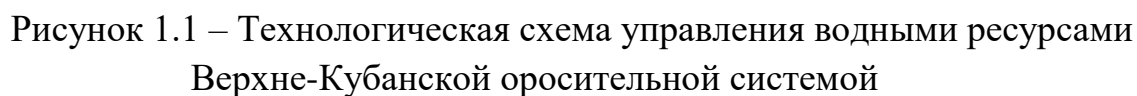
1.4 Анализ технологической схемы управления водными ресурсами на Верхне-Кубанской оросительной системе

Верхне-Кубанская оросительная система расположена на территории Новокубанского и Гулькевичского районов Краснодарского края и занимает площадь 8319 га. Введена в эксплуатацию в 1954 г. Водным источником оросительной системы является р. Кубань с самотёчным водозабором, расположенным у г. Армавира. Водозаборное сооружение обслуживает Новокубанский канал (НОК) протяжённостью 72,9 км, который считается магистральным оросительно-обводнительным и служит для подачи воды из р. Кубань к орошаемым земельным участкам [51, 56]. Трасса Новокубанского канала проходит вдоль р. Кубань.

Головной самотечный водозабор находится в конце подводящего канала

Верхне-Кубанская оросительная система входит в составе Новокубанского филиала ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз». В управление водными ресурсами входит: мелиоративная система площадью 8319 га; головное самотечное сооружение на р. Кубань; Новокубанский канал; шесть быстротоков; трубчатый переезд; водомерный пост.

По данным управления на канале имеется 12 водопользователей, которые снабжаются водой канала. Пять водопользователей находятся в Новокубанском районе с площадью орошения 3312 га, остальные 7 - в Гулькевичском районе с площадью 4764 га.



По данным управления в 2022 г. площадь орошения сократилась до 41 %, что составляло 3312 га, площадь оросительной системы 4764 га не поливалась по различным причинам, главная из которых является дефицит уровней р. Кубань. В 2024 г. площадь орошения увеличилась и составила по филиалу управления 4523 га за счёт ввода в эксплуатацию орошаемых земель ООО «Союз-Агро» Гулькевичского района.

Средняя поливная фактическая норма по Новокубанскому филиалу ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз» составляет 400 м³/га. Фактический объём воды на орошение составляет 4,74 млн. м³ в 2020 г. Проектная мощность Верхне-Кубанской оросительной системы рассчитана на объём воды 18,25 млн. м³.

Основные причины снижения площади орошения на Верхне-Кубанской оросительной системе являются:

- дефицита стока и уровней р. Кубань в вегетационный период;
- изменение гидрологического режима р. Кубань оказывает влияние на управление водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы, как следствие уменьшается водообеспеченность Новокубанского канала;
- малые расходы и глубины в канале, как следствие снижение площадей орошения;
- низкий КПД сети при протяжённой линейной схеме Новокубанского канала, который нуждается в подпитке дополнительными расходами воды по всей трассе;
- уменьшение орошаемых площадей при снижении эксплуатационных характеристик насосных станций из-за низких уровней и высокого содержания наносов в потоке;
- зарастание растительностью отдельных участков, что приводит к снижению пропускной способности канала.

Для повышения надёжности эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы необходимо, на наш взгляд:

- во-первых, при дефиците стока р. Кубань необходимо провести ремонт головного водозаборного сооружения: отремонтировать гидротехнические затворы, которые управляют расходами в Новокубанском канале; ежегодно

проводить расчистку подводящего русла канала от наносов и мусора.

- во-вторых, для повышения расходов и уровней в Новокубанском канале в вегетационный период для надёжной подачи воды на хозяйственные орошаемые участки, необходимо внедрить на канале водоподпорные сооружения в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов (подпорно-пропускные водосливы) в местах, где сосредоточены основные водопользователи на Новокубанском канале.

- в-третьих, необходимо поставить алгоритм и изменить схему управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы путем дополнительной машинной подзадачей расхода в Новокубанском канале, что гарантированно повысит водообеспеченность системы.

В современных условиях Новокубанский канал находится в удовлетворительном состоянии с максимальной пропускной способностью – 10,97 м³/с.

Расходы воды из р. Кубань на Верхне-Кубанской оросительной системе значительно снизились. В таблице 1.1 приведены среднемесячные расходы, поступившие в Новокубанский канал за 2022 г.

Таблица 1.1 – Среднемесячные расходы за 2022 г.

Месяц	м ³ /с	Месяц	м ³ /с
Январь	0,88	Июль	2,52
Февраль	0,72	Август	2,54
Март	0,86	Сентябрь	2,64
Апрель	1,00	Октябрь	1,76
Май	1,09	Ноябрь	1,06
Июнь	2,64	Декабрь	0,80

Данные в таблице 1.1 показывают, что в канале в вегетационный период в 2022г расходы находились в диапазоне 2,52-2,64 м³/с, глубины в канале составляли не более 0,45-0,53 м.

Из выполненного анализ схемы управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системой можно сделать выводы.

1.Верхне-Кубанская оросительная система в современных условиях из-за дефицита водных ресурсов р. Кубань не обеспечивает всю площадь орошения, что сдерживает развитие орошаемого земледелия на данной территории.

2. Для повышения надёжности эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы необходимо разработать комплекс мер, которые будут направлены на повышение расхода и уровней в Новокубанском канале.

3. Для эффективного управления водными ресурсами на Верхне-Кубанской оросительной системе в сложившейся ситуации необходима модернизация технологической схемы водораспределения на Новокубанском канале.

1.5 Выводы по 1 главе

Из литературных источников установлено, что эксплуатация оросительных систем в настоящее время нарушается дефицитом оросительной воды в реках и каналах, что связано со многими причинами, наиболее важной из которых является снижение качества и количества оросительной воды. Решить задачу надёжной водообеспеченности на каналах возможно модернизацией технологических схем и алгоритма управления водными ресурсами, для этого необходимо:

- разработать и исследовать физические модели подпорно-пропускных полигональных водосливов и выбрать наиболее адаптированы в качестве водоподпорных сооружений для повышения водообеспеченности и надёжности водораспределения на мелиоративных каналах;
- применять на практике водоподпорные сооружения в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов для управления расходами и получения данных о пропуске наносов через водосливы;
- исследовать уровни в верхнем бьефе водоподпорных сооружений для оценки дополнительных объёмов воды в мелиоративных каналах для надёжности орошения;
- выполнить исследования пропускной способности водоподпорного сооружения и дать оценку объёмам донных отложений наносов в вегетационный период на Новокубанском канале;
- модернизировать технологическую схему управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системой на основе усовершенствованных водоподпорных сооружений и дополнительной подпитки расходами из р. Кубань Новокубанского канала.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1 Методология исследований

При модернизации схемы управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы был проведён анализ различных технологических схем управления водными ресурсами и конструкций водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах (Патенты РФ: № 432469 [63]; № 127763 [64]; № 2614798 [65]; № 2621268 [66] и др.). Анализ показал, что не имеется достаточно надёжных схем управления водными ресурсами и конструкций водоподпорных сооружений, которые были бы наиболее адаптированы к современным условиям дефицита расходов, уровней и пропуску наносов на протяжённых мелиоративных каналах с малыми расходами. Наиболее надёжной конструкцией, с нашей точки зрения, является водоподпорное сооружение [63], которое эксплуатируется на Новокубанском канале. Однако, надёжного эксплуатационного обоснования этого сооружения не проводилось, не определялись его технические параметры, поэтому были усовершенствованы гидравлические и геометрические параметры для разработки более совершенной конструкции водоподпорного сооружения на мелиоративных каналах.

Лабораторные исследования проводились на физических моделях водоподпорных сооружений на двух лотках кафедры гидравлики и с. х. водоснабжения ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ. Натурные исследования выполнялись на действующем подпорно-пропускном полигональном водосливе для получения необходимых расходных характеристик и данных о пропуске наносов через водоподпорное сооружение на Новокубанском канале.

Лабораторные и натурные исследования позволяют установить какое количество более совершенных водоподпорных сооружений необходимо для надёжной водообеспеченности Новокубанского канала и эффективного управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы.

2.2 Обоснование формы и размеров физических моделей водоподпорного сооружения, лабораторная установка

Для совершенствования конструкций водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах были разработаны физические модели, из которых необходимо было выбрать физическую модель, наиболее адаптированную по гидравлическим и геометрическим параметрам к условиям Новокубанского канала, которая бы пропускала наибольший расход и при этом обеспечивала максимальный пропуск наносов в нижний бьеф [89, 90, 91, 92, 93, 95, 99]. В лабораторных экспериментах обеспечивались принципы физического подобия, выполнялось постоянство масштабов связи параметров природы (Н) и модели (М).

Решалась обратная задача перевода гидравлических процессов, которые имеются в природе, на физические модели с соблюдением следующих условий: геометрического подобия; подобия начальных и граничных условий; равенства критериев динамического подобия [13, 17, 19, 33, 85, 105, 110].

Основным критерием динамического является критерий Ньютона, в качестве определяющих критериев подобия принимаются критерии Фруда, Эйлера и Рейнольдса. Однако для одной и той же жидкости на модели и натуре одновременно нельзя удовлетворить равенство критериев Фруда, Эйлера и Рейнольдса [13, 82]. При изучении движения воды в мелиоративных каналах, как правило, принимается критерий Фруда [7, 13], так как движение в безнапорных потоках происходит под действием силы тяжести, которая значительно больше сил вязкости из-за малых скоростей потока. Следовательно, в исследованиях опытов принимается критерий Фруда.

Критерий Фруда выражают через среднюю скорость:

$$\frac{v_{\text{нат}}^2}{g_{\text{нат}} h_{\text{нат}}} = \frac{v_{\text{мод}}^2}{g_{\text{мод}} h_{\text{мод}}} = Fr, \quad (2.1)$$

где $v_{\text{нат}}$ – средняя скорость в натуре; $g_{\text{нат}}$ – ускорение силы тяжести в натуре; $h_{\text{нат}}$ – напор в натуре; $v_{\text{мод}}$ – средняя скорость на модели; $g_{\text{мод}}$ – ускорение силы тяжести на модели; $h_{\text{мод}}$ – напор на модели; Fr – число Фруда.

Линейный масштаб моделирования вычисляется из следующего соотношения:

$$\sigma_1 = \frac{B_{\text{нат}}}{B_{\text{мод}}}, \quad (2.2)$$

где σ_1 – линейный масштаб моделирования; $B_{\text{нат}}$ – ширина канала в натуре, м; $B_{\text{мод}}$ – ширина канала на физические модели, м.

Для решения задач по исследованию гидравлических и геометрических параметров водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов разработаны физические модели с заложением откосов верхней грани и углами боковых стенок со следующими параметрами: относительной длиной водосливного фронта $h/B_n=0.004-0.044$ и относительной шириной порога $h/L_n=0.081-0.938$.

Согласно данным академика Н. Н. Павловского, исследуемые полигональные водосливы практического профиля с высотой порога $0,5H-3H$ и шириной в пределах от $(0,5-0,67) H$ до $2H$, где H – полный напор являются низкими с практическим профилем по ширине [60]. Геометрические параметры M водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива получили при линейном масштабе 1:25 и вертикальном - 1:10. Напоры и расходы в натуре были в диапазоне $(0,08-0,53)$ м и $(0,34-13,44)$ м³/с, соответственно. Значения чисел Фруда модели и натуры находились в пределах от 0,28 до 1,1.

Следует отметить, что параметры физических моделей усовершенствованных водоподпорных сооружений для изучения движения наносов получили с

применением подобия Фруда при линейном 1:65 и вертикальном 1:10 масштабах. При движении наносов на М и натуре был рассчитан критерий подвижности (число Шильдса) и критерий взвешивания наносов (число Рауза).

Критерий Шильдса определяется по формуле:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w)gd}, \quad (2.3)$$

где τ_* – число Шильдса; τ_0 – касательное напряжение на дне, Па или н/м²; ρ_s – плотность частиц наносов, кг/м³; ρ_w – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; d – диаметр песка, м.

$$\tau_0 = \rho g R I, \quad (2.4)$$

где R – гидравлический радиус потока, м; I – уклон канала.

Критерий Рауза выражается по формуле:

$$Z = \frac{Ws}{K\tau_0}, \quad (2.5)$$

где R – число Рауза; Ws – гидравлическая крупность наносов, м/с; K – постоянная Кармана, $K=0,4$.

Значения чисел Фруда, Шильдса и Рауза находились в пределах (0,05-0,33); (0,05- 0,33) и (0,72- 4,9), соответственно, для модели и натуре.

Критические числа Шильдса для песка лежат в диапазоне от 0,03 до 0,06, т.е. числа Шильдса равны и большие критического числа Шильдса, это значит, что частицы песка находятся в области критического состояния [13, 14, 16].

Число Рауза находится в диапазоне от 0,72 до 4,9, т.е. по классификации Рауза частицы переносятся, как взвешенные наносы и их концентрация быстро растет у дна [13, 14, 16].

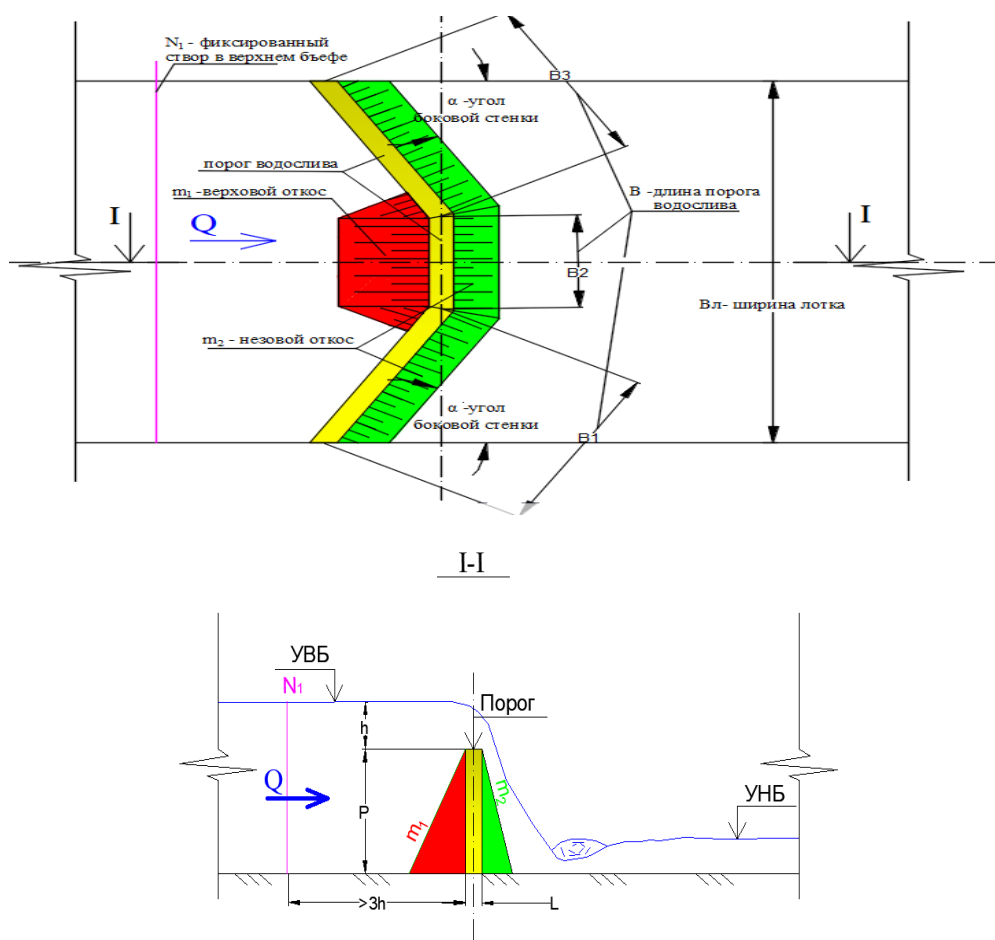
При обработке экспериментальных данных использовали электронную таблицу Excel, а для инженерного представления графики в AutoCAD.

2.3 Разработка физических моделей усовершенствованных водоподпорных сооружений

Согласно методике эксперимента, была разработана физическая модель действующего водоподпорного сооружения на Новокубанском канале и на основе

этой модели были разработаны физические модели с иными геометрическими параметрами, которые необходимо было исследовать и получить более совершенное водоподпорное сооружение с улучшенными эксплуатационными параметрами, удовлетворяющие требованиям модернизации технологической схемы управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы.

Общая схема исследуемой физической модели усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива в плане и разрезе даны на рисунке 2.1.



N_1 – створ для измерения напора; P – высота порога; h – напор; L – ширина по гребню водоподпорного сооружения; m_1 – заложения верхней грани; m_2 – заложения нижней грани

Рисунок 2.1 – Общая схема усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива

Для исследования усовершенствованных водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов была разработана схема опыта, в которой для сравнения и выбора более совершенной конструкции разработано 9

вариантов водоподпорного сооружения. В таблице 2.1 даются варианты моделей водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных водосливов.

Таблица 2.1 – Варианты геометрических параметров физических моделей водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных водосливов (водоподпорных сооружений)

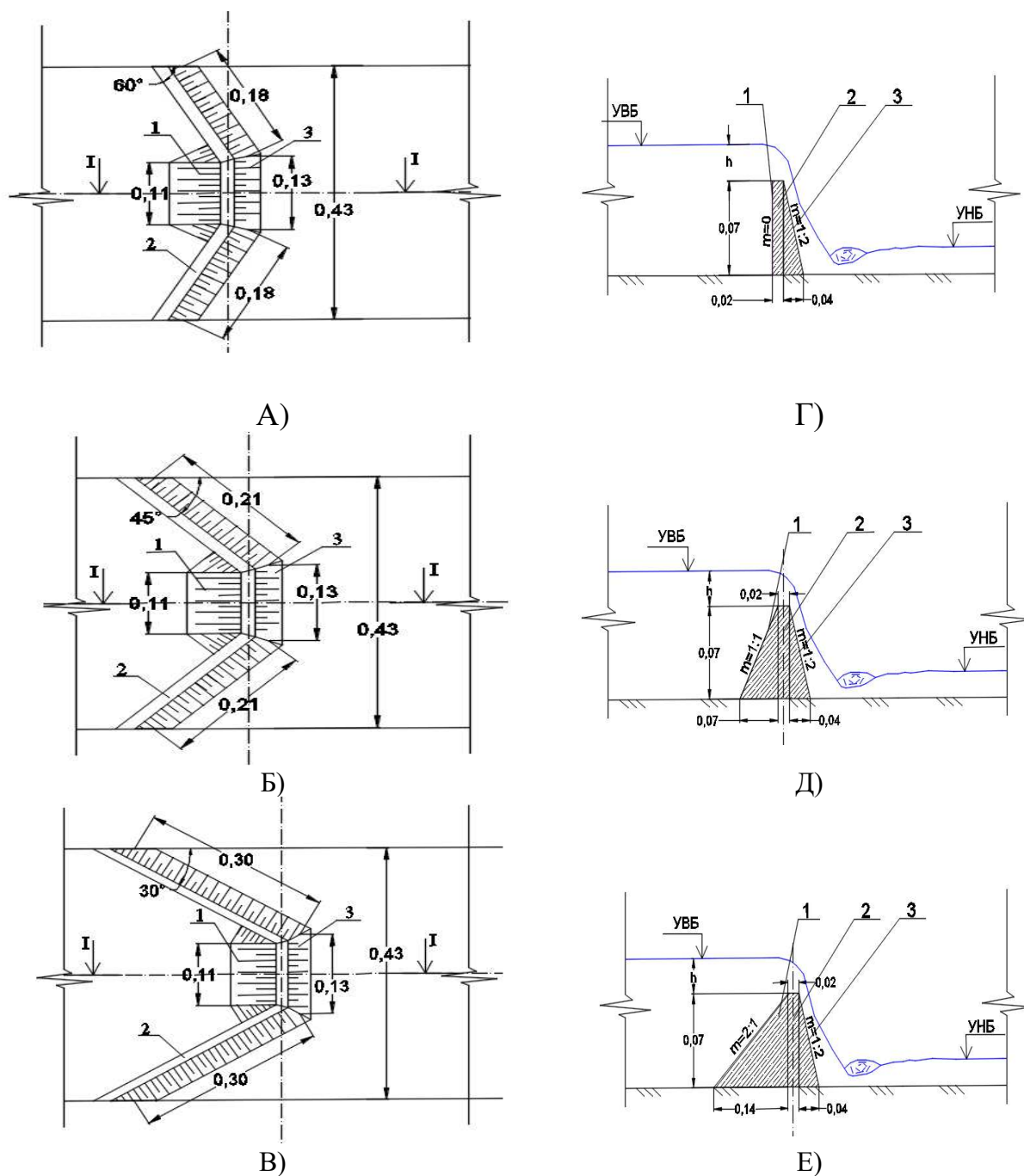
Модель водослива	Геометрические параметры физических моделей					
	m_1	α	$B_1 = B_3, \text{ см}$	$B_2, \text{ см}$	$P, \text{ м}$	m_2
1	0	30°	32,34	11,02	0,07	1:2
2		45°	22,62			
3		60°	18,19			
4	1:1	30°	32,34			
5		45°	22,62			
6		60°	18,19			
7	2:1	30°	32,34			
8		45°	22,62			
9		60°	18,19			

Физические модели усовершенствованного водоподпорного сооружения изготавливались с постоянной высотой порога $P=0,07$ м и низовой гранью с заложением откоса 1:2. Верховая грань моделей изменялась и была с откосами – 0; 1:1; 2:1. Физические модели усовершенствованных водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов были сделаны из гипсовых материалов и покрашены 2-мя слоями эмалированной краски. На фото показано (рисунок 2.2) доведение физические модели водослива до опытного образца.



Рисунок 2.2 – Подготовка физических моделей водоподпорного сооружения к лабораторным исследованиям

На рисунке 2.3 (А; Б; В; Г; Д и Е) показаны варианты планов и разрезв усовершенствованного водоподпорного сооружения.

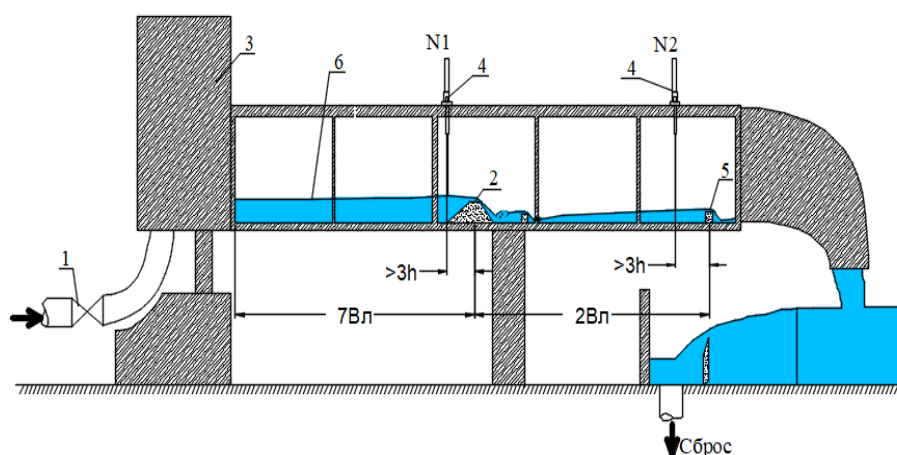


1 – верховой откос; 2 – порог усовершенствованного водоподпорного сооружения;
3 – низовой откос; А) – план физической модели с углом боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=60^\circ$, Б) – план физической модели с углом боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=45^\circ$, В) – план физической модели с углом боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=30^\circ$, Г) – разрез физической модели I-I с откосом $m_I=0$, Д) – разрез модели I-I с откосом $m_I=1:1$, Е) – разрез физической модели I-I с откосом $m_I=2:1$

Рисунок 2.3 – Схема вариантов физических моделей усовершенствованных водоподпорных сооружений

2.3.1 Методика исследования коэффициента расхода водоподпорных сооружений

Для проведения лабораторных исследований коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения были выполнены эксперименты на гидравлическом лотке длиной 4,5 м, шириной 0,43 м и высотой 1,0 м (рисунок 2.4). Для измерения расхода использовались тарированный водослив-водомер и мерная тарированная ёмкость. Для измерения напора использовался шпигунмасштаб 4 с точностью 0,1 мм. Точность измерения расхода составляла 2,5 %. Напор воды над гребнем водоподпорного сооружения измерялся в створах N_1 и N_2 на расстоянии $3H$ от порога. С помощью секундомера с точностью 0,01 с измеряли время каждого опыта [90].



1 – задвижка; 2 – подпорно-пропускной полигональный водослив; 3 – напорный бак;
4 – шпигунмасштаб; 5 – водослив-водомер; 6 – уровень воды ВБ

Рисунок 2.4 – Лабораторная установка для исследования коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива

При исследовании коэффициента расхода водоподпорного сооружения необходимо было установить:

- зависимость коэффициента расхода m_n от геометрической формы профиля и гидравлических параметров: относительной длины водосливного фронта h/B_n ; относительной ширины порога h/L_n для вариантов физических моделей усовершенствованного водоподпорного сооружения;

- эффективную физическую модель усовершенствованного водоподпорного сооружения, которая бы обеспечивала наибольшую пропускную способность на мелиоративных каналах.

Методика проведения экспериментов на лабораторной установке выполнялась в следующей последовательности:

- поочерёдно в лоток устанавливались физические модели водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов;
- проводились измерения расхода объёмным способом при ошибке измерения, которая не превышала 2,5 %;
- повторность опыта трёхкратная;
- опыт выполнялся в диапазоне чисел Фруда 0,05-0,33.

Расход Q_ϕ в лотке вычисляется по формуле:

$$Q_\phi = C \cdot h^{\frac{5}{2}}, \quad (2.6)$$

где C – константа водослива-водомера, которая составляет 1,30; h – напор у водослива-водомера на расстоянии $3h$ от порога, м.

Для определения расхода водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива Q использовали формулу [6, 7, 13, 15, 16, 90, 97, 98, 103]:

$$Q = m_\Pi \cdot B_\Pi \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}}, \quad (2.7)$$

где $(B_\Pi = B_1 + B_2 + B_3)$ – длина водосливного фронта полигонального водослива (рисунок 2.1), м; h – напор над водоподпорным сооружением, м.

Коэффициент расхода водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива m_Π определяется из формулы расхода (2.8):

$$m_\Pi = \frac{Q_\phi}{B_\Pi \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2g}} \rightarrow m_\Pi = \frac{Q_\phi}{Q^*}, \quad (2.8)$$

где Q^* – теоретический расход в лотке, м³/с.

Исследование m_n усовершенствованного водоподпорного сооружения проводилось при расходе $0,11 \cdot 10^{-3} - 4,30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, напоре над водоподпорным сооружением $h = 3 \cdot 10^{-3} - 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Относительная ширина порога водоподпорного сооружения h/L_n изменялась в диапазоне $0,081 - 0,938$, относительная длина водосливного фронта h/B_n была в диапазоне $0,004 - 0,444$ и углах 30° ; 45° и 60° .

Лабораторные опыты для изучения m_n выполнялись на физической модели водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов практических профилей с разными заложениями верховой грани m_l и углами боковых стенок водоподпорного сооружения к их осям α . Для определения значения коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения m_n использовали формулу (2.8). Опытные данные и результаты расчёта коэффициента расхода для усовершенствованного водоподпорного сооружения с заложениями верховой грани $m_l = 0, 1:1$ и $2:1$ и боковыми стенками водослива к осям $\alpha = 30^\circ$; 45° ; 60° представлены в приложении 1, а результаты зависимости m_n от h/L_n и h/B_n для 3-х различных верховых откосов и 3-х различных углах боковых стенок водоподпорного сооружения 30° ; 45° ; 60° приведены в приложении 2.

2.3.1.1 Исследование коэффициента расхода с применением ПИ-теоремы и метода наименьших квадратов

Из ПИ-теоремы (Бэкингема) получаем зависимость, учитывающую воздействие основных факторов, которые влияют на коэффициент расхода водоподпорного сооружения. Основные гидравлические факторы, влияющие на коэффициент расхода водоподпорного сооружения при высоте порога p и постоянном низовом откосе, представляются в виде зависимости:

$$m_n = f(h, L_n, B_n, \rho, g, \mu, \sigma, \theta, \alpha), \quad (2.9)$$

где h – напор над водоподпорным сооружением, м; L_n – ширина по гребню водоподпорного сооружения, м; B_n – длина водосливного фронта, м; ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; μ – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; σ – поверхностное натяжение, $\text{н}/\text{м}^2$; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; θ – угол наклона верховой грани, градус; α – угол боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси, градус.

Используя Пи-теорему, получаем выражение для коэффициента расхода водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного водослива $m_{\text{п}}$:

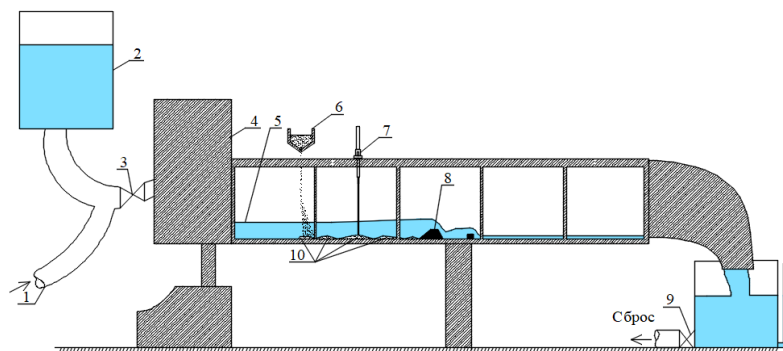
$$m_{\text{п}} = f\left(\frac{h}{L_n}; \frac{h}{B_n}; Re; We; \vartheta; \alpha\right), \quad (2.10)$$

где h/L_n – относительная ширина порога водоподпорного сооружения; h/B_n – относительная длина водосливного фронта водослива; $Re = \frac{V \cdot h}{\mu}$ – число Рейнольдса; $We = \frac{\sigma}{\rho \cdot h^2}$ – число Вебера.

Данные методики применяли для получения практических зависимостей $m_{\text{п}}$ от основных гидравлических и геометрических параметров, которые будут использоваться для исследования движения наносов, подпоров уровней в верхнем бьефе водоподпорного сооружения и получения их эксплуатационных параметров для управления водопотребления на оросительных системах.

2.3.2 Схема опыта движения наносов через усовершенствованные водоподпорные сооружения

Исследования водоподпорного сооружения проводили на втором гидравлическом лотке. Лоток был шириной 0,17 м, длиной 4,4 м, высотой 0,3 м, который дан на рисунке 2.5.



- 1 – подача из подземного резервуара; 2 – напорный резервуар; 3, 9 – задвижки; 4 – напорный бак; 5 – уровень воды ВБ; 6 – воронка для добавления песка; 7 – шпигенмасштаб; 8 – конструкция водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного водослива; 10 – продольный профиль песка

Рисунок 2.5 – Лабораторная установка для исследования движения наносов через порог водоподпорного сооружения

Вода подается в установку (рисунок 2.5) из 2-х источников: из подземного резервуара насосом вода подаётся в лоток (канал) через трубу 1; и резервуара 2,

который установлен на высоте 3-х метров, из ёмкости 4 вода поступает в лоток. Расход воды в лотке управляется с помощью задвижки 3. Лоток имел постоянный уклон дна 0,001.

Для изучения движения наносов в лоток через водоподпорное сооружение (рисунок 2.6) подавался песок на дно в поток с постоянным весовым расходом с помощью воронки 6 на расстоянии 1 м от его гребня. Напор воды над гребнем водоподпорным сооружением измерялся на расстоянии $3H$ от порога водоподпорного сооружения. Расходы в опытах определялись объёмным методом с помощью тарированной мерной ёмкости. Ошибка при измерении расхода не превышала 2,5 %. Продольный профиль песка 10 на дне лотка и уровни воды 5 измерялись с использованием шпигенмасштаба 7 с точностью 0,1 мм. Песок, осажденный у порога подпорно-пропускного водослива, сушился в сушильном шкафу при температуре 100-110 °С и взвешивался с помощью электронных весов KS1005 с точностью 0,01 г. Время опыта определялось секундомером с точностью 0,01 с.



Рисунок 2.6 – Лабораторный лоток для исследования движения наносов через водоподпорное сооружение

Исследовались физические модели водоподпорного сооружения с изменяющимся заложением верховой грани 0; 1:1; 2:1 и углами боковых стенок к оси водоподпорного сооружения (рисунок 2.3 (Г; Д и Е)). Углы боковых стенок были к оси $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° при постоянной высоте порога $P=0,07$ м и при

постоянном заложении низового откоса водослива, который составлял $m_2=1:2$. Полученные результаты сравнили с водоподпорным сооружением – классическим с вертикальной водосливной гранью, который применяется, в основном, в мелиоративной практике на каналах при угле боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=90^\circ$.

2.3.2.1 Методика исследования движения наносов на водоподпорных сооружениях

Методика исследований на лабораторном лотке была максимально приближена к условиям движения наносов на Новокубанском канале через водоподпорное сооружение. Исследования выполнялись на физических моделях, для выявления более совершенной конструкции для модернизации технологической схемы управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы на основе подпорно-пропускных полигональных водосливов.

Исследования выполнялись на моделях при напоре $1,3 \cdot 10^{-2}$ – $7,3 \cdot 10^{-2}$ м с шагом 0,01 м и расходе, который был в диапазоне $0,58 \cdot 10^{-3}$ – $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Скорости потока находились в пределах от 0,046 м/с до 0,409 м/с.

Для исследования движения наносов через водоподпорное сооружение приняли песок диаметром 0,1–0,5 мм, который преобладает в Новокубанском канале. Температура воды при проведении опытов была постоянной и составила 20 °С. Гидравлическая крупность наносов была в пределах от 0,00663 м/с до 0,04020 м/с при средневзвешенной гидравлической крупности песка – 0,02342 м/с [88].

При такой гидравлической крупности наносов значения чисел Рауза для $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° находились в пределах 0,72–0,82 при диаметре 0,1 мм и 4,36–4,95 при диаметре 0,5 мм.

Для имитации натурной мутности потока (мутность р. Кубань и Новокубанского канала) в лоток добавляли песок в поток с постоянным расходом

0,35 г/с при напорах воды от 1,3 до 7,3 см с шагом 0,01 м, т.е. при 7 расходах от $0,58 \cdot 10^{-3}$ до $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Каждый эксперимент выполнялся 30 минут. Вес добавленного песка в поток в каждом опыте составлял $W_{n1} = 630$ г, при этом мутность потока в лотке во время опытов изменялась от 35 г/м³ до 603 г/м³ в зависимости от расхода.

Для определения веса песка, осажденного у порога водоподпорного сооружения W_{n2} , после окончания эксперимента собирали и сушили в сушильном шкафу при температуре 100 – 110°C, а затем взвешивали на электронных весах.

Процент песка по весу, прошедшего через водоподпорное сооружение Π %, вычисляли по формуле:

$$\Pi\% = \frac{W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2}}{W_{\Pi 1}} \cdot 100, \quad (2.11)$$

где W_{n1} – исходный вес песка, гр.; W_{n2} – осаждённый вес песка у подпорно-пропускного водослива, гр.

Расход песка P_n (г/с), прошедшего через водоподпорное сооружение, определяли по формуле:

$$P_{\Pi} = \frac{W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2}}{t}, \quad (2.12)$$

где t – продолжительность эксперимента, с.

Расход песка и процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение определили при напоре воды $1,3 \cdot 10^{-2}$ – $7,3 \cdot 10^{-2}$ м, расходе $0,58 \cdot 10^{-3}$ – $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с, мутности потока 35–603 г/м³

Для выбора более совершенной конструкции физические модели водоподпорного сооружения исследовался водоподпорное сооружение в виде подпорно-пропускного водослива с заложением верховой грани $m_1 = 0$; 1:1 и 2:1 и углами боковых стенок к его оси $\alpha = 30^\circ$; 45; 60° и 90°.

При отложении донных наносов и определении размеров отложений использовался шпигенмасштаб с точностью 0,1 мм, измеряли высоту песчаных гряд и волн, образовавшихся у водоподпорного сооружения при разных скоростях,

заложениях верховой грани и углах боковых стенок. Длину, форму, высоту гряд и волн в верхнем бьефе измеряли на отрезке 1 м в каждом опыте. Были построены продольные профили отложений донных наносов от точки подачи песка в лоток до порога водослива.

2.3.3 Методика исследования уровней в верхнем бьефе водоподпорного сооружения

Исследования уровней в верхнем бьефе проводились на втором гидравлическом лотке, как показано на рисунке 2.6. В лотке устанавливались физические модели водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива практического профиля с углами боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° при постоянной высотой порога водоподпорного сооружения $P = 0,07$ м и постоянном заложении низовой грани 1:2 [15, 89].

Измерения уровня воды проводились по длине потока в верхнем и нижнем бьефе в 15 створах и расстояния между створами. Для измерения уровней воды и отметок дна лотка использовался шпигенмасштаб с точностью 0,1 мм. Расходы измерялись объёмным методом с помощью тарированной мерной ёмкости с точностью до 2,5 %. Для построения свободной поверхности использовались программы Microsoft Excel и AutoCAD. По методу В. И. Чарномского получали длину кривой свободной поверхности (подпора) L , которую использовали для определения объёмов водопользования.

Исследования выполнялись на моделях в лотке при напорах от $1,3 \cdot 10^{-2}$ м до $7,3 \cdot 10^{-2}$ м с шагом 0,01 м, расход воды был в диапазоне $0,58 \cdot 10^{-3}$ - $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с, скорости потока находилась в пределах от 0,046 м/с до 0,406 м/с. Числа Фруда были в диапазоне 0,07-0,33; 0,06-0,27 и 0,05-0,24 для $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° , соответственно.

Эксперименты позволяют определить длину кривой подпора водной поверхности в верхнем бьефе водоподпорного сооружения при расходах $0,58 \cdot 10^{-3}$ - $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с на исследуемых моделях. Уровни свободной поверхности и отметки дна канала представлены в приложении 3.

Построение профилей по длине канала выполнялось в следующем порядке: на систему координат наносились точки с цифровыми значениями длины и уровня x и h . Уровень измерялся в 6 точках в верхнем бьефе с шагом 10 см до 50 см от оси подпорно-пропускного водослива. И в 7 точках с шагом 10 см до 50 см от оси водослива в нижнем бьефе относительно плоскости сравнения 0-0 по порогу подпорно-пропускного водослива.

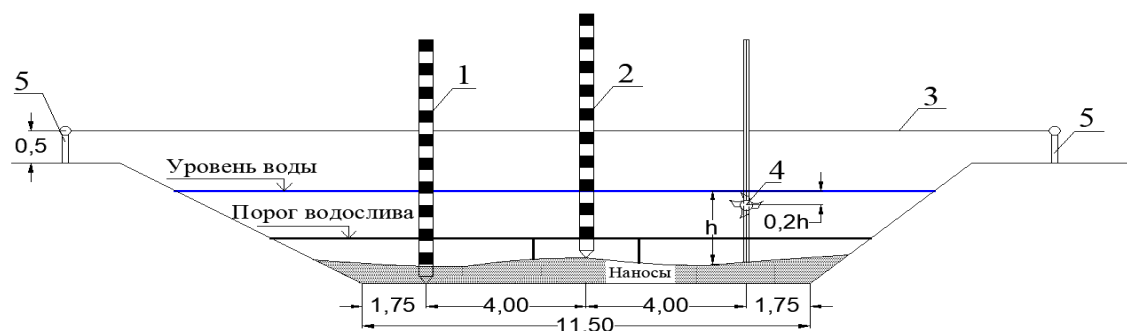
2.4 Методика натурных исследований водоподпорного сооружения на Новокубанском канале

Водоподпорное сооружение в виде подпорно-пропускного полигонального водослива на Новокубанском канале имеет следующие параметры: высота порога водоподпорного сооружения $P=0,8$ м; заложение верхового откоса 2:1; заложение низового откоса 1:1,4; углы боковых стенок к оси водослива $\alpha=60^\circ$; длина водосливного фронта $B_n = B_1 + B_2 + B_3 = 4,86 + 3,07 + 4,86 = 12,79$ м; ширина по гребню водоподпорного сооружения $L_n = 0,5$ м; напор над водоподпорным сооружением в диапазоне 0,91-1,17 м при расходах 0,72-4,39 м³/с. На левом берегу канала (рисунок 2.7) установлено водозаборное сооружение, содержащее рыбозащитное устройство, на расстоянии 1,5 м от левого устоя водоподпорного сооружения и представляет собой аванкамеру закрытого типа с 6 всасывающими трубами диаметром 300 мм, расположенными от дна на 0,5 м.



Рисунок 2.7 – Водозаборное сооружение ООО «Южная плодовоовощная компания» на Новокубанском канале (ВБ)

Топографические и гидрометеорологические исследования проводились в 2018 г. при проектировании и в 2023 г. после строительства водоподпорного сооружения на Новокубанском канале. С помощью нивелира-теодолита VEGA ТЕО - 5В выполнялись топографические измерения, разбивались створы для промерных работ на канале, определяли отметки поверхности воды в канале и на водоподпорном сооружении. В створах намечали точки (вертикали), где измерялись скорости потока и отложения донных наносов у сооружения. Скорости измеряли сертифицированной вертушкой 4 ГР-21М. Гидрометрические измерения проводили в трёхкратной повторности, с помощью троса 3, натянутого по ширине канала и закрепленного на металлических стержнях 5 на высоте 0,5 м над берегом, намечали створы. Для определения глубины канала, уровня воды и толщины отложения наносов использовалась гидрометрическая рейка 1, 2 длиной 3 м с острым наконечником с точностью измерений ± 5 мм. Толщина отложения наносов рассчитывается по разнице между отметками отложения наносов и дна канала по гидрометрической рейке 1 и 2 (рисунок 2.8).



1 – гидрометрическая рейка у дна; 2 – гидрометрическая рейка на наносах; 3 – трос;
4 – гидрометрическая вертушка марки ГР-21М; 5 – металлический стержень

Рисунок 2.8 – Методика гидрометрического измерения
в Новокубанском канале

Скорость измерялась трех точечным способом на глубине $0,2h$; $0,6h$; $0,8h$ от поверхности воды и рассчитывалась, как средняя скорость на вертикали по формуле (2.13):

$$V_{\text{ср}} = \frac{V_{0,2} + 2 \cdot V_{0,6} + V_{0,8}}{4}, \quad (2.13)$$

где $V_{0,2}$, $V_{0,6}$, $V_{0,8}$ – скорости потока на глубине $0,2h$; $0,6h$; $0,8h$, соответственно, от поверхности воды.

Для определения расхода воды в Новокубанском канале в вегетационной период 2023 г. (таблица 2.2) использовалась формула (2.14) [11, 16, 61]:

$$Q = m_n \cdot B_{\text{п}} \cdot \sqrt{2gH^3}, \quad (2.14)$$

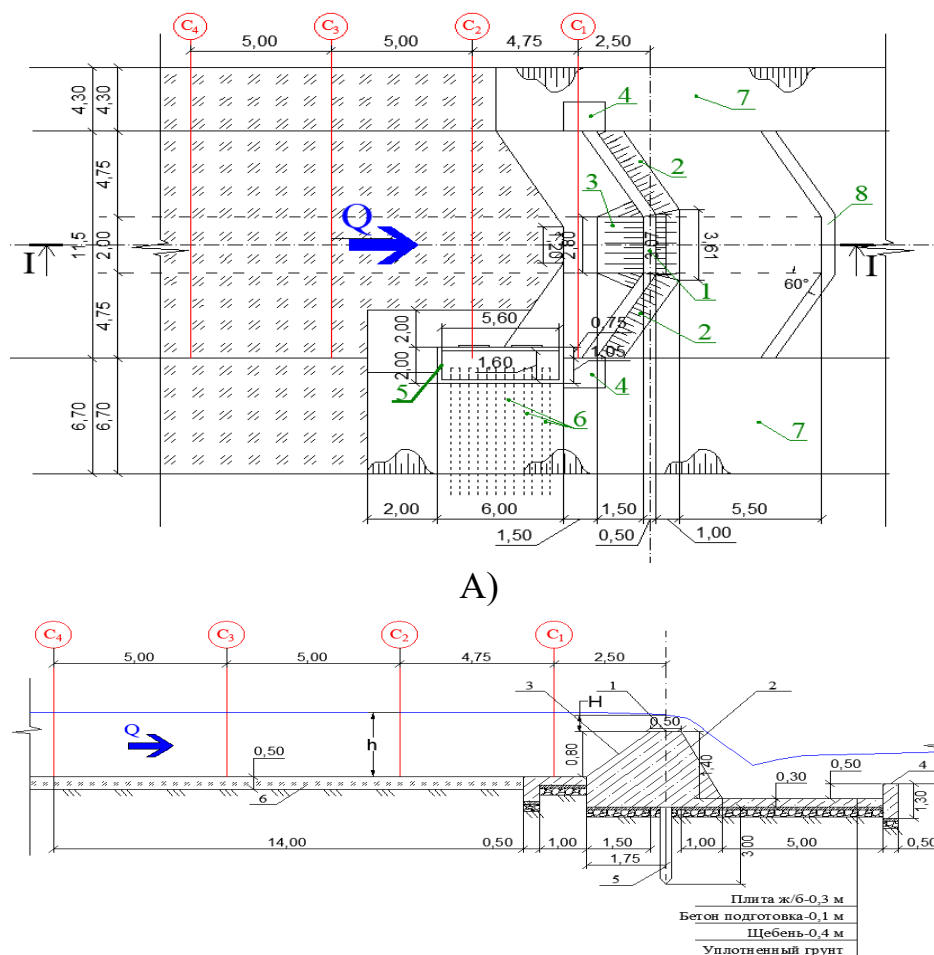
где Q – среднемноголетний расход канала, $\text{м}^3/\text{с}$; m_n – коэффициент расхода водоподпорного сооружения составляет $0,373$ при $\alpha=60^\circ$; $B_{\text{п}}$ – длина водосливного фронта полигонального водослива, м; H – глубина над водоподпорным сооружением, м.

Таблица 2.2 – Расчетный расход Новокубанского канала в вегетационный период 2023 г.

Месяц	Глубина в канале (h , м)	Напор над водоподпорным сооружением (H , м)	Расход воды в канале (Q , $\text{м}^3/\text{с}$)
Июнь	1,12	0,32	3,86
Июль	1,12	0,32	3,86
Август	1,14	0,34	4,21
Сентябрь	1,17	0,37	4,34

Для определения эффективности работы водоподпорного сооружения на Новокубанском канале проводили гидрометрические измерения в вегетационный период на четырех створах C_1 ; C_2 ; C_3 и C_4 перед полигональным подпорно-пропускным водосливом в верхнем бьефе канала, которые находились на расстоянии 2,5 м, 7,25 м, 12,25 м и 17,25 м от оси порога, соответственно, как показано на рисунке 2.11 А и Б.

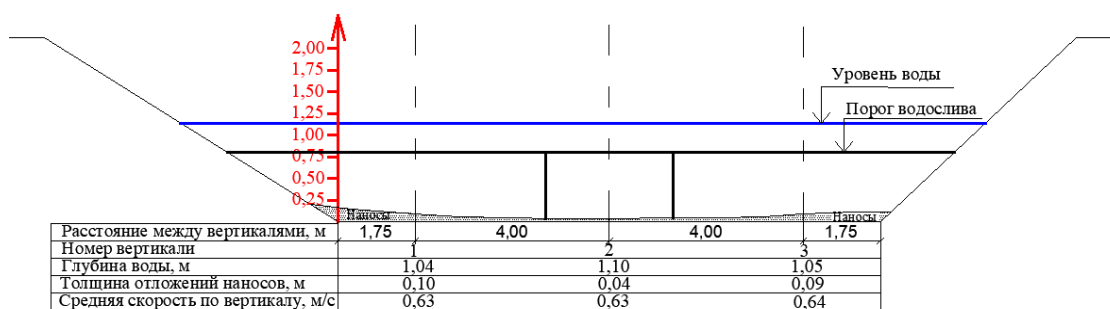
В каждом створе измеряли глубину канала, толщину донных отложений, глубину воды и среднюю скорость потока на 3 вертикалях с расстоянием 1,75 м от края дна канала и 4,00 м от середины канала (рисунок 2.9 А и Б, рисунок 2.10 А; Б; В и Г).



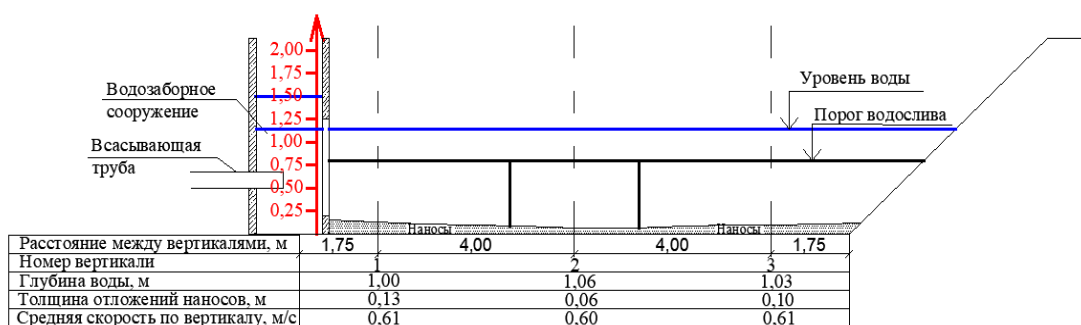
А – План; Б – разрез I-I

1 – порог водоподпорного сооружения; 2 – заложение низового откоса; 3 – заложение верхового откоса; 4 – устой береговой; 5 – водозаборное сооружение; 6 – всасывающие трубы насосной станции; 7 – ж/б крепление откосов; 8 – водозаборный колодец; 9 – сваи буронабивные; 10 – каменная наброска

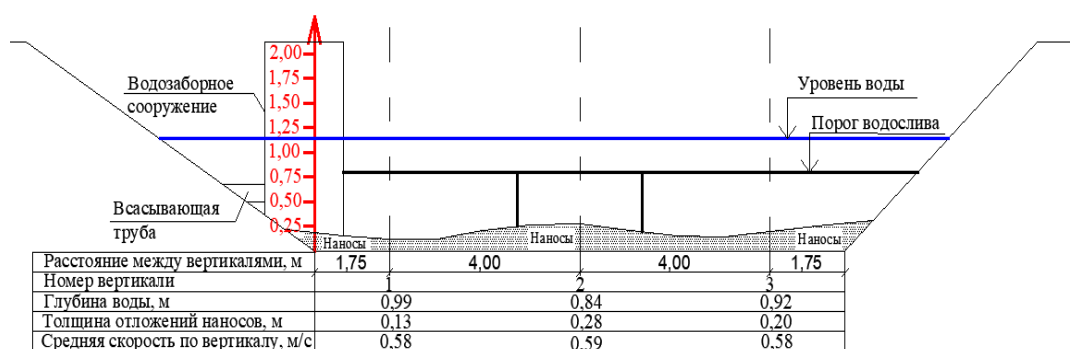
Рисунок 2.9 – Водоподпорное сооружение в Новокубанском канале



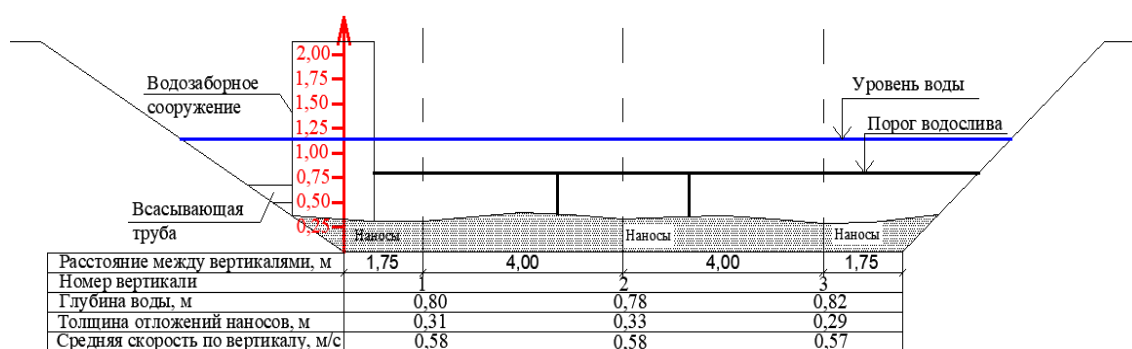
А)



Б)



В)



Г)

А – створ С₁; Б – створ С₂; В – створ С₃; Г – створ С₄

Рисунок 2.10 – Поперечные профили Новокубанского канала у водоподпорного сооружения

При устройстве водоподпорного сооружения находился коэффициент шероховатости русла Новокубанского канала в створах C_2 ; C_3 и C_4 , который составил $n=0,03$. Коэффициент Шези определялся с учетом скоростей потока в створах по формуле (2.13) и формул Шези и Маннинга:

$$Q = \omega \cdot C \sqrt{Ri}, \quad (2.15)$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}}, \quad (2.16)$$

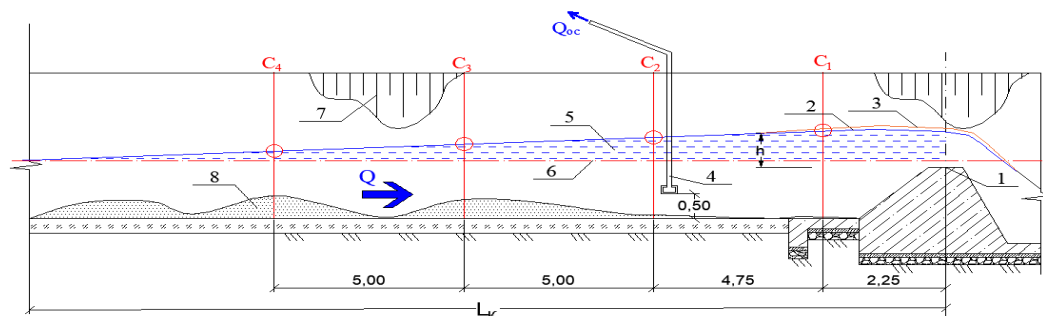
где Q – расход канала, $\text{м}^3/\text{с}$; R – гидравлический радиус, ω – площадь живого сечения потока м^2 , i – гидравлический уклон дна канала.

Для сравнения эффективности водоподпорных сооружений решали обратную задачу перевода параметров модели на натуру. Более совершенную модель водоподпорного сооружения при углах боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=30^\circ$ и заложением верхового откоса $m_1=2:1$, сравнили с водоподпорным сооружением на Новокубанском канале при $\alpha=60^\circ$, $m_1=2:1$.

Дополнительный объём воды (V_d) в канале рассчитывается с использованием уравнения В. И. Чарномского [12] и по формуле (2.17).

$$V_d = (A_c - A_6) \cdot L_k / 2, \quad (2.17)$$

где A_c – площадь живого сечения канала при наличии водоподпорного сооружения, м^2 ; A_6 – площадь живого сечения канала при отсутствии подпорно-пропускного водослива, м^2 ; L_k – длина кривой поверхности воды, м .



1 – водоподпорное сооружение; 2 – опытная кривая подпора при наличии водоподпорного сооружения при $\alpha=60^\circ$; 3 – кривая подпора при наличии водоподпорного сооружения а при $\alpha=30^\circ$; 4 – всасывающие трубы НС; 5 – дополнительный объём воды в канале; 6 – расчётная кривая уровня воды в канале без водослива по уравнению (5.3); 7 – бровка канала; 8 – наносы.

Рисунок 2.11 – Кривые свободной поверхности воды в канале без водоподпорного сооружения и с ним

Определены средний дополнительный объём воды для орошения в Новокубанском канале на участке 1,52 км, которые будет обеспечивать усовершенствованная физическая модель водоподпорного сооружения при $\alpha=30^\circ$ и действующее водоподпорное сооружение на Новокубанском канале при $\alpha=60^\circ$.

2.5 Выводы по 2 главе:

- Из анализа конструктивных и технологических особенностей водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах [63, 64, 65, 66 и др.] было разработано 9 вариантов физических моделей для обоснования более совершенной физической модели водоподпорного сооружения;

- в основе исследования гидравлических и геометрических параметров водоподпорных сооружений на каналах лежит подпорно-пропускной полигональный водослив практического профиля прямолинейного очертания (вариант В, рисунок 2.3), который обладает эффективными водосливными формами по пропускной способности, отмеченные рядом учёных [6, 7, 13, 32, 60, 84 и др.];

- совершенствование гидравлических и геометрических параметров водопропускных сооружений было выполнено с использованием теории подобия гидравлических явлений с применением критерия Фруда, наименьших квадратов, которые использовались при разработке физических моделей водоподпорных сооружений;

- транспортирующая способность потока наносов через водоподпорные сооружения и на мелиоративном канале исследовалась с учётом параметра подвижности наносов - числа Шильдса и критерия взвешивания наносов - число Рауза и определялась процентом пропуска наносов через водоподпорное сооружение;

- натурные исследования гидравлических и геометрических параметров усовершенствованного водоподпорного сооружения на Новокубанском канале выполнялись с использованием стандартных методик с применением ГОСТ Р 58330.2-2018, ГОСТ 8.417-2024, МИ 1759-87 ГСИ.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВОДОПОДПОРНОГО СООРУЖЕНИЯ

3.1 Исследование коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения методом наименьших квадратов

Применяя к уравнению (2.10) метод наименьших квадратов, после решения получаем зависимость:

$$Z = b_0 \cdot U_1^{b_1} \cdot U_2^{b_2} \cdot U_3^{b_3} \cdot U_4^{b_4} \cdot U_5^{b_5} \cdot U_6^{b_6}, \quad (3.1)$$

где $Z = m_n$, $u_1 = h/L_n$, $u_2 = h/B_n$, $u_3 = Re$, $u_4 = We$, $u_5 = \sin(\theta)$, $u_6 = \sin(\alpha)$.

Прологарифмируем зависимость (3.1), получаем уравнение:

$$\begin{aligned} \ln(Z) = \ln(b_0) + b_1 \cdot \ln(U_1) + b_2 \cdot \ln(U_2) + b_3 \cdot \ln(U_3) + \\ + b_4 \cdot \ln(U_4) + b_5 \cdot \ln(U_5) + b_6 \cdot \ln(U_6) \end{aligned} \quad (3.2)$$

где $y = \ln(z) = \ln(m_n)$, $a_0 = \ln(b_0)$, $x_1 = \ln(u_1) = \ln\left(\frac{h}{L_n}\right)$, $x_2 = \ln(u_2) = \ln\left(\frac{h}{B_n}\right)$, $x_3 = \ln(u_3) = \ln(Re)$, $x_4 = \ln(u_4) = \ln(We)$, $x_5 = \ln(u_5) = \ln(\sin(\theta))$, $x_6 = \ln(u_6) = \ln(\sin(\alpha))$.

Уравнение (3.2) можно записать в виде выражения:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5 + a_6 \cdot x_6. \quad (3.3)$$

Значения при переменных $x_1 \dots x_6$ выражения (3.3) соответствуют относительной длине полигонального водосливного фронта h/B_n ; относительной ширине порога водоподпорного сооружения h/L_n ; числу Рейнольдса Re ; числу Вебера We ; синусу угла наклона верхового откоса порога и значению синуса угла боковых стенок к оси водоподпорного сооружения для всех рассматриваемых моделей водоподпорного сооружения (приложение 4).

Для решения алгебраического выражения (3.3) представим его в матричной форме (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Матричная форма системы алгебраического уравнения

	$\sum x_1$	$\sum x_2$	$\sum x_3$	$\sum x_4$	$\sum x_5$	$\sum x_6$	$\sum y$
$\sum x_1$	$\sum x_{1.x1}$	$\sum x_{2.x1}$	$\sum x_{3.x1}$	$\sum x_{4.x1}$	$\sum x_{5.x1}$	$\sum x_{6.x1}$	$\sum y.x1$
$\sum x_2$	$\sum x_{1.x2}$	$\sum x_{2.x2}$	$\sum x_{3.x2}$	$\sum x_{4.x2}$	$\sum x_{5.x2}$	$\sum x_{6.x2}$	$\sum y.x2$
$\sum x_3$	$\sum x_{1.x3}$	$\sum x_{2.x3}$	$\sum x_{3.x3}$	$\sum x_{4.x3}$	$\sum x_{5.x3}$	$\sum x_{6.x3}$	$\sum y.x3$
$\sum x_4$	$\sum x_{1.x4}$	$\sum x_{2.x4}$	$\sum x_{3.x4}$	$\sum x_{4.x4}$	$\sum x_{5.x4}$	$\sum x_{6.x4}$	$\sum y.x4$
$\sum x_5$	$\sum x_{1.x5}$	$\sum x_{2.x5}$	$\sum x_{3.x5}$	$\sum x_{4.x5}$	$\sum x_{5.x5}$	$\sum x_{6.x5}$	$\sum y.x5$
$\sum x_6$	$\sum x_{1.x6}$	$\sum x_{2.x6}$	$\sum x_{3.x6}$	$\sum x_{4.x6}$	$\sum x_{5.x6}$	$\sum x_{6.x6}$	$\sum y.x6$

После преобразований, получаем значения коэффициентов уравнения (3.2).

Таблица 3.2 – Значения коэффициентов уравнения (3.3).

$a_0=$	-15,216	$\Rightarrow$	$b_0=e^{a_0}=$	$2,47 \cdot 10^{-7}$
$a_1=$	1,6467		$b_1=a_1=$	1,647
$a_2=$	-2,6458		$b_2=a_2=$	-2,646
$a_3=$	0,0012		$b_3=a_3=$	0,001
$a_4=$	1,61368		$b_4=a_4=$	1,614
$a_5=$	0,75178		$b_5=a_5=$	0,752
$a_6=$	-0,04565		$b_6=a_6=$	-0,046

Выражение (3.3) с учетом коэффициентов таблицы (3.2), можно записать в виде:

$$Z = 2,47 \cdot 10^{-7} \cdot U_1^{1,647} \cdot U_2^{-2,646} \cdot U_3^{0,001} \cdot U_4^{1,614} \cdot U_5^{0,752} \cdot U_6^{-0,046}. \quad (3.4)$$

Используя метод наименьших квадратов, из (3.4) получаем формулу (3.5) для коэффициента расхода m_n , которую можно использовать для оценки пропускной способности водослива:

$$m_n = 2,47 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{h}{L_n}\right)^{1,647} \cdot \left(\frac{h}{B_n}\right)^{-2,646} \cdot (Re)^{0,001} \cdot (We)^{1,614} \cdot (\sin\theta)^{0,752} \cdot (\sin\alpha)^{-0,046}. \quad (3.5)$$

Из формулы (3.5) следует, что коэффициент расхода m_n прямо пропорционален параметрам h/L_n ; Re ; We и $\sin\theta$ в степени 1,647; 0,001; 1,614 и 0,752, соответственно, и обратно пропорционален параметрам h/B_n и $\sin\alpha$ в степени

2,646 и 0,046, соответственно. Т.е. коэффициент расхода m_n в формуле (3.5) при росте параметров h/L_n ; Re ; We и $\sin\theta$ – увеличивается. Следовательно, можно сказать, что с уменьшением параметров h/B_n и $\sin\alpha$ коэффициент расхода m_n будет также будет возрастать.

Формула (3.5) получена при напоре над водоподпорным сооружением $h=3\cdot 10^{-3}$ – $21\cdot 10^{-3}$ м и расходе $Q = 0,11$ – $4,30$ л/с. Относительная ширина порога водоподпорного сооружения изменялась в диапазоне $h/L_n=0,081$ – $0,938$, относительная длина водосливного фронта была в диапазоне $h/B_n=0,004$ – $0,444$ при заложениях верховой грани 0; 1:1 и 2:1. При углах боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси 30° , 45° и 60° число Рейнольдса изменялось в диапазонах 590–13456; 375–8261 и 290–6410 соответственно, а число Вебера (We) — в пределах 2,35–148,47; 1,8–102,41 и 1,61–88,55 соответственно

Для подтверждения достоверности полученной формулы была выполнена оценка точности значений m_n по формуле (3.5) и лабораторных измерений коэффициента расхода. Средняя относительная погрешность измерений составила 0,62 %. Связь коэффициента расхода m_n по формуле (3.5) с лабораторными значениями m_n оказалась достаточно «высокая» и составила $R^2=0,9855$ (приложение 4).

3.2 Расчетные зависимости для определения коэффициента расхода усовершенствованных водоподпорных сооружений

Формула (3.5) показывает, что на коэффициент расхода водоподпорного сооружения в виде полигонального подпорно-пропускного водослива влияют следующие параметры: относительная ширина порога водоподпорного сооружения h/L_n ; относительная длина водосливного фронта h/B_n ; число Рейнольдса Re ; число вебера We ; угол наклона верховой грани и угол боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси α . Чтобы оценить влияния этих параметров на пропускную способность водоподпорного сооружения проводились опыты на физических моделях, которые между собой различались заложениями

верховой грани ($m_l=0; 1:1; 2:1$) и углами боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси ($\alpha=30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$) при относительной длине водосливного фронта ($h/B_n = 0,004\text{--}0,044$) и относительной ширине порога водоподпорного сооружения h/L_n ($0,081\text{--}0,938$).

На рисунках 3.1 и 3.2 даны экспериментальные значения коэффициента расхода m_n от относительной ширины порога h/L_n ($L_n=3,71 \cdot 10^{-2}$ м) и относительной длины водосливного фронта h/B_n ($B_n=0,757$ м), соответственно, для $m_l = 0; 1:1; 2:1$ при постоянных углах боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$.

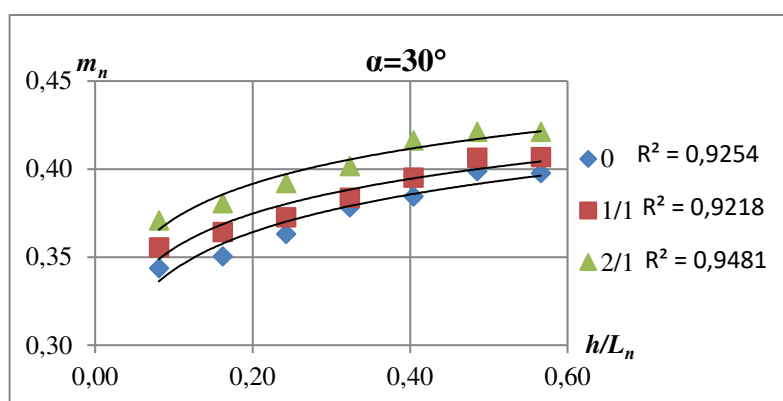


Рисунок 3.1 – Зависимость $m_n = f(h/L_n, m_l)$ при $\alpha=30^\circ$

Из опытных данных (рисунок 3.1) установлено, что при изменении относительной ширины порога водоподпорного сооружения от 0,081 до 0,566 и $\alpha=30^\circ$ коэффициент расхода m_n повышается от 0,344 до 0,421 с ростом заложения верховой грани и значения h/L_n , приближаясь к постоянному значению при h/L_n больше 0,485, наступает автомодельная область относительно h/L_n и значения m_n остаются практически постоянными, не меняются при увеличении h/L_n [90].

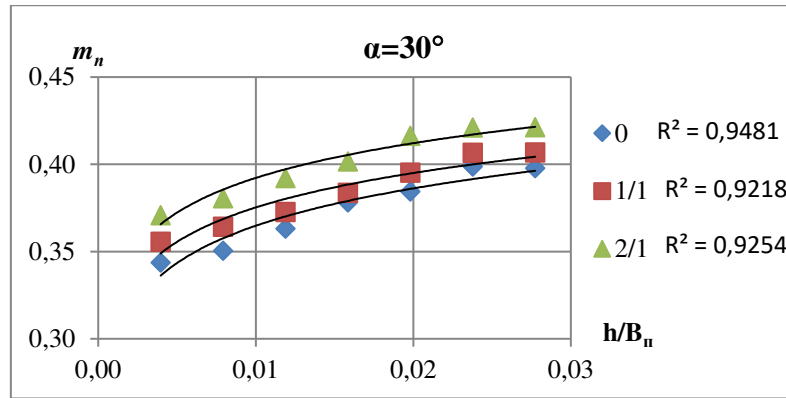


Рисунок 3.2 – Зависимость $m_n = f(h/B_n, m_I)$ при $\alpha = 30^\circ$

При $\alpha = 30^\circ$ (рисунок 3.2) и относительной длине водосливного фронта $h/B_n = 0,004–0,0277$, установлено, что с ростом h/B_n , коэффициента расхода водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного водослива увеличивается от 0,344 до 0,421, приближаясь к постоянному значению при h/B_n больше 0,024, т.е. наступает автомодельная область относительно h/B_n .

Результаты опытов, приведенные на графиках 3.3 и 3.4, показывают зависимость значения m_n от h/L_n ($L_n = 2,67 \cdot 10^{-2}$ м) и h/B_n ($B_n = 0,563$ м) при постоянном угле боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha = 45^\circ$.

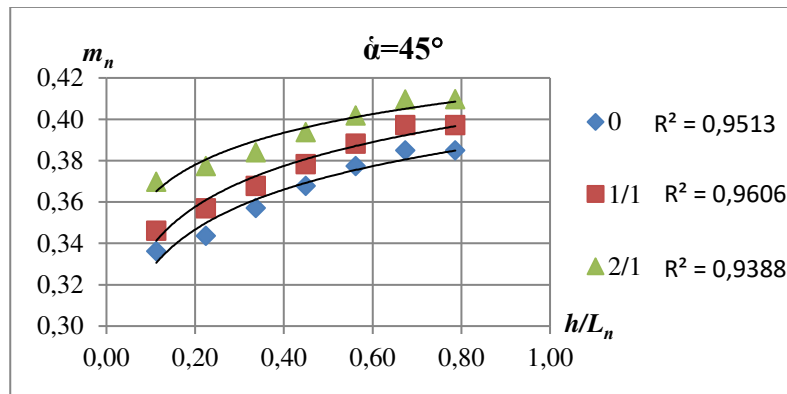


Рисунок 3.3 – Зависимость $m_n = f(h/L_n, m_I)$ при $\alpha = 45^\circ$

Из данных рисунка 3.3 видно, что для $\alpha = 45^\circ$ и при относительной ширине порога водоподпорного сооружения $h/L_n = 0,111–0,787$ коэффициент расхода m_n повышается от 0,336 до 0,410 с ростом h/L_n .

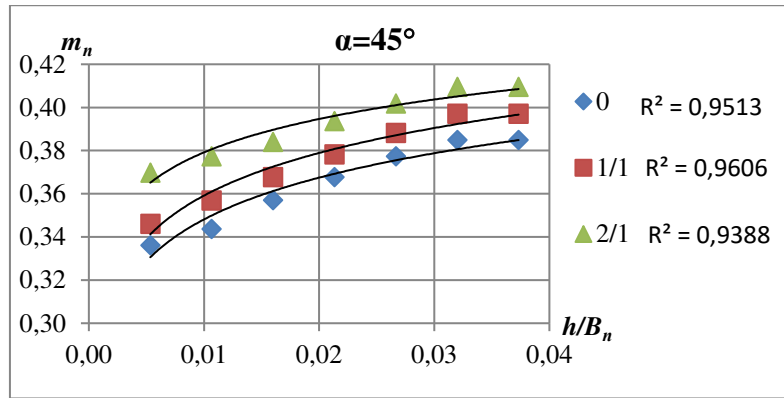


Рисунок 3.4 – Зависимость $m_n = f(h/B_n, m_1)$ при $\alpha=45^\circ$

Из данных рисунка 3.4 видно, что коэффициент расхода при $\alpha=45^\circ$ зависит от h/B_n в диапазоне 0,005–0,037, увеличивается от 0,336 до 0,410 с повышением значения h/B_n . Коэффициент расхода приближается к постоянному значению 0,41 при h/B_n больше 0,032.

На рисунках 3.5 и 3.6 показаны результаты зависимости коэффициента расхода водоподпорного сооружения от h/L_n ($L_n=2,24 \cdot 10^{-2}$ м) и относительной длины полигонального водосливного фронта h/B_n ($B_n=0,474$ м) при угле боковых стенок водоподпорного сооружения к оси 60° .

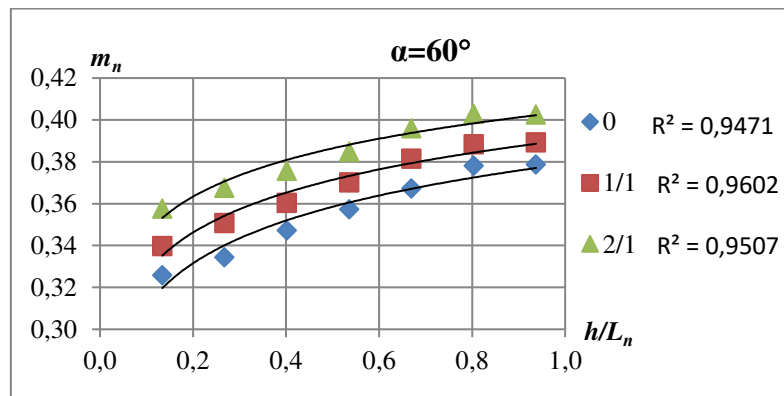


Рисунок 3.5 – Зависимость $m_n = f(h/L_n, m_1)$ при $\alpha=60^\circ$

Установлено, что для $\alpha=60^\circ$ и при изменении h/L_n от 0,134 до 0,938 значения m_n водоподпорного сооружения увеличивается от 0,326 до 0,403, а при значении h/L_n больше 0,804 коэффициент расхода остаются постоянным.

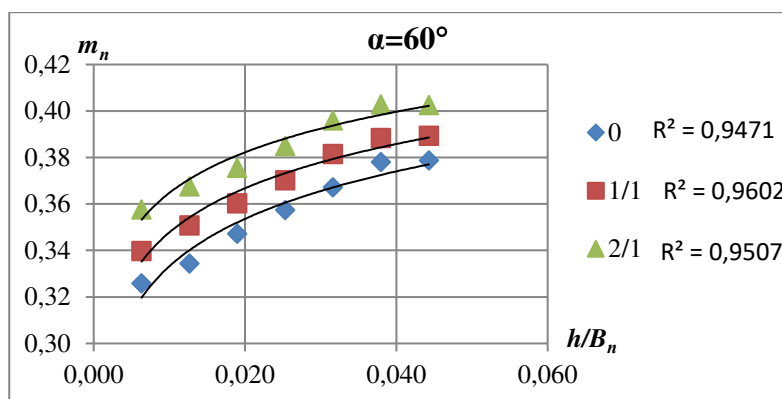


Рисунок 3.6 – Зависимость $m_n = f(h/B_n, m_l)$ при $\alpha=60^\circ$

Из данных рисунка 3.6 видно, что при $\alpha=60^\circ$ и увеличении h/B_n от 0,006 до 0,044 m_n увеличивается от 0,326 до 0,403 с ростом h/B_n и остается практически постоянным при h/B_n больше 0,038.

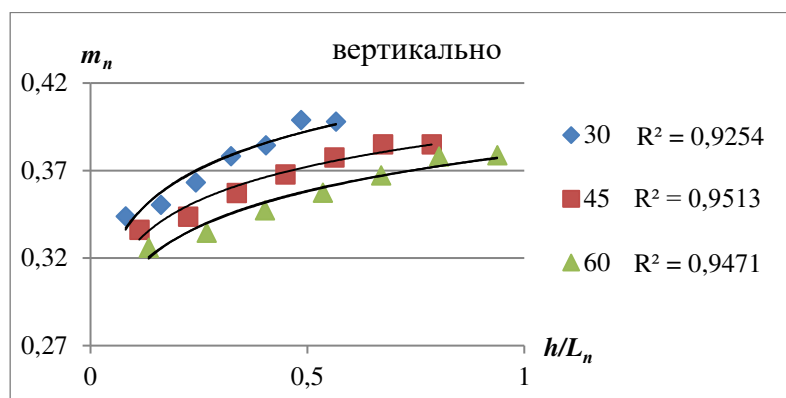
Из графиков (рисунки 3.1-3.6) установлено, что при увеличении заложения верхового откоса подпорно-пропускного водослива от 0 до 2:1 m_n увеличивается. Это увеличение при постоянных углах боковых стенок водоподпорного сооружения составляет: при $\alpha=30^\circ$ – 6,68 %; $\alpha=45^\circ$ – 7,07 %; $\alpha=60^\circ$ – 7,38 %, соответственно.

Наибольшее влияние на m_n подпорно-пропускного водослива оказывает заложение верхового откоса 2:1, что наглядно показывают графики. Это можно объяснить увлечением пропускной способности подпорно-пропускного водослива за счет уменьшения местных сопротивлений движению потока через водоподпорное сооружение, сопротивление уменьшается, что приводит к повышению значений коэффициента расхода.

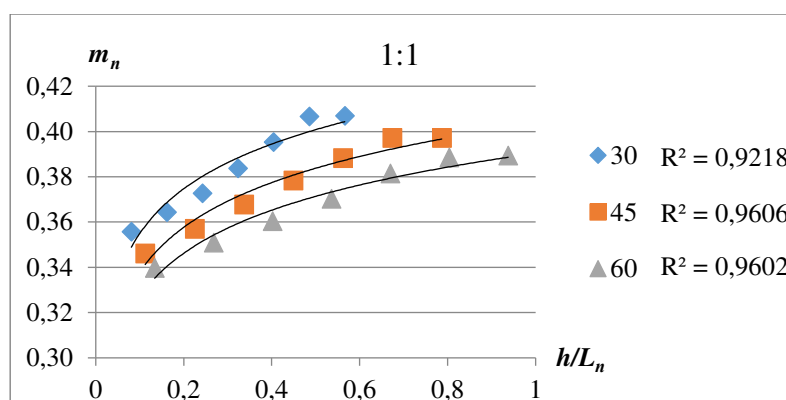
Чтобы оценить влияние углов боковых стенок водоподпорного сооружения на m_n при относительной ширине порога водоподпорного сооружения $h/L_n=0,08-0,938$ и относительной длине водосливного фронта при $h/B_n=0,004-0,044$, получили графики зависимости m_n от h/L_n и m_n от h/B_n при заложении верховой грани откоса 0; 1:1 и 2:1, соответственно.

На графиках (рисунки 3.7, а, б, в) даны опытные m_n в зависимости от h/L_n для $\alpha=30^\circ$; 45° ; 60° при соответствующих заложениях верховой грани 0; 1:1 и 2:1.

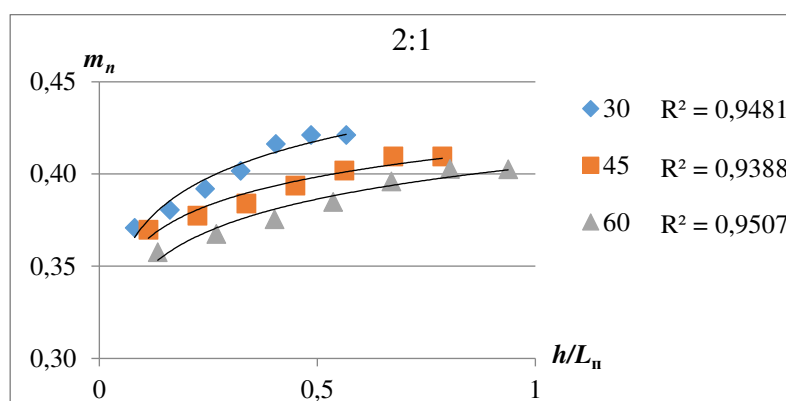
Установлено, что при неизменных заложениях верхового откосов m_I , величина m_n увеличивается с уменьшением угла боковых стенок водоподпорного сооружения при увеличении h/L_n .



а)



б)



в)

а) $m_I=0$; б) $m_I=1:1$; в) $m_I=2:1$

Рисунок 3.7 – Зависимость $m_n = f(h/L_n, \alpha)$ при заложение верховой грани:

Опытные данные (рисунки 3.1-3.7) описываются логарифмическими эмпирическими формулами, которые показывают зависимость m_n от

относительной ширины порога водоподпорного сооружения h/L_n и относительной ширины водосливного фронта h/B_n :

$$m_{\Pi} = u_1 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + u_2, \quad (3.6)$$

$$m_{\Pi} = u_3 \ln\left(\frac{h}{B_{\Pi}}\right) + u_4, \quad (3.7)$$

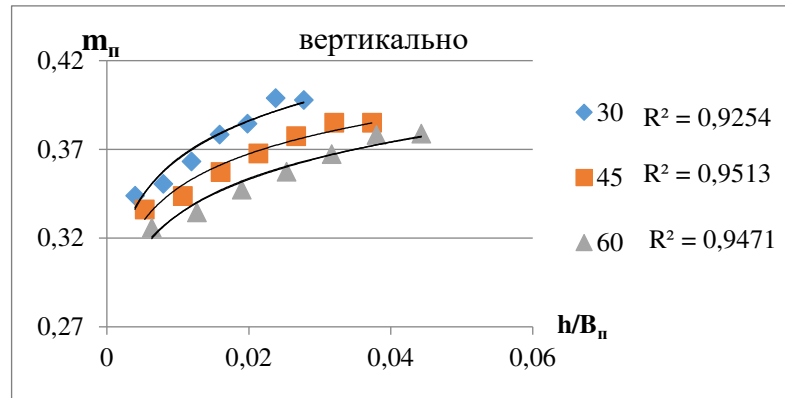
где u_1 и u_2 и u_3 и u_4 – эмпирические коэффициенты.

При обработке опытных данных по формуле (3.6) получены новые эмпирические зависимости для m_n и установлены эмпирические коэффициенты в зависимости от h/L_n для девяти вариантов физических моделей водоподпорного сооружения (таблица 3.3).

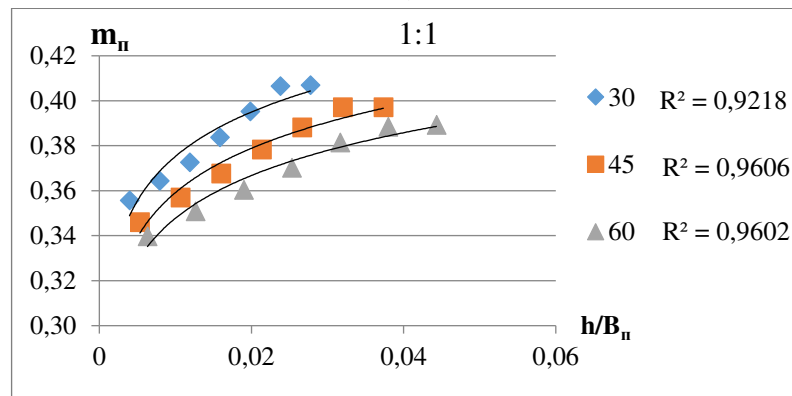
Таблица 3.3 – Эмпирические зависимости m_n от h/L_n

Варианты	Заложения верхового откоса	α	Эмпирические формулы m_n для водоподпорных сооружений	R^2 – коэффициент корреляции
1	0	30°	$m_{\Pi} = 0,0309 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,4139$	0,9254
2		45°	$m_{\Pi} = 0,0279 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,3916$	0,9513
3		60°	$m_{\Pi} = 0,0295 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,3789$	0,9471
4	1:1	30°	$m_{\Pi} = 0,0285 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,4206$	0,9218
5		45°	$m_{\Pi} = 0,0285 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,4035$	0,9606
6		60°	$m_{\Pi} = 0,0274 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,3904$	0,9602
7	2:1	30°	$m_{\Pi} = 0,0287 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,4379$	0,9481
8		45°	$m_{\Pi} = 0,0223 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,4139$	0,9388
9		60°	$m_{\Pi} = 0,0252 \ln\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right) + 0,4039$	0,9507

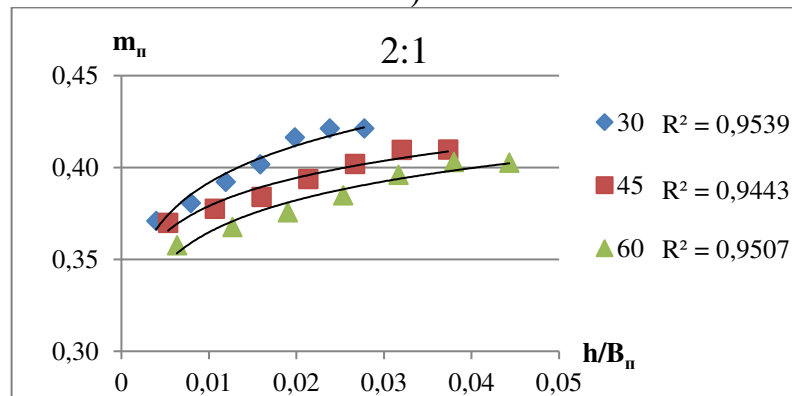
На графиках (рисунки 3.8, а, б, в) приводятся кривые с экспериментальными значениями m_{Π} , от h/B_n , при фиксированном заложении верхового откоса 0; 1:1 и 2:1, соответственно.



а)



б)



в)

а) $m_I=0$; б) $m_I=1:1$; в) $m_I=2:1$ Рисунок 3.8 – Зависимость $m_n = f(h/B_n, \alpha)$ при заложении верховой грани

Из графиков (рисунок 3.8) видно, что значение m_n увеличивается с ростом h/B_n и m_n зависит от величины угла α при постоянных заложениях верховой грани.

Таким образом, приходим к выводу, что при относительной ширине порога водоподпорного сооружения h/L_n от 0,081 до 0,938 и относительной длине водосливного фронта h/B_n от 0,004 до 0,044 m_n увеличивается с уменьшением α . Увеличение m_n при постоянных заложения верхового откоса составляет: при $m_I=0$ – 4,88 %; $m_I=1:1$ – 3,9 %; $m_I=2:1$ – 4,16 %, соответственно.

Наибольшее влияние α на m_n водоподпорного сооружения оказывается при $\alpha=30^\circ$. Это объясняется тем, что конструкция водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного водослива с формой боковых стенок $\alpha=30^\circ$ создает благоприятные условия движению потока через порог водоподпорного сооружения в нижний бьеф мелиоративных каналах. Это связано с тем, что конструкция водоподпорного сооружения, устраиваемая с углом $\alpha=30^\circ$ имеет наибольшую длину водосливного фронта B_n и ширину по гребню водоподпорного сооружения L_n по сравнению с $\alpha=45^\circ$ и $\alpha=60^\circ$.

Получено, что значение m_n при постиранном α возрастает с увеличением заложения верхового откоса. Зависимость m_n от относительной длины водосливного фронта h/B_n при $\alpha=30^\circ$; 45° ; 60° и заложении верхового откоса 0; 1:1 и 2:1 описывается эмпирической формулой $m_n=f(h/B_n)$ (3.7).

При обработке опытных данных по формуле (3.7) получены новые эмпирические зависимости для m_n и установлены эмпирические коэффициенты в зависимости от h/B_n для 9 вариантов физических моделей водоподпорного сооружения, которые приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Эмпирические зависимости m_n от h/B_n

Варианты	Заложения верхового откоса	α	Эмпирические формулы m_n для водоподпорных сооружений	R^2 – коэффициент корреляции
1	0	30°	$m_n = 0,0309 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,507$	0,9254
2		45°	$m_n = 0,0279 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,4766$	0,9513
3		60°	$m_n = 0,0295 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,4689$	0,9471
4	1:1	30°	$m_n = 0,0285 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,5065$	0,9218
5		45°	$m_n = 0,0285 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,4903$	0,9606
6		60°	$m_n = 0,0274 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,4742$	0,9602
7	2:1	30°	$m_n = 0,0287 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,5245$	0,9481
8		45°	$m_n = 0,0223 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,4819$	0,9388
9		60°	$m_n = 0,0252 \ln\left(\frac{h}{B_n}\right) + 0,4808$	0,9507

Наибольшее влияние на m_n оказывает h/B_n – относительная длина водосливного фронта водоподпорного сооружения. Это можно объяснить величиной эмпирических коэффициентов факторов уравнения (3.7).

Полученные новые эмпирические зависимости вычисления m_n физических моделей водоподпорных сооружений (таблицы 3.3 и 3.4) позволяют выбрать из девяти вариантов наиболее совершенное водоподпорное сооружение по пропускной способности при изменении расходов от $0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и напоров $3 \cdot 10^{-3} - 21 \cdot 10^{-3}$ и относительной ширины порога водоподпорного сооружения $h/L_n=0,081-0,938$ и относительной длины водосливного фронта $h/B_n=0,004-0,044$.

3.3 Выводы по 3 главе:

- Получены коэффициенты расхода водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов. Установлено, что в зависимости от относительных напоров h/L_n и h/B_n величина m_n составляет: для угла $\alpha = 30^\circ$ (при $h/L_n= 0,08-0,566$ и $h/B_n= 0,004-0,028$) — $0,344-0,421$; для $\alpha = 45^\circ$ (при $h/L_n; 0,112-0,787$ и $h/B_n=0,005-0, 0,037$) — $0,336-0,410$; для $\alpha = 60^\circ$ (при $h/L_n= 0,134-0,938$ и $h/B_n= 0,006-0,044$) — $0,326-0,403$;

- установлено, что подпорно-пропускные полигональные водосливы имеют высокую пропускную способность ($m_n= 0,344-0,4210$) благодаря нерегулируемым полигональным формам и конструктивным особенностям водосливной части;

- получена зависимость (3.5), которая позволяет определять коэффициенты расхода m_n водоподпорного сооружения с заложением верхового откоса порога 0; 1:1 и 2:1 и боковыми стенками к оси водослива $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, при изменении расхода $0,11 \cdot 10^{-3}-4,30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; напоров $3 \cdot 10^{-3}-21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; относительной ширине порога $h/L_n=0,081-0,938$; относительной длине водосливного фронта в диапазоне $h/B_n=0,004-0,044$;

- получены новые эмпирические зависимости коэффициента расхода m_n от геометрических и гидравлических параметров физических моделей усовершенствованных водоподпорных сооружений;

- установлено, что при фиксированных углах боковых стенок водоподпорного сооружения значение коэффициента расхода m_n увеличивается с увеличением заложения верховой грани на 6,68 % для $\alpha=30^\circ$; на 7,07 % для $\alpha=45^\circ$; на 7,38 % для $\alpha=60^\circ$. Увлечение в значении m_n составляет: 4,88 %; 3,90 %; 4,16 % при фиксировании заложения верхового откоса $m_l=0$; 1:1; 2:1, соответственно;

- установлено, что физическая модель водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива с заложением верхового откоса 2:1 и углом боковых стенок 30° к его оси обладает лучшими расходно-напорными характеристиками, по сравнению с остальными изучаемыми моделями, она создаёт благоприятные гидравлические условия, обеспечивая пропуск максимальных расходов для повышения водообеспеченности водоподпорными сооружениями на мелиоративных каналах. Данную модель можно назвать усовершенствованным водоподпорным сооружением на Новокубанском канале, так как её можно использовать в качестве надёжного управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАНОСОВ ЧЕРЕЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ ВОДОПОДПОРНОЕ СООРУЖЕНИЕ

Исследования движения песчаных наносов через водоподпорное сооружение показывают, что при незначительной размывающей скорости потока наносы начинают перемещаться. Происходит подвижка частиц песка, при этом некоторые из них сдвигаются со своего места и катятся по дну, другие отрываются от дна и резко перемещаются в потоке по течению, переходя через порог водоподпорного сооружения. Тогда количество движущихся и прошедших песчаных наносов через водоподпорное сооружение, понемногу возрастает с увеличения скорости потока. Наносы переносятся потоком во взвешенном состоянии, а донные перемещаются по дну канала скольжением, перекачиванием и сальтацией. Взвешенные наносы распределяются в живом сечении неравномерно, а донные – еще более неравномерно, часто они движутся по дну узкими полосами [69]. Мутность воды в реках и мелиоративных каналах увеличивается по направлению от поверхности ко дну. В случае изменения одного из гидравлических параметров потока, как скорость, глубина воды или др., наблюдается изменение условий движения наносов, т.е. наносы переходят из одного типа в другой [10, 15, 18, 19, 60, 66, 104]. При оценке качества оросительной воды учитывается количество и состав взвешенных наносов.

Следовательно, при движении наносов через физические модели водоподпорного сооружения была поставлена цель, установить параметры размывающей скорости, при которой будет происходить наибольший пропуск наносов в нижний бьеф Новокубанского канала. Для этой цели была разработана методика исследования, описанная выше.

4.1 Расчетные зависимости по движению наносов

Количество взвешенных наносов в мелиоративных каналах зависит от гидравлической крупности фракций ω и вертикальной скорости течения. В каждой точке потока возникают мгновенные составляющие скорости, направленные вертикально вверх или вниз. Опытами М. А. Великанова и др. исследователей [13, 14, 72, 89] установлено, что вертикальная составляющая скорости $V_{\text{вер}}$ по величине равна некоторой доли средней скорости v :

$$V_{\text{вер}} = (0,1 \div 0,2)V. \quad (4.1)$$

Величины нисходящей и восходящей вертикальных составляющих скоростей равны между собой. Частицы наносов, лежащие на дне, а особенно перекатывающиеся через гребень песчаных волн, приподнимаются подъемной силой. Частицы наносов могут перемещаться вверх под действием вертикальной составляющей скорости потока, если последняя больше гидравлической крупности частиц наносов W_0 :

$$V_{\text{вер}} > W_0. \quad (4.2)$$

Вертикальная составляющая $V_{\text{вер}}$ различна в соответствующих точках потока, в связи с этим частицы наносов то поднимаются вверх, то падают, находясь в непрерывном движении.

Расход для исследования движения наносов через полигональную водосливную форму подпорных сооружений измеряется мерной ёмкостью по формуле:

$$Q_k = \frac{V}{t} = \frac{L \cdot B \cdot h'}{t}, \quad (4.3)$$

где Q_k – расход воды, м³/с; V – объём воды, м³; t – время, с; L, B – длина и ширина мерной емкости, м, ($L=1$ м, $B=0,5$ м); h' – напор в емкости, м.

Скорость потока рассчитывается по формуле (4.4):

$$v = \frac{Q_k}{B \cdot h}, \quad (4.4)$$

где v – скорость потока в лотке, м/с; Q_k – расход воды; м³/с; B – ширина лотка, м; h – глубина воды в лотке, м.

При исследовании наносов в мелиоративных каналах встречаются два вида скорости: 1) Vn_p – размывающая скорость – начальная фаза размыва дна русла; 2) $Vn_{нр}$ – незаиляющая скорость потока – наименьшая средняя скорость, с которой отдельные частицы во взвешенном состоянии начинают двигаться.

Наиболее существенные факторы, которые влияют на величину $Vn_{нр}$: диаметр наносов d , шероховатость дна, вязкость воды (температура) и степень неравномерности гранулометрического состава грунта дна.

По эмпирической зависимости Великанова М. А. и Бочкова Н. М. [11] определяют неразмывающую скорость с частицами крупностью в диапазоне 0,1–0,5 мм:

$$v_{нр} = \sqrt{15 + \frac{6}{d}} \cdot \sqrt{gd}, \quad (4.5)$$

где d – диаметр наносов в мм.

Из уравнения (4.5) получено значение $Vn_{нр}$ в диапазоне 0,27–0,36 м/с.

Значения размывающей скорости Vn_p для изучаемых частиц песка диаметром 0,1–0,5 мм будут:

$$V_{пр} = (1,3 - 1,4) V_{нр}. \quad (4.6)$$

Скорости из уравнения (4.6): находятся в диапазоне 0,36–0,49 м/с.

4.2 Результаты опытов движения наносов через водоподпорное сооружение

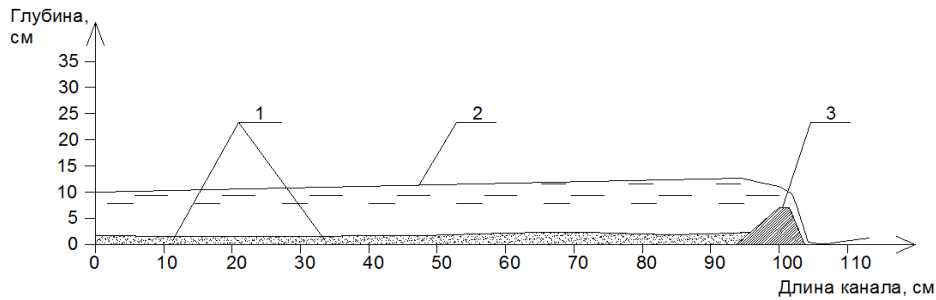
4.2.1 Исследование распределения донных наносов у водоподпорного сооружения

Продольные профили отложений донных наносов вдоль канала характеризуются волнообразным внешним видом с чередованием глубоких и неглубоких мест вдоль него. Это показывают опыты. Продольный профиль донных гряд, образовавшихся у водоподпорного сооружения, постоянно меняется, это изменение в основном связано со скоростью потока, что подтверждается результатами опытов (таблица 4.1), где исследованы высоты гряд, образовавшиеся у водоподпорного сооружения при заложении верхового откоса 1:1 и угле боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=60^\circ$ для разных скоростей в канале в диапазоне 0,08-0,41 м/с.

Таблица 4.1 – Размеры высот и участков песчаных гряд и волн у водоподпорного сооружения при $\alpha=60^\circ$ и $m_1=1:1$ при разных скоростях потока

Скорость, м/с	Значения высоты гряд и волн X(см) на участке водоподпорного сооружения (см)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
0,08 0,126 0,165 0,189 0,231	2,04	1,94	1,9	1,9	1,9	1,92	1,94	1,94	1,92	1,93	1,99
0,32	1,43	2,43	2,40	1,22	1,14	1,88	2,47	2,08	1,59	1,15	0,2
0,41	2,52	0,16	2,42	0,10	1,83	1,79	1,23	2,72	0,12	0,05	0

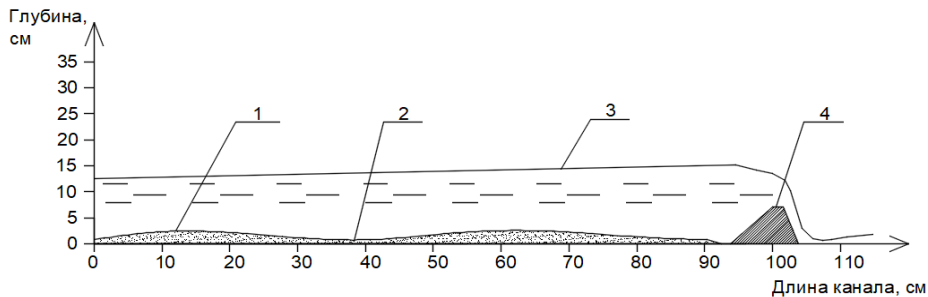
Из таблицы 4.1 видно, что для скорости потока меньше 0,231 м/с продольный профиль песка остается горизонтальным без каких-либо изменений (рисунок 4.1). Когда скорость потока равна 0,32 м/с частицы начинают сдвигаться (рисунок 4.2). Эта скорость называется скоростью началом движения наносов или неразмывающей скоростью $V_{нр}$. При скорости потока больше 0,32 формируются гряды и для $v=0,41$ м/с получили профиль (рисунок 4.3).



1 – песок отложился на дне канала; 2 – уровень воды ВБ;
3 – водоподпорное сооружение при откосе $m_1=1:1$ и $\alpha=60^\circ$

Рисунок 4.1 – Продольные профили песка при $v \leq 0,231$ м/с

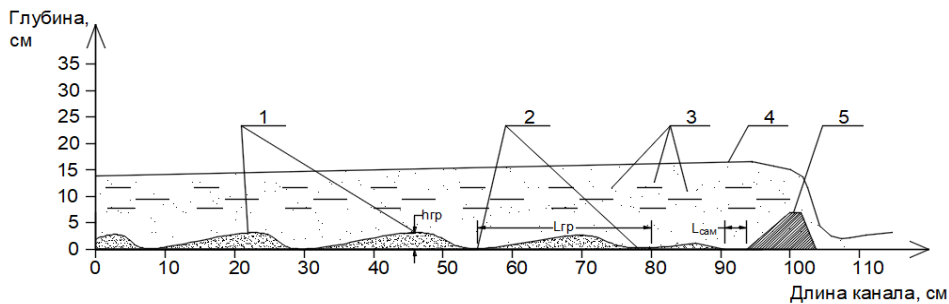
Из рисунка 4.1 видно, что песок на дне канала не двигается и откладывается равномерно на дне канала.



1 – гребень; 2 – подвалье; 3 – уровень воды ВБ;
4 – водоподпорное сооружение при $\alpha=60^\circ$ и откосе $m_1=1:1$

Рисунок 4.2 – Продольные профили песка при $v = 0,32$ м/с

Рисунок 4.2 показывает, что при скорости 0,32 м/с начинается формирование гряд, при этом частицы песка начинают двигаться под влиянием неразмывающей скорости. Формируется гребень и подвалье гряд. При $v = 0,32$ м/с будет движение наносов из ВБ в НБ водоподпорного сооружения.



1 – гребень; 2 – подвалье; 3 – взвешенные наносы у водоподпорного сооружения; 4 – уровень воды ВБ; 5 – водоподпорное сооружение при откосе $m_1=1:1$ и $\alpha=60^\circ$, $L_{г\text{о}}$ – длина гидравлической очистки от отложений наносов у водоподпорного сооружения

Рисунок 4.3 – Продольные профили песка при $v = 0,41$ м/с

Продольный профиль донных гряд (рисунок 4.3) имеет пологий верховой скат и крутой низовой. Высота песчаных гряд и волн находилась в диапазоне 0,20-2,72 см. Высота гряд $h_{гр}$ (превышение гребня над подвалем) растет с глубиной потока и ее значение составляет 0,18 от глубины потока для скорости $v=0,41$ м/с. Длины донных гряд составляют 1,75 от глубины потока. Образуются рифели [6], что соответствует выводам Н. С. Знаменской [6, 25].

Полигональная форма создаёт условия удаления наносов у порога гидравлическими струями на некотором расстоянии $L_{го}$, и это, на наш взгляд, связано с действием боковых и центральных струй (рисунок 4.3). Расстояние $L_{го}$ будем называть длиной гидравлической очистки, которое было исследовано для всех моделей водоподпорного сооружения.

По опытным данным, значения средней длины гидравлической очистки $L_{го}$ при угле $\alpha=30^\circ$ и заложениях верховой грани $m_1=0$; 1:1 и 2:1 составляли 0,11 м; 0,14 м и 0,20 м соответственно; для $\alpha=45^\circ$ — 0,09 м; 0,11 м и 0,18 м при соответствующих заложениях верховой грани; для $\alpha=60^\circ$ — 0,06 м; 0,09 м и 0,15 м соответственно. Установлено, что средняя длина $L_{го}$ при $\alpha=30^\circ$ и заложении верхового откоса 2:1; 1:1 и 0 была больше на 10; 21,43 и 18,18 %, соответственно, по сравнению с водоподпорным сооружением при $\alpha=45^\circ$ и больше на 25; 35,72 и 45,45 %, соответственно, по сравнению с водоподпорным сооружением при $\alpha=60^\circ$.

Получено, что $L_{го}$ растёт с увеличением заложения верхового откоса и с уменьшением угла боковых стенок α . Таким образом, при угле боковых стенок водоподпорного сооружения к оси водослива 30° и заложении верхового откоса 2:1 обеспечивается наибольшая длина гидравлической очистки от отложений наносов перед порогом водоподпорным сооружением.

На рисунке 4.4 дан план донных гряд перед водоподпорным сооружением на второй установке.



А

Б

А – при $v \leq 0,231$ м/с; Б – при $v = 0,41$ м/с

Рисунок 4.4 – План донных гряд для двух изучаемых моделей водоподпорного сооружения

На основании проведённых опытов установлено, что с целью уменьшения отложений наносов диаметром 0,1–0,5 мм у порога водоподпорного сооружения в оросительных каналах минимальные скорости течения воды рекомендуется принимать не менее 0,32 м/с.

4.2.2 Исследование процента пропуска наносов через физические модели водоподпорных сооружений в нижний бьеф канала

Вода в мелиоративных каналах содержит большое количество наносов, которые откладываются у водоподпорных сооружений, часть наносов пропускается в нижний бьеф, а другая большая часть откладывается у порога в виде донных наносов. Создаются условия, когда водозаборные сооружения захватывают большую часть наносов, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик НС, тем самым не обеспечивается рациональное водопользование на мелиоративных каналах. Процент песка, прошедшего через порог водоподпорного сооружения, связан с гидравлическими параметрами и его конструкцией. Проводились исследования на физических моделях водоподпорных

сооружений, что позволило выбрать наилучшую модель, обеспечивающую максимальный пропуск наносов, улучшить качество работы водозаборных сооружений, от которых существенно зависит рациональное на водопользование оросительных системах.

При движении наносов через порог подпорно-пропускного водослива исследовались все физические модели водоподпорных сооружений. В таблице 4.2 представлены процент и расход песка, прошедшего через модель водоподпорного сооружения, которые рассчитывались по формулам (2.11) и (2.12) при откосе $m_1=0$ и угле $\alpha=30^\circ$.

Таблица 4.2 – Результаты исследований процента и расхода песка, проходящего через водоподпорное сооружение при откосе $m_1=0$ и угле $\alpha=30^\circ$

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=0$							
№	Напор над водоподпорным сооружением h , см	Средняя скорость, м/с	Вес добавленного песка. 10^{-3} , кг	Вес остаточного песка. 10^{-3} , кг	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10^{-3} , кг	Расход песка, P_n , г/с	Процент песка по весу, проходящего через водоподпорное сооружение, П %
1	1,3	0,065	630	619	11	0,006	1,7
2	2,3	0,101		576	54	0,030	8,6
3	3,3	0,133		546	84	0,047	13,3
4	4,3	0,154		519	111	0,062	17,6
5	5,3	0,193		476	154	0,086	24,5
6	6,3	0,230		431	199	0,111	31,6
7	7,3	0,295		377	253	0,141	40,2

Из данных таблицы 4.2 видно, что расход и процент песка, проходящего через водослив, растет с увеличением средней скоростей потока [103].

Результаты остальных опытов по проценту песка, прошедшего через водослив, для верхового откоса 0; 1:1 и 2:1 при углах боковых стенок $\alpha=30^\circ$; 45° 60° и 90° представлены в таблицах 5.1-5.4 приложение 5.

На рисунке 4.5 даны опытные данные зависимости процента песка от напора на водосливе, проходящего через водоподпорное сооружение при постоянном угле боковых стенок $\alpha=30^\circ$ для верхового откоса 0; 1:1 и 2:1.

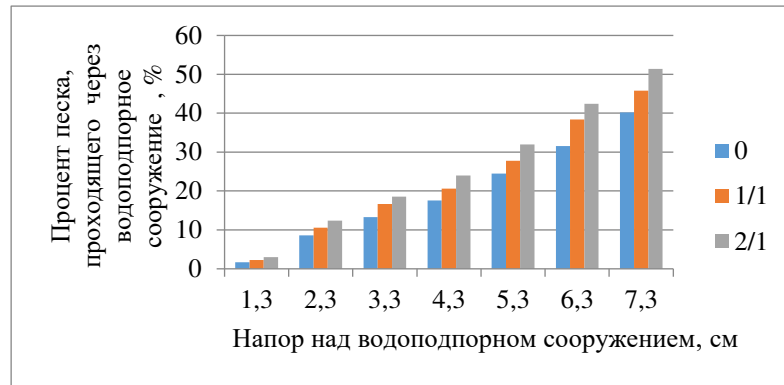


Рисунок 4.5 – Графики зависимости процента песка от напора при углах боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$

Из рисунка 4.5 видно, что максимальный процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение при заложении верхового откоса 0; 1:1; 2:1 и $\alpha=30^\circ$, составил 51,4 % при $m_1=2:1$. Среднее увеличение транспорта песка через порог подпорно-пропускного водослива при откосе 2:1 больше на 11,75 % чем при откосе 1:1 и больше на 25,19 % при откосе 0.

На рисунке 4.6. даны опытные данные зависимости процента песка от напора на водоподпорном сооружении, проходящем через водоподпорное сооружение при постоянном угле боковых стенок 45° для верхового откоса $m_1=0$; 1:1 и 2:1.

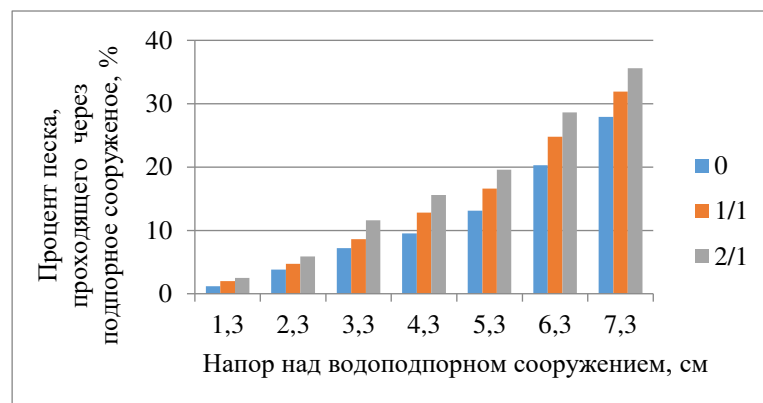


Рисунок 4.6 – Графики зависимости процента песка от напора при $\alpha=45^\circ$

Из рисунка 4.6 видно, что максимальный процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение при заложении верхового откоса $m_1=0$; 1:1; 2:1 и $\alpha=45^\circ$, составил 35,6 % при заложении верхового откоса 2:1. Средний процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, при откосе 2:1 больше среднего процента песка на 15,08 % при откосе 1:1 и на - 30,49 % при откосе 0.

На рисунке 4.7 даны опытные данные зависимости процента песка от напора, проходящего через водоподпорное сооружение при постоянном угле боковых стенок $\alpha=60^\circ$ для верхового откоса - 0; 1:1 и 2:1.

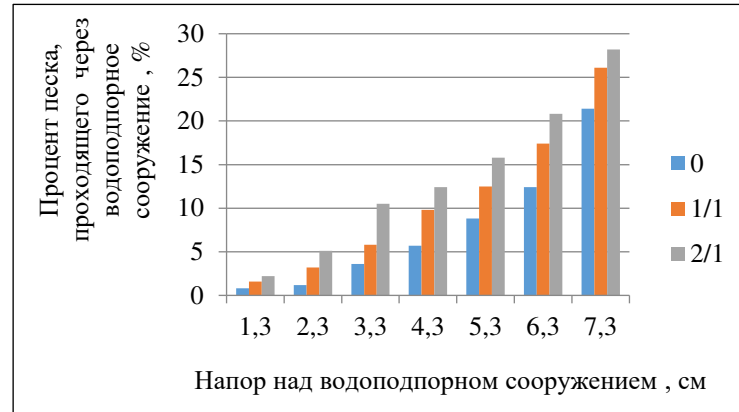


Рисунок 4.7 – Графики зависимости процента песка от напора при $\alpha=60^\circ$

Из рисунка 4.7 видно, что максимальный процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение при заложении верхового откоса 0; 1:1; 2:1 и $\alpha=60^\circ$, составил 28,2 % при $m_I=2:1$. Среднее процентное увеличение транспорта песка через порог водослива при откосе 2:1 больше на 11,75 % при откосе 1:1 и на - 43,26 % при откосе 0.

Таким образом, из графиков (рисунки 4.5–4.7) установлено, что при увеличении заложения верхового откоса водослива от 0 до 2:1 процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, увеличивается. Сравним результаты опытов для углов боковых стенок водоподпорного сооружения $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° с результатами опытов для водослива классического профиля при $\alpha=90^\circ$ и заложениях верхового откоса $m_I=0$; 1:1 и 2:1 (рисунок 4.8).

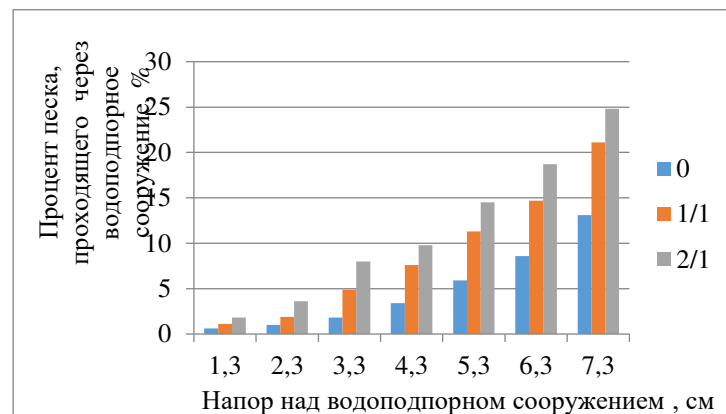


Рисунок 4.8 – Графики зависимости процента песка от напора при $\alpha=90^\circ$

Установлено, что при $\alpha=30^\circ$; 45° ; 60° и $\alpha=90^\circ$ процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение, увеличивается с ростом заложения верхового откоса, как видно из рисунка 4.8. Максимальный процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение при $\alpha=90^\circ$ составляет 24,8 % при заложении верхового откоса 2:1. Среднее процентное увеличение транспорта песка через порог подпорно-пропускного водослива при 2:1 и $\alpha=90^\circ$ больше на 22,91 % и 57,64 % по сравнению с заложением верхового откоса водослива 1:1 и 0, соответственно.

На графиках (рисунки 4.9 - 4.11) приводятся эмпирические зависимости средней скорости потока от процента песка, проходящего через водоподпорное сооружение для заложения верхового откоса – 0; 1:1 и 2:1, при напорах 1,3-7,3 см для водослива с углами боковых стенок $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° и классического водоподпорного сооружения при $\alpha=90^\circ$.

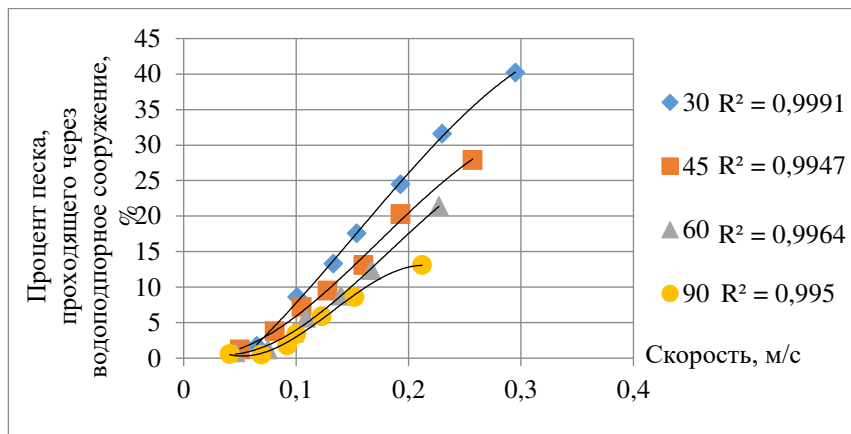


Рисунок 4.9 – Эмпирические зависимости $\Pi\%=f(v, \alpha)$ для заложения верхового откоса $m_l=0$

При заложении верхового откоса $m_l=0$ и для $\alpha=30^\circ$; 45° ; 60° и 90° , при скоростях потока от 0,065 м/с до 0,295 м/с; 0,050-0,257 м/с; 0,046-0,227 м/с и 0,041-0,212 м/с, соответственно, процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение, находится в диапазоне 1,7-40,2 %; 1,2-27,9 %; 0,2-21,4 % и 0,2-13,1 %, соответственно, средний процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, для $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° больше на 80,81 %; 67,86 % и 35,86 %, соответственно, по сравнению с классическим водоподпорным сооружением.

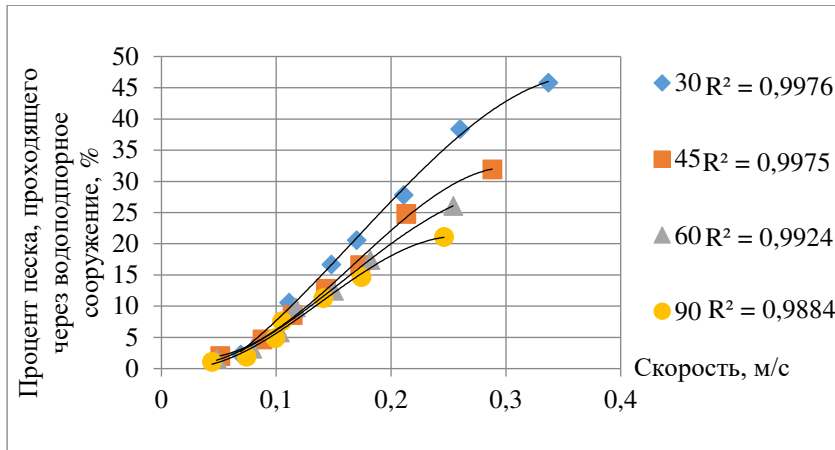


Рисунок 4.10 – Эмпирические зависимости $\Pi\% = f(v, \alpha)$ для верхового откоса – $m_I = 1:1$

При средней скоростей потока в диапазоне 0,069-0,337 м/с, 0,051-0,288 м/с, 0,048-0,254 м/с и 0,044-0,246 м/с, как видно из рисунка 4.10, для подпорно-пропускного водослива с углами - $\alpha = 30^\circ$; 45° ; 60° и 90° , соответственно, процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение, находится в диапазоне 2,3-45,8 %; 2,0-31,9 %; 1,4 -26,1 % и 0,8-21,1 %, соответственно. Таким образом, средний процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение для углов $\alpha = 30^\circ$; 45° и 60° , больше на 65,15 %; 44,25 % и 23,67 %, соответственно, по сравнению с классическим водоподпорным сооружением при $\alpha = 90^\circ$ [89].

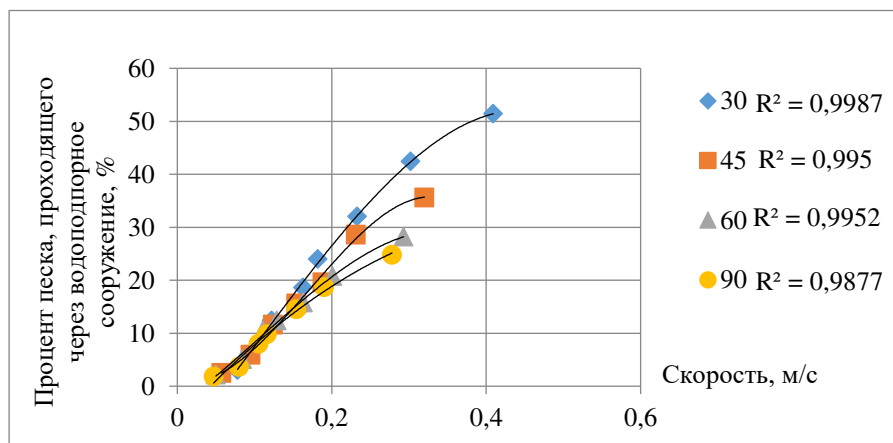


Рисунок 4.11 – Эмпирические зависимости $\Pi\% = f(v, \alpha)$ для верхового откоса $m_I = 2:1$

Из рисунка 4.11 видно, что при $m_I = 2:1$ и для $\alpha = 30^\circ$; 45° ; 60° и 90° , при средней скоростей потока в диапазоне 0,078–0,409 м/с; 0,057–0,32 м/с; 0,05–0,293 м/с и 0,047–0,278 м/с, соответственно, процент песка, прошедшего через водоподпорное

сооружение, находится в диапазоне 3,0–51,4 %; 2,5–35,6 %; 2,2–28,2 % и 1,8–24,8 %, соответственно, а значит, средний процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение для углов $\alpha = 30^\circ$; 45° и 60° , больше на 55,64 %; 32,31 % и 17,54 %, соответственно, по сравнению с классическим водоподпорным сооружением.

В результате обработки опытных данных и на основании полученных графиков получили регрессионную модель (4.7), характеризующая процент пропуска наносов $\Pi\%$ от скорости воды u водослива V :

$$\Pi\% = u_1(v)^3 + u_2(v)^2 + u_3v + u_4, \quad (4.7)$$

где u_1 , u_2 , u_3 и u_4 – коэффициенты полиномиальных уравнений при коэффициентах корреляции (0,99) (рисунки 4.9, 4.10, 4.11).

В таблице 4.3 даны значения коэффициентов уравнения (4.7) для изучаемых водоподпорных сооружений.

Таблица 4.3 – Эмпирические коэффициенты для уравнения (4.7)

Заложения верхового откоса	α	Опытные зависимости $\Pi\% = f(v)$	R^2 – коэффициент корреляции
0	30°	$\Pi\% = -1294,8v^3 + 598,43v^2 + 94,25v - 6,36$	0,9991
	45°	$\Pi\% = -2107,3v^3 + 1096,2v^2 - 36,08v + 0,67$	0,9947
	60°	$\Pi\% = -2385,5v^3 + 1298,4v^2 - 86,78v + 2,05$	0,9964
	90°	$\Pi\% = -6110,7v^3 + 2435,6v^2 - 204,72v + 5,22$	0,995
1:1	30°	$\Pi\% = -1636v^3 + 829,26v^2 + 56,43v - 4,58$	0,9976
	45°	$\Pi\% = -3127,1v^3 + 1588,3v^2 - 98,73v + 3,37$	0,9975
	60°	$\Pi\% = -2321,8v^3 + 1114,5v^2 - 33,11v + 0,62$	0,9924
	90°	$\Pi\% = -3147v^3 + 1309,9v^2 - 48,71v + 0,59$	0,9884
2:1	30°	$\Pi\% = -523,88v^3 + 142,21v^2 + 184,07v - 11,82$	0,9987
	45°	$\Pi\% = -2278,7v^3 + 1170v^2 - 32,52v + 0,95$	0,995
	60°	$\Pi\% = -812,95v^3 + 262,96v^2 + 101,71v - 3,74$	0,9952
	90°	$\Pi\% = -2397,6v^3 + 986,45v^2 + 2,252v - 0,59$	0,9956

Регрессионная модель (4.7) получена при мутности 35–603 г/м³, заложениях верхового откоса 0; 1:1 и 2:1, углах боковых стенок $\alpha = 30^\circ$, 45° и 60° , напоре $1,3 \cdot 10^{-2} - 7,3 \cdot 10^{-2}$ м, расходе в диапазоне $0,58 \cdot 10^{-3} - 9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с и скорости потока в пределах от 0,046 до 0,409 м/с.

Из выполненных исследований получено, что процент песка, прошедшего через усовершенствованное водоподпорное сооружение в виде подпорно-пропускного полигонального водослива практического профиля больше по сравнению с классическим водоподпорным сооружением, что соответствует выводам Филиппова Е. Г., о том, что водослив практического профиля пропускает наносы больше, чем другие типы [7, 84, 89]. Процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, увеличивается с увеличением скорости потока,

Процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение в мелиоративных каналах, увеличивается с уменьшением угла боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси, что наглядно отражено графически (рисунки 4.9-4.11).

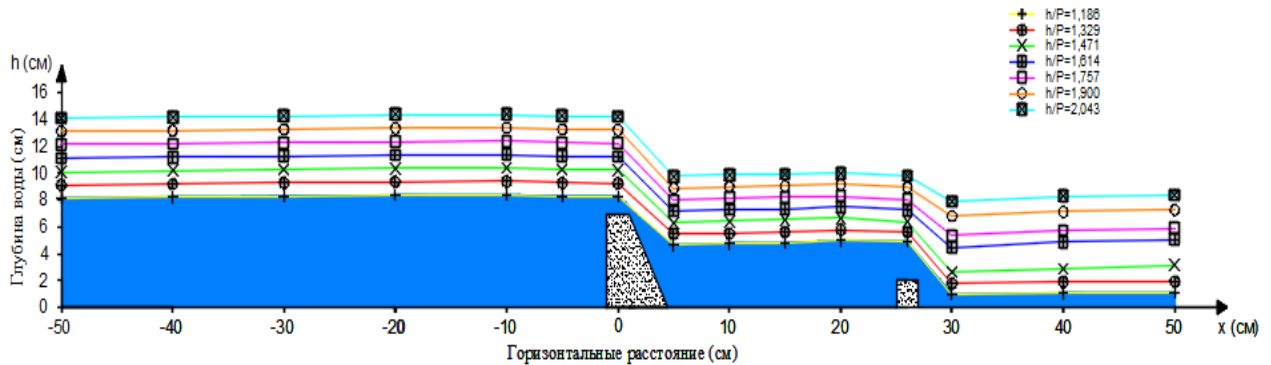
Таким образом, максимальный процент транспортируемого песка через водоподпорные сооружения при $\alpha=30^\circ$ был в среднем больше на 39,64 %; 60,80 % и 75,35 % при заложении верхового откоса 0, – на 37,48 %; 52,90 % и 61,41 % при заложении верхового откоса 1:1 и – на 35,04 %; 48,31 % и 55,82 % при заложении верхового откоса 2:1 по сравнению с углом боковых стенок водоподпорного сооружения к оси 45° ; 60° и 90° , соответственно.

4.3 Исследование уровня свободной поверхности в верхнем бьефе водоподпорного сооружения

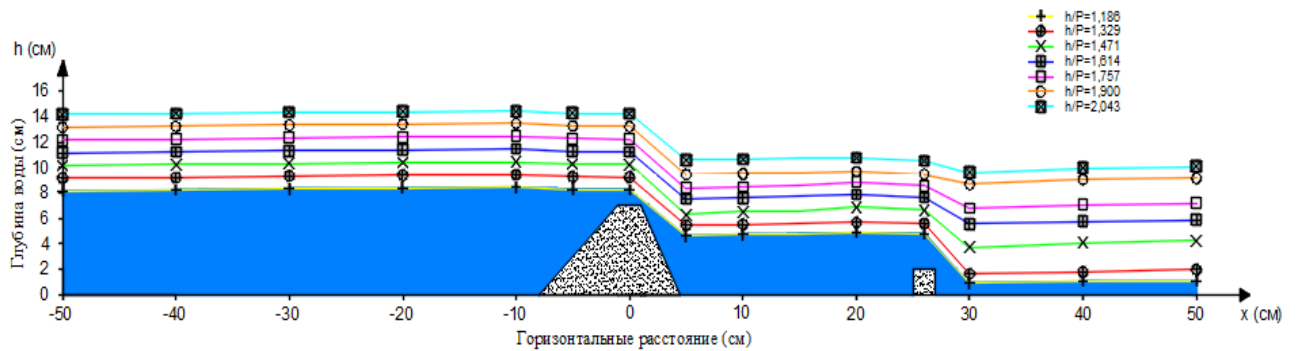
Водоподпорные сооружения увеличивают объёмы воды для орошения, которые зависят от режима уровней в ВБ [16, 45, 48, 64]. Дополнительный объём воды формируется между подпорным уровнем свободной поверхности и нормальным уровнем при равномерном движении потока, и зависит от длины кривой свободной поверхности на канале. Следовательно, на канале будут создаваться требуемые глубины и скорости потока, обеспечивающие надёжное управление водоподачей на оросительные системы.

4.3.1 Влияние геометрических параметров усовершенствованного водоподпорного сооружения на изменение уровня в верхнем бьефе

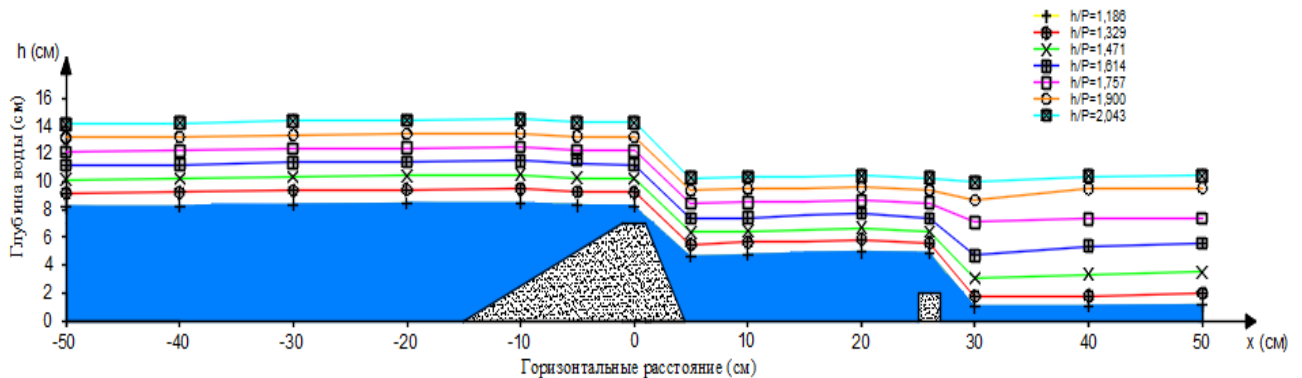
На рисунках 4.12 А; Б и В представлены продольные профили уровня в лотке для угла боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$ при изменении заложения верховой грани 0; 1:1 и 2:1, соответственно.



А)



Б)



В)

А) заложении верховой грани $m_1=0$; Б) заложении верховой грани $m_1=1:1$;

В) заложении верховой грани $m_1=2:1$

Рисунок 4.12 – Продольные профили уровня по длине канала для $\alpha=30^\circ$

Из анализа полученных значений (рисунки 4.12 А; Б и В) можно сделать вывод о том, что продольные профили водной поверхности перемещаются вверх по течению в верхнем бьефе, т.е. уровень воды до входа на водоподпорное сооружение на участке от -50 см до -10 см поднимется, затем на подходе к подпорно-пропускному водосливу на участке от -10 см до 0 уровень несколько понижается. На перепаде создаётся местное сжатие, обусловленное уменьшением живого сечения потока над порогом водоподпорного сооружения. Это понижение становится заметным на расстоянии (3-5) H от гребня водоподпорного сооружения, т. е. на участке 4,5 -7,5 см.

Выше порога водоподпорного сооружения в зоне (0...+5) м уровень резко понижается, это приводит к увеличению скорости течения и кинетической энергии потока, поток переходит из спокойного состояния в бурное. Пройдя водоподпорное сооружение, в водобойном колодце на участке (+5...+20) см поток переходит из бурного состояния в спокойное НБ через гидравлический прыжок. Ниже порога имеется зона, где профиль водной поверхности начинает несколько понижаться на участке (+20...+26) см.

Изучалось влияние заложения верхового откоса и углов боковых стенок к оси водоподпорного сооружения на изменение уровня над его гребнем. На горизонтальной оси графика откладывают расстояние по длине канала, на которое распространяется (-20...+10) см от оси водоподпорного сооружения, а на вертикальной оси – уровни. На рисунках (4.13-4.15) представлены графики профилей свободной поверхности на участке от -20 см до +10 см при $m_1 = 0; 1:1$ и $2:1$, соответственно, при $\alpha = 30^\circ$.

В приложение 6 на рисунках (6.1-6.6) представлены графики профилей свободной поверхности при верховом откосе: 0, 1:1 и 2:1, соответственно, при $\alpha = 45^\circ$ и 60° .

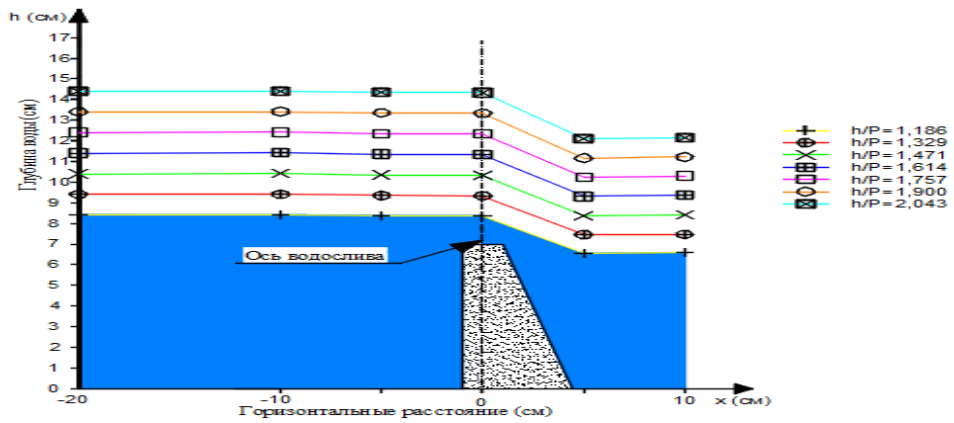


Рисунок 4.13 – Продольные профили свободной поверхности при $\alpha=30^\circ$ и $m_1=0$

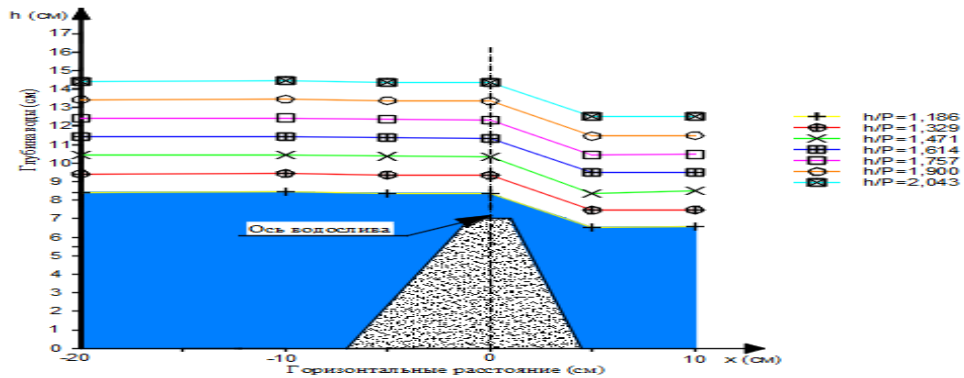


Рисунок 4.14 – Продольные профили свободной поверхности при $\alpha=30^\circ$ и $m_1=1:1$

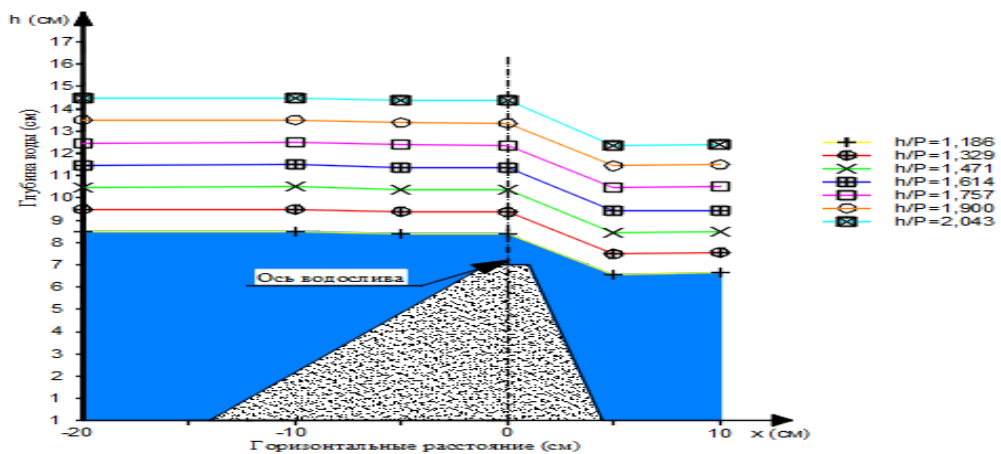


Рисунок 4.15 – Продольные профили свободной поверхности при $\alpha=30^\circ$ и $m_1=2:1$

Из опытных данных (рисунки 4.13- 4.15) установлено, что с ростом заложения верховой грани продольные профили свободной поверхности перемещаются вверх по течению. Для углов боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$ и при заложении верховой грани $m_1=2:1$ кривые свободной поверхности потока несколько повышаются до 0,20 % и 0,37 % по сравнению с водоподпорными сооружениями с заложениями верховой грани 1:1 и 0, соответственно.

Аналогичные данные получили для водоподпорных сооружений при углах боковых стенок к оси водоподпорного сооружения $\alpha=45^\circ$ и 60° и заложениях верхового откоса порога 0; 1:1 и 2:1, соответственно.

Можно сделать следующие выводы:

- физическая модель водоподпорного сооружения с заложением верховой грани $m_1=2:1$ и уклоном боковых стенок 30° обеспечивает наибольший уровень перед порогом водоподпорного сооружения на 0,37 % выше, чем другие физические модели и будет обеспечивать надёжную работу насосной станции на мелиоративных каналах;

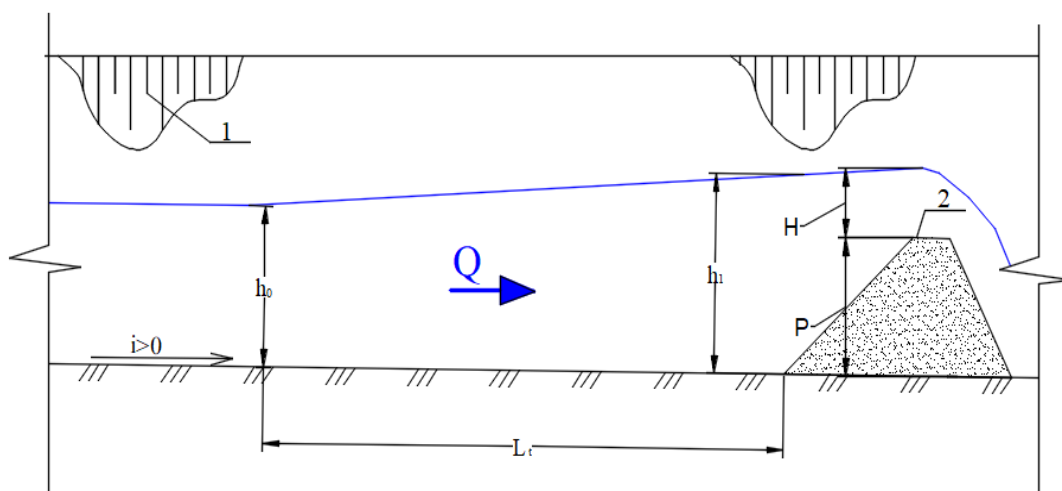
- при движении потока на водоподпорном сооружении при напоре в диапазоне $1,3 \cdot 10^{-2}$ - $7,3 \cdot 10^{-2}$ м и расходе в диапазоне $0,58 \cdot 10^{-3}$ - $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с для всех моделей водоподпорных сооружений на расстоянии -20 см от порога в ВБ гидравлические и геометрические параметры практически не оказывают влияния на изменение уровня, который находится в пределах ошибки опыта.

4.3.2 Расчет длины кривой свободной поверхности L_t в верхнем бьефе канала

Основной целью исследования является: установить влияние водоподпорного сооружения на длину участка, на котором возможно размещать всасывающие трубы насосной станции на мелиоративном канале. Для определения длины участка L_t и места установки всасывающих труб насосной станции использовалось уравнение В. И. Чарномского [12, 88] при i больше 0, которое имеет вид:

$$L_t = \frac{\mathfrak{E}_1 - \mathfrak{E}_0}{i - i_{fcp}}, \quad (4.8)$$

где $\mathfrak{E}_1$ – удельная энергия сечения при глубине h_1 у подпорно-пропускного водослива; $\mathfrak{E}_0$ – удельная энергия сечения при нормальной глубине в канале h_0 ; i – уклон канала; i_{fcp} – средний уклон трения в зоне исследуемого участка. На рисунке 4.16 приведена расчетная схема участка с кривой подпора А1, т.к. $i < i_{кр}$.



1 – бровка канала; 2 – водоподпорное сооружение; L_t – длина кривой свободной поверхности; h_0 – нормальная глубина, при которой линии водной поверхности начинают стабилизироваться; h_1 – глубина у подпорно-пропускного водослива

Рисунок 4.16 – Длина кривой свободной поверхности у подпорно-пропускного водослива

Удельная энергия вычисляется по следующему соотношению:

$$\mathfrak{E}_i = h_i + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_i^2}, \quad (4.9)$$

где Q – расход воды в канале, м³/с; ω_i – площадь живого сечения канала, м²; g – ускорение силы тяжести, м/с²; α – коэффициент Кориолиса, $\alpha=1,1$; b – ширина сечения потока, м; m – коэффициент заложения откоса.

Уклон трения (i_{fi}) определяется из соотношения:

$$i_{fi} = \left(\frac{Q}{\omega_i W_i} \right)^2, \quad (4.10)$$

где W_i – скоростные характеристики, связанные с гидравлическим радиусом и коэффициентом шероховатости канала.

Гидравлический радиус R_i определяется по выражению:

$$R_i = \frac{\omega_i}{X_i}, \quad (4.11)$$

где X_i – длина смоченного периметра.

В таблице 4.4 представлен расчет длины кривой свободной поверхности L_t для изучаемых моделей водоподпорных сооружений при угле $\alpha=30^\circ$ и $m_1=2:1$; $1:1$ и 0 , соответственно. Результаты остальных опытов по расчету длины кривой свободной поверхности L_t для верхового откоса 0 ; $1:1$ и $2:1$ и при угле боковых стенок водоподпорного сооружения $\alpha=45^\circ$ и 60° , соответственно, представлены в таблицах 7.1-7.2 в приложении 7.

Установлено, что длина кривой свободной поверхности L_t в ВБ канала возрастает с увеличением заложения верховой грани водоподпорного сооружения. При $\alpha=30^\circ$ значения средних относительных L_t/h_0 для заложения верхового откоса 0 ; $1:1$ и $2:1$ были 52,77; 58,33 и 78,58, соответственно (таблица 4.4).

При угле боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$ значение длины кривой свободной поверхности L_t было максимальной и больше на 15,11 %, 17,00 % и 24,98 % по сравнению с водоподпорным сооружением при $\alpha=45^\circ$ и больше на 28,20 %; 31,62 % и 37,09 % по сравнению с водоподпорным сооружением при $\alpha=60^\circ$ для заложения верхового откоса 0 ; $1:1$ и $2:1$, соответственно.

Таким образом, при угле боковых стенок к оси водоподпорного сооружения 30° обеспечивает наибольшее расстояние в ВБ для установки всасывающих труб насосной станции на мелиоративном канале.

Таблица 4.4 – Расчет длины кривой свободной поверхности (L_t) при $\alpha=30^\circ$

α	заложения верхового откоса	b, м	h_0 , м	h_1 , м	R_{i0} , м	R_{i1} , м	Ξ_0	Ξ_1	$i_{\text{фср}}$	L_t , м	L_t / h_0
30°	2:1	0,17	0,0816	0,0852	0,0416	0,0425	0,0819	0,0855	0,00002	6,163	75,529
			0,0918	0,0950	0,0441	0,0449	0,0926	0,0958	0,00004	5,727	62,391
			0,1016	0,1052	0,0463	0,0470	0,1030	0,1066	0,00007	6,817	67,092
			0,1118	0,1152	0,0483	0,0489	0,1135	0,1170	0,00008	6,685	59,797
			0,1216	0,1252	0,0500	0,0506	0,1244	0,1281	0,00013	7,950	65,375
			0,1317	0,1352	0,0517	0,0522	0,1364	0,1401	0,00022	9,826	74,607
			0,1416	0,1452	0,0531	0,0536	0,1503	0,1543	0,00041	20,568	145,255
	1:1	0,17	0,0818	0,0848	0,0417	0,0424	0,0820	0,0851	0,00001	5,114	62,513
			0,0918	0,0947	0,0441	0,0448	0,0924	0,0954	0,00003	5,137	55,960
			0,1017	0,1047	0,0463	0,0469	0,1028	0,1059	0,00006	5,586	54,922
			0,1115	0,1148	0,0482	0,0488	0,1130	0,1164	0,00007	6,360	57,043
			0,1217	0,1247	0,0500	0,0505	0,1240	0,1271	0,00011	6,350	52,175
			0,1317	0,1348	0,0517	0,0521	0,1352	0,1385	0,00017	7,543	57,273
			0,1418	0,1446	0,0531	0,0535	0,1477	0,1508	0,00028	9,701	68,417
	0	0,17	0,0813	0,0842	0,0416	0,0423	0,0815	0,0844	0,00001	4,933	60,677
			0,0913	0,0942	0,0440	0,0447	0,0918	0,0948	0,00003	5,085	55,699
			0,1010	0,1043	0,0462	0,0468	0,1019	0,1053	0,00005	6,000	59,404
			0,1114	0,1142	0,0482	0,0487	0,1126	0,1155	0,00006	5,290	47,482
			0,1217	0,1242	0,0500	0,0505	0,1236	0,1262	0,00009	5,142	42,251
			0,1314	0,1342	0,0516	0,0520	0,1342	0,1371	0,00013	6,287	47,850
			0,1413	0,1441	0,0531	0,0535	0,1458	0,1489	0,00021	7,920	56,052

4.3.3 Влияние кривой свободной поверхности на размещение насосных станций в верхнем бьефе водоподпорного сооружения

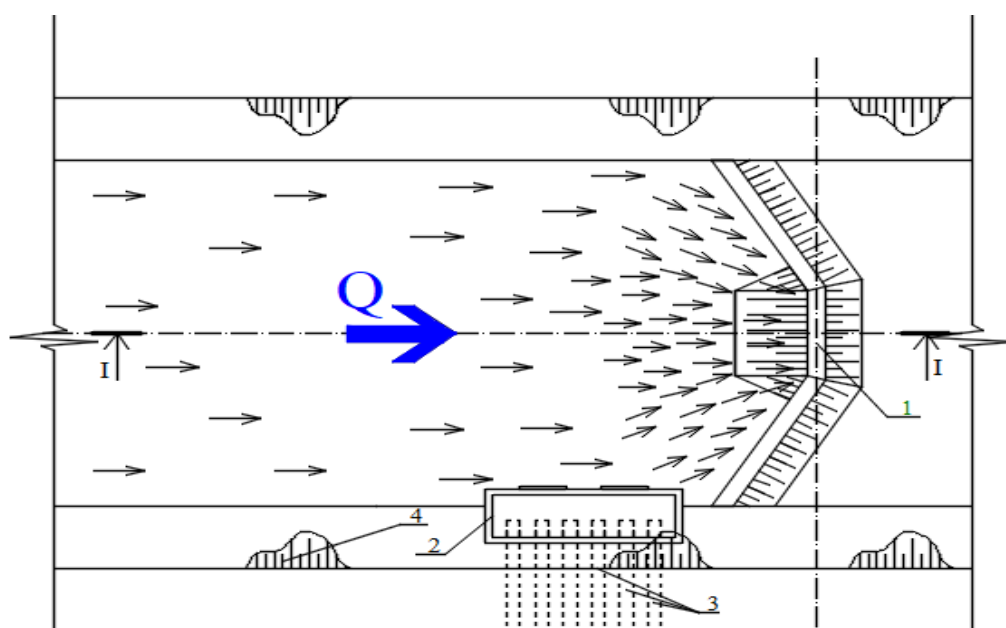
В условиях дефицита воды в источниках орошения эксплуатация мелиоративных насосных станций на основе ресурсосберегающих технологий является первостепенной задачей. Увеличение межремонтных сроков службы сооружений и оборудования, обеспечивающее экономию электрической энергии, надёжное водопользование достигается водоподпорными сооружениями на мелиоративных каналах.

Выбор места установки всасывающих труб насосной станции в ВБ мелиоративных каналах (рисунок 4.17) имеет решающее значение для рационального и надёжного водопользования оросительных систем.

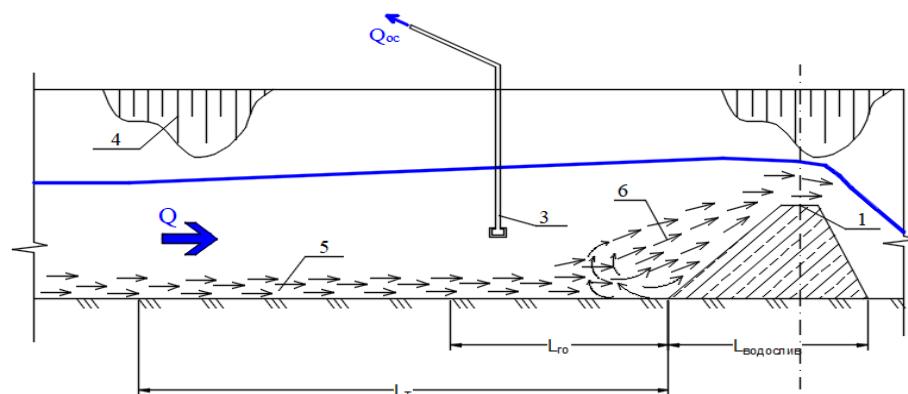
Однако вопрос точного размещения всасывающих труб насосной станции у водоподпорного сооружения оставался недостаточно определённым. Опыты, выполненные на физических моделях водоподпорных сооружений, позволят установить место расположения всасывающих труб насосной станции перед водосливом, при котором водоподпорное сооружение обеспечивает промыву наносов гидравлическими струями перед порогом на расстоянии $L_{го}$, что обеспечивается боковыми и центральными струями набегающего потока (рисунок 4.17).

На основании результатов исследования уровня воды в ВБ и с использованием метод В. И. Чарномского [12] получили длину кривой свободной поверхности L_s , на которой можно размещать всасывающие трубы насосной станции на мелиоративном канале. На данном участке устанавливаются уровни, которые обеспечивают надёжную эксплуатацию НС. Анализ данных по движению наносов и результаты измерений отложения донных наносов перед порогом подпорно-пропускного водослива определяют длину гидравлической очистки на дине $L_{го}$, которую можно считать наиболее стабильной зоной для размещения НС, как показано на рисунок 4.17. В таблице 4.5 представлены значения длины

гидравлической очистки L_{zo} , длины кривой свободной поверхности L_t , относительный параметр L_{zo}/L_t , и относительный параметр L_{zo}/h для физических моделей усовершенствованного водоподпорного сооружения.



А)



Б)

1 – водоподпорное сооружение; 2 – водозаборное сооружение; 3 – всасывающие трубы насосной станции; 4 – бровка канала; 5 – данные наносы; 6 – взвешенные наносы

Рисунок 4.17 – Место гидравлической очистки от наносов перед водоподпорным сооружением

В таблице 4.5 получены отношения L_{zo}/h для подпорно-пропускных полигональных водосливов при угле $\alpha = 30^\circ$, 45° и 60° . Наилучшие результаты установлены для водоподпорного сооружения с заложением верхового откоса 2:1 и углом 30° . Для этого водоподпорного сооружения получено максимальное соотношение $L_{zo}/h = 2,74$.

Таблица 4.5 – Параметры зон для выбора размещения НС

α	Заложения верхового откоса	Средняя длина кривой свободной поверхности (L_t), м	Средняя длина гидравлической очистки L_{zo} , м,	L_{zo}/L_t	L_{zo}/h
30°	2/1	9,11	0,20	0,022	2,74
	1/1	6,54	0,14	0,021	1,92
	0	5,81	0,11	0,019	1,51
45°	2/1	7,71	0,18	0,023	2,47
	1/1	6,75	0,11	0,016	1,51
	0	7,34	0,09	0,012	1,23
60°	2/1	5,58	0,15	0,027	2,05
	1/1	4,43	0,09	0,020	1,23
	0	4,11	0,06	0,015	0,82

При исследуемой глубине в канале установлено, что водоподпорное сооружение при угле боковых стенок к оси 30° и заложении верхового откоса 2:1 обеспечивает наибольшее расстояние гидравлической очистки от отложений наносов перед порогом водоподпорного сооружения до $(1,51–2,74) h$. Сооружение обеспечивает наилучшую очистку до 51,4 % от отложений наносов перед порогом водоподпорного сооружения, что создаёт надёжную работу мелиоративных насосных станций при рациональном водопользовании.

4.4. Выводы по 4 главе:

- установлено, что продольный профиль донных гряд, сформировавшихся у водоподпорного сооружения в мелиоративных каналах, постоянно меняется, что связано с изменением скорости потока. С целью уменьшения отложения наносов размером 0,1–0,5 мм перед порогом водоподпорном сооружением в оросительных каналах минимальные скорости потока рекомендуется принимать не менее 0,32 м/с;
- установлено, что подпорно-пропускные полигональные водосливы создают условия для гидравлической промывки отложений наносов, образовавшихся у порогов на длине L_{zo} , что обеспечивает устойчивую работу водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах, так как длина гидравлической очистки L_{zo} не требует периодической механической очистки от наносов;
- установлено, что значения L_{zo} увеличивается с ростом заложения верховой

границы m_1 и с уменьшением угла боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси α . Таким образом, модель водоподпорного сооружения при $\alpha=30^\circ$ и откосе 2:1 обеспечивает наибольшую длину гидравлической очистки L_{20} от отложений наносов у порога водоподпорного сооружения;

- установлено, что пропуск наносов из верхнего в нижний бьеф водоподпорного сооружения на мелиоративных каналах зависит от средней скорости набегающего потока на порог, заложения верховой грани m_1 , угла боковых стенок α , длины водосливного фронта B_n и ширины по гребню водоподпорного сооружения L_n ;

- установлено, что процент песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, обеспечиваемый формой подпорных сооружений для угла боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$ находится в пределах от 1,7 до 51,4 %; для $\alpha=45^\circ$ находится в диапазоне от 1,2 до 35,6 %; для $\alpha=60^\circ$ находится в пределах от 0,8 до 28,2 %; для $\alpha=90^\circ$ находится в пределах от 0,6 до 24,8 %;

- установлено, что физическая модель усовершенствованного водоподпорного сооружения с заложением верховой грани 2:1 и углом боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$ оказывается наилучшей адаптированной моделью, обеспечивающей максимальный пропуск наносов через порог в нижний бьеф до 51,4 % при максимальном коэффициенте расхода в диапазоне $m_n=0,344-0,421$, которая обеспечит надёжное водопотребление воды из мелиоративных каналов;

- получена регрессионная модель (4.7) для определения процента песка, проходящего через подпорно-пропускные полигональные водосливы $P\%$ в зависимости от средней скорости потока v , которая находится в диапазоне 0,041–0,409 м/с;

- построены продольные профили свободной поверхности потока у водоподпорного сооружения при углах боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° и заложении верхового откоса 0; 1:1 и 2:1 для определения длины кривой свободной поверхности L_t , где можно разместить всасывающие трубы НС перед порогом водослива на мелиоративном канале;

- установлено, что свободная поверхность уровня воды перемещается вверх по течению с увеличением заложения верховой грани и с уменьшением угла боковых

стенок водоподпорного сооружения к его оси, т.е. конструкция водоподпорное сооружение с уклоном боковых стенок $\alpha=30^\circ$ и заложением верхового откоса порога $m_I=2:1$ обеспечивает наибольшую уровень перед порогом водоподпорного сооружения;

- на основании уравнения В. И. Чарномского рассчитаны длины кривой свободной поверхности L_t в ВБ канала перед порогом водоподпорном сооружением и получено, что длина кривой свободной поверхности L_t для угла боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$ больше на 15,11 %; 17,00 % и 24,98 % по сравнению с водоподпорным сооружением при $\alpha=45^\circ$ и больше на 28,20 %; 31,62 % и 37,09 % по сравнению с водоподпорным сооружением при $\alpha=60^\circ$ для заложения верхового откоса 0; 1:1 и 2:1, соответственно; т.е. длина кривой свободной поверхности L_t растёт с увеличением заложения верхового откоса полигонального водослива и с уменьшением угла боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси;

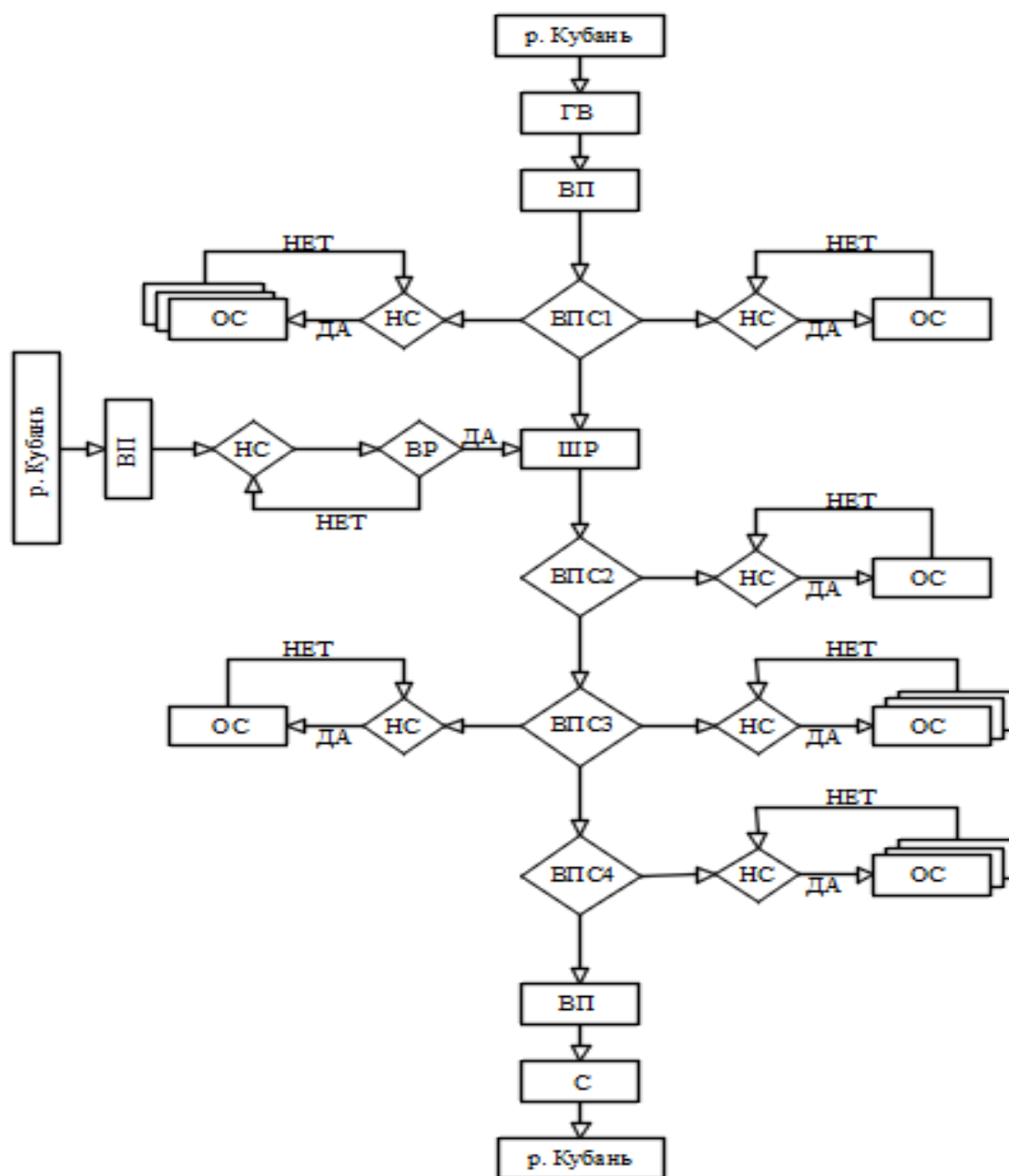
- установлено, что длина кривой свободной поверхности L_t и длина гидравлической очистки L_{go} были максимальны при угле боковых стенок водоподпорного сооружения к его оси $\alpha=30^\circ$ и заложении верхового откоса порога $m_I=2:1$, что связано с полигональной формой водоподпорное сооружение и действием боковых и центральных струй набегающего потока [90].

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ НОВОКУБАНСКОГО КАНАЛА И РАЗРАБОТКА СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРХНЕ-КУБАНСКОЙ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

5.1 Модернизированная технологическая схема и алгоритм управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы

Верхне-Кубанская оросительная система была введена в эксплуатацию в 1954г и частично эксплуатируется по настоящее время. Снижение мощности Верхне-Кубанской оросительной системы обусловлено различными причинами: дефицитом водных ресурсов р. Кубань; перераспределением стока р. Кубань между Ставропольским и Краснодарским краями; перестроечным периодом экономики в конце прошлого века и рядом других причин. Для восстановления мелиоративной системы до проектной мощности до 8319 га необходима модернизация технологической схемы управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы.

Модернизация мелиоративных систем должна идти по пути повышения водообеспеченности, увеличения коэффициента полезного действия и получения гарантированных урожаев [40]. Модернизацию схемы управления Верхне-Кубанской оросительной системы (рисунок 5.1) следует рассматривать, как замкнутую, адаптированную к изменениям природной среды, в которой необходимо учитывать закономерности и связи между основными природными и техногенными компонентами: дефицитом воды р. Кубань и головным водозабором Верхне-Кубанской оросительной системы; уровнем в Новокубанском канале и забором воды для орошения; объёмом воды для орошения и водоподпорными сооружения на Новокубанском канале (НОК); водообеспеченностью



Р. Кубань – источник орошения; ГВ– головной самотёчный водозабор; ВП – водомерный пост; ВПС 1-4 – водоподпорное сооружение; НС – насосная станция; ВР– водовыпуск регулятор; ШР – шлюз-регулятор; ОС – оросительная система; С– сборное сооружение

Рисунок 5.2 – Алгоритм управления водными ресурсами модернизированной технологической Верхне-Кубанской оросительной системы

Модернизацию схемы Верхне-Кубанской оросительной системы (рисунок 5.1) нужно рассматривать, как комплексное управление водными ресурсами, которое будет направлено на повышение водообеспеченности и эксплуатационной надёжности системы [34, 40].

Для снижения дефицита расхода Новокубанского канала в местах сосредоточения основных водопользователей необходимо обустройство водоподпорного сооружения (ВПС) и дополнительная его подпитка расходом р. Кубань каналом К (рисунок 5.1). Лучшим местом сопряжения канала К с Новокубанским каналом находится у с. Отрадо-Ольгинское Гулькевичского района [87]. Управление водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы будет выполняться комплексно по предлагаемому алгоритму регулируемыми, водоподпорными сооружениями и каналом К (рисунок 5.2):

- головным самотёчным водозабором из р. Кубань;
- водомерными постами ВП в начале и устье Новокубанского канала;
- водоподпорным сооружением ВПС 1, внедрённым КубГАУ;
- усовершенствованными водоподпорными сооружениями ВПС 2-4
- быстотоками (6 шт.);
- шлюзом-регулятором (ШР), который устраивается в конце канала К для управления дополнительными расходами в межень;
- каналом К с машинным водозабором из р. Кубань.

Канал К рассчитывается на проектный расход, который будет покрывать дефицит объёма воды Верхне-Кубанской оросительной системы в межень. Управление водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы следует выполнять комбинированно в зависимости от вариантов водообеспеченностью стока р. Кубань:

Вариант 1 – 75 % обеспеченность стока р. Кубань и выше. Экстремальный режим эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы и Новокубанский канал. Вода поступает в Новокубанский канал через головное водозаборное сооружение. Насосная станция на канале К не работает. Шлюз закрыт.

Вариант 2 – 75 % обеспеченность стока р. Кубань. Нормальный режим эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы. Вода поступает в Новокубанский канал через головное водозаборное сооружение. Насосная станция

не работает. Шлюз закрыт.

Вариант 3 – 50-75 % обеспеченность стока р. Кубань. Комбинированный режим эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы. Вода поступает в Новокубанского канала через головное водозаборное сооружение. Шлюз управляет дополнительным расходом. Насосная станция работает, вода подаётся в канал К, который подпитывает Новокубанского канала. В данном режиме водоподпорные сооружения надёжно повышают водообеспеченность Верхне-Кубанской оросительной системы.

Вариант 4 – 50 % обеспеченность стока р. Кубань. Комбинированный режим эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы. (Дефицитный режим эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы). Вода поступает в Новокубанский канал через головное водозаборное сооружение. Шлюз открыт полностью. Насосная станция работает, вода подаётся в канал К, который подпитывает расходом Новокубанского канала. В данном режиме водоподпорные сооружения надёжно повышают водообеспеченность Верхне-Кубанской оросительной системы.

Модернизированная схема Верхне-Кубанской оросительной системы с устройством 4-х водоподпорных сооружений в местах сосредоточения основных водопользователей и дополнительной подпитки необходимым расходом Новокубанского канала каналом К из р. Кубань повысит надёжность управления водными ресурсами при эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы.

Результатом модернизации Верхне-Кубанской оросительной системы будет являться:

- восстановление площадей орошения до проектной мощности;
- повышение водообеспеченности Новокубанского канала;
- ввод новых мелиорируемых земель до 2400 га в ООО «Союз-Агро» путём подачи дополнительного объёма воды из р. Кубань по каналу К до 6 млн. м³ на Верхне-Кубанскую оросительную систему.

5.2 Оценка эксплуатационной надёжности при внедрении водоподпорного сооружения

Оценка водообеспеченности.

Водообеспеченность определяет эксплуатационную надёжность мелиоративных систем, которая зависит от комплекса показателей: объёма стока источника, пропускной способности каналов, регулирующих сооружений, управления мелиоративной системой и др. Для эксплуатационной надёжности мелиоративных систем используется коэффициент водообеспеченности P [40], показывающий насколько фактический объём W_ϕ , поданной воды на систему, соответствует запланированному плану водопользования W_3 для конкретного водопользователя:

$$\varphi (\Delta W) = W_3 - W_\phi = 0. \quad P = (W_\phi / W_3) \rightarrow 1, \quad (5.1)$$

где $\varphi (\Delta W)$ – дефицита объём воды плана водопользования, млн. м³; W_3 – объём воды плана водопользования, млн. м³; W_ϕ – фактический объём воды, поданной на мелиоративную систему.

При бездефицитном водопользовании из (5.1) следует, что коэффициент водообеспеченности $P=1$, т.к. $W_\phi = W_3$. Объём воды в мелиоративную систему ООО «Южная плодоовощная компания» поступает из Новокубанского канала, который испытывает дефицит расхода (варианты 3 и 4 алгоритма управления Верхне-Кубанской оросительной системы). При дефицитном расходе глубины в канале находятся в диапазоне 0,18-0,53 м. Запланированный объём воды для мелиоративной системы ООО «Южная плодоовощная компания» составляет 2,5 млн. м³. Фактический объём воды в условиях дефицита расхода канала не превышал 1,82 млн. м³, следовательно, коэффициент водообеспеченности канала в месте водозабора мелиоративной системы составлял 0,74, что следует из (5.1).

Низкая водообеспеченность Новокубанского канала была обусловлена небольшими глубинами воды в вегетационный период при дефиците стока р. Кубань [82]. Повышения водообеспеченность Новокубанского канала возможно путём устройства водоподпорных сооружений (ВПС) (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Устройство водозабора у водоподпорного сооружения ООО «Южная плодоовощная компания» на Новокубанском канале

Из рисунка 5.3 видно, что надёжный плановый забор воды в мелиоративную систему ООО «Южная плодоовощная компания» обеспечивается увеличением глубины водоподпорным сооружением в канале при дефицитном расходе.

При заборе расхода в мелиоративную систему сравнивались между собой 2 водоподпорного сооружения на канале: действующее водоподпорное сооружение с углом 60° и усовершенствованная (модернизированная) физическая модель водоподпорного сооружения (МВПС) с углом 30° . Решалась обратная задача перевода параметров физических моделей водоподпорных сооружений в натуру с помощью критериев подобия. Выполнялось сравнение полученных результатов по эксплуатационной надёжности Новокубанского канала.

При воздействии потока на сооружения уровни повышаются, создаётся подпор воды в канале, длина которого и уровни определяются из уравнения В.И Чарномского. При подпоре уровня в вегетационный период увеличиваются глубины до 0,92-1,17 м при расходах в канале 0,88-4,39 м³/с, соответственно. Обработка опытных данных позволила установить дополнительные объёмы воды в Новокубанском канале в вегетационный период для 2-х вариантов водоподпорных сооружений (приложение 8). Дополнительный объём (объём) – это объём воды, который находится выше порога водослива в ВБ водоподпорного сооружения. Результаты опыта представлены на графике (рисунок 5.4).

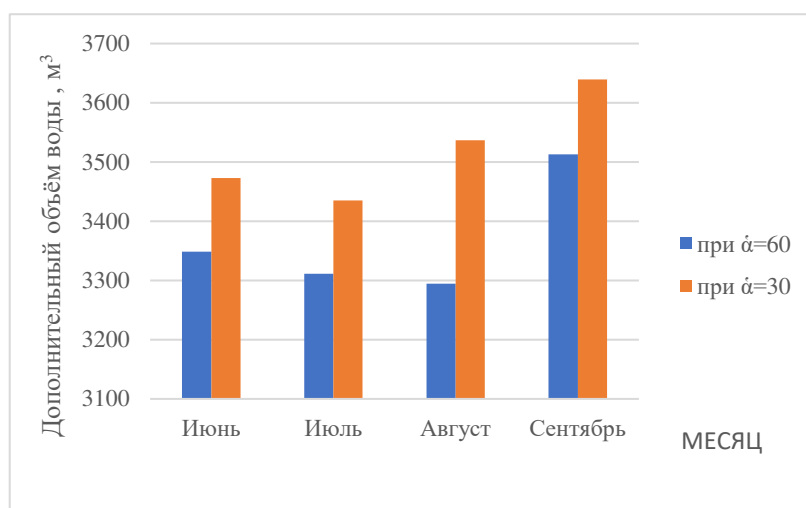


Рисунок 5.4 – Объёмы воды при устройстве ВПС и МВПС в Новокубанском канале

Установлено, что при устройстве более совершенствованного водоподпорного сооружения с углом 30° объём воды в канале составил 3,52 тыс. м³, а при устройстве водоподпорного сооружения с углом 60° объём воды в канале был 2,37 тыс. м³. При сравнении объёмов воды для орошения при водоподпорных сооружениях получено, что объём воды в канале при усовершенствованном водоподпорном сооружении больше на 4,4 % по сравнению с объёмом воды при водоподпорном сооружении. Следовательно, повышение водообеспеченности Новокубанского канала будет надёжно обеспечено при устройстве усовершенствованного водоподпорного сооружения

Коэффициент водообеспеченности Новокубанского канала для мелиоративной системы ООО «Южная плодоовощная компания» по формуле (5.1) равен $P = 1$, т.к. фактический объём W_Φ соответствует плану водопользования W_3 . $W_\Phi = 2,5$ тыс. м³; $W_3 = 2,5$ тыс. м³.

Оценка допустимых скоростей в Новокубанском канале.

Эксплуатационная надёжность Верхне-Кубанской оросительной системы должна обеспечивается соблюдением критерия по допустимым скоростям [39] в Новокубанском канале при устройстве водоподпорных сооружений. Критерий надёжности эксплуатации каналов определяется по допустимым скоростям [42]:

$$\varphi(V) = V - V_{нез} > 0 ; \varphi(V) = V - V_{неп} < 0 \quad (5.2)$$

где: V – средняя скорость в канале, м/с; $V_{нез}$ – допустимая незаиляющая скорость,

м/с; $V_{\text{нер}}$ – допустимая неразмывающая скорость, м/с.

Скорости для грунтовых условий в Новокубанском канале [87] должны находиться в диапазоне допускаемых скоростей 0,3–1,0 м/с, где $V_{\text{нез}}=0,3$ м/с и $V_{\text{нер}}=1,0$ м/с.

Определялись скорости потока в канале (рисунок 2.14). В створах C_3 – C_4 скорости были в диапазон 0,59–0,58 м/с в зависимости от расхода воды в канале 4,31–4,22 м³/с. В створах C_1 и C_2 скорости увеличиваются до значений 0,63–0,61 м/с. Установлено, что частицы наносов при средней скорости в канале более 0,30 м/с начинают двигаться по дну.

Процесс переноса донных наносов к водоподпорному сооружению объясняется повышением скорости потока в створах канала. Процесс движения наносов через водоподпорные сооружения описан в разделе 4. В опытах при меженном и максимальном расходе 0,88 м³/с и 4,39 м³/с соответственно определялись средние скорости потока в канале, которые у водоподпорного сооружения были 0,35–0,64 м/с, что меньше допустимой размывающей и больше неразмывающей скоростей, т.е. $V_{\text{нез}} < V < V_{\text{нер}}$.

Следовательно, при устройстве водоподпорных сооружений в Новокубанском канале выполняется критерий эксплуатационной надёжности по допускаемым скоростям (5.2).

Оценка пропускной способности Новокубанского канала.

Критерий пропускной способности характеризуется пропуском расхода в русле канала в зависимости от различных факторов, к основным можно отнести мутность, состояние поверхности, изменение формы русла и др. [32, 39, 40]. Этот критерий влияет на водообеспеченность каналов и мелиоративных систем [40].

Мутность потока в Новокубанском канале является основным фактором, влияющим на надёжную эксплуатацию Верхне-Кубанской оросительной системы. Максимальная мутность потока 603 г/м³ наблюдается при паводках на р. Кубань, при которой средняя толщина наносов в Новокубанском канале на дне у

водоподпорного сооружения в створах C_1 и C_2 составляет 0,08-0,10 м, в створах C_3 и C_4 – 0,20-0,31 м, соответственно.

Из выполненного опыта о влиянии мутности потока на объём забора воды из канала можно сделать вывод о том, что размещение всасывающих труб насосной станция водозабора следует устраивать между створами C_1 и C_2 , где толщина наносов минимальна. Наносы в канале не будут влиять на процесс эксплуатации насосной станция.

Выполнено исследование 2-х моделей водоподпорных сооружений по транспортирующей способности потока:

- 1) модель водоподпорного сооружения с углом 60° ;
- 2) усовершенствованная физическая модель водоподпорного сооружения с углом 30° .

Получено, что усовершенствованного физическая модель водоподпорного сооружения с углом 30° при мутности до 603 г/м^3 самоочищает русло от наносов до 51,4 %. Модель водоподпорного сооружения с углом 60° очищает русло от наносов до 28,2 %. Таким образом, усовершенствованная физическая модель водоподпорного сооружения обладает более высокой транспортирующей способностью потока.

Совершенная модель водоподпорного сооружения с углом 30° улучшает гидравлические параметры канала и очищает русло от наносов до 51,4 %, обладает более высокой транспортирующей способностью, снижает шероховатость русла [85].

Пропускная способность русла канала.

Критериальные уравнения, по которым можно оценить пропускную способность русла канала, имеют вид [39]:

$$\varphi(Q) = Q_{\text{пр}} - Q; \quad a Q_{\text{пр}} \geq \varphi(Q) \geq 0, \quad (5.3)$$

где Q и $Q_{\text{пр}}$ – фактическая и проектная пропускная способность русла канала $\text{м}^3/\text{с}$; a – коэффициент допустимого снижения нормативных показателей.

Установим пропускную способность Новокубанского канала по формуле

Шези. Коэффициент Шези вычисляются по формуле Маннинга для земляного русла:

$$Q = \frac{1}{n} \omega R^{1/6} \sqrt{RI}, \quad (5.4)$$

где n – коэффициент шероховатости русла; $\omega = h(b + mh)$ – площадь живого сечения, м^2 ; b – ширина дна канала, м ; h – глубина воды в канале, м ; m – коэффициент заложения откосов; $R = \omega/\chi$ – гидравлический радиус, м ; $\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$ – смоченный периметр, м ; I – уклон дна Новокубанского канала.

Расчет гидравлических параметров русла выполняются по общеизвестным формулам и сводятся в таблицу 5.1.

Проектная пропускная способность русла Новокубанского канала находилась по формуле (5.4) при коэффициенте шероховатости русла 0,025, находящегося в нормальных грунтовых условиях. При определении проектной пропускной способности русла Новокубанского канала применяли коэффициент допустимого снижения нормативных показателей [39], как для протяженных каналов с малыми расходами Юга РФ. По аналогии с эксплуатируемыми каналами (расход, длина канала и т.д.) величину коэффициента a можно принять 0,9. Результаты расчетов даны в таблице 5.1.

Основным параметром русла его является шероховатость, которая будет отражать состояние Новокубанского канала в естественных условиях. По данным ранее выполненных исследований (отчет ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз», 2023 г.) коэффициент шероховатости русла Новокубанского канала имеет значение 0,045. Это говорит о том, что русло Новокубанского канала находится в крайне неудовлетворительном состоянии [32, 87]. По формуле (5.4) находится расход, который пропускает русло канала в современных естественных условиях, данные представлены в таблице 5.1.

При устройстве водоподпорного сооружения на участке Новокубанского канала протяженностью 1,52 км происходит гидравлическое очищение русла от наносов. Данный участок канала расположен от головного водозабора до места устройства водоподпорного сооружения. Установлено, что на участке канала

произошло частичное очищение русла наносов гидравлическим потоком, при этом объём удалённых наносов составил 2203 м³.

Исследования, выполненные по формулам Шези-Железнякова [13, 16, 32], в створах С₃ и С₄ показали, что коэффициент шероховатости снизился и составил 0,03. По формуле (5.4) находится расход, который пропускает русло канала после гидравлического очищения наносов. Результаты заносятся в таблицу 5.1.

Расчеты по пропускной способности Новокубанского канала выполнялись для глубин 0,3–1,0 м при постоянных параметрах участка канала: уклон дна 0,0006 и ширина по дну 11,6 м.

Таблица 5.1 – Пропускная способность русла Новокубанского канала

Характеристика русла канала	Средняя глубина, м	Коэффициент шероховатости	Скорость в канале, м/с	Расход, м ³ /с	Коэффициент пропускной способности
Проектное сечение	0,3	0,025	0,54	1,80	1,0
	0,5		0,74	4,29	
	0,7		0,90	7,67	
	1,0		1,10	14,33	
Участок русла с водоподпорным сооружением	0,3	0,03	0,45	1,67	0,83
	0,5		0,61	3,98	
	0,7		0,75	7,10	
	1,0		0,92	13,27	
Русло в естественных условиях	0,3	0,045	0,30	1,11	0,56
	0,5		0,41	2,65	
	0,7		0,50	4,73	
	1,0		0,61	8,85	

Коэффициент пропускной способности канала определяется с использованием формулы (5.3), по зависимости:

$$\mu = Q_i / Q_{пр}, \quad (5.5)$$

где Q_i – расход канала в русле при данном коэффициенте шероховатости, м³/с; $Q_{пр}$ – проектный расход канала, м³/с.

Коэффициент пропускной способности Новокубанского канала μ в естественных условиях значительно уменьшился по сравнению с проектным коэффициентом при глубинах 0,3–1,0 м (на 44 %).

Пропускная способность канала увеличивается за счет устройства усовершенствованного водоподпорного сооружения при этом будет выполняться: гидравлическая очистка канала от наносов; увеличение глубин и скоростей; повышение водообеспеченности канала. Коэффициент пропускной способности Новокубанского канала увеличился с 0,56 до 0,83, что отвечает нормативам требованиям для мелиоративных каналов оросительных систем [76].

5.3 Экономическая оценка внедрения водоподпорного сооружения на Новокубанском канале

Эффективность от расчистки русла Новокубанского оросительного канала.

Качество воды и количество наносов в Новокубанском канале требуют постоянной очистки от наносов и ила два раза в год, а иногда и после каждого паводка на р. Кубань. Очистка каналов от иловых отложений проводится экскаватором «Драглайн» ЭО-4112 с ковшом вместимостью 0,8 м³.

Стоимость очистки от наносов участка Новокубанского канала по данным ФГБУ «Управления «Кубаньмелиоводхоз» составляет 500 тыс. руб./км, следовательно, стоимость очистки участка канала от водозаборного сооружения на р. Кубань до водоподпорного сооружения длиной 1,52 км можно рассчитать:

$$C_{\text{дв}} = L_{\text{дв}} \cdot C_1, \quad (5.6)$$

где $C_{\text{дв}}$ – стоимость очистки участка канала, тыс. руб.; $L_{\text{дв}}$ – длина канала от водоподпорного сооружения до р. Кубань, км; C_1 – стоимость очистки участка 1 км Новокубанского канала от наносов, тыс. руб./ км.

Из уравнения (5.6) установлено, что стоимость очистки участка канала перед подпорно-пропускным водосливом составляет 760 тыс. руб.

Исследованиями и практикой установлено, что очистка Новокубанского канала на участке от р. Кубань до водоподпорного сооружения требуется 1 раз в 2 года.

Такой режим очистки канала от наносов обуславливается увеличением скоростей потока в канале, увеличением размывающей скорости потока до 0,55-0,64 м/с и водосливной формой самого водоподпорного сооружения, через которое пропуск наносов доходит до 51,4 %.

Следовательно, экономическая эффективность от расчистки русла Новокубанского канала составила – 1,14 млн. руб./год в ценах 2026 г.

Обоснование инвестиций в оросительную систему ООО «Южная плодоовощная компания».

Водоподпорное сооружение входит в состав оросительной системы ООО «Южная плодоовощная компания», поэтому срок окупаемости строительства сооружения определяется по общей стоимости строительства ОС.

Стоимость строительства оросительной системы находим по укрупненным показателям (в ценах 2001 г.) с последующим пересчетом в текущие цены 1-го квартала 2026 г. составляет 98 214 тыс. руб., в т. ч. стоимость водоподпорного сооружения -1140 тыс. руб. (приложение 9).

Объект инвестиций водоподпорное сооружение с насосной станцией с орошаемым участком Верхне-Кубанской оросительной системы ООО «Южная плодоовощная компания» на площади 233 га. Стоимость инвестиций проекта составляет 98214,0 тыс. руб.

Прибавка урожая культур севооборота (ΔU_{PAT}) за счет внедрения ресурсосберегающих адаптированных технологий определяется годовым приростом прибыли от орошения и комплекса мероприятий, рассчитывается по формуле:

$$\Delta U_{PAT} = U - U_{\kappa}, \quad (5.7)$$

где U – урожайность культур при орошении, т/га; U_{κ} – урожайность на контрольном варианте, т/га.

Площадь участка орошения для озимой пшеницы и голубики составляет 303 га, на которой до орошения получали урожай пшеницы 4 т/га, голубики – 2 т/га. Урожайность после орошения стала (таблица 5.3). Стоимость валовой продукции

B_i по культурам рассчитываем по формуле:

$$B_i = C_i \cdot A_i \cdot Y_i, \quad (5.8)$$

где C_i – цена реализации i -го вида сельскохозяйственной продукции, руб./т; Y_i – урожайность i -ой культуры, т/га.; A_i – площадь, занятая i -ой культурой, га.

Затраты на производство продукции рассчитаны как 30 % от стоимости валовой продукции и составляют 3288,6 и 3639,168 тыс. руб., соответственно, для озимой пшеницы и голубики.

Расчеты по экономической эффективности инвестиций по строительству мелиоративной системы ООО «Южная плодоовощная компания» и в том числе водоподпорного сооружения на Новокубанском канале выполнены с использования компьютерной программы.

Расчет показателей эффективности инвестиционного проекта.

Расчет показателей эффективности инвестиционного проекта проводится с привлечением выполненных в предыдущих разделах расчетов. Установленные стоимостные значения эффектов строительства и, обусловившие их капитальные затраты рассматриваются в качестве составляющих денежных потоков (прогнозируемых временных зависимостей поступлений и платежей).

Распределение капитальных вложений по годам строительства следующее: 1-й год – 50 %, 2-й год – 50 %. Расчет технико-экономических показателей эффективности инвестиционного проекта проводятся в таблице приложения 9.

Интегральные показатели эффективности проектов строительства (реконструкции) объектов определяются с использованием сальдо накопленного (за 25 лет) денежного потока по формулам для определения: чистого дисконтированного дохода (ЧДД), индекс доходности (ИД), внутренней нормы доходности (ВНД), срока окупаемости по формулам.

Дисконтированный чистый доход ЧДД:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (p_t - n_t) \cdot \frac{1}{(1+E)^t} - K, \quad (5.9)$$

где p_t – результаты, достигнутые на шаге расчета t ; n_t – затраты, связанные с

реализацией проекта АЗОС, тыс. руб.; E – норма дисконта; K – сумма дисконтированных капиталовложений.

Для инвестиционных проектов мелиорации и водного хозяйства норматив дисконтирования может быть принят на уровне 6 – 8 %. Чистый доход и чистый дисконтированный доход представляют собой превышение суммарных поступлений над суммарными затратами для данного проекта, соответственно, без учета и с учетом дисконтирования. С точки зрения инвестора проект считается эффективным при условии, если ЧДД проекта положительный; при сравнении альтернативных проектов предпочтение отдается проекту с большим значением ЧДД: Индекс доходности представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к сумме дисконтированных капиталовложений:

$$\text{ИД} = \frac{\text{ЧДД}}{K}. \quad (5.10)$$

Показатели экономического эффекта от внедрения проектируемых мероприятий приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Расчет показателей величины экономического эффекта проектируемых мероприятий

Показатели проекта	Культура при орошении	
	Озимая пшеница	Голубика
Площадь участка орошении, га	203	30
Прибавка урожая культур, т/га	3	9
Цена реализации продукции, руб. /т	18000	44928
Стоимость валовой продукции, тыс. руб.	10962	12130,56
Затраты на производство 30 %	3288,6	3639,168
Валовый доход, (дурат), тыс. руб.	7673,4	8491,392
Общий итог ежегодных инвестиций, тыс. руб.	98214,0	
Продолжительность строительства	25 лет	

Все расчеты и графики даны в приложении 9. В результате инвестиций в оросительной системе получены экономические показатели проекта: Срок окупаемости проекта составляет 6 лет. Индекс доходности проекта составляет 1,98

больше 1, что отвечает высокой экономической эффективности проекта.

5.4 Выводы по 5 главе:

1. Модернизированная схема Верхне-Кубанской оросительной системы с устройством 3-х более совершенных водоподпорных сооружений в местах сосредоточения основных водопользователей и дополнительной подпитки необходимым расходом Новокубанского канала каналом К из р. Кубань повысит надёжность управления водными ресурсами при эксплуатации Верхне-Кубанской оросительной системы, которая приведёт к восстановлению площади орошения до проектной мощности и повышению коэффициента водообеспеченности Новокубанского канала.

Для модернизированной схемы Верхне-Кубанской оросительной системы разработан управления водными ресурсами по 4 вариантам.

2. Устройство более совершенных водоподпорных сооружений на Новокубанском канале в местах сосредоточения основных водопользователей обеспечит выполнение критерия эксплуатационной надёжности по допускаемым скоростям (5.2).

3. Совершенная модель водоподпорного сооружения с углом 30° очищает русло Новокубанского канала от наносов до 51,4 % и обладает более высокой транспортирующей способностью, что ведёт к снижению коэффициента шероховатости русла канала с 0,045 до 0,03.

4. Установлено, что при устройстве усовершенствованного водоподпорного сооружения на Новокубанском канале повышается пропускная способность, коэффициент пропускной способности канала $\mu=0,83$, что отвечает нормативам для мелиоративных каналов оросительных систем [76].

5. Срок окупаемости усовершенствованного водоподпорного сооружения в составе оросительной системы ООО «Южная плодоовощная компания» составляет 6 лет. Индекс доходности проекта составляет $1,98 > 1$, что отвечает высокой экономической эффективности проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены основные причины снижения надежной эксплуатации мелиоративных каналов и эффективности управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы. К числу основных факторов отнесены: заиливание и снижение пропускной способности каналов, недостаточная водообеспеченность в дефицитные периоды, а также несовершенство существующих водоподпорных сооружений, не обеспечивающих устойчивый гидравлический режим в вегетационный период.

2. Выполнено физическое моделирование и разработаны физические модели усовершенствованных водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов. Установлено, что оптимальным геометрическим параметром является угол наклона $\alpha=30^\circ$, при котором объем воды в верхнем бьефе Новокубанского канала в вегетационный период на 4,4 % превышает показатель действующего водоподпорного сооружения с $\alpha=60^\circ$.

3. Получены новые эмпирические зависимости коэффициента расхода от геометрических и гидравлических параметров физических моделей усовершенствованных водоподпорных сооружений. Коэффициент пропускной способности канала увеличился с 0,56 до 0,83, что соответствует требованиям для мелиоративных каналов. Средние скорости в канале составили 0,54–0,68 м/с, что ниже допустимой размывающей и выше неразмывающей скоростей.

4. Исследовано влияние уровня воды в верхнем бьефе на движение наносов. Получена регрессионная модель пропуска процента наносов в зависимости от скорости потока для усовершенствованных водоподпорных сооружений. Установлено, что транспортирующая способность потока возросла до 51,4 %, а глубины воды в канале в вегетационный период увеличились с 0,28–0,53 м до 0,97–1,17 м, что обеспечивает устойчивый транзит наносов в русле мелиоративного канала при снижении их отложений.

5. Разработаны модернизированная технологическая схема и алгоритм управления водными ресурсами Верхне-Кубанской оросительной системы,

предусматривающие четыре режима эксплуатации: при обеспеченности стока р. Кубань 75 % и выше, и при обеспеченности менее 75 %.

6. Исследованы параметры эксплуатационной надёжности Новокубанского канала в створе водозабора оросительной системы ООО «Южная плодоовощная компания». Коэффициент водообеспеченности Новокубанского канала увеличился с 0,73 до 1, фактический объём воды стал соответствовать плану водопользования оросительной системы. Пропускная способность канала увеличивалась до 0,83 м³/с при уменьшении толщины донных отложений до 8–10 см у усовершенствованного водоподпорного сооружения. Экономический эффект составляет до 1,14 млн руб. (в ценах I кв. 2026 г.), срок окупаемости капиталовложений – 6 лет, индекс доходности ИД=1,98, что подтверждает целесообразность практического внедрения усовершенствованного водоподпорного сооружения.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Для повышения эффективности и эксплуатационной надёжности оросительных систем на мелиоративных каналах необходимо проектировать и внедрять усовершенствованные водоподпорные сооружения, которые снижают поступление наносов в оросительные системы, уменьшают мутность, подаваемой воды водопользователям; увеличивают глубины воды в русле каналов, при этом повышают водообеспеченность каналов, сокращают эксплуатационные затраты на очистку каналов от наносов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

На протяжённых магистральных каналах с малыми расходами при низкой водообеспеченности следует внедрять усовершенствованные водоподпорные сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абакаров, А. Т. Повышение эксплуатационной надежности оросительных систем / А. Т. Абакаров // Агроинженерия. – 2008. – № 5/1. – С. 99-103.
2. Абдразаков, Ф. К. Фильтрация в каналах с земляным руслом и новые методы крепления откосов / Ф. К. Абдразаков, А. А. Рукавишников, О. В. Михеева, Е. Н. Миркина // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 6. – С. 107-114.
3. Абдулмажидов, Х. А. Выбор оптимального состава комплекса машин для очистки осушительного канала мелиоративной сети / Х. А. Абдулмажидов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 1(65). – С.391-399.
4. Алексеевский, Н. И. Пространственная изменчивость характеристик стока взвешенных наносов в бассейне селенги в период дождевых паводков / Н. И. Алексеевский, Е. В. Белозерова, Н. С. Касимов, С. Р. Чалов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2013. – №3. – С. 60-65.
5. Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1978. – 25 с.
6. Альдорадин, Г. Л. Пропускная способность водосливов практического треугольного поперечного профиля с закругленным оголовком: дис. ... канд. технических наук: 05.23.16 / Альдорадин Гутьеррес Лилиана Ингрид. – Москва, 2007. – 160 с.
7. Ашур, А. Пропускная способность водосливов практического профиля полигонального очертания при свободном и подтопленном истечении: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.16 / Ашур Амар. – Москва, 1993. – 24 с.
8. Баев, О. А. Обоснование методов гидравлических расчетов оросительных каналов / О. А. Баев // Мелиорация и гидротехника. – 2023. – Т. 13. – № 3. – С. 274-295.

9. Баев, О.А. Конструктивно-технологические решения для создания и восстановления покрытий оросительных каналов / О.А. Баев, В.Ф. Талалаева // Мелиорация и гидротехника. - 2022. - Т. 12. – №2. - С. 177-191.
10. Баев, О. А. Натурные обследования и анализ технического состояния оросительных каналов Республики Дагестан / О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Экология и водное хозяйство. – 2020. – № 3(06). – С. 61-72.
11. Барышников, Н.Б. Динамика русловых потоков / Н.Б. Барышников. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2016. – 342 с.
12. Беляков, П. В. Транспорт наносов в реках: зависимость параметров донных гряд от определяющих факторов/ П. В. Беляков, Г. Л. Гладков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 52-63.
13. Богомолов, А.И. Гидравлика: Учебник для гидротехн. специальностей вузов Изд. 2-е/ А.И. Богомолов, К. А. Михайлов. – перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1972. 648 с.
14. Великанов, М. А. Движение наносов/ М. А. Великанов. –Москва: изд-во и 1-я тип. Речиздата, 1948. – 210 с.
15. Вострова, Р. Н. Построение линии свободной поверхности при неравномерном установившемся движении воды: Учебно-методическое пособие / Р. Н. Вострова, О. К. Новикова, А. М. Ратникова. – Гомель, 2015. – 43 с.
16. Гидротехнические сооружения: Учебники и пособия для высш. с.-х. учебн. заведений / Н. П. Розанов, Я. В. Бочкарев, В. С. Лапшенков, Г. И. Журавлев, Г. М. Каганов, И. С. Румянцев. – Москва, 1978. – 647 с.
17. Гиргидов, А. А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации / А. А. Гиргидов // Magazine of Civil Engineering. – 2011. – № 3. – С.21-27.
18. Гладков, Г. Л. Параметры транспорта наносов в реках с побочным типом руслового процесса / Г. Л. Гладков, В. М. Католиков, П. В. Беляков// Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2022. – Т.14. – № 4. – С.493-506.

19. Глотко, А. В. Моделирование транспорта наносов и русловых переформирований в районе сормовского водозабора в условиях половодий, межени и при работе земснарядов / А. В. Глотко, Е. С. Васильева, В. В. Беликов, Н. М. Борисова // Природообустройство. – 2023. – № 2. – С. 86-91.
20. Годин, П. А. Обоснование мобильных подпорных сооружений комплексного назначения для малых водотоков: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.16 / Годин Павел Александрович. – Новочеркасск, 2013. – 19 с.
21. ГОСТ Р 58376-2019. Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Эксплуатация. Общие требования. – Дата введения 2019-07-01. – Москва: Стандартиформ, 2019. – 36 с.
22. Гришанин, К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979.л – 311 с.
23. Дерюгин, Г. К. Общий способ определения коэффициентов расхода прямого прямоугольного водослива при отсутствии бокового сжатия и свободном доступе воздуха под струю / Г. К. Дерюгин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. - 1971. - Т. 96. - С. 47-53.
24. Диалло Мамаду, Д. С. Совершенствование расчетов и конструкций сооружений водозаборных гидроузлов для рек Гвинеи: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.07 / Диалло Мамаду Дюльде Солокуре. – Москва, 1992. – 24 с.
25. Знаменская, Н. С. Донные наносы и русловые процессы / Н. С. Знаменская. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. – 191 с.
26. Зоммер, Т. В. Высота поднятия частиц донных и взвешенных наносов / Т. В. Зоммер, А. Г. Ходзинская // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 161-170.
27. Ищенко, А. В. Теоретическая модель водопроницаемости бетонопленочного противофильтрационного покрытия канала / А. В. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 93-97.

28. Калинин, А.В. Кривые расходов малых водотоков при изменении формы транспорта наносов / А.В. Калинин // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2021. – Т.7. – № 1. – С. 1-12.
29. Карапетян, М. А. Очистка мелиоративных каналов от наносов, заилений и растительности / М. А. Карапетян, Х. А. Абдулмажидов // Агроинженерия. – 2016. – № 5. – С. 13-17.
30. Караушев, А. В. Теория и методы расчета речных наносов / А. В. Караушев. – Ленинград, 1977. – 272 с.
31. Кашарин, Д. В. Гидравлические условия работы подпорно-аэрационных регулирующих сооружений для малых водотоков: дис. ... канд. техн. наук. 05.23.16. / Кашарин Денис Владимирович. – Москва, 1999. – 173 с.
32. Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев [и др.]. - М.: ЭКОЛИТ, 2011. - 312 с.
33. Клавен, А.Б. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса / А.Б. Клавен, З.Д. Копалиани: монография. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2011. – 504 с.
34. Косиченко, Ю. М. Оценка комплексной реконструкции и модернизации оросительных систем / Ю. М. Косиченко, А Ю. Гарбуз, О. А. Баев // Мелиорация и водное хозяйство. –2021– № 2. – С. 6-11.
35. Косиченко, Ю. М. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – Выпуск 8. – С. 1147-1161.
36. Косиченко, Ю. М. Обобщение данных по шероховатости русел каналов в земляном русле и облицовке // Экология и водное хозяйство. – 2020. – № 2(5). – С. 155-168.
37. Косиченко, Ю. М. Влияние эксплуатационных факторов на пропускную способность земляных русел каналов / Ю. М. Косиченко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2011. – № 3(03). – С.1-13.

38. Косиченко, Ю. М. Критерии оценки технического состояния и эксплуатационной надёжности оросительных систем и сооружений / Ю. М. Косиченко // Вестник аграрной науки Дона. – 2010. – № 3. – С. 120-126.
39. Косиченко, Ю. М. Критерии эксплуатационной надёжности оросительных систем каналов / Ю. М. Косиченко, Ю.И. Иовчу // Природообустройство. – 2008. – № 1. – С. 70-74.
40. Косиченко, Ю. М. Эксплуатационная надёжность оросительных систем /Ю. М. Косиченко, В.Н. Щедрин, А. В, Колганов. Москва, ФГНУ «Росинтерформагротех», 2005. – 392 с.
41. Кузнецов, Е. В. Разработка компенсационных мероприятий для возмещения ущерба водным биологическим ресурсам при отборе воды на орошение / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, Л. В. Кравченко, Н. С. Сасикова // International agricultural journal. – 2022. – № 2. – С. 789-810.
42. Кузнецов, Е. В. Повышение эффективности рыбозащитных сооружений на мелиоративных водозаборах нижней кубани / С. М. Драгунова, А. Е. Хаджиди, Е. В. Кузнецов, // Природообустройство. – 2020. – № 4. – С. 55-60.
43. Кузнецов, Е. В. Природно-ресурсный потенциал агроландшафтов и акватории степных рек Краснодарского края назначения / Е. В. Кузнецов, Ф. А. Алексеенко, С. А. Владимиров // Символ науки. – 2017. – № 03-2. – С. 154-157.
44. Кузнецов, Е. В. Методика разработки физической модели рыбозащитного сооружения на водозаборах для оптимизации водопользования / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 23 с.
45. Кузнецов, Е. В. Земельно-охранные системы для сохранения и восстановления плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, В. Н. Гельмиярова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2006. – № 23(7). – С. 1-6.
46. Кхарел, Б. Заиление оросительных каналов и истирание гидроагрегатов гидроэлектростанций в горных регионах / Б. Кхарел // Вестник государственного

университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. –2010. – выпуск 2. – С. 203-207.

47. Ларьков, В. М. Научное обоснование облегченных конструкций водопропускных низконапорных сооружений водохозяйственных объектов: автореф. дис... доктора технических наук: 05.23.07 / Ларьков Виктор Макарович. – Москва, 1998. – 57 с.

48. Ли, М. А. К вопросу борьбы с донными наносами на речных водозаборах / М. А. Ли // Гидрометеорология и экология. – 2009. – № 3. – С.185-190.

49. Миркина, Е. Н. Теоретические исследования фильтрации из оросительных каналов / Е. Н. Миркина, Ф. К. Абдразаков, А. А. Рукавишников, О. В. Михеева // Мелиорация и гидротехника. – 2024. – Т.14. – № 4. – С. 390-402.

50. Миркина, Е. Н. Применимость уровнемеров различных конструкций для регулирования стока на малых водохранилищах комплексного назначения / О. В. Михеева, Е. Н. Миркина, В. С. Мавзовин // Экономика строительства. – 2023. – № 2. – С. 80-89.

51. Миркина, Е. Н. Мониторинг состояния гидротехнических сооружений / Е. Н. Миркина, С. С. Орлова, О. В. Михеева, Т. А. Панкова // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 9. – С. 98-103.

52. Михайлович, В. С. Усовершенствованная конструкция сопрягающего сооружения для каналов мелиоративной сети предгорной и горной зон / В. С. Михайлович, Т. А. Иванович, С. Г. Александрович, Г. В. Дмитриевич // Экология и водное хозяйство. – 2019. – N1(01). – С. 46-63.

53. Ольгаренко, В. И. Комплексная оценка технического уровня гидромелиоративных систем / В. И. Ольгаренко, Г. В. Ольгаренко, И. В. Ольгаренко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. – № 6. – С. 8-11.

54. Ольгаренко, Г.В. Повышение эффективности использования водных ресурсов и перспективы развития водопользования на мелиоративных системах Северного Кавказа / Г.В. Ольгаренко [и др.]. - Москва: ООО «Русайнс», 2024. - 246 с.

55. Ольгаренко, Д. Г. Технический уровень и эффективность эксплуатации мелиоративных систем / Д. Г. Ольгаренко // Мелиорация и гидротехника. – 2015. – № 4(20). – С. 287-295.
56. Ольгаренко, И. В. Система интегральных показателей оценки эффективности водопользования/ В.И. Ольгаренко, И. В. Ольгаренко, С.Д. Дезюра, М.В. Герасименко, В. И. Ольгаренко // Мелиорация и гидротехника. – 2019. – № 1(33). – С. 139-152.
57. Ольгаренко, В. И. Экосистемные подходы к функционированию оросительных систем/ В. И. Ольгаренко, И. В. Ольгаренко, В.И. Ольгаренко // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 115-130.
58. Основные принципы и методы эксплуатации магистральных каналов и сооружений на них: монография / В. Н. Щедрин [и др.]; под общ. ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – 361 с.
59. Остякова, А. В. Оценка параметров руслового процесса в условиях изменения гидравлического режима / А. В. Остякова // Строительство: наука и образование. – 2022. – vol. 12. – Issue 2(44). – С. 119-134.
60. Офицеров А.С. Гидравлика водослива ОНТИ, 1938г.
61. Павловский, Н. Н. Гидравлический справочник: / Н. Н. Павловский. – Ленинград-Москва: ОНТИ НКТП СССР, 1937. – 890 с.
62. Палиивец, М. С. Гидравлический расчет пропускной способности квадратного водовыпуска при регулировании/ М. С. Палиивец // Природообустройство. – 2020. – № 3. – С. 716-78.
63. Патент 432469, РФ. Регулятор уровня воды в гидротехнических сооружениях / Е. П. Масягин, А. Г. Баев и Б. Н. Галаган; 1754789; заявл. 28.02.72; опубл. 15.06.74-Бюл. № 22.
64. Патент 127763, РФ. Плотина / Е. В. Васильева; 2012138254; заявл. 06.09.12; опубл. 10.05.13. -Бюл. № 15.
65. Патент № 2614798 Российская Федерация, МПК E02B 7/02 (2006.01). водоподпорная плотина: № 2016112813: заявл. 31.05.2016: опубл. 29.03.2017 /

Кузнецов Е. В., Серый Д. Г.; патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. – 10 с.

66. Патент 2621268 Российская Федерация, МПК E03B 3/32, E03B 3/06. Устройство для регулирования запасов пресных вод / О. Г. Дегтярева, В. Г. Дегтярев; заявитель и патентообладатель Кубанский ГАУ. – № 2016124446; заявл. 20.06.2016; опубл. 01.06.2017; Бюл. № 16.

67. Пашков, П. В. Повышение надежности эксплуатации насосных станций оросительных систем на основе совершенствования конструктивно – технологических параметров насосного оборудования: дис. ... канд. технических наук: 06.01.02 / Пашков Павел Викторович. – Москва, 2019. – 146 с.

68. Петраш, А.Д. Рекомендации по выбору величины коэффициентов расхода водосливов трапецеидального профиля/ А. Д. Петраш, В. А. Большаков // Гидротехническое строительство. - 1967. - № 10. - С. 38-40.

69. Петровская, О. А. Оптимизация методов расчета расхода донных наносов с учетом гидравлических параметров рек: дис. ... канд. технических наук: 25.00.27 / Петровская Ольга Андреевна. – Санкт-Петербург, 2018. – 252 с.

70. Потапов, Д. И. Развитие берегового откоса в русле трапецевидного канала / Д.И. Потапов, И.И. Потапов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 581-592.

71. Пхи, Л. Водосбросные сооружения с полигональными тонкостенными водосливами: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.07 / Пхи Лида. – Москва, 1992. – 21 с.

72. Ржаковская, П.С. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла / Г. Л. Гладков, П.С. Ржаковская// Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2023. – Т.15. – №3. – С. 344-358.

73. Сатункин, И. В. Теоретическое и эксплуатационное обоснование проектных решений по увеличению расхода воды в магистральном канале Черновской ОС / И. В. Сатункин, С. С. Кузьменко, А. И. Гуляев // Известия

Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022г. – № 4(96). – С. 184-189.

74. Сенчуков Г. А. Актуальные вопросы эффективности водопользования в мелиоративном комплексе современной России / Р. С. Масный, И. П. Абраменко, Г. А. Сенчуков / Экология и водное хозяйство. – 2023. – Т. 5. – № 2. – С. 1-13.

75. Слесарев, М. Ю. Состояние объектов мелиоративного строительства в бассейне малой реки Альма республики Крым / Л. Н. Фесенко, Т. В. Иванкова, М. Ю. Слесарев // Экология урбанизированных территорий. – 2022. – № 1. – С. 15-22.

76. СП 421.1325800.2018. Мелиоративные системы и сооружения. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 24 декабря 2018 г. N 854/пр и введен в действие с 25 июня 2019 г.–Москва: ФГБНУ "РосНИИПМ", 2019. – 45с.

77. СП 100.13330.2016. Мелиоративные системы и сооружения. Утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 953/пр: введены в действие 17.06.2017. – 346421, Новочеркасск: ФГБНУ "РосНИИПМ", 2017. – 231 с.

78. Тищенко, А. И. Рациональное использование водных ресурсов Крыма для целей мелиорации / А. И. Тищенко, А. А. Кузьмичев, Т. С. Пономаренко // Мелиорация и гидротехника. –2018. – № 1(29). – С. 188-207.

79. Ткачев, А. А. Реконструкция новотроицкого водохранилища в ставропольском крае / А. А. Ткачев, А. М. Анохин // Мелиорация и гидротехника, – 2021. – Т.11. – № 4. – С.302-315.

80. Ткачев, А. А. Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем / А. А. Ткачев, И. В. Ольгаренко// Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2021. – Т. 11. – № 2. – С. 1-23.

81. Ткачев, А. А. Специальные задачи гидравлики рек и каналов / Ю. Г. Иваненко, А. М. Бак-штанин, А. А. Ткачев, Д. Ю. Иваненко: монография. Москва: Ред. журн. «Механизация и электрификация сел. хоз-ва», 2020. – 220 с.
82. Ткачев, А. А. Расчет переходных процессов в бьефах магистрального канала при различных схемах регулирования для способа активного управления водораспределением / А. А. Ткачев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 3. – С. 86-90.
83. Ткачев, А. А. Расчет расходов воды в магистральных каналах для неустановившегося режима течения / А. А. Ткачев // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 3. – С. 42-46.
84. Филиппов, Е. Г. Гидравлика гидрометрических сооружений для открытых потоков / Е. Г. Филиппов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 288 с.
85. Фомичева, Н. Н. Гидравлическое моделирование при изучении пропуска льда через гидротехнические сооружения / Н. Н. Фомичева // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 11. – С. 298-300.
86. Фомичева, Н. Н. Мероприятия, обеспечивающие пропуск льда в весенний период через низконапорные гидроузлы. / Н. Н. Фомичева // Основы рационального природопользования. Материал международной научно-практической конференции. – Саратов: Наука, 2009. – тир. 100. – с. 144-147.
87. Хаджиди, А. Е. К вопросу повышения водообеспеченности Верхнекубанской оросительной системы Краснодарского края / А. Е. Новиков, А. Е. Хаджиди, И. Буханиф // Природообустройство. – 2024. – № 1. – С. 6-11.
88. Хаджиди, А. Е. Гидравлический расчет открытых русел и гидротехнических сооружений: учеб. пособие / С. Ю. Орленко, Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди – Краснодар: КубГАУ, 2009. – 75 с.
89. Хасан, М. Исследование водоподпорного сооружения для пропуска наносов на мелиоративных каналах / Е. В. Кузнецов, М. Хасан // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 3(75). – С. 195-202.

90. Хасан, М. Исследование коэффициента расхода при разных углах водосливных стенок к оси полигональных водосливов / Е. В. Кузнецов, М. Хасан, А. Алматар // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование, – 2022. – №2(66). – С. 353-364.

91. Хасан, М. Исследование водоподпорного сооружения для рационального использования водных ресурсов в мелиоративных каналах / М. Хасан // Структурные преобразования экономики территорий: в поиске социального и экономического равновесия: сборник научных статей по материалам IX - Международной научно-практической конференции. – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2022. – С. 45-48.

92. Хасан, М. Исследование коэффициента расхода водослива водоподпорного сооружения / М. Хасан // Economic aspects of industrial development in the transition to a digital economy: сборник научных статей по материалам IX – Международной научно-практической конференции – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2022. – С. 52-56.

93. Хасан, М. Исследование коэффициента расхода полигонального водослива / М. Хасан // Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика: сборник научных статей по материалам IX – Международной научно-практической конференции – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2022. – С. 59-62.

94. Хасан, М. Водослив практического профиля для рационального использования водных ресурсов / М. Хасан // Актуальные вопросы современной науки: теория, методология, практика, инноватика: сборник научных статей по материалам IX – Международной научно-практической конференции – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2022. – С. 30-33.

95. Хасан, М. Исследование водослива практического профиля для рационального использования водных ресурсов в оросительных каналах / М. Хасан // Современная наука в условиях модернизационных процессов: проблемы, реалии, перспективы: сборник научных статей по материалам IX – Международной научно-практической конференции – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2022. – С. 24-27.

96. Хасан, М. Исследование водоподпорного сооружения для рационального использования водных ресурсов в мелиоративных каналах / М. Хасан // Актуальные проблемы науки и техники: сборник научных статей по материалам IX – Международной научно-практической конференции – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2022. – С. 45-48.
97. Хасан, М. Исследование коэффициента расхода водослива водоподпорного сооружения на каналах / М. Хасан, А. Алматар, Е. В. Кузнецов, Л.В. Моторная // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2021. – №1(81). – С.110-116.
98. Хасан, М. Исследование коэффициента расхода полигонального водослива / М. Хасан, Е. В. Кузнецов // Экология речных ландшафтов: сборник статей по материалам III Международной Научной Экологической Конференции. Краснодар: КубГАУ (университет), 2019. – С. 329-334.
99. Хасан, М. Разработка сооружения для устойчивого забора воды на оросительную систему / Е. В. Кузнецов, М. Хасан // Сборник тезисов по материалам Международной конференции. – 2018. – 50 с.
100. Хецуриани, Е. Д. научно-технологическое обустройство водозаборных сооружений оросительных систем на юге России: дис. ... доктора технических наук: 06.01.02 / Хецуриани Елгуджа Демурович. – Новочеркасск, 2022. – 383 с.
101. Ходзинская, А. Г. Движение донных наносов и оценка деформации русел каналов: дис. ... канд. техн. наук. 05.14.09. / Ходзинская Анна Геннадьевна. – Москва, 1988. – 201 с.
102. Чугаев, Р. Р. Гидротехнические сооружения. Водосливные плотины / Р. Р. Чугаев. – Москва: Высшая школа, 1978. – 352 с.
103. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика/ Д.В. Штеренлихт. – М.: Колос С, 2007. – 655 с.
104. Шмакова, М. В. К вопросу о расчетах расхода взвешенных наносов / М. В. Шмаков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. - № 1. - С. 49-71.

105. Щедрин, В. Н. Подходы к формированию принципов создания современных мелиоративных систем и объектов / В. Н. Щедрин, В. И. Коржов, А. А. Белоусов // Мелиорация и гидротехника. – 2020. – № 3(39). – С. 170-188.
106. Щедрин, В. Н. Стратегические направления развития мелиоративного сектора в АПК / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев // Стратегические направления развития АПК стран СНГ: материалы XVI Междун. науч.-практ. конф., Барнаул, 27–28 февраля 2017 г. – Новосибирск: СФНЦА РАН, 2017. – Т. 2. – С. 167-169.
107. Щедрин, В. Н. Состояние и перспективы развития мелиорации земель на юге России // В. Н. Щедрин, Г. Т. Балакай // Мелиорация и гидротехника. – 2014. – № 3(15). – С. 1-15.
108. Щедрин, В. Н. Основные правила и положения эксплуатации мелиоративных систем и сооружений, проведения водоучета и производства эксплуатационных работ: монография / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, В. В. Слабунов. – В 2 ч. – Новочеркасск: Геликон, 2013. – 262 с.
109. Щедрин, В. Н. Перспективы развития мелиорации и водного хозяйства в Российской Федерации / В. Н. Щедрин, Г. А. Сенчуков // Мелиорация и гидротехника. – 2012. – № 1(05). – С. 1-9.
110. Щедрин, В. Н. Новая стратегия оросительных мелиораций - циклическое орошение / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, Т. П. Андреева // Вопросы мелиорации. – 2008. – № 3-4. – С. 7-20.
111. Щедрин, В. Н. Управление водопользованием на оросительных системах, современное состояние и пути совершенствования / В. И. Слюков, В. Н. Щедрин // Сб. науч. тр. ЮжНИИГиМ. - Новочеркасск, 2001. - С. 36-43.
112. Baev, O.A. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect / O.A. Baev, Y.M. Kosichenko, V.F. Silchenko // Magazine of Civil Engineering. - 2022.- No. 111 (3). - Art. No. 11109. - Pp. 1-10. DOI:10.34910/MCE.111.9.
113. Bogdanovich, A. E. Multi-scale modeling, stress and failure analyses of 3-D woven compo-sites / A. E. Bogdanovich // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41, № 20. – P. 6547-6590. DOI: 10.1007/s10853-006-0197-2.

114. Degtyareva, O. G. The base soil local sagging zones' influence assessment on the water retaining structure's operability / O. G. Degtyareva, S. M. Vasiliev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 11 Sept. – 2020. - Vol. 913, Is. 2. - Article number 022055. – DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022055.
115. Einstein, H. A. Bed-load transport as a probability problem / H. A. Einstein // Sedimentation. Fort Collins. Colorado, 1972. Pp. 1–105.
116. Houehanou, E. C. Assessment of slope stability by the Fellenius slice method: Analytical and numerical approach / K. J. Agbelele, M. F. Ahlinhan, E. C. Houehanou, A. W. Ali, H. C. Aristide // World Journal of Advanced Research and Reviews. –2023. –№ 18(02). – P. 1205-1214. DOI: 10.30574/wjarr.2023.18.2.0874.
117. Khetsuriani, E. D. Hydrological Studies on the River Don around the Alexandrov sky OSV Water-Intake Facilities / E.D. Khetsuriani, V.P. Kostyukov, E.G. Ugrovato-va // Procedia Engineering. - 2016. - Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016; Chelyabinsk; Russian Federation; 19 - 20 May 2016. - P. 2358–2363. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.322.7.
118. Kuznetsov, E. V. Study of a Radius of Action and Sprinkler Density Distribution/ E. V. Kuznetsov, A. E. Khadzhidi, A. Almatar, M. Hasan // Helix – The Scientific Explorer. – 2020 –Volume № 10 Issue № 02. – P. 112-116.134. DOI: 10.29042/2020-10-2-112-116.

Приложение 1

Таблица 1.1 – Коэффициент расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива с боковыми стенками водоподпорного сооружения к осям $\alpha=30^\circ$ и заложениями верховой грани $m_1=0, 1:1$ и $2:1$.

$\alpha=30^\circ$				
Длина водосливного фронта ($B=0,757$ м)				
№	расход	Напор над водоподпорным сооружением	Теоретический расход	Коэффициент расхода
	$Q, \text{ м}^3/\text{с},$	$h, \text{ м}$	$Q^*, \text{ м}^3/\text{с}$	m_n
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=0$				
1	0,00019	0,003	0,0006	0,344
2	0,00055	0,006	0,0016	0,350
3	0,00104	0,009	0,0029	0,363
4	0,00167	0,012	0,0044	0,378
5	0,00237	0,015	0,0062	0,384
6	0,00323	0,018	0,0081	0,399
7	0,00406	0,021	0,0102	0,398
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=1:1$				
1	0,00020	0,003	0,0006	0,356
2	0,00057	0,006	0,0016	0,364
3	0,00107	0,009	0,0029	0,373
4	0,00169	0,012	0,0044	0,384
5	0,00243	0,015	0,0062	0,395
6	0,00329	0,018	0,0081	0,407
7	0,00415	0,021	0,0102	0,407
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=2:1$				
1	0,00020	0,003	0,0006	0,371
2	0,00059	0,006	0,0016	0,381
3	0,00112	0,009	0,0029	0,392
4	0,00177	0,012	0,0044	0,402
5	0,00256	0,015	0,0062	0,416
6	0,00341	0,018	0,0081	0,421
7	0,00430	0,021	0,0102	0,421

Таблица 1.2 – Коэффициент расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива с боковыми стенками водоподпорного сооружения к осям $\alpha=45^\circ$ и заложениями верховой грани $m_1=0, 1:1$ и $2:1$.

$\alpha=45^\circ$				
Длина водосливного фронта ($B=0,563\text{м}$)				
№	расход	Напор над водоподпорным сооружением	Теоретический расход	Коэффициент расхода
	$Q, \text{м}^3/\text{с}$,	$h, \text{м}$	$Q^*, \text{м}^3/\text{с}$	m_n
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=0$				
1	0,00014	0,003	0,0004	0,336
2	0,00040	0,006	0,0012	0,344
3	0,00076	0,009	0,0021	0,357
4	0,00120	0,012	0,0033	0,368
5	0,00173	0,015	0,0046	0,377
6	0,00232	0,018	0,0060	0,385
7	0,00292	0,021	0,0076	0,385
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=1:1$				
1	0,00014	0,003	0,0004	0,346
2	0,00041	0,006	0,0012	0,357
3	0,00078	0,009	0,0021	0,368
4	0,00124	0,012	0,0033	0,378
5	0,00178	0,015	0,0046	0,388
6	0,00239	0,018	0,0060	0,397
7	0,00301	0,021	0,0076	0,397
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=2:1$				
1	0,00015	0,003	0,0004	0,370
2	0,00044	0,006	0,0012	0,377
3	0,00082	0,009	0,0021	0,384
4	0,00129	0,012	0,0033	0,394
5	0,00184	0,015	0,0046	0,402
6	0,00247	0,018	0,0060	0,410
7	0,00311	0,021	0,0076	0,410

Таблица 1.3 – Коэффициент расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива с боковыми стенками водоподпорного сооружения к осям $\alpha=60^\circ$ и с заложениями верховой грани $m_1=0, 1:1$ и $2:1$.

При $\alpha = 60^\circ$				
Длина водосливного фронта ($B=0,474\text{м}$)				
№	расход	Напор над водоподпорным сооружением	Теоретический расход	Коэффициент расхода
	$Q, \text{м}^3/\text{с},$	$h, \text{м}$	$Q^*, \text{м}^3/\text{с}$	m_n
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=0$				
1	0,00011	0,003	0,0003	0,326
2	0,00033	0,006	0,0010	0,334
3	0,00062	0,009	0,0018	0,347
4	0,00099	0,012	0,0028	0,357
5	0,00142	0,015	0,0039	0,367
6	0,00192	0,018	0,0051	0,378
7	0,00242	0,021	0,0064	0,379
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=1:1$				
1	0,00012	0,003	0,0003	0,340
2	0,00034	0,006	0,0010	0,351
3	0,00065	0,009	0,0018	0,360
4	0,00102	0,012	0,0028	0,370
5	0,00147	0,015	0,0039	0,381
6	0,00197	0,018	0,0051	0,388
7	0,00249	0,021	0,0064	0,389
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1=2:1$				
1	0,00012	0,003	0,0003	0,358
2	0,00036	0,006	0,0010	0,368
3	0,00067	0,009	0,0018	0,376
4	0,00106	0,012	0,0028	0,385
5	0,00153	0,015	0,0039	0,396
6	0,00204	0,018	0,0051	0,403
7	0,00257	0,021	0,0064	0,403

Таблица 2.1 – Зависимость коэффициента расхода m_n водоподпорного сооружения от h/L_n и h/B_n для $\alpha=30^\circ$ с заложением верховой грани $m_l=0$; 1:1 и 2:1

При $\alpha=30^\circ$					
L_n , м			P , м		B_n , м
0,0371			0.07		0,757
h, м	h/L_n	h/B_n	Коэффициент расхода (m_n)		
			$m_l=0$	$m_l=1:1$	$m_l=2:1$
0,003	0,081	0,004	0,344	0,356	0,371
0,006	0,162	0,008	0,350	0,364	0,381
0,009	0,243	0,012	0,363	0,373	0,392
0,012	0,323	0,016	0,378	0,384	0,402
0,015	0,404	0,020	0,384	0,395	0,416
0,018	0,485	0,024	0,399	0,407	0,421
0,021	0,566	0,028	0,398	0,407	0,421

Таблица 2.2 – Зависимость коэффициента расхода m_n водоподпорного сооружения от h/L_n и h/B_n для $\alpha=45^\circ$ с заложением верховой грани $m_l=0$; 1:1 и 2:1

При $\alpha=45^\circ$					
L_n , м			P , м		B_n , м
0,0267			0.07		0,563
h, м	h/L_n	h/B_n	Коэффициент расхода (m_n)		
			$m_l=0$	$m_l=1:1$	$m_l=2:1$
0,003	0,112	0,005	0,336	0,346	0,370
0,006	0,225	0,011	0,344	0,357	0,377
0,009	0,337	0,016	0,357	0,368	0,384
0,012	0,449	0,021	0,368	0,378	0,394
0,015	0,562	0,027	0,377	0,388	0,402
0,018	0,674	0,032	0,385	0,397	0,410
0,021	0,787	0,037	0,385	0,397	0,410

Таблица 2.3 – Зависимость коэффициента расхода m_n водоподпорного сооружения от h/L_n и h/B_n для $\alpha=60^\circ$ с заложением верховой грани $m_l=0$; 1:1 и 2:1

При $\alpha=60^\circ$					
L_n , м			P , м		B_n , м
0,0224			0.07		0,474
h , м	h/L_n	h/B_n	Коэффициент расхода (m_n)		
			$m_l=0$	$m_l=1:1$	$m_l=2:1$
0,003	0,134	0,006	0,326	0,340	0,358
0,006	0,268	0,013	0,334	0,351	0,368
0,009	0,402	0,019	0,347	0,360	0,376
0,012	0,536	0,025	0,357	0,370	0,385
0,015	0,670	0,032	0,367	0,381	0,396
0,018	0,804	0,038	0,378	0,059	0,403
0,021	0,938	0,044	0,379	0,060	0,403

Приложение 3

Таблица 3.1 – Отметки свободной поверхности воды в канале и его дна для водоподпорного сооружения при $\alpha = 30^\circ$

$\alpha = 30^\circ$								
Заложение верховой грани $m_1 = 0$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	х [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]
1	-50	8,13	9,13	10,1	11,14	12,17	13,14	14,13
2	-40	8,22	9,21	10,2	11,21	12,22	13,21	14,22
3	-30	8,3	9,29	10,3	11,3	12,29	13,29	14,3
4	-20	8,39	9,4	10,4	11,39	12,4	13,39	14,4
5	-10	8,42	9,42	10,43	11,42	12,42	13,42	14,41
6	-5	8,3	9,3	10,3	11,3	12,3	13,3	14,3
7	0	1,28	2,27	3,26	4,28	5,27	6,27	7,26
8	1	4,69	5,56	6,35	7,23	8,08	8,95	9,83
9	5	4,79	5,58	6,47	7,37	8,23	9,06	9,95
10	10	4,89	5,7	6,6	7,41	8,28	9,11	9,99
11	15	5,04	5,87	6,74	7,56	8,35	9,24	10,1
12	20	2,98	3,7	4,45	5,34	6,11	7,01	7,9
13	26	1,07	1,86	2,7	4,54	5,44	6,89	7,98
14	30	1,13	1,97	2,96	4,95	5,85	7,22	8,39
15	40	1,19	2,03	3,27	5,17	6	7,37	8,49
Заложение верховой грани $m_1 = 1:1$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	х [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]
1	-50	8,18	9,18	10,17	11,15	12,17	13,17	14,18
2	-40	8,24	9,23	10,25	11,24	12,24	13,24	14,24
3	-30	8,34	9,35	10,34	11,34	12,35	13,34	14,34
4	-20	8,43	9,42	10,43	11,42	12,42	13,43	14,42
5	-10	8,48	9,47	10,47	11,48	12,47	13,48	14,46
6	-5	2,12	3,12	4,12	5,12	6,12	7,12	8,12
7	0	1,27	2,27	3,25	4,25	5,26	6,25	7,26
8	1	4,69	5,53	6,35	7,58	8,47	9,52	10,64
9	5	4,8	5,6	6,59	7,65	8,55	9,57	10,7
10	10	4,9	5,7	6,66	7,79	8,65	9,63	10,78
11	15	4,99	5,76	6,96	7,97	8,94	9,76	10,82
12	20	2,88	3,67	4,73	5,72	6,62	7,54	8,6
13	26	1	1,76	3,84	5,66	6,88	8,77	9,67
14	30	1,15	1,9	4,18	5,86	7,17	9,15	10,06
15	40	1,2	2,07	4,34	5,98	7,29	9,25	10,16

Продолжение таблицы 3.1

Заложение верховой грани $m_1=2:1$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]
1	-50	8,16	9,18	10,16	11,18	12,16	13,17	14,16
2	-40	8,25	9,24	10,24	11,25	12,24	13,25	14,25
3	-30	8,39	9,38	10,38	11,39	12,39	13,38	14,38
4	-20	8,47	9,46	10,47	11,46	12,46	13,47	14,46
5	-10	8,52	9,51	10,52	11,52	12,52	13,52	14,52
6	-5	2,12	3,12	4,12	5,12	6,12	7,12	8,12
7	0	1,28	2,26	3,25	4,24	5,26	6,25	7,27
8	1	4,71	5,55	6,43	7,42	8,51	9,44	10,32
9	5	4,84	5,71	6,52	7,47	8,57	9,56	10,4
10	10	4,93	5,76	6,63	7,63	8,64	9,59	10,44
11	15	5,01	5,94	6,77	7,78	8,72	9,67	10,5
12	20	2,91	3,68	4,48	5,45	6,57	7,48	8,35
13	26	1,08	1,85	3,16	4,78	7,18	8,76	10,05
14	30	1,12	1,88	3,44	5,45	7,42	9,59	10,48
15	40	1,2	2,08	3,6	5,66	7,48	9,66	10,55

Таблица 3.2 – Отметки свободной поверхности воды в канале и его дна для водоподпорного сооружения при $\alpha=45^\circ$

при $\alpha=45^\circ$								
Заложение верховой грани $m_1=0$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]
1	-50	8,14	9,12	10,09	11,11	12,18	13,13	14,14
2	-40	8,21	9,2	10,2	11,21	12,21	13,22	14,21
3	-30	8,27	9,27	10,27	11,27	12,27	13,26	14,26
4	-20	8,36	9,35	10,35	11,35	12,35	13,35	14,35
5	-10	8,38	9,38	10,39	11,39	12,38	13,39	14,39
6	-5	8,3	9,3	10,3	11,3	12,3	13,3	14,3
7	0	1,27	2,26	3,27	4,27	5,26	6,27	7,25
8	1	4,45	5,28	6,25	7,15	8,03	8,9	9,78
9	5	4,59	5,34	6,25	7,27	8,18	9,01	9,9
10	10	4,64	5,4	6,4	7,37	8,23	9,06	9,94
11	15	4,78	5,64	6,59	7,51	8,3	9,19	10,05
12	20	2,67	3,45	4,26	5,15	6,06	6,96	7,85
13	26	1,16	2,07	3,61	4,82	6,19	7,54	8,73
14	30	1,19	2,31	3,88	5	6,5	7,83	9,14
15	40	1,33	2,51	4,05	5,2	6,7	8,02	9,22

Продолжение таблицы 3.2

Заложение верховой грани $m_1= 1:1$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	х [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]
1	-50	8,17	9,17	10,18	11,15	12,16	13,16	14,17
2	-40	8,23	9,22	10,24	11,23	12,24	13,23	14,23
3	-30	8,31	9,32	10,31	11,31	12,32	13,31	14,31
4	-20	8,4	9,4	10,4	11,4	12,4	13,4	14,4
5	-10	8,44	9,43	10,44	11,44	12,43	13,43	14,44
6	-5	2,12	3,12	4,12	5,12	6,12	7,12	8,12
7	0	1,27	2,27	3,26	4,26	5,26	6,26	7,26
8	1	4,51	5,34	6,3	7,2	8,08	8,95	9,83
9	5	4,64	5,39	6,3	7,32	8,22	9,06	9,95
10	10	4,7	5,46	6,46	7,41	8,29	9,11	9,99
11	15	4,83	5,69	6,64	7,56	8,34	9,23	10,09
12	20	2,71	3,51	4,31	5,1	6,11	7,01	7,89
13	26	1,22	2,12	3,66	4,86	6,25	7,6	8,78
14	30	1,23	2,37	3,94	5,04	6,56	7,88	9,18
15	40	1,39	2,57	4,09	5,25	6,74	8,08	9,3
Заложение верховой грани $m_1= 2:1$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	х [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]	у [см]
1	-50	8,15	9,19	10,14	11,18	12,15	13,15	14,16
2	-40	8,24	9,25	10,23	11,24	12,24	13,24	14,24
3	-30	8,35	9,35	10,35	11,36	12,34	13,35	14,35
4	-20	8,44	9,44	10,44	11,44	12,44	13,44	14,44
5	-10	8,49	9,48	10,48	11,48	12,47	13,48	14,47
6	-5	2,12	3,12	4,12	5,12	6,12	7,12	8,12
7	0	1,28	2,26	3,24	4,25	5,24	6,25	7,25
8	1	4,55	5,38	6,35	7,24	8,12	8,99	9,87
9	5	4,67	5,44	6,34	7,36	8,26	9,11	10
10	10	4,75	5,51	6,51	7,46	8,32	9,16	10,03
11	15	4,86	5,74	6,69	7,6	8,38	9,28	10,14
12	20	2,76	3,55	4,35	5,13	6,14	7,04	7,93
13	26	1,26	2,17	3,71	4,9	6,29	7,63	8,82
14	30	1,28	2,42	3,98	5,09	6,59	7,91	9,23
15	40	1,43	2,62	4,13	5,29	6,79	8,13	9,32

Таблица 3.3 – Отметки свободной поверхности воды в канале и его дна для усовершенствованных водоподпорных сооружений в виде подпорно-пропускных полигональных водосливов при $\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 60^\circ$								
Заложение верховой грани $m_l = 0$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]
1	-50	8,14	9,11	10,11	11,11	12,17	13,14	14,14
2	-40	8,21	9,22	10,22	11,2	12,21	13,2	14,22
3	-30	8,25	9,24	10,24	11,23	12,25	13,24	14,24
4	-20	8,33	9,33	10,33	11,33	12,33	13,33	14,33
5	-10	8,35	9,36	10,35	11,36	12,35	13,36	14,35
6	-5	8,3	9,3	10,3	11,3	12,3	13,3	14,3
7	0	1,25	2,24	3,25	4,24	5,25	6,23	7,24
8	1	4,3	5,14	6	6,91	7,84	8,65	9,65
9	5	4,43	5,18	6,03	7,03	7,89	8,74	9,72
10	10	4,48	5,31	6,17	7,13	7,98	8,84	9,81
11	15	4,61	5,44	6,28	7,23	8,06	8,88	9,89
12	20	2,51	3,31	4,18	5,04	5,81	6,7	7,64
13	26	1,08	1,94	2,82	3,99	5,17	6,45	7,59
14	30	1,13	2,12	3,15	4,31	5,51	6,85	8,01
15	40	1,29	2,28	3,31	4,51	5,61	6,92	8,21
Заложение верховой грани $m_l = 1:1$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]
1	-50	8,19	9,18	10,18	11,14	12,18	13,16	14,17
2	-40	8,25	9,24	10,24	11,23	12,24	13,23	14,23
3	-30	8,28	9,29	10,28	11,28	12,29	13,29	14,29
4	-20	8,37	9,36	10,36	11,37	12,36	13,37	14,37
5	-10	8,41	9,4	10,39	11,4	12,4	13,41	14,41
6	-5	2,12	3,12	4,12	5,12	6,12	7,12	8,12
7	0	1,27	2,26	3,25	4,27	5,25	6,28	7,25
8	1	4,35	5,19	6,05	6,96	7,89	8,7	9,68
9	5	4,48	5,23	6,09	7,08	7,94	8,8	9,75
10	10	4,52	5,35	6,23	7,18	8,03	8,89	9,86
11	15	4,66	5,49	6,34	7,29	8,11	8,91	9,94
12	20	2,56	3,36	4,24	5,09	5,85	6,73	7,66
13	26	1,11	1,99	2,87	4,04	5,22	6,48	7,61
14	30	1,18	2,17	3,2	4,35	5,56	6,9	8,05
15	40	1,33	2,33	3,37	4,57	5,66	6,97	8,26

Продолжение таблицы 3.3

Заложение верховой грани $m_1= 2:1$								
Уровень воды над водоподпорным сооружением h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]	y [cm]
1	-50	8,17	9,18	10,16	11,17	12,15	13,16	14,16
2	-40	8,24	9,25	10,24	11,24	12,23	13,24	14,24
3	-30	8,32	9,33	10,32	11,31	12,32	13,32	14,33
4	-20	8,42	9,41	10,4	11,4	12,41	13,42	14,42
5	-10	8,44	9,44	10,44	11,44	12,45	13,44	14,45
6	-5	2,12	3,12	4,12	5,12	6,12	7,12	8,12
7	0	1,25	2,26	3,27	4,25	5,25	6,27	7,26
8	1	4,4	5,23	6,08	6,99	7,95	8,73	9,73
9	5	4,53	5,28	6,13	7,12	7,99	8,84	9,77
10	10	4,57	5,4	6,28	7,21	8,06	8,94	9,88
11	15	4,71	5,54	6,39	7,33	8,14	8,96	9,98
12	20	2,59	3,41	4,27	5,12	5,9	6,78	7,71
13	26	1,14	2,04	2,9	4,09	5,25	6,52	7,66
14	30	1,22	2,2	3,24	4,39	5,61	6,93	8,09
15	40	1,37	2,37	3,42	4,62	5,69	7,01	8,32

Приложение 4

Таблица 4.1 – Экспериментальные значения коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива m_{Π}

α	Заложение верховой границы m_1	y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
		m_{Π}	h/L_{Π}	h/B_{Π}	$\sin\theta$	$\sin\alpha$	Re	We
1	2	3	4	5	6	7	8	9
30°	0	0,344	0,081	0,004	1	0,5	590,564	2,3544
		0,35	0,162	0,0079	1	0,5	1688,349	9,616
		0,363	0,243	0,0119	1	0,5	3216,245	22,526
		0,378	0,323	0,0159	1	0,5	5179,828	42,049
		0,384	0,404	0,0198	1	0,5	7287,725	67,028
		0,399	0,485	0,0238	1	0,5	9967,889	101,215
		0,398	0,566	0,0277	1	0,5	12284,51	137,315
	1/1	0,356	0,081	0,004	0,707	0,5	622,308	2,444
		0,364	0,162	0,0079	0,707	0,5	1793,079	10,05
		0,373	0,243	0,0119	0,707	0,5	3348,47	23,226
		0,384	0,323	0,0159	0,707	0,5	5297,798	42,802
		0,395	0,404	0,0198	0,707	0,5	7616,31	69,466
		0,407	0,485	0,0238	0,707	0,5	10277,7	103,849
		0,407	0,566	0,0277	0,707	0,5	12730,09	141,509
	2/1	0,371	0,081	0,004	0,454	0,5	664,576	2,566
		0,381	0,162	0,0079	0,454	0,5	1921,304	10,594
		0,392	0,243	0,0119	0,454	0,5	3630,521	24,749
		0,402	0,323	0,0159	0,454	0,5	5701,175	45,422
		0,416	0,404	0,0198	0,454	0,5	8280,079	74,509
		0,421	0,485	0,0238	0,454	0,5	10879,98	109,055
		0,421	0,566	0,0277	0,454	0,5	13456,81	148,474
45°	0	0,336	0,112	0,005	1	0,707	375,783	1,796
		0,344	0,225	0,011	1	0,707	1076,708	7,292
		0,357	0,337	0,016	1	0,707	2048,479	16,849
		0,368	0,449	0,021	1	0,707	3227,77	30,603
		0,377	0,562	0,027	1	0,707	4598,762	48,783
		0,385	0,674	0,032	1	0,707	6112,656	71,365
		0,385	0,787	0,037	1	0,707	7581,67	97,127
	1/1	0,346	0,112	0,005	0,707	0,707	390,529	1,831
		0,357	0,225	0,011	0,707	0,707	1132,591	7,486
		0,368	0,337	0,016	0,707	0,707	2131,074	17,216
		0,378	0,449	0,021	0,707	0,707	3355,009	31,28
		0,388	0,562	0,027	0,707	0,707	4779,29	49,896
		0,397	0,674	0,032	0,707	0,707	6381,088	73,239
		0,397	0,787	0,037	0,707	0,707	7914,113	99,685
	2/1	0,37	0,112	0,005	0,454	0,707	427,264	1,921
		0,377	0,225	0,011	0,454	0,707	1221,994	7,805
		0,384	0,337	0,016	0,454	0,707	2261,371	17,806
		0,394	0,449	0,021	0,454	0,707	3545,707	32,316
		0,402	0,562	0,027	0,454	0,707	5015,152	51,379
		0,41	0,674	0,032	0,454	0,707	6661,538	75,236
		0,41	0,787	0,037	0,454	0,707	8261,347	102,411

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
60°	0	0,326	0,134	0,006	1,000	0,866	290,5733	1,608
		0,334	0,268	0,013	1,000	0,866	835,6822	6,510
		0,347	0,402	0,019	1,000	0,866	1584,0050	14,923
		0,357	0,536	0,025	1,000	0,866	2489,5708	26,932
		0,367	0,670	0,032	1,000	0,866	3546,1888	42,714
		0,378	0,804	0,038	1,000	0,866	4764,2040	62,549
		0,379	0,938	0,044	1,000	0,866	5928,8805	85,227
	1:1	0,340	0,134	0,006	0,707	0,866	305,9642	1,640
		0,351	0,268	0,013	0,707	0,866	886,7393	6,667
		0,360	0,402	0,019	0,707	0,866	1659,0179	15,217
		0,370	0,536	0,025	0,707	0,866	2602,3266	27,461
		0,381	0,670	0,032	0,707	0,866	3721,3602	43,669
		0,388	0,804	0,038	0,707	0,866	4931,0980	63,580
		0,389	0,938	0,044	0,707	0,866	6141,2776	86,673
	2:1	0,358	0,134	0,006	0,454	0,866	326,2977	1,684
		0,368	0,268	0,013	0,454	0,866	940,7802	6,839
		0,376	0,402	0,019	0,454	0,866	1748,9411	15,579
		0,385	0,536	0,025	0,454	0,866	2735,0867	28,100
		0,396	0,670	0,032	0,454	0,866	3904,9317	44,695
		0,403	0,804	0,038	0,454	0,866	5169,9054	65,087
		0,403	0,938	0,044	0,454	0,866	6410,9136	88,545

Таблица 4.2 – Результаты математического анализа коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива по методике наименьших квадратов

$y=\ln z$	$x_1=\ln u_1$	$x_2=\ln u_2$	$x_3=\ln u_3$	$x_4=\ln u_4$	$x_5=\ln u_5$	$x_6=\ln u_6$	y^*x_1	y^*x_2	y^*x_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1,068	-2,515	-5,531	0,000	-0,693	6,381	0,856	2,685	5,906	0,000
-1,049	-1,822	-4,838	0,000	-0,693	7,432	2,263	1,910	5,073	0,000
-1,013	-1,416	-4,432	0,000	-0,693	8,076	3,115	1,435	4,490	0,000
-0,972	-1,129	-4,144	0,000	-0,693	8,553	3,739	1,097	4,029	0,000
-0,956	-0,906	-3,921	0,000	-0,693	8,894	4,205	0,866	3,749	0,000
-0,919	-0,723	-3,739	0,000	-0,693	9,207	4,617	0,665	3,437	0,000
-0,922	-0,569	-3,585	0,000	-0,693	9,416	4,922	0,525	3,304	0,000
-1,034	-2,515	-5,531	-0,347	-0,693	6,433	0,894	2,600	5,717	0,358
-1,010	-1,822	-4,838	-0,347	-0,693	7,492	2,308	1,839	4,884	0,350
-0,987	-1,416	-4,432	-0,347	-0,693	8,116	3,145	1,398	4,375	0,342
-0,958	-1,129	-4,144	-0,347	-0,693	8,575	3,757	1,081	3,970	0,332
-0,928	-0,906	-3,921	-0,347	-0,693	8,938	4,241	0,840	3,640	0,322
-0,900	-0,723	-3,739	-0,347	-0,693	9,238	4,643	0,651	3,365	0,312
-0,899	-0,569	-3,585	-0,347	-0,693	9,452	4,952	0,512	3,223	0,312
-0,992	-2,515	-5,531	-0,790	-0,693	6,499	0,942	2,495	5,486	0,783
-0,966	-1,822	-4,838	-0,790	-0,693	7,561	2,360	1,760	4,673	0,763

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-0,936	-1,416	-4,432	-0,790	-0,693	8,197	3,209	1,326	4,149	0,739
-0,912	-1,129	-4,144	-0,790	-0,693	8,648	3,816	1,029	3,779	0,720
-0,876	-0,906	-3,921	-0,790	-0,693	9,022	4,311	0,794	3,436	0,692
-0,865	-0,723	-3,739	-0,790	-0,693	9,295	4,692	0,625	3,233	0,683
-0,865	-0,569	-3,585	-0,790	-0,693	9,507	5,000	0,492	3,099	0,683
-1,090	-2,186	-5,234	0,000	-0,347	5,929	0,586	2,383	5,706	0,000
-1,068	-1,493	-4,541	0,000	-0,347	6,982	1,987	1,595	4,850	0,000
-1,030	-1,087	-4,135	0,000	-0,347	7,625	2,824	1,120	4,258	0,000
-1,000	-0,800	-3,848	0,000	-0,347	8,080	3,421	0,800	3,849	0,000
-0,974	-0,577	-3,625	0,000	-0,347	8,434	3,887	0,562	3,532	0,000
-0,955	-0,394	-3,442	0,000	-0,347	8,718	4,268	0,376	3,286	0,000
-0,955	-0,240	-3,288	0,000	-0,347	8,933	4,576	0,229	3,139	0,000
-1,061	-2,186	-5,234	-0,347	-0,347	5,968	0,605	2,320	5,554	0,368
-1,030	-1,493	-4,541	-0,347	-0,347	7,032	2,013	1,538	4,678	0,357
-1,000	-1,087	-4,135	-0,347	-0,347	7,664	2,846	1,088	4,137	0,347
-0,972	-0,800	-3,848	-0,347	-0,347	8,118	3,443	0,777	3,740	0,337
-0,946	-0,577	-3,625	-0,347	-0,347	8,472	3,910	0,546	3,430	0,328
-0,923	-0,394	-3,442	-0,347	-0,347	8,761	4,294	0,364	3,179	0,320
-0,923	-0,240	-3,288	-0,347	-0,347	8,976	4,602	0,222	3,036	0,320
-0,995	-2,186	-5,234	-0,790	-0,347	6,057	0,653	2,175	5,206	0,786
-0,974	-1,493	-4,541	-0,790	-0,347	7,108	2,055	1,455	4,425	0,769
-0,957	-1,087	-4,135	-0,790	-0,347	7,724	2,880	1,041	3,958	0,756
-0,932	-0,800	-3,848	-0,790	-0,347	8,173	3,476	0,745	3,586	0,736
-0,912	-0,577	-3,625	-0,790	-0,347	8,520	3,939	0,526	3,304	0,720
-0,893	-0,394	-3,442	-0,790	-0,347	8,804	4,321	0,352	3,072	0,705
-0,892	-0,240	-3,288	-0,790	-0,347	9,019	4,629	0,214	2,934	0,705
-1,121	-2,010	-5,063	0,000	-0,144	5,672	0,475	2,254	5,677	0,000
-1,095	-1,317	-4,369	0,000	-0,144	6,728	1,873	1,443	4,785	0,000
-1,058	-0,912	-3,964	0,000	-0,144	7,368	2,703	0,964	4,192	0,000
-1,029	-0,624	-3,676	0,000	-0,144	7,820	3,293	0,642	3,782	0,000
-1,002	-0,401	-3,453	0,000	-0,144	8,174	3,755	0,402	3,459	0,000
-0,973	-0,219	-3,271	0,000	-0,144	8,469	4,136	0,213	3,181	0,000
-0,971	-0,065	-3,117	0,000	-0,144	8,688	4,445	0,063	3,026	0,000
-1,080	-2,010	-5,063	-0,347	-0,144	5,723	0,495	2,170	5,465	0,374
-1,047	-1,317	-4,369	-0,347	-0,144	6,788	1,897	1,380	4,577	0,363
-1,021	-0,912	-3,964	-0,347	-0,144	7,414	2,722	0,931	4,046	0,354
-0,994	-0,624	-3,676	-0,347	-0,144	7,864	3,313	0,620	3,653	0,345
-0,964	-0,401	-3,453	-0,347	-0,144	8,222	3,777	0,386	3,328	0,334
-0,946	-0,219	-3,271	-0,347	-0,144	8,503	4,152	0,207	3,093	0,328
-0,943	-0,065	-3,117	-0,347	-0,144	8,723	4,462	0,061	2,940	0,327
-1,028	-2,010	-5,063	-0,790	-0,144	5,788	0,521	2,067	5,205	0,812
-1,001	-1,317	-4,369	-0,790	-0,144	6,847	1,923	1,318	4,372	0,790
-0,979	-0,912	-3,964	-0,790	-0,144	7,467	2,746	0,893	3,881	0,773
-0,955	-0,624	-3,676	-0,790	-0,144	7,914	3,336	0,596	3,510	0,754
-0,926	-0,401	-3,453	-0,790	-0,144	8,551	4,176	0,371	3,199	0,731
-0,909	-0,219	-3,271	-0,790	-0,144	8,766	4,484	0,199	2,973	0,718
-0,910	-0,065	-3,117	-0,790	-0,693	8,648	3,816	0,059	2,836	0,718

Таблица 4.3 – Результаты математического анализа коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива по методике наименьших квадратов

$y \cdot x_4$	$y \cdot x_5$	$y \cdot x_6$	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	x_5^2	x_6^2	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$
1	2	3	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,740	-6,814	-0,914	6,325	30,589	0,000	0,480	40,718	0,733	13,910	0,000	1,743
0,727	-7,793	-2,373	3,319	23,402	0,000	0,480	55,227	5,123	8,813	0,000	1,263
0,702	-8,181	-3,155	2,006	19,644	0,000	0,480	65,221	9,701	6,278	0,000	0,982
0,674	-8,314	-3,635	1,274	17,177	0,000	0,480	73,146	13,979	4,678	0,000	0,782
0,663	-8,503	-4,020	0,820	15,377	0,000	0,480	79,102	17,683	3,551	0,000	0,628
0,637	-8,463	-4,244	0,523	13,980	0,000	0,480	84,771	21,319	2,704	0,000	0,501
0,639	-8,678	-4,537	0,324	12,851	0,000	0,480	88,663	24,229	2,040	0,000	0,394
0,717	-6,651	-0,924	6,325	30,589	0,120	0,480	41,389	0,799	13,910	0,872	1,743
0,700	-7,564	-2,330	3,319	23,402	0,120	0,480	56,125	5,325	8,813	0,632	1,263
0,684	-8,012	-3,105	2,006	19,644	0,120	0,480	65,874	9,893	6,278	0,491	0,982
0,664	-8,213	-3,598	1,274	17,177	0,120	0,480	73,531	14,112	4,678	0,391	0,782
0,643	-8,296	-3,936	0,820	15,377	0,120	0,480	79,889	17,985	3,551	0,314	0,628
0,624	-8,314	-4,179	0,523	13,980	0,120	0,480	85,336	21,557	2,704	0,251	0,501
0,623	-8,499	-4,453	0,324	12,851	0,120	0,480	89,335	24,526	2,040	0,197	0,394
0,688	-6,446	-0,935	6,325	30,589	0,624	0,480	42,239	0,888	13,910	1,986	1,743
0,669	-7,303	-2,280	3,319	23,402	0,624	0,480	57,165	5,571	8,813	1,439	1,263
0,649	-7,674	-3,004	2,006	19,644	0,624	0,480	67,193	10,296	6,278	1,118	0,982
0,632	-7,886	-3,480	1,274	17,177	0,624	0,480	74,795	14,562	4,678	0,891	0,782
0,607	-7,905	-3,778	0,820	15,377	0,624	0,480	81,389	18,584	3,551	0,715	0,628
0,599	-8,037	-4,057	0,523	13,980	0,624	0,480	86,391	22,013	2,704	0,571	0,501
0,599	-8,219	-4,323	0,324	12,851	0,624	0,480	90,388	25,004	2,040	0,449	0,394
0,378	-6,464	-0,639	4,779	27,394	0,000	0,120	35,153	0,343	11,442	0,000	0,758
0,370	-7,457	-2,122	2,229	20,619	0,000	0,120	48,744	3,947	6,779	0,000	0,518
0,357	-7,851	-2,908	1,183	17,101	0,000	0,120	58,138	7,977	4,497	0,000	0,377
0,347	-8,083	-3,423	0,640	14,805	0,000	0,120	65,279	11,704	3,077	0,000	0,277
0,338	-8,218	-3,788	0,332	13,137	0,000	0,120	71,125	15,112	2,090	0,000	0,200
0,331	-8,323	-4,074	0,155	11,849	0,000	0,120	76,006	18,214	1,357	0,000	0,137
0,331	-8,529	-4,369	0,058	10,811	0,000	0,120	79,807	20,940	0,790	0,000	0,083
0,368	-6,332	-0,642	4,779	27,394	0,120	0,120	35,611	0,366	11,442	0,758	0,758
0,357	-7,244	-2,074	2,229	20,619	0,120	0,120	49,453	4,052	6,779	0,518	0,518
0,347	-7,667	-2,847	1,183	17,101	0,120	0,120	58,743	8,099	4,497	0,377	0,377
0,337	-7,891	-3,347	0,640	14,805	0,120	0,120	65,905	11,854	3,077	0,277	0,277
0,328	-8,017	-3,700	0,332	13,137	0,120	0,120	71,776	15,288	2,090	0,200	0,200
0,320	-8,090	-3,965	0,155	11,849	0,120	0,120	76,757	18,436	1,357	0,137	0,137
0,320	-8,289	-4,250	0,058	10,811	0,120	0,120	80,576	21,179	0,790	0,083	0,083
0,345	-6,026	-0,649	4,779	27,394	0,624	0,120	36,692	0,426	11,442	1,726	0,758
0,338	-6,926	-2,002	2,229	20,619	0,624	0,120	50,527	4,222	6,779	1,179	0,518
0,332	-7,392	-2,756	1,183	17,101	0,624	0,120	59,656	8,292	4,497	0,859	0,377
0,323	-7,617	-3,239	0,640	14,805	0,624	0,120	66,806	12,079	3,077	0,632	0,277
0,316	-7,767	-3,591	0,332	13,137	0,624	0,120	72,594	15,517	2,090	0,455	0,200
0,309	-7,858	-3,856	0,155	11,849	0,624	0,120	77,512	18,668	1,357	0,311	0,137
0,309	-8,049	-4,131	0,058	10,811	0,624	0,120	81,349	21,428	0,790	0,190	0,083
0,161	-6,360	-0,532	4,042	25,630	0,000	0,021	32,170	0,225	10,178	0,000	0,289
0,158	-7,369	-2,052	1,735	19,092	0,000	0,021	45,269	3,509	5,756	0,000	0,190

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,152	-7,792	-2,859	0,831	15,713	0,000	0,021	54,283	7,306	3,615	0,000	0,131
0,148	-8,046	-3,388	0,390	13,515	0,000	0,021	61,150	10,846	2,295	0,000	0,090
0,144	-8,188	-3,761	0,161	11,924	0,000	0,021	66,808	14,097	1,385	0,000	0,058
0,140	-8,237	-4,023	0,048	10,698	0,000	0,021	71,722	17,106	0,715	0,000	0,031
0,140	-8,434	-4,316	0,004	9,714	0,000	0,021	75,474	19,761	0,201	0,000	0,009
0,155	-6,179	-0,534	4,042	25,630	0,120	0,021	32,758	0,245	10,178	0,697	0,289
0,151	-7,110	-1,987	1,735	19,092	0,120	0,021	46,071	3,599	5,756	0,457	0,190
0,147	-7,567	-2,779	0,831	15,713	0,120	0,021	54,967	7,411	3,615	0,316	0,131
0,143	-7,815	-3,292	0,390	13,515	0,120	0,021	61,845	10,975	2,295	0,216	0,090
0,139	-7,924	-3,640	0,161	11,924	0,120	0,021	67,599	14,263	1,385	0,139	0,058
0,136	-8,041	-3,927	0,048	10,698	0,120	0,021	72,306	17,242	0,715	0,076	0,031
0,136	-8,227	-4,209	0,004	9,714	0,120	0,021	76,087	19,911	0,201	0,022	0,009
0,148	-5,951	-0,536	4,042	25,630	0,624	0,021	33,499	0,272	10,178	1,588	0,289
0,144	-6,851	-1,924	1,735	19,092	0,624	0,021	46,877	3,696	5,756	1,040	0,190
0,141	-7,310	-2,688	0,831	15,713	0,624	0,021	55,753	7,540	3,615	0,720	0,131
0,137	-7,556	-3,185	0,390	13,515	0,624	0,021	62,630	11,127	2,295	0,493	0,090
0,133	-7,660	-3,520	0,161	11,924	0,624	0,021	68,393	14,439	1,385	0,317	0,058
0,131	-7,773	-3,796	0,048	10,698	0,624	0,021	73,113	17,437	0,715	0,173	0,031
0,131	-7,975	-4,079	0,004	9,714	0,624	0,021	76,838	20,102	0,201	0,051	0,009

Таблица 4.4 – Результаты математического анализа коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива по методике наименьших квадратов

$x1*x5$	$x1*x6$	$x2*x3$	$x2*x4$	$x2*x5$	$x2*x6$	$x3*x4$	$x3*x5$	$x3*x6$	$x4*x5$	$x4*x6$	$x5*x6$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-16,048	-2,154	0	3,834	-35,292	-4,736	0	0	0	-4,423	-0,594	5,464
-13,539	-4,124	0	3,353	-35,951	-10,95	0	0	0	-5,151	-1,569	16,821
-11,439	-4,412	0	3,072	-35,794	-13,805	0	0	0	-5,598	-2,159	25,154
-9,653	-4,22	0	2,873	-35,446	-15,495	0	0	0	-5,928	-2,592	31,976
-8,054	-3,808	0	2,718	-34,876	-16,49	0	0	0	-6,165	-2,915	37,4
-6,659	-3,339	0	2,592	-34,425	-17,264	0	0	0	-6,382	-3,2	42,512
-5,359	-2,801	0	2,485	-33,755	-17,646	0	0	0	-6,527	-3,412	46,349
-16,18	-2,248	1,918	3,834	-35,582	-4,943	0,24	-2,231	-0,31	-4,459	-0,619	5,75
-13,649	-4,204	1,677	3,353	-36,242	-11,163	0,24	-2,598	-0,8	-5,193	-1,6	17,288
-11,496	-4,455	1,537	3,072	-35,972	-13,94	0,24	-2,814	-1,091	-5,626	-2,18	25,528
-9,679	-4,24	1,437	2,873	-35,539	-15,569	0,24	-2,973	-1,303	-5,944	-2,604	32,213
-8,094	-3,84	1,36	2,718	-35,049	-16,63	0,24	-3,099	-1,47	-6,195	-2,94	37,905
-6,681	-3,358	1,296	2,592	-34,54	-17,36	0,24	-3,203	-1,61	-6,403	-3,218	42,89
-5,379	-2,818	1,243	2,485	-33,883	-17,753	0,24	-3,277	-1,717	-6,551	-3,433	46,808
-16,345	-2,37	4,367	3,834	-35,945	-5,212	0,547	-5,132	-0,744	-4,505	-0,653	6,124
-13,775	-4,3	3,82	3,353	-36,576	-11,418	0,547	-5,97	-1,864	-5,241	-1,636	17,845
-11,61	-4,545	3,5	3,072	-36,331	-14,222	0,547	-6,473	-2,534	-5,682	-2,224	26,303
-9,762	-4,307	3,273	2,873	-35,843	-15,815	0,547	-6,829	-3,013	-5,995	-2,645	33,002
-8,17	-3,904	3,096	2,718	-35,377	-16,904	0,547	-7,124	-3,404	-6,253	-2,988	38,891
-6,722	-3,393	2,953	2,592	-34,753	-17,543	0,547	-7,34	-3,705	-6,443	-3,252	43,609
-5,411	-2,846	2,831	2,485	-34,082	-17,926	0,547	-7,507	-3,949	-6,59	-3,466	47,54

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-12,961	-1,281	0	1,815	-31,032	-3,066	0	0	0	-2,056	-0,203	3,473
-10,423	-2,966	0	1,574	-31,702	-9,021	0	0	0	-2,421	-0,689	13,871
-8,292	-3,071	0	1,434	-31,531	-11,68	0	0	0	-2,644	-0,979	21,535
-6,462	-2,736	0	1,334	-31,087	-13,163	0	0	0	-2,801	-1,186	27,641
-4,863	-2,242	0	1,257	-30,568	-14,09	0	0	0	-2,924	-1,348	32,784
-3,437	-1,683	0	1,193	-30,009	-14,691	0	0	0	-3,023	-1,48	37,207
-2,145	-1,099	0	1,14	-29,374	-15,046	0	0	0	-3,097	-1,587	40,88
-13,045	-1,323	1,815	1,815	-31,234	-3,167	0,12	-2,069	-0,21	-2,069	-0,21	3,611
-10,498	-3,005	1,574	1,574	-31,932	-9,141	0,12	-2,438	-0,698	-2,438	-0,698	14,156
-8,335	-3,095	1,434	1,434	-31,695	-11,768	0,12	-2,657	-0,987	-2,657	-0,987	21,812
-6,493	-2,754	1,334	1,334	-31,236	-13,247	0,12	-2,815	-1,194	-2,815	-1,194	27,951
-4,885	-2,255	1,257	1,257	-30,707	-14,172	0,12	-2,937	-1,356	-2,937	-1,356	33,125
-3,454	-1,693	1,193	1,193	-30,157	-14,78	0,12	-3,038	-1,489	-3,038	-1,489	37,618
-2,156	-1,105	1,14	1,14	-29,515	-15,132	0,12	-3,112	-1,596	-3,112	-1,596	41,31
-13,242	-1,427	4,133	1,815	-31,704	-3,417	0,274	-4,783	-0,516	-2,1	-0,226	3,955
-10,612	-3,068	3,586	1,574	-32,277	-9,331	0,274	-5,613	-1,623	-2,465	-0,712	14,606
-8,399	-3,131	3,266	1,434	-31,94	-11,908	0,274	-6,099	-2,274	-2,678	-0,998	22,241
-6,537	-2,78	3,038	1,334	-31,449	-13,373	0,274	-6,454	-2,744	-2,834	-1,205	28,407
-4,913	-2,271	2,862	1,257	-30,882	-14,278	0,274	-6,728	-3,111	-2,954	-1,366	33,563
-3,471	-1,704	2,718	1,193	-30,305	-14,872	0,274	-6,952	-3,412	-3,053	-1,498	38,039
-2,166	-1,112	2,596	1,14	-29,656	-15,22	0,274	-7,122	-3,655	-3,127	-1,605	41,75
-11,403	-0,955	0	0,728	-28,714	-2,404	0	0	0	-0,816	-0,068	2,693
-8,863	-2,468	0	0,629	-29,399	-8,185	0	0	0	-0,968	-0,27	12,604
-6,718	-2,465	0	0,57	-29,205	-10,714	0	0	0	-1,06	-0,389	19,914
-4,881	-2,056	0	0,529	-28,748	-12,107	0	0	0	-1,125	-0,474	25,753
-3,278	-1,506	0	0,497	-28,225	-12,965	0	0	0	-1,176	-0,54	30,688
-1,852	-0,904	0	0,471	-27,7	-13,528	0	0	0	-1,218	-0,595	35,027
-0,561	-0,287	0	0,448	-27,076	-13,855	0	0	0	-1,25	-0,64	38,619
-11,507	-0,995	1,755	0,728	-28,976	-2,504	0,05	-1,984	-0,172	-0,823	-0,071	2,831
-8,941	-2,499	1,515	0,629	-29,658	-8,29	0,05	-2,353	-0,658	-0,977	-0,273	12,877
-6,76	-2,482	1,374	0,57	-29,389	-10,792	0,05	-2,571	-0,944	-1,067	-0,392	20,184
-4,908	-2,068	1,275	0,529	-28,911	-12,179	0,05	-2,727	-1,149	-1,131	-0,477	26,052
-3,297	-1,514	1,197	0,497	-28,391	-13,041	0,05	-2,851	-1,309	-1,183	-0,543	31,051
-1,86	-0,908	1,134	0,471	-27,813	-13,581	0,05	-2,948	-1,44	-1,223	-0,597	35,308
-0,563	-0,288	1,081	0,448	-27,186	-13,907	0,05	-3,024	-1,547	-1,255	-0,642	38,922
-11,636	-1,048	3,998	0,728	-29,301	-2,638	0,114	-4,57	-0,411	-0,833	-0,075	3,016
-9,019	-2,533	3,45	0,629	-29,916	-8,401	0,114	-5,407	-1,518	-0,985	-0,277	13,163
-6,808	-2,504	3,13	0,57	-29,598	-10,885	0,114	-5,896	-2,168	-1,074	-0,395	20,503
-4,94	-2,082	2,903	0,529	-29,094	-12,263	0,114	-6,249	-2,634	-1,139	-0,48	26,399
-3,316	-1,524	2,727	0,497	-28,558	-13,122	0,114	-6,53	-3,001	-1,19	-0,547	31,425
-1,87	-0,913	2,583	0,471	-27,968	-13,658	0,114	-6,752	-3,297	-1,23	-0,601	35,705
-0,566	-0,289	2,461	0,448	-27,32	-13,974	0,114	-6,922	-3,54	-1,261	-0,645	39,301

Таблица 4.5 – Оценка точности рассчитанных значений коэффициента расхода усовершенствованного водоподпорного сооружения в виде подпорно-пропускного полигонального водослива m_n по формуле (2.13) и значений лабораторных коэффициента расхода

Измеренные данные (m_n)	Рассчитанные данные (m_n) по выражению (2.13)	относительная погрешность
1	2	3
0,344	0,338	0,016
0,35	0,35	0,003
0,363	0,364	0,002
0,378	0,38	0,004
0,384	0,384	0
0,399	0,398	0,002
0,398	0,394	0,011
0,356	0,351	0,013
0,364	0,365	0,001
0,373	0,374	0,005
0,384	0,386	0,005
0,395	0,397	0,003
0,407	0,407	0
0,407	0,404	0,008
0,371	0,368	0,008
0,381	0,383	0,006
0,392	0,397	0,011
0,402	0,406	0,011
0,416	0,421	0,011
0,421	0,423	0,005
0,421	0,42	0,004
0,336	0,334	0,006
0,344	0,346	0,0185
0,357	-0,009	0,009
0,368	-0,007	0,007
0,377	-0,002	0,002
0,385	0,003	0,003
0,385	0,009	0,009
0,346	0,007	0,007
0,357	-0,005	0,005
0,368	-0,008	0,008
0,378	-0,006	0,006
0,388	-0,002	0,002

Продолжение таблицы 4.5

1	2	3
0,397	0,004	0,004
0,397	0,01	0,01
0,37	0,009	0,009
0,377	-0,004	0,004
0,384	-0,007	0,007
0,394	-0,005	0,005
0,402	-0,001	0,001
0,41	0,004	0,004
0,41	0,01	0,01
0,326	0	0
0,334	-0,012	0,012
0,347	-0,012	0,012
0,357	-0,009	0,009
0,367	-0,003	0,003
0,378	0,003	0,003
0,379	0,009	0,009
0,34	0,004	0,004
0,351	-0,007	0,007
0,36	-0,008	0,008
0,37	-0,005	0,005
0,381	0	0
0,388	0,005	0,005
0,389	0,011	0,011
0,358	0,009	0,009
0,368	-0,003	0,003
0,376	-0,005	0,005
0,385	-0,002	0,002
0,396	0,003	0,003
0,403	0,008	0,008
0,403	0,014	0,014

Приложение 5

Таблица 5.1 – Результаты исследований процента песка, проходящего через водоподпорное сооружение для верхового откоса 1:1 и 2:1 и $\alpha = 30^\circ$.

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани m ₁ = 1:1							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость	Вес добавленного песка.10 ⁻³	Вес остаточного песка.10 ⁻³	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10 ⁻³	Расход песка	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h, (см)	м/с	кг	кг	кг	P _n (г/с)	П%
1	1.3	0,069	630	616	14	0,008	2,3
2	2.3	0,111		563	67	0,037	10,6
3	3.3	0,148		525	105	0,058	16,7
4	4.3	0,170		500	130	0,072	20,6
5	5.3	0,211		455	175	0,097	27,8
6	6.3	0,260		388	242	0,134	38,4
7	7.3	0,337		341	289	0,161	45,8
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани m ₁ = 2:1							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость	Вес добавленного песка.10 ⁻³	Вес остаточного песка.10 ⁻³	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10 ⁻³	Расход песка	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h, (см)	м/с	кг	кг	кг	P _n (г/с)	П%
1	1.3	0,078	630	611	19	0,011	3
2	2.3	0,122		552	78	0,043	12,4
3	3.3	0,163		513	117	0,065	18,6
4	4.3	0,182		479	151	0,084	24
5	5.3	0,233		428	202	0,112	32
6	6.3	0,302		363	267	0,148	42,4
7	7.3	0,409		306	324	0,180	51,4

Таблица 5.2 – Результаты исследований процента песка, проходящего через водоподпорное сооружение для верхового откоса– 0; 1:1 и 2:1 при $\alpha = 45^\circ$.

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1 = 0$							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h , (см)	м/с	кг	кг	кг	P_n (г/с)	П%
1	1.3	0,050	630	622	8	0,004	1,2
2	2.3	0,081		606	24	0,013	3,8
3	3.3	0,105		585	45	0,025	7,2
4	4.3	0,128		570	60	0,033	9,5
5	5.3	0,160		547	83	0,046	13,1
6	6.3	0,193		502	128	0,071	20,3
7	7.3	0,257		454	176	0,098	27,9

Продолжение таблицы 5.2

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани m ₁ = 1:1							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10 ⁻³	Вес остаточного песка. 10 ⁻³	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10 ⁻³	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h, (см)	м/с	кг	кг	кг	P _n (г/с)	П%
1	1.3	0,051	630	617	13	0,007	2
2	2.3	0,088		600	30	0,017	4,7
3	3.3	0,114		576	54	0,030	8,6
4	4.3	0,143		549	81	0,045	12,8
5	5.3	0,173		525	105	0,058	16,6
6	6.3	0,213		474	156	0,087	24,8
7	7.3	0,288		429	201	0,112	31,9
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани m ₁ = 2:1							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10 ⁻³	Вес остаточного песка. 10 ⁻³	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10 ⁻³	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h, (см)	м/с	кг	кг	кг	P _n (г/с)	П%
1	1.3	0,057	630	614	16	0,009	2,5
2	2.3	0,095		593	37	0,021	5,9
3	3.3	0,124		557	73	0,041	11,6
4	4.3	0,154		532	98	0,054	15,6
5	5.3	0,188		507	123	0,068	19,6
6	6.3	0,231		450	180	0,100	28,6
7	7.3	0,320		406	224	0,124	35,6

Таблица 5.3 – Результаты исследований процента песка, проходящего через водоподпорное сооружение для верхового откоса– 0; 1:1 и 2:1 при $\alpha = 60^\circ$.

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1 = 0$							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h , (см)	м/с	кг	кг	кг	P_n (г/с)	П%
1	1.3	0,046	630	625	5	0,003	0,8
2	2.3	0,075		622	8	0,004	1,2
3	3.3	0,098		607	23	0,013	3,6
4	4.3	0,109		594	36	0,020	5,7
5	5.3	0,140		575	55	0,031	8,8
6	6.3	0,167		552	78	0,043	12,4
7	7.3	0,227		495	135	0,075	21,4

Продолжение таблицы 5.3

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1= 1:1$							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h , (см)	м/с	кг	кг	кг	P_n (г/с)	П%
1	1.3	0,048	630	620	10	0,006	1,6
2	2.3	0,079		610	20	0,011	3,2
3	3.3	0,103		593	37	0,021	5,8
4	4.3	0,117		568	62	0,034	9,8
5	5.3	0,150		551	79	0,044	12,5
6	6.3	0,182		520	110	0,061	17,4
7	7.3	0,254		466	164	0,091	26,1
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1= 2:1$							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h , (см)	м/с	кг	кг	кг	P_n (г/с)	П%
1	1.3	0,050	630	616	14	0,008	2,2
2	2.3	0,084		598	32	0,018	5,1
3	3.3	0,111		564	66	0,037	10,5
4	4.3	0,129		552	78	0,043	12,4
5	5.3	0,163		530	100	0,056	15,8
6	6.3	0,201		499	131	0,073	20,8
7	7.3	0,293		452	178	0,099	28,2

Таблица 5.4 – Результаты исследований процента песка, проходящего через водоподпорное сооружение для верхового откоса– 0; 1:1 и 2:1 при $\alpha = 90^\circ$.

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани $m_1 = 0$							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h , (см)	м/с	кг	кг	кг	P_n (г/с)	П%
1	1.3	0,041	630	626	4	0,002	0,6
2	2.3	0,069		624	6	0,003	1
3	3.3	0,092		619	11	0,006	1,8
4	4.3	0,1		609	21	0,012	3,4
5	5.3	0,123		593	37	0,021	5,9
6	6.3	0,152		576	54	0,030	8,6
7	7.3	0,212		547	83	0,046	13,1

Продолжение таблицы 5.4

Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани m ₁ = 1:1							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка.10 ⁻³	Вес остаточного песка.10 ⁻³	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10 ⁻³	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h, (см)	м/с	кг	кг	кг	P _n (г/с)	П%
1	1.3	0,044	630	623	7	0,004	1,1
2	2.3	0,074		618	12	0,007	1,9
3	3.3	0,099		599	31	0,017	4,9
4	4.3	0,105		582	48	0,027	7,6
5	5.3	0,141		559	71	0,039	11,3
6	6.3	0,174		537	93	0,052	14,7
7	7.3	0,246		497	133	0,074	21,1
Водоподпорное сооружение с заложением верховой грани m ₁ = 2:1							
№	Напор над водоподпорным сооружением	Средняя скорость,	Вес добавленного песка.10 ⁻³	Вес остаточного песка.10 ⁻³	Вес песка, прошедшего через водоподпорное сооружение, 10 ⁻³	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водоподпорное сооружение
	h, (см)	м/с	кг	кг	кг	P _n (г/с)	П%
1	1.3	0,047	630	619	11	0,006	1,8
2	2.3	0,08		607	23	0,013	3,6
3	3.3	0,105		580	50	0,028	8
4	4.3	0,116		568	62	0,034	9,8
5	5.3	0,154		539	91	0,051	14,5
6	6.3	0,19		512	118	0,066	18,7
7	7.3	0,278		474	156	0,087	24,8

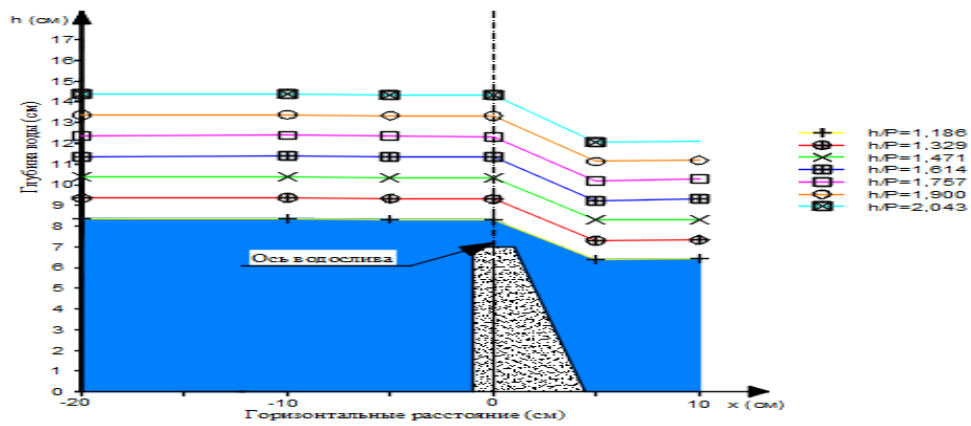


Рисунок 6.1 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha=45^\circ$ и $m_l=0$

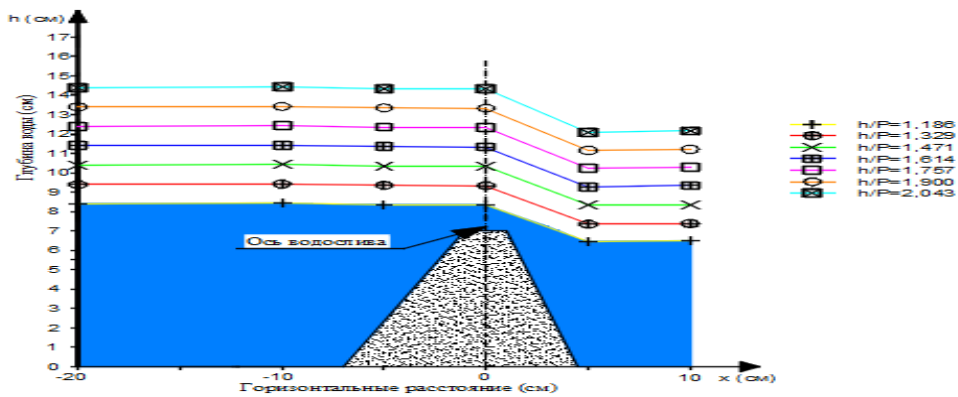


Рисунок 6.2– Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha=45^\circ$ и $m_l=1/1$

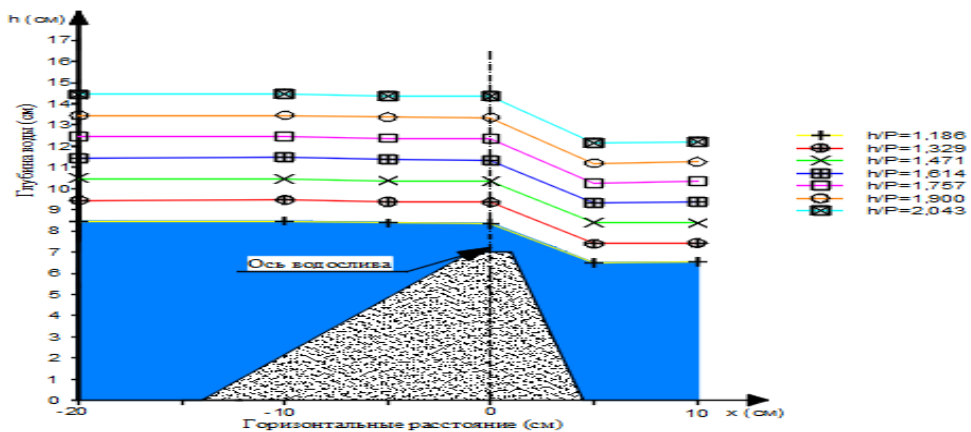


Рисунок 6.3 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha=45^\circ$ и $m_l=2/1$

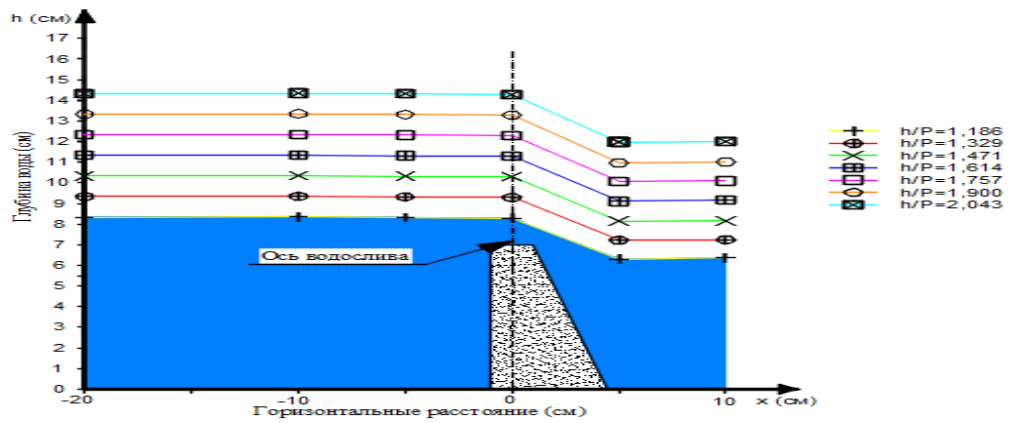


Рисунок 6.4 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 60^\circ$ и $m_1 = 0$

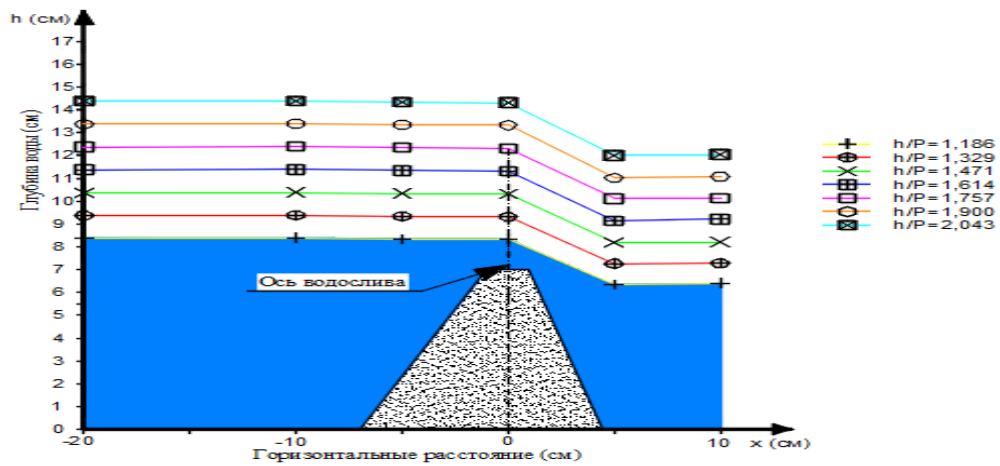


Рисунок 6.5 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 60^\circ$ и $m_1 = 1/1$

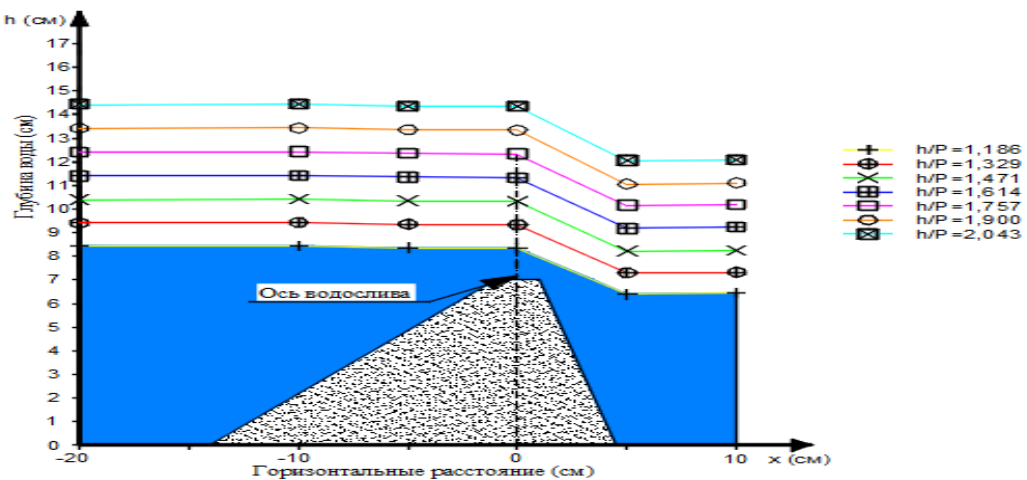


Рисунок 6.6 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 60^\circ$ и $m_1 = 2/1$

Приложение 7

Таблица 7.1 – Расчет длины кривой свободной поверхности (L_t) при $\alpha=45^\circ$

α	заложения верховой границы	b , м	h_0 , м	h_1 , м	R_{i0} , м	R_{i1} , м	$\mathcal{E}_0$	$\mathcal{E}_1$	i_{fcp}	L_t , м	L_t/h_0
45°	2:1	0,17	0,0815	0,0849	0,0416	0,0425	0,0817	0,0851	0,000008	5,750	70,557
			0,0919	0,0948	0,0442	0,0448	0,0924	0,0953	0,000023	5,052	54,974
			0,1014	0,1048	0,0462	0,0469	0,1022	0,1056	0,000039	6,101	60,168
			0,1118	0,1148	0,0483	0,0488	0,1130	0,1161	0,000059	5,645	50,488
			0,1215	0,1247	0,0500	0,0505	0,1233	0,1266	0,000088	6,404	52,711
			0,1315	0,1348	0,0516	0,0521	0,1343	0,1377	0,000131	7,314	55,617
			0,1416	0,1447	0,0531	0,0535	0,1469	0,1503	0,000249	9,648	68,137
	1:1	0,17	0,0817	0,0844	0,0417	0,0423	0,0818	0,0845	0,000007	4,558	55,788
			0,0917	0,0943	0,0441	0,0447	0,0921	0,0947	0,000020	4,509	49,172
			0,1018	0,1044	0,0463	0,0469	0,1025	0,1051	0,000033	4,639	45,568
			0,1115	0,1144	0,0482	0,0488	0,1126	0,1155	0,000051	5,373	48,187
			0,1216	0,1243	0,0500	0,0505	0,1232	0,1259	0,000076	5,305	43,629
			0,1316	0,1343	0,0516	0,0521	0,1340	0,1368	0,000112	5,803	44,093
			0,1417	0,1444	0,0531	0,0535	0,1460	0,1490	0,000202	7,432	52,449
	0	0,17	0,0814	0,0838	0,0416	0,0422	0,0815	0,0839	0,000007	4,052	49,783
			0,0912	0,0938	0,0440	0,0446	0,0915	0,0942	0,000017	4,483	49,156
			0,1009	0,1039	0,0461	0,0468	0,1015	0,1045	0,000028	5,285	52,382
			0,1111	0,1139	0,0482	0,0487	0,1120	0,1148	0,000041	5,085	45,772
			0,1218	0,1238	0,0501	0,0504	0,1231	0,1252	0,000064	3,891	31,946
			0,1313	0,1339	0,0516	0,0520	0,1332	0,1360	0,000092	5,343	40,697
			0,1414	0,1439	0,0531	0,0534	0,1448	0,1476	0,000162	6,199	43,843

Таблица 7.2 – Расчет длины кривой свободной поверхности (L_t) при $\alpha=60^\circ$

α	заложения верховой границы	b , м	h_0 , м	h_l , м	R_{i0} , м	R_{il} , м	$\mathcal{E}_0$	$\mathcal{E}_l$	i_{fcp}	L_t , м	L_t/h_0
60°	2:1	0,17	0,0817	0,0844	0,0417	0,0423	0,0818	0,0845	0,000006	4,556	55,760
			0,0918	0,0944	0,0441	0,0447	0,0922	0,0948	0,000018	4,493	48,939
			0,1016	0,1044	0,0463	0,0469	0,1022	0,1051	0,000031	4,970	48,913
			0,1117	0,1144	0,0483	0,0488	0,1126	0,1153	0,000042	4,912	43,971
			0,1215	0,1245	0,0500	0,0505	0,1229	0,1260	0,000066	5,742	47,256
			0,1316	0,1344	0,0516	0,0521	0,1337	0,1366	0,000099	5,823	44,250
			0,1416	0,1445	0,0531	0,0535	0,1461	0,1492	0,000209	8,067	56,969
	1:1	0,17	0,0819	0,0841	0,0417	0,0423	0,0820	0,0842	0,000006	3,712	45,325
			0,0918	0,094	0,0441	0,0446	0,0921	0,0943	0,000016	3,794	41,334
			0,1018	0,1039	0,0463	0,0468	0,1024	0,1045	0,000027	3,719	36,528
			0,1114	0,114	0,0482	0,0487	0,1121	0,1148	0,000035	4,662	41,848
			0,1218	0,124	0,0501	0,0504	0,1230	0,1252	0,000056	4,176	34,286
			0,1316	0,1341	0,0516	0,0520	0,1333	0,1359	0,000082	5,022	38,160
			0,1417	0,1441	0,0531	0,0535	0,1450	0,1477	0,000158	5,910	41,708
	0	0,17	0,0814	0,0835	0,0416	0,0421	0,0815	0,0836	0,000006	3,541	43,503
			0,0911	0,0936	0,0440	0,0445	0,0914	0,0939	0,000015	4,292	47,113
			0,1011	0,1035	0,0462	0,0467	0,1016	0,1040	0,000025	4,215	41,694
			0,1111	0,1136	0,0482	0,0486	0,1117	0,1143	0,000030	4,445	40,007
			0,1217	0,1235	0,0500	0,0503	0,1227	0,1246	0,000049	3,394	27,885
			0,1314	0,1336	0,0516	0,0519	0,1329	0,1351	0,000035	4,061	30,907
			0,1414	0,1435	0,0531	0,0534	0,1441	0,1464	0,000127	4,827	34,135

Таблица 8.1 – Расчет длины кривой свободной поверхности (L_k)

b , м	α	h_n , м	h_{max} , м	R_{in}	R_{imax}	Q	$\mathcal{E}_n$	$\mathcal{E}_{max}$	if_{cp}	L_k , м	$V\partial$, м ³
11,5	60°	0,49	1,12	0,44	0,90	3,89	0,9180	1,4424	0,00007	656,13	3348,34
		0,52	1,12	0,46	0,91	4,21	0,5144	1,1264	0,00007	650,20	3311,56
		0,52	1,14	0,46	0,92	4,31	0,5389	1,1442	0,00007	647,28	3294,76
		0,53	1,17	0,47	0,93	4,39	0,5464	1,1497	0,00007	666,99	3512,82
11,5	30°	0,49	1,13	0,44	0,91	3,89	0,5126	1,1363	0,00007	668,76	3473,18
		0,52	1,15	0,46	0,92	4,21	0,5369	1,1542	0,00007	662,58	3434,81
		0,52	1,17	0,46	0,93	4,31	0,5444	1,1696	0,00007	670,74	3536,49
		0,53	1,18	0,47	0,94	4,39	0,5503	1,1835	0,00007	679,19	3639,37

Приложение (9)

Таблица 9.1 – Сводный сметный расчет стоимости строительства «Проект орошаемого участка на площади 900 га ООО «Южная плодоовощная компания» Новокубанского района Краснодарского края»

№ пп	номера сметных расчетов и смет	Наименование глав, объектов, работ и затрат	Сметная стоимость, тыс. руб.				Общая сметная стоимость, тыс. руб.
			Строитель ных работ	Монтажных работ	Оборудование , мебель, инвентарь	Прочих	
1	2	3	4	5	6	7	8
Глава2. Основные объекты строительства							
1	02-01-01	материалы для строительных работ оросительной сети 1-я очередь 1-й этап (103 га)	17359,86	-	-	-	17359,86
2	02-01-02	материалы для строительных работ оросительной сети 1-я очередь 2-й этап (105 га)	12691,44	-	-	-	12691,44
3	02-01-03	материалы для строительных работ оросительной сети 1-я очередь 2-й этап (95 га)	6581,04	-	-	-	6581,04
4	02-01-04	строительство оросительной сети 1-я очередь 3-й этап сеть	47017,92		-	-	47017,92
5	02-01-05	строительство водозабора и насосной станции 1-й очереди	14569,02	549,18			15118,2
	Итого по главе 2. "Основные объекты строительства"		98219,28	549,18	-	-	98768,46

Таблица 9.2 – Расчет экономической оценки эффективности инвестиционного проекта

Годы	Показатели эффективности инвестиционного проекта, тыс. руб.								
	Инвестиции	Поступления от реализации	Ежегодные издержки	Ежегодный чистый доход	Коэффициенты дисконтирования	Ежегодный дисконтированный чистый доход	Суммарный чистый доход (ЧД, NV)	Чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV)	Норма дисконта
t	K	D	C	ЧД	α_t	ЧДД	Σ ЧД	Σ ЧДД	e
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0									0,08
1	49107,0	0,0	0,0	-49107,0	1,00	-49107,0	-49107,0	-49107,0	
2	49107,0	10000,0	3000,0	-42107,0	0,93	-38988,0	-91214,0	-88095,0	
3		22000,0	6600,0	15400,0	0,86	13203,0	-75814,0	-74891,9	
4		47500,0	14250,0	33250,0	0,79	26394,9	-42564,0	-48497,0	
5		47500,0	14250,0	33250,0	0,74	24439,7	-9314,0	-24057,3	
6		47500,0	14250,0	33250,0	0,68	22629,4	23936,0	-1427,9	
7		47500,0	14250,0	33250,0	0,63	20953,1	57186,0	19525,3	
8		47500,0	14250,0	33250,0	0,58	19401,1	90436,0	38926,3	
9		47500,0	14250,0	33250,0	0,54	17963,9	123686,0	56890,2	
10		47500,0	14250,0	33250,0	0,50	16633,3	156936,0	73523,5	
11		47500,0	14250,0	33250,0	0,46	15401,2	190186,0	88924,7	
12		47500,0	14250,0	33250,0	0,43	14260,4	223436,0	103185,1	
13		47500,0	14250,0	33250,0	0,40	13204,0	256686,0	116389,1	
14		47500,0	14250,0	33250,0	0,37	12226,0	289936,0	128615,1	
15		47500,0	14250,0	33250,0	0,34	11320,3	323186,0	139935,4	
16		47500,0	14250,0	33250,0	0,32	10481,8	356436,0	150417,2	
17		47500,0	14250,0	33250,0	0,29	9705,4	389686,0	160122,5	
18		47500,0	14250,0	33250,0	0,27	8986,4	422936,0	169109,0	
19		47500,0	14250,0	33250,0	0,25	8320,8	456186,0	177429,7	
20		47500,0	14250,0	33250,0	0,23	7704,4	489436,0	185134,2	
21		47500,0	14250,0	33250,0	0,21	7133,7	522686,0	192267,9	

Продолжение таблицы 9.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22		47500,0	14250,0	33250,0	0,20	6605,3	555936,0	198873,2	
23		47500,0	14250,0	33250,0	0,18	6116,0	589186,0	204989,2	
24		47500,0	14250,0	33250,0	0,17	5663,0	622436,0	210652,2	
25		47500,0	14250,0	33250,0	0,16	5243,5	655686,0	215895,7	



Рисунок 9.1 – Финансовый профиль проекта

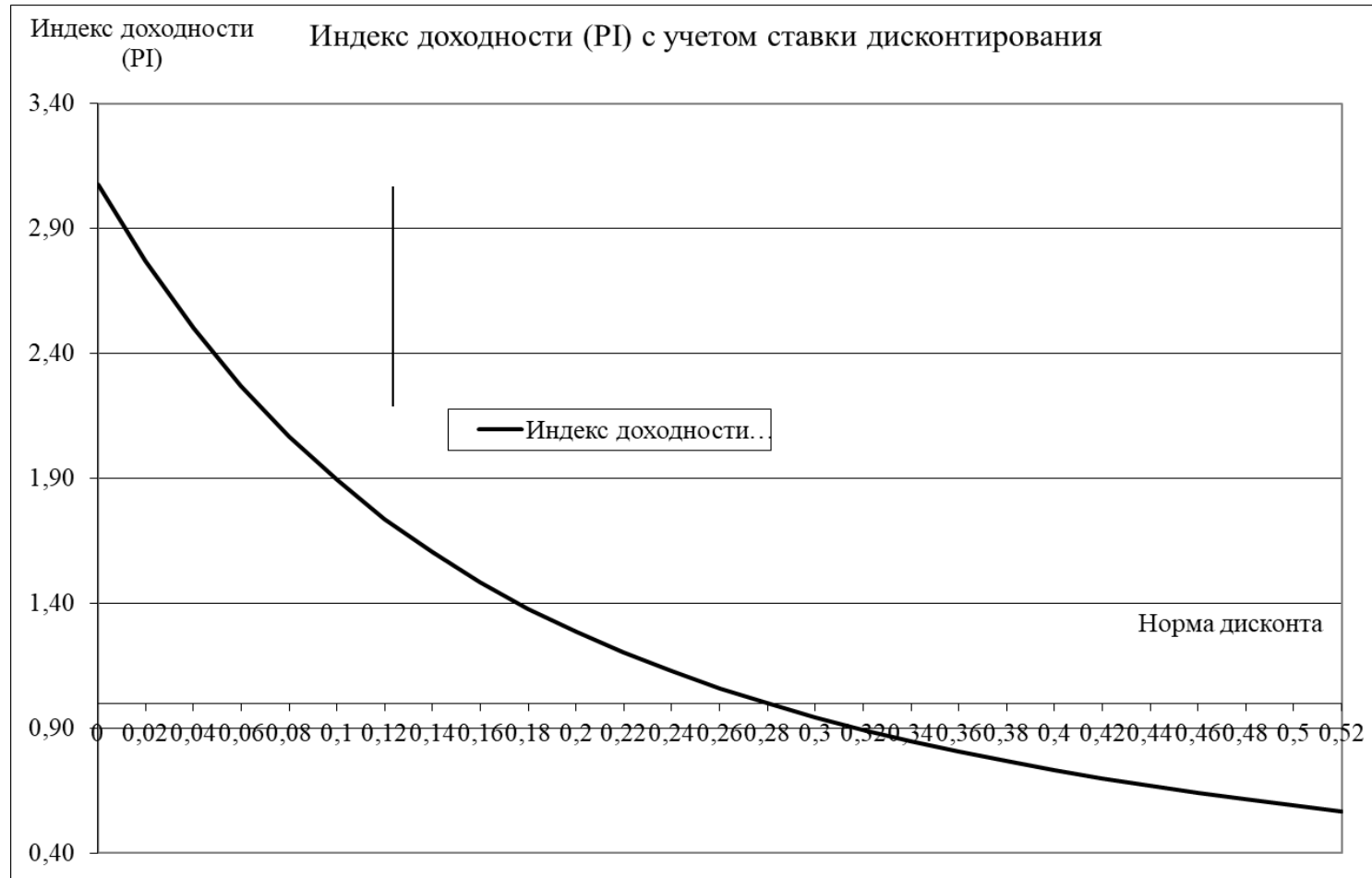


Рисунок 9.2 – Индекс доходности (PI) с учетом ставки дисконтирования

Приложение (10)

СОГЛАСОВАНО

Проректор по научной работе,
академик
ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ



А. Г. Кошасев

«15» 08 2024г.

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ФГБУ
«Управление «Кубаньмелиоводхоз»

К. с.-х.н.




Н. Н. Мальшова

«15» 08 2024г.

АКТ

о внедрении научных и практических результатов

Мы, нижеподписавшиеся, директор Новокубанского филиала ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз» Дуплякин П.В., зав. кафедрой гидравлики и с.-х. водоснабжения, д-р техн. н., профессор Хаджиди А.Е., профессор кафедры строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов, д-р техн. наук, профессор Кузнецов Е.В., старший преподаватель кафедры гидравлики и с.-х. водоснабжения Куртнезиров А.Н., аспирантка кафедры Хасан Марва, составили настоящий Акт внедрения научных исследований и практических результатов, выполненных сотрудниками КубГАУ.

Сотрудниками кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения разработан проект водоподпорного сооружения на Новокубанском канале для водообеспеченности оросительных систем, где аспиранткой Хасан Марва совместно с учёными кафедры были проведены натурные и лабораторные исследования в рамках диссертационной работы на тему: «Совершенствование водоподпорных сооружений для повышения надежности и эффективности эксплуатации оросительных систем при низкой водообеспеченности», которые улучшили эксплуатационные параметры Новокубанского канала, обеспечили гарантированный забор воды на оросительную систему ООО «Южная плодоовощная компания» Новокубанского района Краснодарского края.

Аспиранткой Хасан Марва в период 2020-2023 гг. были проведены опытные исследования по выбору адаптированной конструкции водосливного

оголовка полигонального водослива для модернизации существующего водоподпорного сооружения на Новокубанском канале.

В результате натурных исследований и лабораторных опытов ей удалось разработать более совершенную конструкцию водоподпорного сооружения, которое будет в дальнейшем использоваться для повышения водообеспеченности орошаемых земель при водозаборе из Новокубанского канала.

Директор Новокубанского филиала ФГБУ
«Управление «Кубаньмелиоводхоз»,

Дуплякин П.В.

Заведующий кафедрой гидравлики и с.-х. водоснабжения Куб ГАУ,
д-р. техн н., профессор

Хаджиди А.Е.

Профессор кафедры строительства и эксплуатации
водохозяйственных объектов КубГАУ,
профессор, д-р. техн н.

Кузнецов Е. В.

Старший преподаватель кафедры гидравлики
и с.-х. водоснабжения КубГАУ

Куртнезиров А. Н.

Аспирантка Куб ГАУ

Хасан Марва