

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

На правах рукописи



Хасан Марва

**ПОВЫШЕНИЕ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ ВОДОПОДПОРНЫМИ
СООРУЖЕНИЯМИ МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ**

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.
Условные обозначения.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛАХ.....	12
1.1 Основные требования к водоподпорным сооружениям на мелиоративных каналах.....	12
1.2 Анализ пропускной способности водосливов на мелиоративных каналах.....	16
1.3 Анализ движения наносов в мелиоративных каналах.....	21
1.4 Выводы по 1 главе.....	23
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПОЛИГОНАЛЬНОГО ВОДОСЛИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ	25
2.1 Обоснование размеров моделей водоподпорного сооружения, лабораторная установка для выполнения экспериментов.....	25
2.2 Разработка физических моделей водоподпорного сооружения в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания (водослив).....	27
2.3 Методика исследования коэффициента расхода полигонального водослива.....	32
2.4 Результаты исследования коэффициента расхода водослива.....	33
2.4.1 Метод ПИ-теоремы и методика наименьших квадратов (МНК) для анализа коэффициента расхода водослива	34
2.4.2 Влияние угла наклона верховой грани и боковых стенок на пропускную способность водосливов.....	37
2.5 Выводы по 2 главе.....	46

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАНОСОВ ЧЕРЕЗ ПОЛИГОНАЛЬНУЮ ФОРМУ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА МЕЛИОРАТИВНОМ КАНАЛЕ	48
3.1 Методика исследования конструкции водоподпорных сооружений.....	48
3.2. Методика исследования движения донных наносов у водоподпорных сооружений в канале	50
3.3 Расчетные зависимости движения наносов через водоподпорные сооружения	52
3.4 Результаты исследования движения наносов через водоподпорные сооружения.....	54
3.4.1 Исследование движения донных наносов на участке канала у водоподпорных сооружений	54
3.4.2 Исследование движения наносов через подпорные сооружения для повышения водообеспеченности мелиоративных каналов	58
3.5 Выводы по 3 главе	65
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА УРОВНИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ	67
4.1 Исследование уровня на водоподпорных сооружениях.....	67
4.1.1 Методика исследования	67
4.1.2 Исследование уровня на водосливе в мелиоративных каналах.....	68
4.1.3 Исследование уровня в ВБ мелиоративного канала у водоподпорного сооружения.....	72
4.1.4 Анализ опытных данных по размещению насосных станций в ВБ мелиоративных каналов.....	75
4.2. Выводы по 4 главе.....	79

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПОДПОРНОГО СООРУЖЕНИЯ НА НОВОКУБАНСКОМ КАНАЛЕ.....	81
5.1 Краткая характеристика водоподпорного сооружения на Новокубанском канале.....	81
5.2 Методика исследования.....	83
5.3 Исследование эффективности водоподпорного сооружения в створе водозабора Новокубанского канала.....	86
5.3.1 Обоснование эколого-экономической эффективности водоподпорного сооружения.....	91
5.4. Выводы по 5 главе.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	93
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....	95
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 8.....	135

Условные обозначения

B_n	-	длина водосливного фронта;
$\dot{\alpha}$	-	угол боковых стенок водослива к его оси;
$B_{\text{л}}$	-	ширина лотка;
h	-	напор над водосливом;
P_n	-	высота порога;
L_n	-	ширина по гребню водослива;
Q	-	расход;
m_n	-	коэффициент расхода;
Re	-	число Рейнольдса;
Fr	-	число Фруда;
v	-	скорость потока;
H	-	полный напор над водосливом;
h/B_n	-	относительная длина полигонального водосливного фронта;
h/L_n	-	относительная ширина порога водослива;
g	-	ускорение свободного падения;
P_n	-	расход песка, прошедшего через водослив;
НС	-	насосная станция;
ОС	-	оросительная система;
ВБ	-	верхний бьеф водослива;
НБ	-	нижний бьеф водослива;
$Pn\%$	-	процент песка, прошедшего через водослив;
P_n	-	расход песка, прошедшего через водослив;
$L_{\text{го}}$	-	длина гидравлической очистки от отложений наносов у водослива;
L_t	-	длина кривой свободной поверхности.

Примечание.

Буквенные обозначения, используемые редко, поясняются в тексте.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Водообеспечение – одна из важнейших проблем мировой экономики, в том числе энергетики, сельского хозяйства, промышленности и многих других отраслей народного хозяйства, которое является основой устойчивого развития при рациональном использовании водных ресурсов. Сток р. Кубань в летний период недостаточно обеспечивает водными ресурсами водные объекты. К такому объекту относится магистральный Новокубанский мелиоративный канал. Дефицит воды в канале может быть снижен за счет подпорных сооружений. Сток в канале имеет достаточно большое количество наносов, которые скапливаются у водоподпорных сооружений. Удаление наносов из каналов остаётся одной из сложных задач при водопользовании. Наносы уменьшают пропускную способность, приводят к деформации русел каналов, ведут к зарастанию кустарниковой и травянистой растительностью, что негативно сказывается на пропускной способности мелиоративных каналов. Глубины в каналах снижаются, что ведёт к не стабильному забору воды и, как, следствие, к нарушению эксплуатации водозаборных сооружений и насосных станций при подаче воды на орошение.

Для решения этих сложных комплексных задач разработано, исследовано и построено водоподпорное сооружение в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания (полигональный водослив) на Новокубанском канале для повышения водообеспеченности оросительных систем.

Диссертационное исследование проводилось в рамках тематического плана научно–исследовательских и опытно-конструкторских работ ФГБОУ ВО КубГАУ на 2021-2025 гг. по теме (рег. номер № 121032300049-7).

Разработанность темы диссертации. Из-за дефицита стока рек, малых уровней в каналах, низкой водообеспеченности оросительных систем интерес к проектированию водоподпорных сооружений возрастает. Значительный вклад в изучение и совершенствование водоподпорных сооружений в виде различных

водосливов внесли учёные: Н. Н. Павловский, В. А. Большаков, Р. Р. Чугаев, Е. Г. Филиппов и др. Движение наносов на водосливах и в каналах изложено в трудах ученых Е. А. Замарина, К. В. Гришанина, В. Н. Гончарова, А. Брамса, Н. С. Знаменской, М. П. Дю Буа и др. Изучению вопросов эксплуатации оросительных систем посвящены труды учёных: В. Н. Щедрина, В. И. Ольгаренко, М. С. Григорова, Ю. П. Полякова, Б. С. Маслова, Е. В. Кузнецова, Ю. А. Свистунова, А. А. Пахомова, И. В. Ольгаренко и др.

Научно-технические разработки учёных, которые в современных условиях затрагивают такие аспекты, как гидравлическая промывка и беспрепятственный пропуск наносов в нижний бьеф подпорных сооружений, местоположение всасывающих труб насосных станций на мелиоративных каналах и др., изучены недостаточно.

Цель исследования – Совершенствование водоподпорных сооружений в виде водослива полигональной формы практического профиля прямолинейного очертания, обеспечивающих повышение водообеспеченности на мелиоративных каналах.

Задачи исследований:

- усовершенствовать конструкцию водоподпорного сооружения, разработать физические модели подпорных сооружений в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания (водослив) для повышения водообеспеченности мелиоративных каналов;

- установить зависимости коэффициента расхода полигонального водослива от: угла наклона верховой грани; угла боковых стенок водослива к его оси; относительной шириной порога $h/L_{\text{п}}$ и относительной длиной водосливного фронта $h/B_{\text{п}}$;

- исследовать движение наносов через подпорное сооружение для выбора модели, обеспечивающей наибольший пропуск и гидравлическую промывку наносов;

- исследовать влияние водоподпорных сооружений на подпор уровня для повышения водообеспеченности и места размещения водозабора насосных станций на мелиоративных каналах;

- провести натурные исследования водоподпорного сооружения на Новокубанском канале у водозабора ООО «Южная плодоовощная компания» Новокубанского района Краснодарского края.

Достоверность научных результатов и выводов результатов исследований водоподпорных полигональных водосливов практического профиля подтверждается большим объёмом экспериментальных данных, полученных в лабораторных и натурных условиях, обработанных с использованием методов математического анализа и компьютерных программ.

Объект исследования – Водоподпорное сооружение на Новокубанском канале. Физические модели подпорных сооружений в виде водослива полигональной формы практического профиля прямолинейного очертания.

Предмет исследования – зависимости коэффициента расхода полигонального водослива и движения наносов в канале от гидравлических и геометрических параметров водоподпорного сооружения.

Область исследования – работа соответствует п. 21 «Разработка и исследование эффективности мероприятий и сооружений по управлению водными ресурсами и водохозяйственными системами мелиоративного назначения, а также водоохраных мероприятий и сооружений» паспорта научной специальности 4.1.5. Мелиорация, водяное хозяйство и агрофизика.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработано новое водоподпорное сооружение в виде водослива полигональной формы практического профиля прямолинейного очертания с усовершенствованными геометрическими формами, которое обеспечивает повышение водообеспеченности до 41% мелиоративных каналов;

- получены новые зависимости для определения коэффициента расхода водоподпорного сооружения в виде водослива полигональной формы практического профиля прямолинейного очертания на мелиоративном канале при

относительной ширине порога $0,081 \leq h/L_{\text{п}} \leq 0,938$ и длине полигонального водосливного фронта $0,004 \leq h/B_{\text{п}} \leq 0,044$;

- установлены гидравлические и геометрические параметры водоподпорного сооружения в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания с углом боковых стенок к оси водослива 30° и заложением верхового откоса 2:1, обеспечивающего пропуск наносов через порог в нижний бьеф до 51,4 % и очистку гидравлическими струями участка у порога длиной $(1,51-2,74) h$ на мелиоративном канале;

- получены новые зависимости процента пропуска наносов от скорости воды у подпорного сооружения в виде водосливов полигональной формы, с помощью, которых можно прогнозировать степень заиления Новокубанского канала.

Теоретическая значимость работы заключается в решении метода наименьших квадратов для обоснования коэффициента расхода водоподпорных сооружений в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработке новой конструкции водоподпорного сооружения в виде полигонального водослива практического профиля, повышающей водообеспеченность на участке длиной до 1 км в ВБ Новокубанского мелиоративного канала для оросительных систем;

- повышении уровня в Новокубанском канале, при котором наблюдается гарантированный водозабор в оросительную систему ООО «Южная плодоовощная компания»;

- создании гидравлических режимов водоподпорным сооружением, при которых можно управлять размерами участка очистки от наносов;

- получении новых формул для коэффициента расхода водоподпорного сооружения, которые позволяют расширить представление о его пропускной способности на мелиоративных каналах;

- определении длины участка канала с гарантированной обеспеченностью уровнями и расходами для устойчивого водозабора.

Положения, выносимые на защиту:

- физические модели полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания для повышения водообеспеченности и совершенствования водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах;
- новые формулы для коэффициента расхода полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания, учитывающие его основные геометрические и гидравлические параметры;
- движение наносов через подпорное сооружение для выбора модели, обеспечивающей наибольший пропуск и гидравлическую промывку наносов;
- исследование влияния водоподпорных сооружений на уровни для повышения водообеспеченности мелиоративных каналов и места размещения всасывающих труб НС;
- конструкция водоподпорного сооружения полигональной формы для гарантированной водообеспеченности водозабора ООО «Южная плодоовощная компания» на Новокубанском канале.

Реализация результатов научной работы. Диссертационная работа выполнена в лаборатории кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения ФГБОУ ВО Кубанского ГАУ и на водоподпорном сооружении Новокубанского мелиоративного канала в месте водозабора ООО «Южная плодоовощная компания» Новокубанского района Краснодарского края с 2018 по 2022 гг. (Акт внедрения от 15.08.2024г.).

Апробация исследований. Основные положения, выводы и исследования доложены и обсуждены на Международных научно-практических конференциях: международной конференции «Институциональные преобразования АПК России в условиях глобальных вызовов» (г. Краснодар, 2018 г.), III - IV Международной научной экологической конференции, Международной научной экологической конференции «Экология речных ландшафтов» (г. Краснодар, 2019-2020 гг.), IX – Международной научно-практической конференции «Economic aspects of industrial development in the transition to a digital economy» (г. Уфа, 2022 г.), IX – Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы

современной науки: теория, методология, практика, инноватика» (г. Уфа, 2022 г.), IX – Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2022 г.).

Публикации результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1 – в международных базах данных. Общий объем публикаций составляет 4,32 п. л., из них автору принадлежит 2,55 п. л.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы и приложений. Работа представлена на 135 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 11 таблиц, список литературы, включающий 137 источников.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю д.т.н. профессору Кузнецову Евгению Владимировичу за ценные рекомендации в написании диссертации, а также отдельную благодарность сотрудникам кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения за практическую помощь при проведении гидрометрических и топографических исследований на водоподпорном сооружении Новокубанского мелиоративного канала.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛАХ

1.1 Основные требования к водоподпорным сооружениям на мелиоративных каналах

Эксплуатации оросительных систем посвящены труды ученых В. Н. Щедрина, М. С. Григорова, В. И. Ольгаренко, Ю. П. Полякова, Б. С. Маслова, Е. В. Кузнецова, Ю. А. Свистунов, А. А. Пахомова, И. В. Ольгаренко, F. M. Eaton, J. D. Rhoades 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, 39, 48, 50, 58, 67, 69, 91, 92, 114, 125, 132, 134, 135].

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 водосливами [12, 31, 33, 34, 42, 47, 70, 119, 122, 136, 137]. Отложения наносов распределяется неравномерно: преимущественно их концентрация находится перед водосливами, в местах соединения канала с другими видами сооружений. [56, 64, 78].

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 [16, 20, 22, 34, 42, 50, 73, 88, 110]. 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 [28, 84, 85, 95, 102, 105-107, 117, 118, 129]. 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 водосливов (водослив) [8, 14, 49, 117, 124].

В настоящее время на оросительных каналах существует многообразие типов и конструкций водоподпорных сооружений, которые отображают специфику водохозяйственных задач, особенности мелиоративного и водохозяйственного строительства [14, 23, 24, 26, 61, 77, 80, 81, 86, 90, 95, 118]. 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 гидравлической 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, 61, 87, 108].

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 [12, 20, 38, 40, 43, 48, 70, 88, 89, 121].

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 водосливов [2, 5, 7, 8, 10]. 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.

Абдулмажидов Х. А. Карапетян М. А. [2, 42] 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 взгляд, это невыход 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 [15].

Накопление наносов у водоподпорных сооружений, расположенных на оросительных каналах, приводят к снижению глубин в каналах, не стабильному

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 [59, 111, 114]. 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. [114] 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 устанавливаются 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 [30, 33, 60, 65, 114].

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 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 [44, 45, 81, 93]. 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 водосливов на мелиоративных каналах

Водосливы практического профиля являются одними из важнейших сооружений, предназначенных для управления расходами воды и уровнями на мелиоративных каналах. Данные водосливы выгодно отличаются от других типов водосливов по следующим параметрам: по коэффициенту расхода, сопряжению бьефов, устойчивости в руслах в связи с водосливной формой и рядом других параметров. Коэффициент расхода водослива связан с пропускной способностью, а также со многими факторами, которые определяются конструктивными особенностями сооружения, гидравлическими условиями течения в каналах [9, 11, 15, 29, 32, 46, 66, 76, 103].

Пропускная способность водослива зависит от коэффициента расхода, 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 водослива; r – радиуса скругления входного ребра; коэффициента подтопления ε_n ; коэффициента бокового сжатия $\varepsilon_{сж} = 1 - 0,1\xi H_0/b$, где ξ – коэффициент формы береговых устоев.

Расход рассчитывается по общей зависимости:

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

Значения коэффициента расхода m в зависимости от относительной шириной порога водослива H/δ и величины заложения верхового откоса θ для водослива трапецевидной формы, при θ меньше 0,5 и относительной высоты водослива P/H больше 3 колеблются от 0,33 до 0,42 [9].

Большаков В. А. и Петраш А. Д. [74] предложили формулу (1.2) для определения коэффициента расхода для водослива трапециевидной 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 связаны 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 полигонального водосливного фронта на m .

Французский ученый Базен [9] проводил экспериментальные исследования 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 формы порога.

В результате Базен пришел к следующим выводам:

- значения коэффициента расхода увеличиваются с уменьшением сжатия потока над водосливом и заложением низовой грани, а также с увлечением заложения верховой грани;
- коэффициент расхода падает с уменьшением угла закругления, соединяющего горизонтальную часть порога с передней и задней частями 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 водосливов с криволинейной формой очертания для эксплуатации на мелиоративных каналах с большими расходами.

Академик Павловский Н. Н. [71] классифицировал водосливы по ширине и высоте порога и определил среднюю величину коэффициента расхода водослива 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 полигонального водослива практического профиля из-за наличия большого количества форм, отличных от классической прямоугольной формы.

Ашур Амар [19] исследовал 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 водослива $\frac{p}{H} = 0,25-3,0$ 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:

$$m = f\left(\frac{\Delta}{H}; \frac{p}{H}; \frac{\delta}{H}; З_B; З_H\right). \quad (1.3)$$

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

$$m = 0,48 \left(\frac{1}{1+\delta/H}\right)^{0,371} \cdot \left(\frac{1}{1+p/H}\right)^{-0,028} \cdot (З_B + 1)^{0,008} \cdot (З_H + 1)^{-0,001}. \quad (1.4)$$

Уравнение (1.4) связывает коэффициент расхода водослива с наклоном верхнего и низового откосов водослива, а также с высотой и шириной порога. Но как видно из уравнения (1.4) автор не изучал влияние углов боковых стенок водослива и длины полигонального водосливного фронта на коэффициент расхода.

Розанов Н. П. [19, 94] считает, что влияние двух последних факторов (углов наклона грани водослива в верхнем и нижнем бьефах) мало и ими можно пренебречь, но надо отметить, что автор рассматривал высокие водосливы.

Дерюгин Г. К. [29] изучил коэффициент расхода водослива практического профиля с тонкой стенкой и с широким порогом. По результатам экспериментов автор получил зависимости, позволяющие определять коэффициент расхода водослива графически с учетом рекомендаций Базена.

Смысловым В. В. и Гальпериной Р. С. [78] получена формула для определения коэффициента расхода в зависимости от относительной ширины порога $\frac{\delta}{H_0}$, в виде:

$$m = 10^d \left(\frac{\delta}{H} \right)^r, \quad (1.5)$$

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

В формуле (1.5) не учитывается явления длины водосливного фронта и угла боковых стенок на коэффициент расхода. Исследования проводилось с использованием различных форм водослива.

Филиппов Е. Г. [95] 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 водослива:

$$Q = 1,96 c_n b h^{1,5}, \quad (1.6)$$

где c_n – коэффициент скорости, который колебался от 1,003 до 1,217; b – ширина порога водослива Крампа; h – напор над водосливом.

Филиппов Е. Г. получил формулу для определения расхода расходомером САНИИРИ, расположенном на трапецидальном канале при относительной ширине порога h/P меньше двух, количестве наносов от 40 г/л до 50 г/л и заложении верхового откоса меньше 1:3, в виде:

$$Q = k[(b + tg \alpha)h]\sqrt{2gh}^{1,5}, \quad (1.7)$$

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

Филиппов Е. Г. пришел к выводу, связанному с пропуском наносов, и обнаружил, что водосливы практического профиля пропускают наносы через порог лучше, чем остальные типы водосливов и лотки. Это связано с тем, что наносы, переносимые с водой, приводят к увеличению скорости подхода, следовательно, к нарушению взаимодействия между расходами и напорами в верном бьефе. Среди изучаемых конструкций автор рекомендовал принимать треугольный водослив Крампа при верховом откосе с 1:2 и низовом откосе водослива 1:5. Следует отметить, что коэффициент скорости и коэффициент расхода в формуле (1.6) и (1.7) зависят от относительной высоты водослива $h/(h+P)$ и h/P , но при этом коэффициент расхода не учитывает явления угла верхового и низового откоса.

Однако, Петраш А. Д., Большаков В. А., Недрига В. П., Маккавеев В. М., Коновалов И. М. и др. [9, 16, 19, 74] в своих работах писали, что величина коэффициента расхода трапецеидального водослива практического профиля зависит от углов верхового и низового откоса.

В своей работе Кашарин Д. В. [44] 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 вышеизложенного следует, что полигональные водосливы практического профиля прямолинейного очертания, которые можно применять в виде подпорных сооружений недостаточно исследованы: не имеется данных о влиянии заложения откосов боковых стенок, углов боковых стенок к потоку, скорости набегающего потока, длине полигонального водосливного фронта на m и др.

1.3 Анализ движения наносов в мелиоративных каналах

Изучению движению наносов в каналах, на водосливах, галереях и шлюзах посвящены труды следующих ученых: Е. А. Замарина, А. Брамса, К. В. Гришанина, Дж. Фергюссона, Х. Прендеса, М. Баумгартена, Е. Мейер-Петера, В. Н. Гончарова, Г. И. Шамова, Ф. Ингелунда, Д. И. Кочерина, К. И. Россинского, В. Г. Глушкова, Н. С. Знаменской, М. П. Дю Буа, А. В. Караушева, С. М. Анцыферова, В. К. Дебольского, и др., которые внесли значительный вклад в развитие гидравлики, мелиорации и в другие области науки и практики [3, 6, 7, 13, 17, 22, 27, 28, 35, 36, 37, 41, 42, 43, 46, 56, 63, 64, 66, 68, 75, 78, 56, 100, 115, 116, 123].

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 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 [13, 75]. К основным типам наносов Эйнштейн Х. и Великанов М. А. добавили тип «придонных наносов» [17].

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 [17, 37, 133].

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 [6, 7, 17, 22, 36, 37, 43, 123].

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. [63] 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 [17, 77, 92].

Кхарел Б. [59] 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 насосные и приводят к износу футеровки насосных труб после 3 лет эксплуатации [23, 48, 89].

Хецуриани Е. Д. изучил сооружения водозаборов 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 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 [114].

Анализ движения наносов показывает, что нет достаточных исследований по изучению динамики наносов в мелиоративных каналах и их очистки у порогов водосливов. Эта проблема считается одной из важнейших задач ресурсосбережения для сельского хозяйства, так как наносы ухудшают качество источника воды, влияют на работу насосных станций, а также связаны с заилинием трубопроводов и каналов. В связи с этим снижается пропускная способность каналов, засоряются насадки дождевальных машин, выходят из строя фитинги, уменьшается КПД оросительной сети.

1.4 Выводы по 1 главе

- из литературных источников установлено, что эксплуатация оросительных систем в настоящее время нарушается дефицитом оросительной воды в реках и

каналах. Это связано со многими причинами, наиболее важной из которых является снижение качества и количества оросительной воды, где забираемая вода для нужд ирригации несёт большое количество наносов, мусора, синезелёных водорослей. Наиболее существенное влияние на работу насосных станций и эксплуатацию оросительных систем оказывают наносы, которые забивают всасывающие трубы и откладываются у подпорных сооружений;

- водосливы практического профиля прямолинейного очертания могут использоваться в качестве водоподпорных сооружений и являются наиболее адаптированными конструкциями на мелиоративных каналах;

- наиболее эффективный пропуск расходов и наносов в НБ на мелиоративных каналах будет обеспечиваться, когда водоподпорное сооружение будет в виде водослива практического профиля прямолинейного очертания;

- водоподпорные сооружения обеспечивают автоматический пропуск расходов в нижний бьеф на мелиоративных каналах, но при этом недостаточно исследовано влияние гидравлических и геометрических параметров профиля водослива практического профиля прямолинейного очертания на коэффициент расхода;

- в верхнем бьефе водосливы практического профиля прямолинейного очертания не имеют достаточных исследований об объемах донных отложений наносов и формах кривых уровня в ВБ каналов, а также о влиянии набегающих скоростей на полигональные водосливы практического профиля при пропуске наносов из ВБ в НБ мелиоративных каналов;

- при подъёме уровня у подпорных сооружений в мелиоративных каналах не имеется данных о повышении водообеспеченности.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ПОЛИГОНАЛЬНОГО ВОДОСЛИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ

Объектом исследования было совершенствование водоподпорного сооружения в виде полигонального водослива практического профиля, разработанного на кафедре гидравлики ФГБОУ ВО «Кубанского ГАУ» (Патент РФ №2614798, МПК E02B 7/02, 2016 г.) [72], которое было построено на Новокубанском мелиоративном канале Новокубанского района Краснодарского края. Исследование было направлено на совершенствование водоподпорных сооружений для повышения водообеспеченности мелиоративных каналов. Основными задачами исследования были: разработка физических моделей водоподпорных сооружений (моделей) в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания с различными геометрическими размерами и всесторонняя проверка моделей на пропускную способность.

2.1 Обоснование размеров моделей водоподпорного сооружения, лабораторная установка для выполнения экспериментов

Для совершенствования конструкций водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах были разработаны модели, из которых необходимо было выбрать модель, наиболее адаптированную по гидравлическим и геометрическим параметрам к условиям Новокубанского канала, которая пропускала бы наибольший расход и при этом обеспечивала бы максимальный пропуск наносов в нижний бьеф [100, 102, 104, 106, 113].

В экспериментах обеспечивались принципы подобия, выполнялось постоянство масштабов связи параметров природы (Н) и модели (М). Гидравлическое моделирование основано на общих законах подобия механических

систем. Гидравлические процессы, происходящие в натуре, воспроизводятся на модели с соблюдением следующих условий: геометрического подобия; подобия начальных и граничных условий; равенства критериев динамического подобия [21, 62, 96, 120].

Основным критерием динамического является критерий Ньютона, в качестве определяющих критериев подобия принимаются критерии Фруда, Л. Эйлера и Рейнольдса. Однако для одной и той же жидкости на модели и натуре одновременно нельзя удовлетворить равенство критериев Фруда, Эйлера и Рейнольдса [14, 95]. При изучении движения воды в мелиоративных каналах, как правило, принимается критерий Фруда [11, 14, 19], 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 на 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:

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

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

Для решения задач по исследованию коэффициента расхода полигонального водослива, влияющего на повышение водообеспеченности мелиоративных каналов разработаны физические модели с заложением откосов верхней грани и углами боковых стенок, которые наиболее распространены в мелиоративном

строительстве со следующими параметрами: относительной длины водосливного фронта $h/B_{\text{п}}$ и относительной ширины порога водослива $h/L_{\text{п}}$.

Физические модели были испытаны в лаборатории кафедры гидравлики и с. х. водоснабжения ФГБОУ ВО «Кубанского ГАУ».

Согласно исследованиям академика Н. Н. Павловского полигональные водосливы практического профиля являются низкими и средними по высоте с практическим профилем по ширине, так как высота порога водослива находится в диапазоне $0,5H-3H$, а ширина в пределах от $(0,5-0,67) H$ до $2H$, где H – полный напор.

Следует отметить, что геометрические параметры M конструкций получили при линейном масштабе 1:25 и вертикальном 1:5. Напоры и расходы в натуре были в диапазоне $0,08-0,53 \text{ м}^3/\text{с}$ и $0,34-13,44 \text{ м}^3/\text{с}$, соответственно. Модели были близки по масштабу к натурным сооружениям, также обеспечивалось условие теории динамического подобия. Значения чисел Фруда модели и натуре находились в пределах от 0,28 до 1,1.

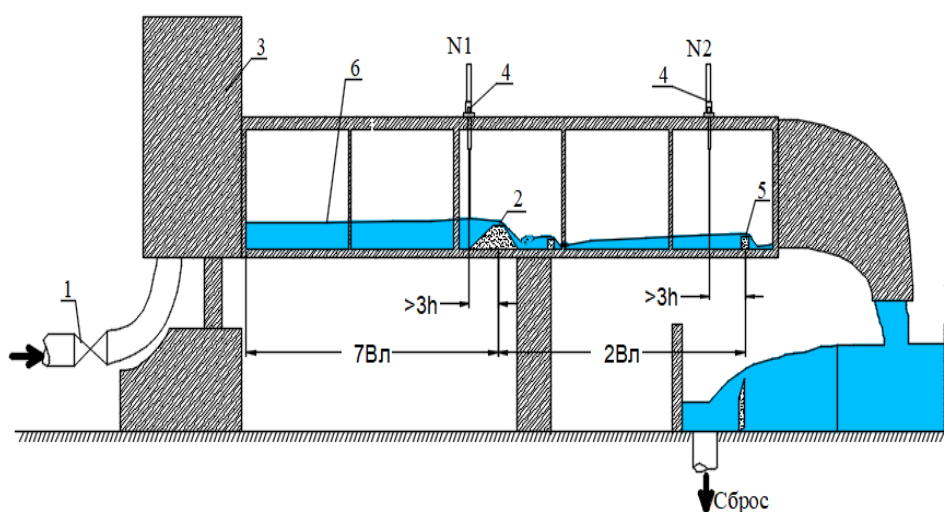
При обработке экспериментальных лабораторных данных использовали электронную таблицу Excel, а для инженерного представления и графиков - AutoCAD.

2.2 Разработка физических моделей водоподпорного сооружения в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания (водослив)

Для проведения лабораторных исследований по изучению коэффициента расхода полигонального водослива практического профиля выполнены 189 экспериментов на гидравлическом лотке длиной 4,5 м, шириной 0,43 м и высотой

1,0 м (рисунок 2.1). Для измерения расхода через водослив использовался тарированный водослив-водомер в конце лотка на расстояние 1 м от водослива.

Для исследования коэффициента расхода водоподпорного сооружения полигональной водосливной формы используется лабораторная установка (рисунок 2.1), в которую подаётся вода в лоток насосом через задвижку 1. Уклон дна лотка – постоянный 0,001. В лотке устанавливался исследуемый водослив 2 и водослив-водомер 5. При помощи шпигенмасштаба 4 с точностью 0,1 мм и водослива-водомера с точностью до 2,5 %, соответственно, измерялись уровни и расходы воды в опытах. Напор воды над гребнем полигонального водослива практического профиля и водослива-водомера измерялся в створах N_1 и N_2 на расстоянии $3H$ от их порогов. С помощью секундомера с точностью 0,01 с проводили измерения времени каждого лабораторного опыта [101].



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

Рисунок 2.1 – Лабораторная установка для исследования коэффициента расхода полигонального водослива (водоподпорного сооружения)

Исследуемая модель полигонального водослива в плане-дана на рисунке 2.2.

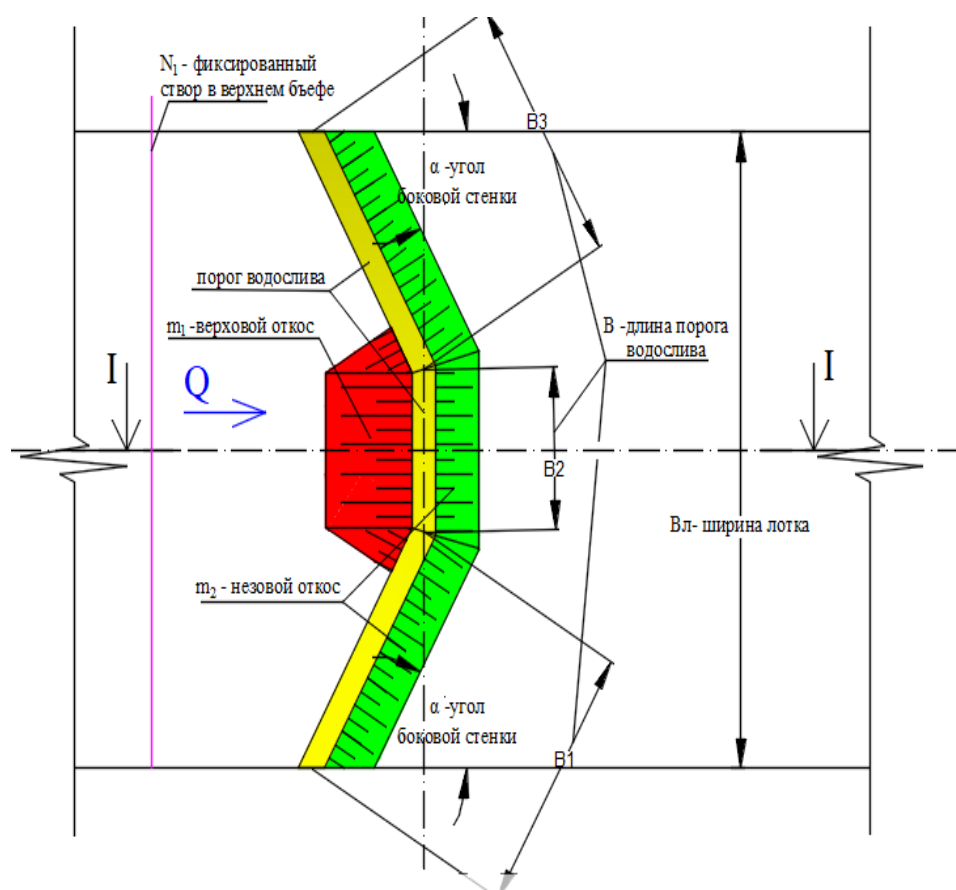
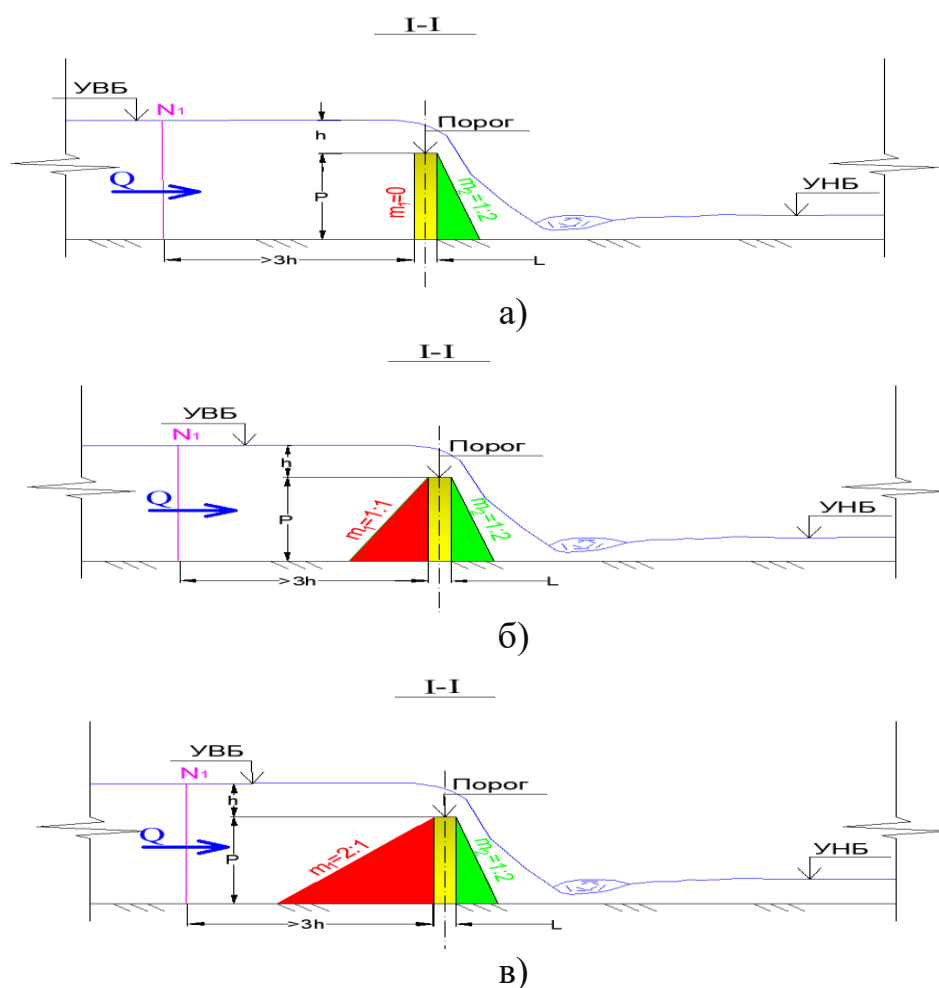


Рисунок 2.2 – Модель полигонального водослива в плане при $\alpha = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$

Модели водослива изготовлены с высотой порога $P=0,07$ м и низовой гранью с постоянным заложением откоса 1:2. Верховая грань менялась и была с откосами – 0; 1:1; 2:1, соответственно (рисунок 2.3 а, б, в).

Углы боковых стенок к оси водослива при изучении коэффициента расхода составляют $\alpha = 30; 45$ и 60 градусов, при этом форма боковых стенок водослива и их расположение в потоке создают высокую адаптированность к условиям пропускной способности расходов и наносов через водоподпорное сооружение в НБ мелиоративных каналов.



N_1 – створ для измерения напора; P – высота порога; h – напор; L – ширина по гребню водослива

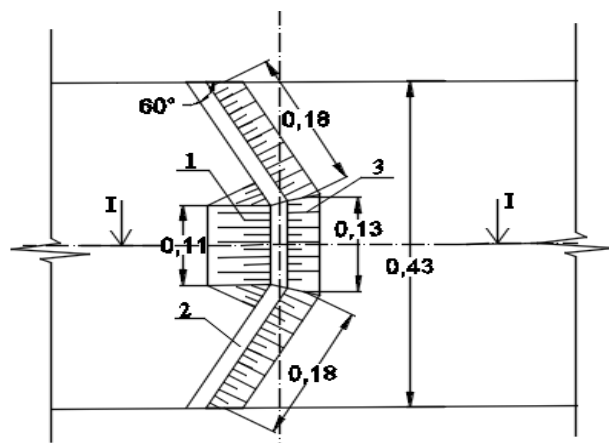
Рисунок 2.3 – Схемы водослива с заложением верхней грани: а) – $m_1=0$; б) – $m_1=1:1$; в) – $m_1=2:1$

Модели водосливов были сделаны из гипсовых материалов и покрашены 2-мя слоями эмалированной краски. На фото показано (рисунок 2.4) доведение модели водослива до опытного образца.

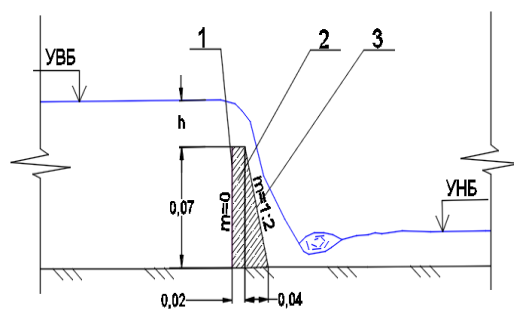


Рисунок 2.4 – Подготовка водоподпорного сооружения к исследованию в лаборатории КубГАУ

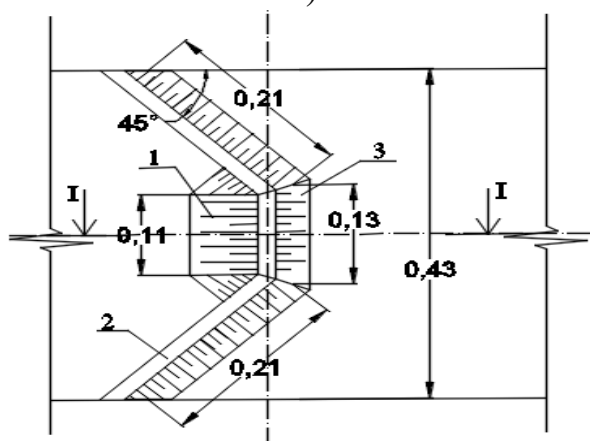
На рисунках (2.5 А; Б; В; Г; Д и Е) показаны планы и разрезы водоподпорного сооружения на лабораторной установке.



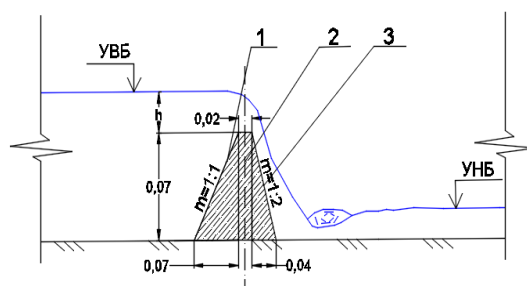
А)



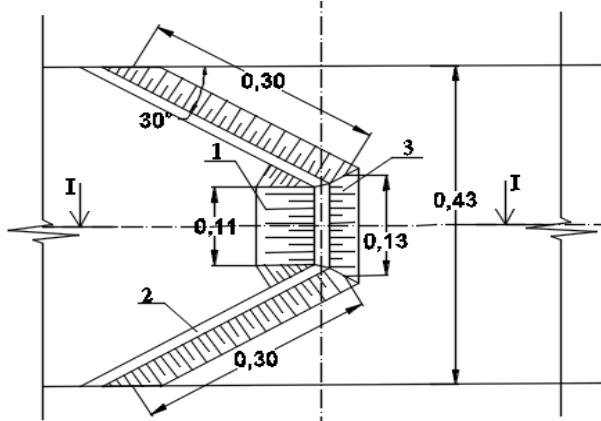
Г)



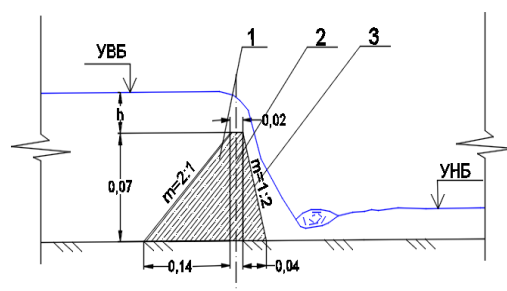
Б)



Д)



В)



Е)

1 – верховой откос; 2 – порог водослива; 3 – низовой откос

А) – план модели с углом боковых стенок к оси водослива $\alpha=60^\circ$, Б) – план модели с углом боковых стенок к оси водослива $\alpha=45^\circ$, В) – план модели с углом боковых стенок к оси водослива $\alpha=30^\circ$, Г) – разрез модели I-I с откосом $m_I=0$, Д) – разрез модели I-I с откосом $m_I=1:1$, Е) – разрез модели I-I с откосом $m_I=2:1$

Рисунок 2.5 – Варианты моделей водослива

2.3 Методика исследования коэффициента расхода полигонального водослива

При исследовании коэффициента расхода полигонального водослива решали следующей вопросы:

1) найти зависимость коэффициента расхода полигонального водослива практического профиля m_n от геометрической формы профиля и гидравлических параметров: относительной длины водосливного фронта h/B_n ; относительной ширины порога h/L_n для различных заложений верховой грани и углов боковых стенок водослива;

2) Выбрать наиболее адаптивную конструкцию полигонального водослива, которая обеспечивает наибольшую пропускную способность на мелиоративных каналах.

Методика проведения экспериментов на лабораторной установке выполнялась в следующей последовательности:

- разрабатывались варианты физических моделей полигональных водосливов, которые поочерёдно устанавливались в лоток;

- проводились измерения расхода водосливом-водомером, ошибка измерения расхода не превышала 2,5 %;

- для каждого опыта были проведены эксперименты в трёхкратной повторности;

- шаг измерения расхода составлял 7 единиц в диапазоне расхода $Q_{\phi} = 0,11 - 4,30$ л/с.

Фактический расход Q_{ϕ} вычисляется по формуле:

$$Q_{\phi} = C \cdot h^{\frac{5}{2}}, \quad (2.3)$$

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

Для определения пропускной способности водослива Q использовали формулу [9, 11, 14, 15, 20, 49, 73, 101, 109, 112]:

$$Q = m_{\Pi} \cdot B_{\Pi} \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}}, \quad (2.4)$$

где $(B_{\Pi} = B_1 + B_2 + B_3)$ – длина водосливного фронта полигонального водослива (рисунок 2.2), м; h –напор над водосливом, м.

Коэффициент расхода полигонального водослива m_{Π} определяется из формулы расхода (2.4):

$$m_{\Pi} = \frac{Q_{\Phi}}{B_{\Pi} \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2g}} \rightarrow m_{\Pi} = \frac{Q_{\Phi}}{Q^*}, \quad (2.5)$$

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

Исследование m_{Π} водослива проводилось при расходе $Q_{\Phi} = 0,11 - 4,30$ л/с, напоре над водосливом $h = 3 \cdot 10^{-3} - 21 \cdot 10^{-3}$ м. Относительная ширина порога водослива h/L_{Π} изменялась в диапазоне 0,081 - 0,938, относительная длина водосливного фронта h/B_{Π} была в диапазоне 0,004-0,444 и углах 30°; 45° и 60° при Re , которые были в диапазоне 590,564 - 13456,808; 375,783 - 8261,347 и 290,573 - 6410,914, соответственно, и Fr 0,7322 - 0,8424; 0,5694 - 0,6681 и 0,4781 - 0,5737, соответственно.

2.4 Результаты исследования коэффициента расхода

Лабораторные опыты для изучения m_{Π} выполнялись на модели полигональных водосливов практических профилей с разными заложениями верховой грани m_I и углами боковых стенок полигонального водослива к их осям α .

Для определения значения коэффициента расхода водослива m_{Π} использовали формулу (2.5). Опытные данные и результаты расчёта коэффициента расхода для водослива с заложениями верховой грани $m_I = 0, 1:1$ и $2:1$ и боковыми стенками

водослива к осям $\alpha=30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ 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 водослива $30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ приведены в **приложении 2**.

2.4.1 Метод ПИ-теоремы и методика наименьших квадратов (МНК) для анализа коэффициента расхода

При использовании теоремы ПИ-теоремы (Бэкингема) получаем зависимость, учитывающую воздействие основных факторов, которые влияют на величину коэффициента расхода водоподпорных сооружений (водосливов) m_n , устраиваемых на мелиоративных каналах для создания рабочих уровней и рационального водопользования.

Основные гидравлические факторы, влияющие на коэффициент расхода водосливов при высоте порога p и постоянном низовом откосе, представляются в виде зависимости:

$$m_n = f(h, L_n, B_n, \rho, g, \theta, \alpha), \quad (2.6)$$

где h – напор над полигональным водосливом, м; L_n – ширина по гребню полигонального водослива, м; B_n – длина водосливного фронта, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; θ – угол наклона верховой грани, градус; α – угол боковых стенок водослива к его оси, градус.

Используя ПИ-теорему, получаем выражение для коэффициента расхода водослива m_n :

$$m_n = f\left(\frac{L_n}{h}; \frac{B_n}{h}; \theta; \alpha\right), \quad (2.7)$$

или:

$$m_n = f\left(\frac{h}{L_n}; \frac{h}{B_n}; \theta; \alpha\right), \quad (2.8)$$

где h/L_n – относительная ширина порога; h/B_n – относительная длина водосливного фронта водослива.

На основании выражения (2.8) с помощью метода МНК, запишем следующую зависимость:

$$Z = b_0 \cdot U_1^{b_1} \cdot U_2^{b_2} \cdot U_3^{b_3} \cdot U_4^{b_4}, \quad (2.9)$$

где $Z=m_n$, $u_1=h/L_n$, $u_2=h/B_n$, $u_3=\sin(\theta)$, $u_4=\sin(\dot{\alpha})$.

Прологарифмируем зависимость (2.9), получаем новое уравнение (2.10):

$$\ln(Z) = \ln(b_0) + b_1 \cdot \ln(U_1) + b_2 \cdot \ln(U_2) + b_3 \cdot \ln(U_3) + b_4 \cdot \ln(U_4), \quad (2.10)$$

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

В таблице **приложения 3** представлены экспериментальные значения: коэффициента расхода водослива m_n при относительной длине полигонального водосливного фронта h/B_n ; относительной ширине порога водослива h/L_n ; синуса угла наклона верхового откоса порога и значения синуса угла боковых стенок к оси водослива для всех рассматриваемых моделей, результаты математического анализа по МНК и вычислений средней относительной погрешности.

Таким образом, линейное уравнение (2.10) становится следующим:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5. \quad (2.11)$$

Для решения системы алгебраического уравнения (2.11) представим её в матричной форме (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Матричная форма системы алгебраического уравнения

	$\sum x_1$	$\sum x_2$	$\sum x_3$	$\sum x_4$	$\sum y$
$\sum x_1$	$\sum x_1 \cdot x_1$	$\sum x_2 \cdot x_1$	$\sum x_3 \cdot x_1$	$\sum x_4 \cdot x_1$	$\sum y \cdot x_1$
$\sum x_2$	$\sum x_1 \cdot x_2$	$\sum x_2 \cdot x_2$	$\sum x_3 \cdot x_2$	$\sum x_4 \cdot x_2$	$\sum y \cdot x_2$
$\sum x_3$	$\sum x_1 \cdot x_3$	$\sum x_2 \cdot x_3$	$\sum x_3 \cdot x_3$	$\sum x_4 \cdot x_3$	$\sum y \cdot x_3$
$\sum x_4$	$\sum x_1 \cdot x_4$	$\sum x_2 \cdot x_4$	$\sum x_3 \cdot x_4$	$\sum x_4 \cdot x_4$	$\sum y \cdot x_4$

Затем получаем значения коэффициентов уравнения (2.11).

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов уравнения (2.11).

	$a_0=$	-2,7053	$\Rightarrow$	$b_0=e^{a_0}=$	0,0669	
	$a_1=$	0,6327		$b_1=a_1=$	0,633	
	$a_2=$	-0,5585		$b_2=a_2=$	-0,558	
	$a_3=$	-0,0933		$b_3=a_3=$	-0,093	
	$a_4=$	-0,1853		$b_4=a_4=$	-0,185	

Из (2.11) с учетом таблицы (2.2) получаем зависимость:

$$Z = 0,067 \cdot U_1^{0,633} \cdot U_2^{-0,558} \cdot U_3^{-0,093} \cdot U_4^{-0,185}. \quad (2.12)$$

Используя метод наименьших квадратов, из (2.12) получаем формулу (2.13) для коэффициента расхода m_n , которую можно использовать для оценки пропускной способности водослива:

$$m_n = 0,067 \cdot \left(\frac{h}{L_n}\right)^{0,633} \cdot \left(\frac{h}{B_n}\right)^{-0,558} \cdot (\sin\theta)^{-0,093} \cdot (\sin\alpha)^{-0,185}. \quad (2.13)$$

Из формулы (2.13) можно сделать вывод, что коэффициент расхода пропорционален отношению (h/L_n) в степень 0,633, и обратно пропорционален отношению (h/B_n) ; $(\sin\theta)$ и $(\sin\alpha)$ в степени 0,558; 0,093 и 0,185, соответственно. Т.е. коэффициент расхода в формуле (2.13) при (h/L_n) положителен, т.е. с ростом этого параметра увеличивается m_n . Следовательно, можно сказать, что с уменьшением параметров (h/B_n) , $(\sin\theta)$ и $(\sin\alpha)$ коэффициент расхода будет возрастать.

Из (2.13) следует, что угол наклона верхового откоса порога и угол боковых стенок к оси водослива меньше влияют на значение коэффициента расхода (в пределах до 4%), если сравнить их влияние на m_n с влиянием относительной ширины порога h/L_n и относительной длины полигонального фронта h/B_n на значение m_n .

Для подтверждения достоверности полученной формулы была выполнена оценка точности рассчитанных значений m_n по формуле (2.13) и значений проводимых лабораторных измерений коэффициента расхода (**приложение 3**). Средняя относительная погрешность составила 0,96%.

При анализе коэффициентов расхода по (2.13). с измеренными данными m_n (рисунок 2.6), величина корреляции R^2 оказалась «высокая» и составила 0,9608.

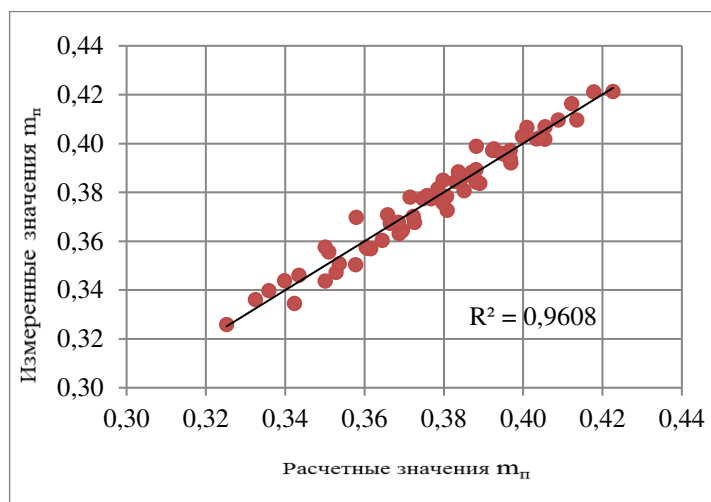


Рисунок 2.6– Связь m_n с расчётными значениями коэффициента m_n , полученного из формулы (2.13)

2.4.2 Влияния угла наклона верховой грани и боковых стенок на пропускную способность водосливов

Формула (2.13) свидетельствует о том, что на коэффициент расхода водослива влияют следующие параметры: относительная ширина порога водослива h/L_n ; относительная длина водосливного фронта h/B_n ; угол наклона верховой грани и угол боковых стенок полигонального водослива к его оси α . Чтобы оценить влияния этих параметров на пропускную способность водослива проводились опыты на моделях, которые между собой различались заложениями верховой грани ($m_l = 0; 1:1; 2:1$) и углами боковых стенок водослива к его оси ($\alpha = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$) при относительной длине водосливного фронта h/B_n (0,004-0,044) и относительной ширине порога водослива h/L_n (0,081-0,938).

На рисунках 2,7 и 2,8 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 водослива к его оси $\alpha = 30^\circ$.

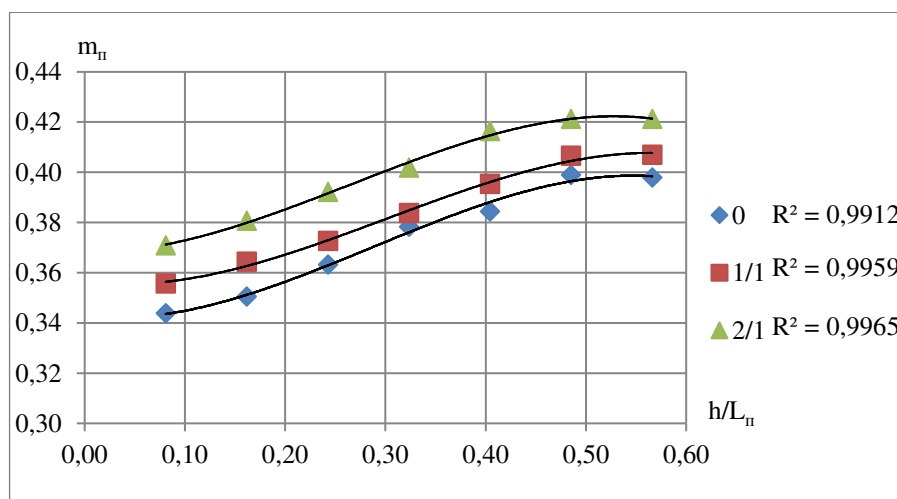


Рисунок 2.7 – $m_n = f(h/L_n, m_l)$ при $\alpha = 30^\circ$

Из опытных данных (рисунок 2.7) установлено, что при изменении относительной ширины порога водослива h/L_n от 0,081 до 0,566 при $\alpha = 30^\circ$, значения коэффициента 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 $h/L_n > 0,485$, наступает автомодельная область относительно h/L_n и значения m_n остаются практически постоянными, не меняются при увеличении h/L_n [101].

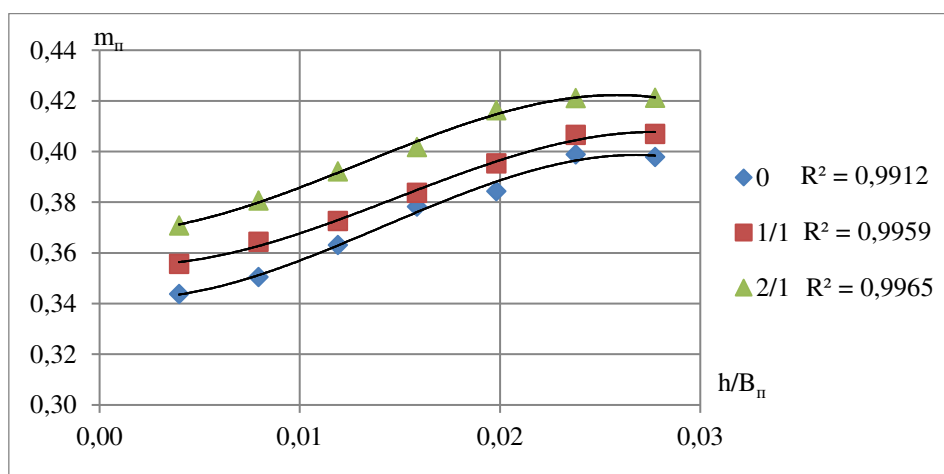


Рисунок 2.8 – $m_n = f(h/B_n, m_l)$ при $\alpha = 30^\circ$

При $\dot{\alpha} = 30^\circ$ (рисунок 2.8) и относительной длине водосливного фронта $h/B_n = 0,004-0,0277$, установлено, что с ростом h/B_n , коэффициент расхода водослива увеличивается от 0,344 до 0,421, приближаясь к постоянному значению при $h/B_n > 0,024$, т.е. наступает автомодельная область относительно h/B_n .

Результаты опытов, приведенные на графиках 2.9 и 2.10, 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 водослива к его оси $\dot{\alpha} = 45^\circ$.

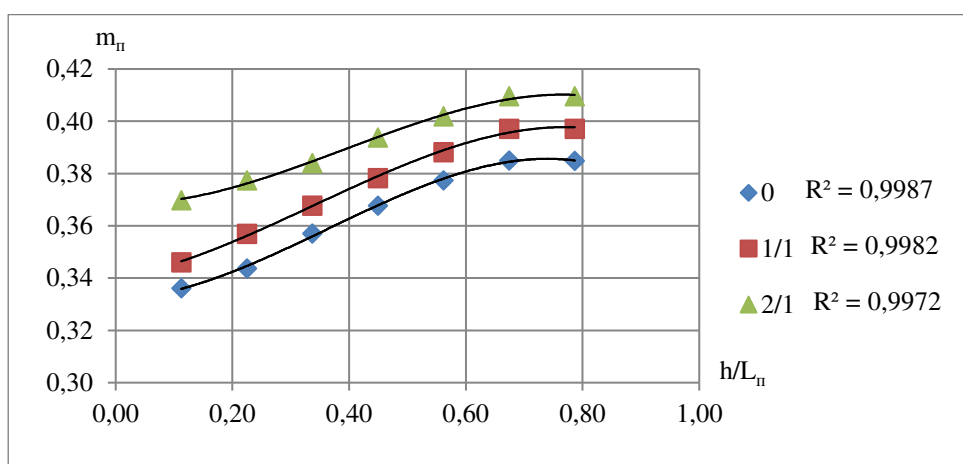


Рисунок 2.9 – $m_n = f(h/L_n, m_1)$ при $\dot{\alpha} = 45^\circ$

Из рисунка 2.9 видно, что при изменении относительной ширины порога водослива h/L_n от 0,112 до 0,787 при $\dot{\alpha} = 45^\circ$ коэффициент расхода m_n повышается в диапазоне 0,336-0,410 с ростом h/L_n .

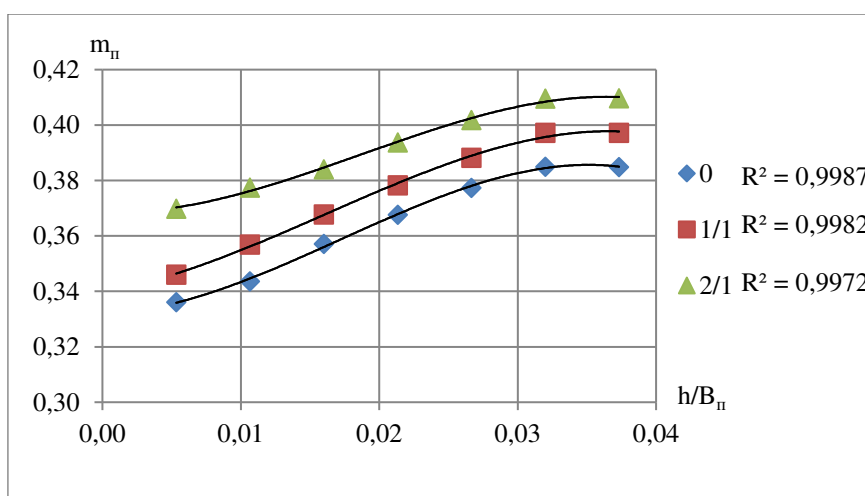


Рисунок 2.10 – $m_n = f(h/B_n, m_1)$ при $\dot{\alpha} = 45^\circ$

Из рисунка 2.10 видно, что коэффициент расхода при $\dot{\alpha} = 45^\circ$ 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 $h/B_n > 0,032$.

На рисунках 2.11 и 2.12 показаны результаты зависимости коэффициента расхода водослива 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 водослива к оси 60° .

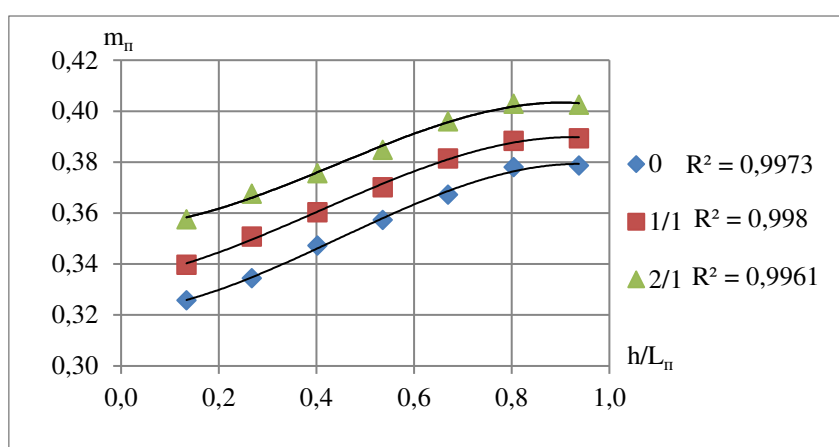


Рисунок 2.11 – $m_n = f(h/L_n, m_1)$ при $\dot{\alpha} = 60^\circ$

Установлено, что при изменении h/L_n от 0,134 до 0,938 при $\dot{\alpha} = 60^\circ$ происходит увеличение значения m_n водослива в диапазоне 0,326-0,403, а при значении $h/L_n > 0,804$ коэффициенты расхода остаются постоянными.

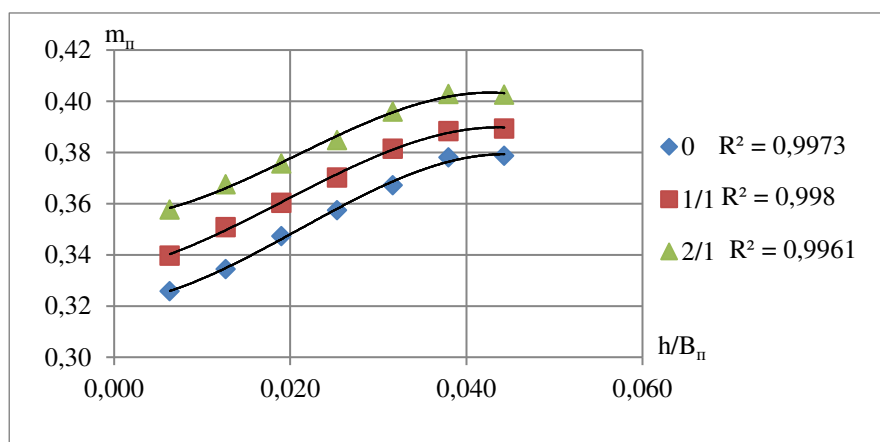


Рисунок 2.12 – $m_n = f(h/B_n, m_1)$ при $\dot{\alpha} = 60^\circ$

Из рисунка 2.12 видно, что при $\dot{\alpha} = 60^\circ$ 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 $h/B_n > 0,038$.

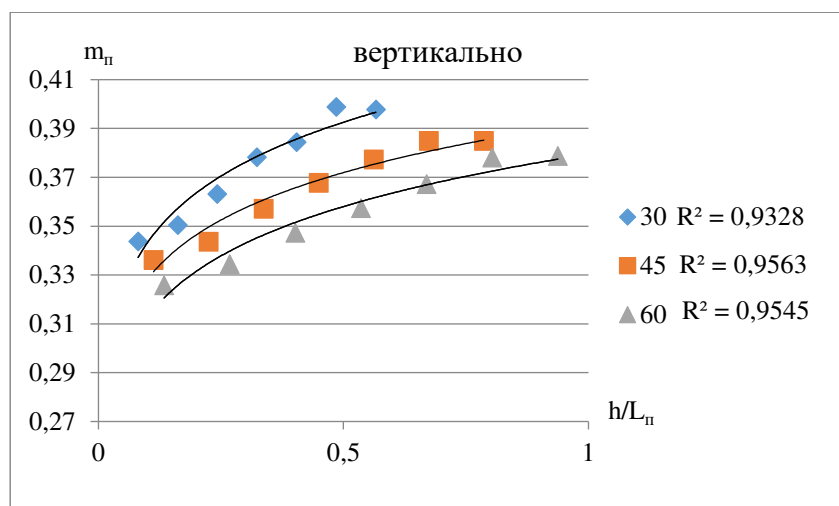
Из графиков (рисунки 2.7 - 2.12) установлено, что при увеличении заложения верхового откоса водослива от 0 до 2:1 m_n увеличивается. Это увлечение при постоянных углах боковых стенок водосливов составляет: при $\dot{\alpha} = 30^\circ$ - 6,68 %; $\dot{\alpha} = 45^\circ$ - 7,07 %; $\dot{\alpha} = 60^\circ$ - 7,38 %, соответственно.

Наибольшее влияние на m_n водослива оказывает заложение верхового откоса 2:1, что наглядно показывают графики. Это можно объяснить пропускной способностью водослива за счет уменьшения местных сопротивлений движению потока через полигональный водослив практического профиля, сопротивление уменьшается, что приводит к повышению значений коэффициента расхода.

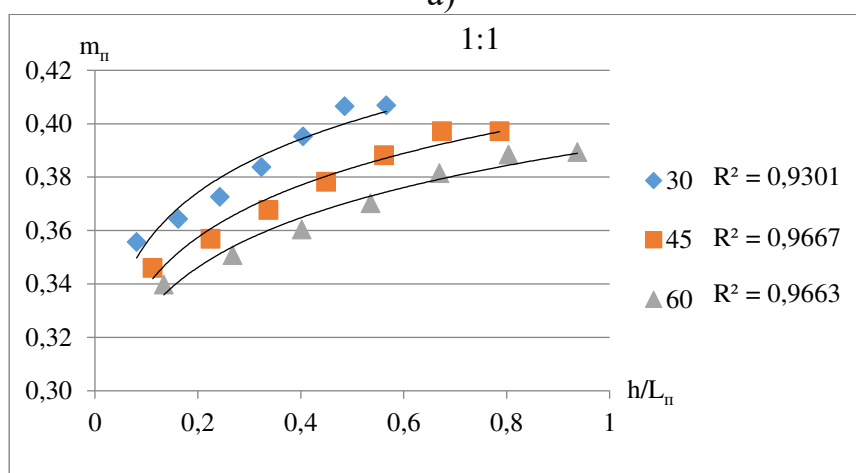
Чтобы оценить влияние углов боковых стенок водослива на m_n при относительной ширине порога водослива $h/L_n = 0,08-0,938$ и относительной длиной водосливно-го фронта при $h/B_n = 0,004-0,044$, получили графики зависимости m_n от h/L_n и m_n от h/B_n при заложении верховой грани откоса 0; 1:1 и 2:1,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

На графиках (рисунки 2.13, а, б, в) даны опытные m_n в зависимости от h/L_n для $\dot{\alpha} = 30^\circ$; 45° ; 60° при соответствующих заложениях верховой грани 0; 1:1 и 2:1.

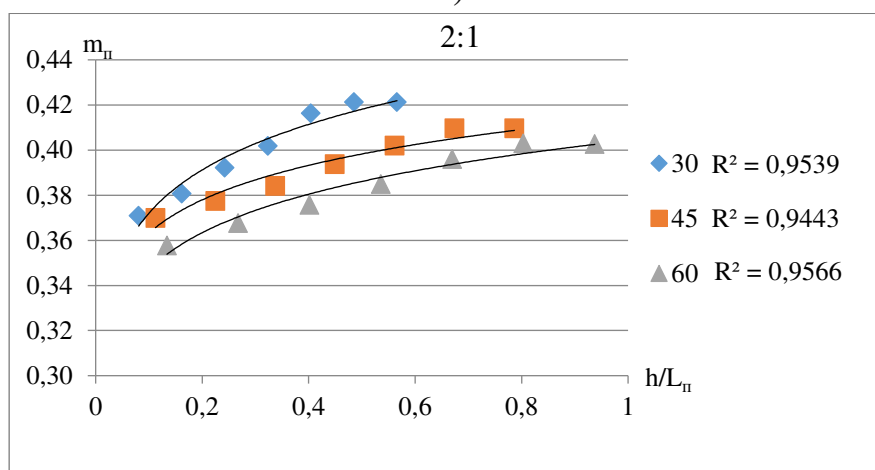
Установлено, что при неизменных заложениях верхового откосов m_n , величина m_n увеличивается с уменьшением угла боковых стенок водослива при увеличении h/L_n .



а)



б)



в)

Рисунок 2.13 – Зависимость $m_n = f(h/L_n, \dot{\alpha})$
при заложение верховой грани: а) 0; б) 1:1; в) 2:1

В результате обработки опытных данных и на основании полученных графиков получили уравнения (2.14), характеризующее зависимость m_n от относительной ширины порога водослива h/L_n :

$$m_{\Pi} = u_1 \left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + u_2 \left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 + u_3 \frac{h}{L_{\Pi}} + u_4; \quad (2.14)$$

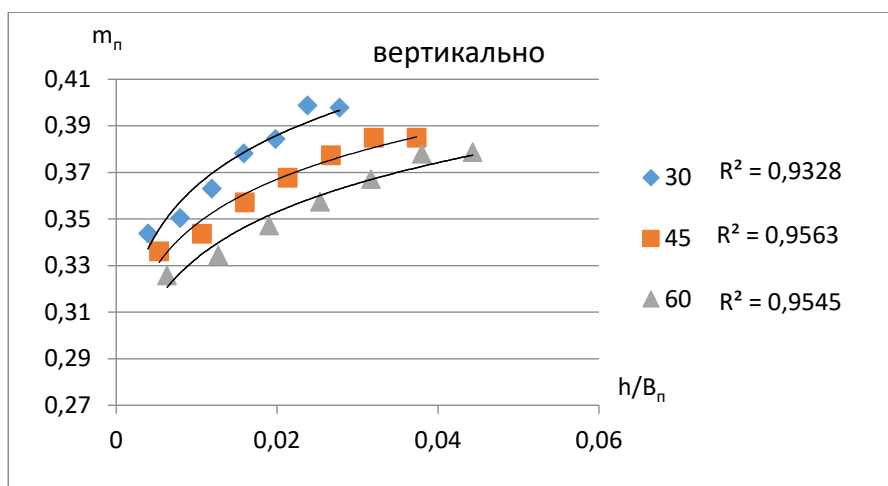
где u_1 , u_2 , u_3 и u_4 – коэффициенты полиномиального уравнения из эмпирических графиков (рисунки 2.13, а, б, в).

В таблице 2.3 – даны значения коэффициентов уравнения (2.14) для различных конструкций рассматриваемых водосливов.

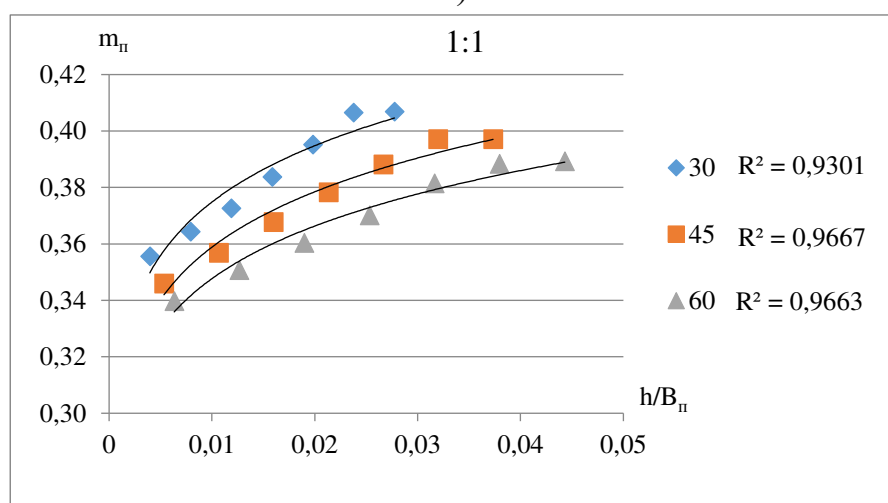
Таблица 2.3 – Эмпирические коэффициенты для уравнения (2.14)

Заложения верхового откоса порога водослива	α	Опытные зависимости $m_n = f(h/L_n)$	R^2 – Коэффициент корреляции
0	30°	$m_{\Pi} = -0,8195\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,7085\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 - 0,0398\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3426$	0,9912
	45°	$m_{\Pi} = -0,1869\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,2728\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 + 0,008\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3319$	0,9987
	60°	$m_{\Pi} = -0,1231\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,1645\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 + 0,0161\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3211$	0,9973
1:1	30°	$m_{\Pi} = -0,7153\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,6471\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 - 0,0462\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3563$	0,9959
	45°	$m_{\Pi} = -0,1869\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,1908\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 + 0,0391\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3399$	0,9982
	60°	$m_{\Pi} = -0,105\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,1285\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 + 0,0313\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,334$	0,998
2:1	30°	$m_{\Pi} = -0,7542\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,6012\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 - 0,0044\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3681$	0,9965
	45°	$m_{\Pi} = -0,2005\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,2369\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 - 0,0096\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3687$	0,9972
	60°	$m_{\Pi} = -0,1234\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^3 + 0,1628\left(\frac{h}{L_{\Pi}}\right)^2 + 0,0074\frac{h}{L_{\Pi}} + 0,3547$	0,9961

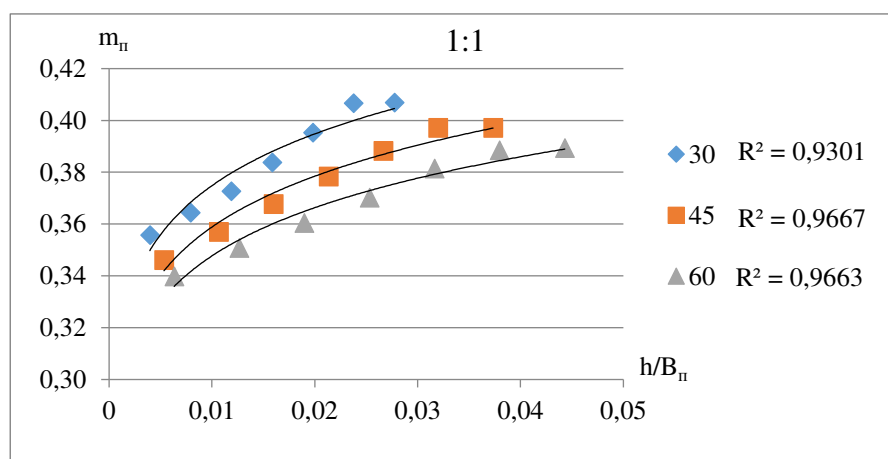
На графиках (рисунки 2.14, а, б, в) приводятся кривые с экспериментальными значениями m_n , от h/B_n , при фиксированном заложении верхового откоса 0; 1:1 и 2:1, соответственно.



а)



б)



в)

Рисунок 2.14 – Зависимость $m_n = f(h/B_n, \dot{\alpha})$ при изменении заложения верхней грани а) 0; б) 1:1; в) 2:1

На рисунках (2.14 а, б, и в) видно, что значение m_n увеличивается с увеличением 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 водослива h/L_n в диапазоне 0,081- 0,938 и относительной длине водосливного фронта h/B_n в диапазоне 0,004-0,044 m_n увеличивается с уменьшением α к оси водослива. Увеличение m_n при постоянных заложения верхового откоса составляет: при $m_1=0$ - 4,88%; $m_1 = 1:1$ -3,90%; $m_1 = 2:1$ - 4,16%, соответственно.

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

Получено, что значение m_n при фиксированном α возрастает с увеличением заложения верховой грани. Это подтверждают полученные результаты, представленные на графиках (рисунки 2.7 – 2.12).

Зависимость m_n от относительной длины водосливного фронта h/B_n при $\alpha = 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$ и заложении верхового откоса 0; 1:1 и 2:1 описывается эмпирической формулой $m=f(h/B_n)$:

$$m_n = u_1 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + u_2 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 + u_3 \frac{h}{B_n} + u_4 , \quad (2.15)$$

где u_1, u_2, u_3 и u_4 –коэффициенты полиномиального уравнения, полученные по результатам исследований, которые даны на графиках (рисунок 3.9 а, б, и в).

В таблице 2.4 даны коэффициенты уравнения (2.15).

Таблица 2.4 – Коэффициенты уравнения (2.15) для 9-ти конструкций полигональных водосливов практического профиля

Заложения верхового откоса	α	Опытные зависимости $m_n = f(h/B_n)$	R^2 – Коэффициент корреляции
0	30°	$m_n = -6961,7 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 294,99 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 - 0,8124 \frac{h}{B_n} + 0,3426$	0,9912
	45°	$m_n = -2345 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 121,13 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 + 0,1683 \frac{h}{B_n} + 0,3319$	0,9987
	60°	$m_n = -1166,5 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 73,646 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 + 0,3415 \frac{h}{B_n} + 0,3211$	0,9973
1:1	30°	$m_n = -6076,6 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 269,41 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 - 0,942 \frac{h}{B_n} + 0,3563$	0,9959
	45°	$m_n = -1748,4 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 84,698 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 + 0,8236 \frac{h}{B_n} + 0,3399$	0,9982
	60°	$m_n = -994,67 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 57,534 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 + 0,6615 \frac{h}{B_n} + 0,334$	0,998
2:1	30°	$m_n = -6407,3 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 250,29 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 - 0,0903 \frac{h}{B_n} + 0,3681$	0,9965
	45°	$m_n = -1875,9 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 105,18 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 - 0,2017 \frac{h}{B_n} + 0,3687$	0,9972
	60°	$m_n = -1168,8 \left(\frac{h}{B_n}\right)^3 + 72,908 \left(\frac{h}{B_n}\right)^2 + 0,157 \frac{h}{B_n} + 0,3547$	0,9961

Из уравнений (2.14, 2.15) делаем вывод, что наибольшее влияние на m_n оказывают значения коэффициентов факторов уравнения (2.15), т.е. h/B_n – относительная длина полигонального водосливного фронта. Это можно объяснить тем, что они имеют наибольшие по абсолютной величине значения коэффициентов факторов уравнения (2.15). Полученные уравнения (2.14, 2.15), позволяют определять m_n при изменении расходов воды в пределах от $0,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ до $4,30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и напоров в диапазоне $3 \cdot 10^{-3} \leq h \leq 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ при относительной ширине порога водослива в диапазоне $0,081 \leq h/L_n \leq 0,938$ и относительной длины водосливного фронта в диапазоне $0,004 \leq h/B_n \leq 0,044$.

2.5 Выводы по 2 главе:

- с помощью теории подобия по критерию Фруда была разработана физическая модель водоподпорного сооружения в виде полигонального водослива практического профиля при горизонтальном масштабе 1:25 и вертикальном

масштабе 1:5, которая исследовалась в гидравлическом лотке, имитируя водоподпорное сооружение на мелиоративном канале;

- получены коэффициенты расхода полигонального водослива для $\alpha = 30^\circ$, которые находились в диапазоне $m_n = 0,344-0,421$; для $\alpha = 45^\circ$, которые находились в диапазоне $m_n = 0,336-0,410$; для $\alpha = 60^\circ$, которые находились в диапазоне $m_n = 0,326-0,403$ в зависимости от $h/L_n = 0,08-0,566$; и $h/B_n = 0,004-0,028$; h/L_n ; $0,112-0,787$ и $h/B_n = 0,005-0,037$; $h/L_n = 0,134-0,938$ и $h/B_n = 0,006-0,044$, соответственно;

- установлено, что полигональные водосливы практические профиля имеют высокую пропускную способность ($m_n = 0,344-0,421$) благодаря нерегулируемым полигональным формам и конструктивным особенностям водосливной части;

- с помощью метода Бэкингема установлено существенное влияние относительной длины полигонального водосливного фронта h/B_n ; относительной ширины порога h/L_n ; угла наклона верхового откоса порога и угла боковых стенок водослива α на m_n полигонального водослива практического профиля;

- получена новая зависимость (2.13), которая позволяет определять коэффициенты расхода m_n полигонального водослива с заложением верхового откоса порога 0; 1:1 и 2:1 и боковыми стенками к оси водослива 30° , 45° , 60° , при изменении расхода в диапазоне $0,11 \cdot 10^{-3} - 4,30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; напоров $3 \cdot 10^{-3} \leq h \leq 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; относительной ширине порога $0,081 \leq h/L_n \leq 0,938$; относительной длине водосливного фронта в диапазоне $0,004 \leq h/B_n \leq 0,044$;

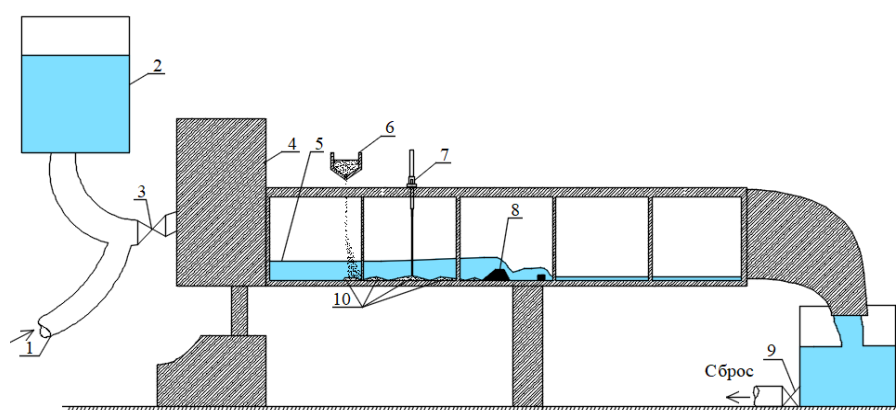
- получены новые зависимости (2.14) и (2.15) для определения m_n полигонального водослива в зависимости от относительной ширины порога h/L_n и длины водосливного фронта h/B_n , соответственно;

- установлено, что физическая модель водоподпорного сооружения с заложением верхового откоса 2:1 и углом боковых стенок водослива 30° к его оси оказывается наиболее адаптированной с точки зрения геометрической формы, которая создаёт благоприятные гидравлические условия, обеспечивая пропуск максимальных расходов при повышении водообеспеченности на мелиоративных каналах.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НАНОСОВ ЧЕРЕЗ ПОЛИГОНАЛЬНУЮ ФОРМУ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА МЕЛИОРАТИВНОМ КАНАЛЕ

3.1 Методика исследования конструкции водоподпорных сооружений

Были выполнены эмпирические исследования по имитационному моделированию движения наносов через водоподпорное сооружение в виде полигонального водослива практического профиля (водослив). Требовалось установить такой вид сооружения, которое пропускало бы максимальное количество наносов из ВБ в НБ и пропускало бы максимальные расходы при повышении водообеспеченности на мелиоративных каналах. В связи с этим проводили исследования водоподпорного сооружения с разными заложениями верховой грани m_1 и углами боковых стенок водослива к их осям α на 2-х гидравлических лотках. Первый лоток представлен во 2 главе (рисунок 2.1). Второй гидравлический лоток шириной 0,17 м, длиной 4,4 м, высотой 0,3 м дан на рисунке 3.1.



- 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 полигонального водослива практического профиля; 10 – продольный профиль песка

Рисунок 3.1– Лабораторная установка для исследования движения наносов через порог водослива

Вода подается в установки (рисунки 3.1 и 3.2) из двух источников: первый представляет собой подземный резервуар, откуда насос подает воду в лоток (канал) через трубу 1; второй представляет собой резервуар 2 на высоте три метров от дна канала, из резервуара 4 вода подается в канал самотёком. Расход воды в канале управляется с помощью задвижки 3. Лоток имел постоянный уклон дна 0,001.

Для изучения движения наносов в мелиоративном канале через водослив (рисунок 3.1) подавался песок у дна в поток с постоянным весовым расходом с помощью воронки 6 на расстоянии 1 м от его гребня. Напор воды над гребнем водослива измерялся на расстоянии $3H$ от порога водослива. 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 водослива, сушился в сушильном шкафу при температуре 100°-110° С и взвешивался с помощью электронных весов *KS1005* с точностью 0,01 г. Время опыта определяется секундомером с точностью 0,01 с.



Рисунок 3.2 –Лабораторный лоток для исследования движения наносов через порог водослива

Исследовалась конструкция водоподпорного сооружения с изменяющимся заложением верховой грани 0; 1:1; 2:1 (рисунок 2.3) и углами боковых стенок к оси водослива. Углы боковых стенок были к оси $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° при постоянной высоте порога $P=0,07$ м при постоянном заложении низового откоса водослива,

который составлял $m_2=1:2$. Сравнили полученные результаты с водоподпорным сооружением – классическим водосливом, который применяется на практике при угле боковых стенок к оси водослива $\alpha=90^\circ$ (рисунок 3.3).

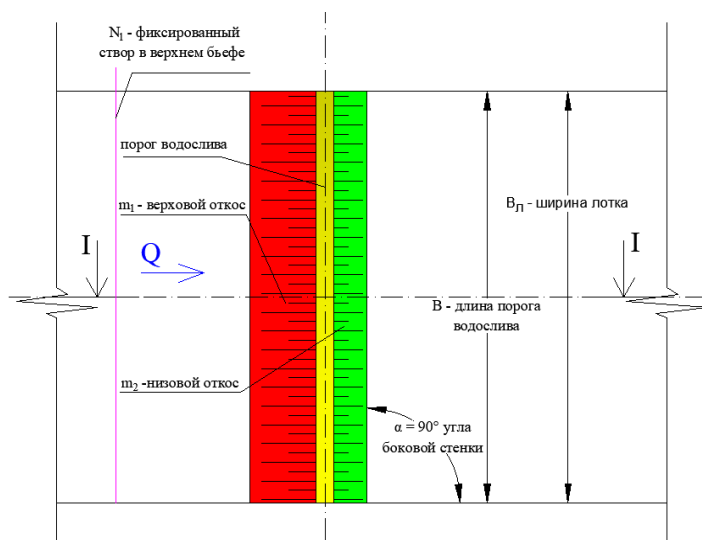


Рисунок 3.3 – Конструкция классического водослива практического профиля при $\alpha = 90^\circ$

Следует отметить, что параметры моделей водосливов для изучения движения наносов получили с применением подбоя Фруда (горизонтальный масштаб 1:65, вертикальный масштаб 1:5).

3.2. Методика исследования движения донных наносов у водоподпорных сооружений в канале

Исследования выполнялись на физических моделях полигональных водосливов для выбора более совершенной конструкции водоподпорного сооружения, которое обеспечивало бы наибольший объем пропуска наносов через порог в НБ мелиоративного канала.

На моделях во втором лотке было проведено 378 экспериментов по определению параметров: расхода Q ; средней скорости потока; свободной поверхности уровня по длине канала; продольного профиля донных наносов, сформировавшихся у водослива; движения наносов через порог водослива.

Исследования выполняли при напоре, который находился в пределах $1,3 \cdot 10^{-2}$ – $7,3 \cdot 10^{-2}$ м с шагом 0,01 м, расходе, который был в диапазоне $0,58 \cdot 10^{-3}$ – $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Расходы измерялись объёмным методом с помощью тарированной мерной ёмкости. Ошибка не превышала 2,5%, при этом скорости потока находилась в пределах от 0,046 м/с до 0,406 м/с.

Для исследования движения наносов через водослив приняли песок диаметром 0,10–0,25 мм, который преобладает в донных и взвешенных наносах Новокубанского канала. Температура воды при проведении опытов была постоянной и составила 20°C. Гидравлическая крупность наносов была в пределах от 0,00663 м/с до 0,02602 м/с [98] при средневзвешенной гидравлической крупности песка – 0,016325 м/с [84, 98].

Для имитации натурной мутности потока в лоток добавляли песок в поток с постоянным расходом 0,35 г/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 35,2 г/м³ до 603,4 г/м³ в зависимости от расхода. Мутность р. Кубань и Новокубанского канала соответствовала опытным параметрам мутности потока в лотке.

Для определения веса песка, осажденного у порога водослива W_{n2} , после окончания эксперимента собирали и сушили в сушильном шкафу при температуре 100–110 °С, а затем взвешивали на электронных весах. Процент песка по весу, прошедшего через водослив $\Pi_n\%$, вычисляли по формуле:

$$\Pi\% = \frac{W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2}}{W_{\Pi 1}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где W_{n1} – исходный вес песка, г.; W_{n2} – осаждённый вес песка у водослива, г.

Расход песка P_{Π} (г/с), прошедшего через водослив, определяли по формуле:

$$P_{\Pi} = \frac{W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2}}{t}, \quad (3.2)$$

где t – продолжительность эксперимента, с.

Для выбора более совершенной конструкции модели водоподпорного сооружения исследовался водослив с заложением верховой грани $m_1 = 0; 1:1$ и $2:1$ и углами боковых стенок к его оси $\alpha = 30; 45; 60$ и 90 град.

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 ВБ измеряли на отрезке 1 м в каждом опыте. Были построены продольные профили отложений донных наносов от точки подачи песка в лоток до порога полигонального водослива. Высота песчаных гряд и волн находилась в диапазоне $0,20-2,72$ см.

3.3 Расчетные зависимости движения наносов через водоподпорные сооружения

Взвешенные 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 [78, 84]. 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 [52]. При оценке качества оросительной воды учитывается количество и состав взвешенных 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

[14,17, 81, 100] установлено, что вертикальная составляющая скорости $V_{\text{вер}}$ по величине равна некоторой доли средней скорости v :

$$V_{\text{вер}} = (0,1 \sim 0,2)V. \quad (3.3)$$

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 :

$$V_{\text{вер}} > W_0. \quad (3.4)$$

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.

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

$$Q_k = \frac{V}{t} = \frac{L \cdot B \cdot h'}{t}, \quad (3.5)$$

где Q_k – фактический расход воды; $\text{м}^3/\text{с}$, V – объем воды, м^3 ; 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 (3.6):

$$v = \frac{Q_k}{B \cdot h}, \quad (3.6)$$

где v – скорость потока в лотке, $\text{м}/\text{с}$; Q_k – фактический расход воды; $\text{м}^3/\text{с}$; B – ширина лотка, м; h – глубина воды в лотке, м.

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

Наиболее существенные факторы, которые влияют на величину Vn_{np} : 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 [14] определяют неразмывающую скорость с частицами крупностью в диапазоне 0,1-0,25 мм:

$$v_{np} = \sqrt{15 + \frac{6}{d}} \cdot \sqrt{gd}, \quad (3.7)$$

где d – диаметр наносов в мм.

Из уравнения (3.7) получено значение Vn_{np} в диапазоне 0,27-0,31 м/с.

Значения размывающей скорости Vn_p для изучаемых частиц песка диаметром 0,1-0,25 мм будут:

$$V_{np} = (1,3 - 1,4)V_{np} . \quad (3.8)$$

Скорости из уравнения (3.8): находятся в диапазоне 0,36-0,42 м/с.

3.4 Результаты исследования движения наносов через водоподпорные сооружения

3.4.1 Исследование движения донных наносов на участке канала у водоподпорных сооружений

Отложения донных наносов на участках у водоподпорных сооружений в мелиорации рассматривается, как одна из сложных задач речных наносов, так как движение донных наносов возрастное, изменяется с сезонами года, и носит пульсационный характер [99].

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

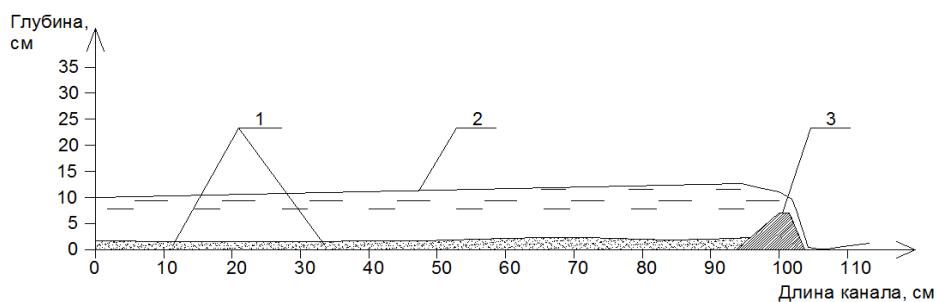
резко перемещаются в потоке по течению, переходя через порог водоподпорного сооружения. Тогда количество движущихся и прошедших песчаных наносов через водослив, понемногу возрастает с увеличения скорости потока [4]. Таким образом, приходим к выводу о том, что продольные профили отложений донных наносов вдоль канала характеризуются волнообразным внешним видом с чередованием глубоких и неглубоких мест вдоль него.

Эксперименты показывают, что продольный профиль донных гряд, образовавшихся у водослива, постоянно меняется, это изменение в основном связано со скоростью потока. Это подтверждается результатами опытов (таблица 3.1), где исследованы высоты гряд, образовавшихся у водослива при заложении верхового откоса водослива 1:1 и угле боковых стенок к оси водослива $\alpha=60^\circ$ для разных скоростей в канале в диапазоне 0,08-0,41 м/с.

Таблица 3.1 – Размеры высот и участков песчаных гряд и волн у водоподпорного сооружения при $\alpha=60^\circ$ и заложении верховой грани $m_1=1:1$ при разных скоростях потока

Скорость, м/с	Значения высоты гряд и волн X(см) на участке водослива (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

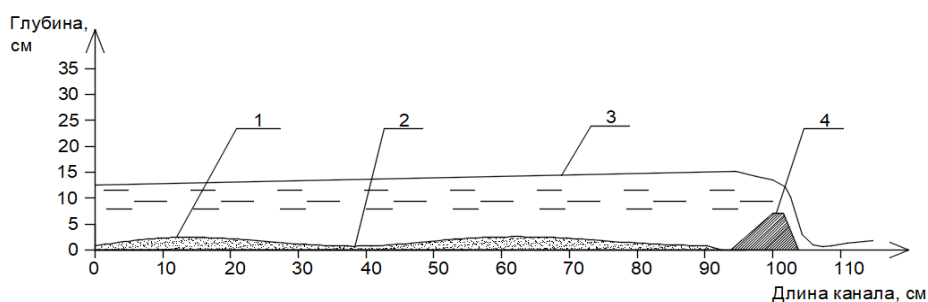
Из таблицы 3.1 видно, что для скорости потока $\leq 0,231$ м/с продольный профиль песка остается горизонтальным без каких-либо изменений (рисунок 3.4). Когда скорость потока равна 0,32 м/с частицы начинают сдвигаться (рисунок 3.5). Эта скорость называется скоростью началом движения наносов или неразмывающей скоростью $V_{нр}$. При скорости потока $> 0,32$ формируются гряды и для $v=0,41$ м/с получили профиль (рисунок 3.6).



1 – песок отложился на дне канала; 2 – уровень воды ВБ; 3 – полигональный водослив практического профиля при откосе $m_l = 1:1$ и $\alpha = 60^\circ$

Рисунок 3.4 – Продольные профили песка при $v \leq 0,231$ м/с

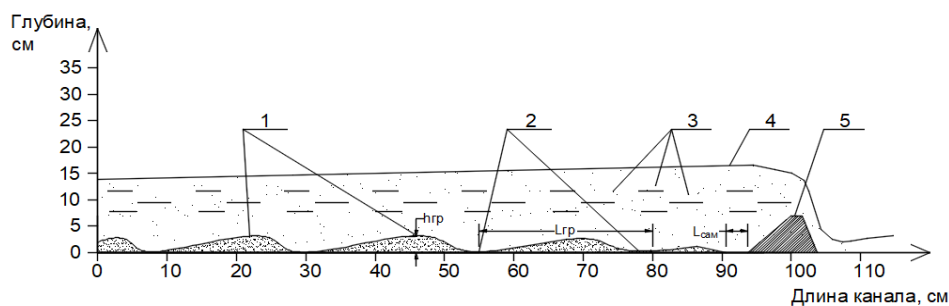
Из рисунка 3.4 видно, что песок на дне канала не двигается и откладывается равномерно на дне канала.



1 – гребень; 2 – подвалье; 3 – уровень воды ВБ; 4 – полигональный водослив практического профиля при $\alpha = 60^\circ$ и откосе $m_l = 1:1$

Рисунок 3.5 – Продольные профили песка при $v = 0,32$ м/с

Рисунок 3.5 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 полигонального водослива.



1 – гребень; 2 – подвалье; 3 – взвешенные наносы у водоподпорного сооружения; 4 – уровень воды ВБ; 5 – полигональный водослив при откосе $m_l = 1:1$ и $\alpha = 60^\circ$, $L_{го}$ – длина гидравлической очистки от отложений наносов у водослива

Рисунок 3.6 – Продольные профили песка при $v = 0,41$ м/с

Продольный профиль донных гряд (рисунок 3.6) имеет пологий верховой скат и крутой низовой. Высота гряд $h_{гр}$ (превышение гребня над подвалом) 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 [4, 6], что соответствует выводам Н. С. Знаменской [8].

Полигональная форма (рисунок 3.6) создаёт условия удаления наносов у порога гидравлическими струями на некотором расстоянии L_{zo} , и это, на наш взгляд, связано с действием боковых и центральных струй. Расстояние L_{zo} будем называть длиной гидравлической очистки, которое было исследовано для всех моделей водосливов.

По Опытным данным значения средней длины гидравлической очистки L_{zo} при угле $\alpha = 30^\circ$ и заложениях верховой грани 0; 1:1 и 2:1 составляют 0.11, 0.14, 0.20; для $\alpha = 45^\circ$ были 0.09, 0.11, 0.18 при соответствующих заложениях верховой грани; $\alpha = 60^\circ$ были 0.06, 0.09, 0.15, соответственно. Установлено, что средняя длина L_{zo} при $\alpha=30^\circ$ и заложении верхового откоса 2:1; 1:1 и 0 была больше на 10,0; 21,43 и 18,18 %, соответственно, по сравнению с водосливом при $\alpha=45^\circ$ и больше на 25,0; 35,72 и 45,45 %, соответственно, по сравнению с водосливом при $\alpha=60^\circ$.

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

На рисунке 3.7 дан план донных гряд перед порогами полигонального водослива практического профиля на второй установке.



А

Б

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

Рисунок 3.7 – План донных гряд для двух изучаемых моделей полигонального водослива практического профиля

На основании проведённых опытов установлено, что с целью уменьшения отложений наносов диаметром 0,1-0,25 мм у порога водослива в оросительных каналах минимальные скорости течения воды рекомендуется принимать не менее 0,32 м/с.

3.4.2 Исследование движения наносов через подпорные сооружения для повышения водообеспеченности мелиоративных каналов

Вода в мелиоративных каналах содержит большое количество наносов, которые откладываются у водоподпорных сооружений, часть наносов пропускается в НБ, 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 водослива, связан с гидравлическими параметрами и его конструкцией. Проводились исследования на физических моделях полигональных водосливов, что позволило выбрать наилучшую модель, обеспечивающую максимальный пропуск наносов,

улучшить качество работы водозаборных сооружений, от которых существенно зависит рациональное водопользование оросительных систем.

При движении наносов через порог водосливов исследовались все опытные образцы водоподпорных сооружений. В таблице 3.3 представлены процент и расход песка, прошедшего через водослив, которые рассчитывались по формулам (3.1) и (3.2) при откосе $m_I = 0$ и угле $\alpha = 30^\circ$.

Таблица 3.2 – Результаты исследований процента и расхода песка, проходящего через полигональный водослив при откосе $m_I = 0$ и угле $\alpha = 30^\circ$

Полигональный водослив с заложением верховой грани $m_I = 0$							
№	Напор над водосливом h , см	Средняя скорость, м/с	Вес добавленного песка. 10^{-3} , кг	Вес остаточного песка. 10^{-3} , кг	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3} , кг	Расход песка, R_p , г/с	Процент песка по весу, проходящего через водослив, 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 таблицы 3.2 видно, что процент и расход песка, проходящего через водослив, растет с увеличением средней скоростей потока [100].

Результаты остальных опытов по проценту песка, прошедшего через водослив, для верхового откоса 0; 1:1 и 2:1 при углах боковых стенок полигонального водослива $\alpha = 30^\circ$; 45° 60° и 90° представлены в таблицах 4.1-4.4 **приложение 4.**

На рисунке 3.8 даны опытные данные зависимости процента песка от напора на водосливе, проходящего через водослив при постоянном угле боковых стенок $\alpha = 30^\circ$ для верхового откоса 0; 1:1 и 2:1.

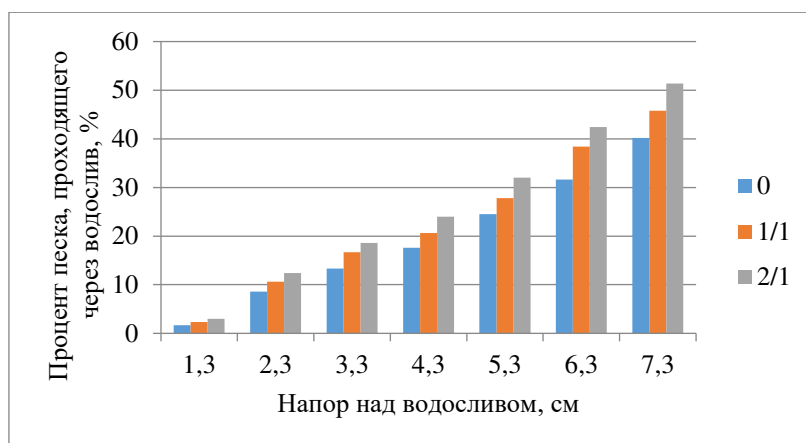


Рисунок 3.8 – Графики зависимости процента песка от напора при углах боковых стенок водослива к его оси $\alpha = 30$ град

Из рисунка 3.8 видно, что максимальный процент песка, прошедшего через водослив при заложении верхового откоса 0; 1:1; 2:1 и $\alpha = 30^\circ$, составил 51,4 % при $m_l = 2:1$. Среднее увеличение транспорта песка через порог водослива при откосе 2:1 больше на 11,75 % чем при откосе 1:1 и больше на 25,19 % при откосе 0.

На рисунке 3.9. даны опытные данные зависимости процента песка от напора на водосливе, проходящем через водослив при постоянном угле боковых стенок $\alpha = 45$ град для верхового откоса $m_l = 0; 1:1$ и 2:1.

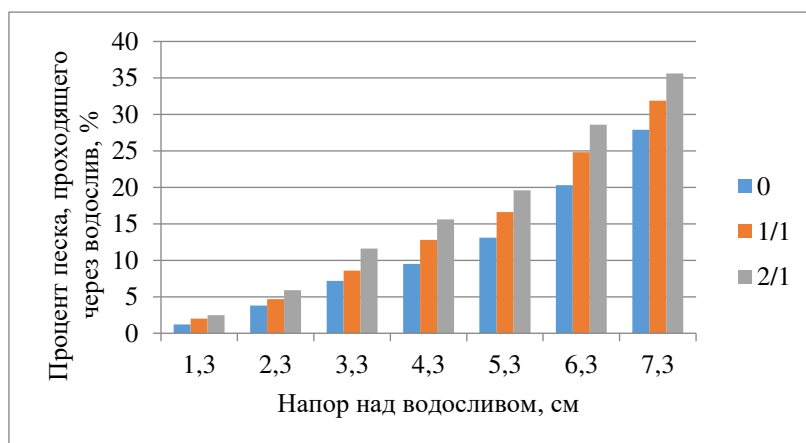


Рисунок 3.9 – Графики зависимости процента песка от напора при $\alpha = 45^\circ$

Из рисунка 3.9 видно, что максимальный процент песка, прошедшего через водослив при заложении верхового откоса 0; 1:1; 2:1 при $\alpha = 45^\circ$, составил при $m_l = 2:1$ - 35,6 %. Средний процент песка, прошедшего через водослив, при откосе 2:1 больше среднего процента песка на 15,08 % при откосе 1:1 и на - 30,49 % при откосе 0.

На рисунке 3.10 даны опытные данные зависимости процента песка от напора, проходящего через водослив при постоянном угле боковых стенок $\alpha = 60^\circ$ для верхового откоса 0; 1:1 и 2:1.

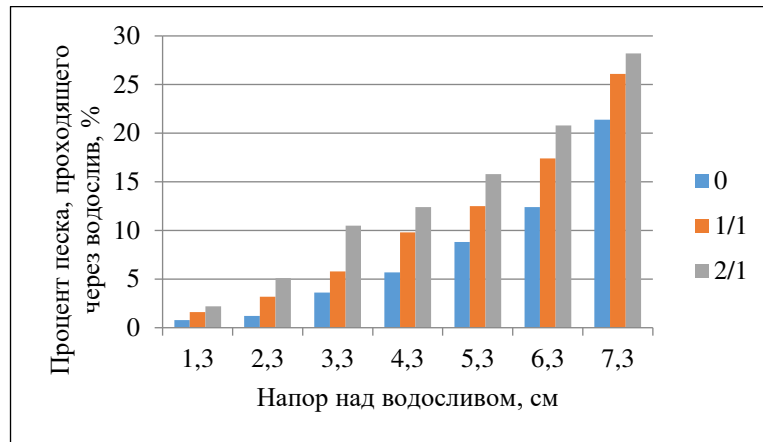


Рисунок 3.10 – Графики зависимости процента песка от напора при $\alpha = 60^\circ$

Из рисунка 3.10 видно, что максимальный процент песка, прошедшего через водослив при заложении верхового откоса 0; 1:1; 2:1 и $\alpha = 60^\circ$, составил 28,2 % при $m_1 = 2:1$. 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 3.8–3.10) установлено, что при увеличении заложения верхового откоса водослива от 0 до 2:1 процент песка, прошедшего через подпорное сооружение, увеличивается. Сравним результаты опытов для углов боковых стенок водослива $\alpha = 30; 45$ и 60 град с результатами опытов для водослива классического профиля при $\alpha = 90$ град и заложениях верхового откоса $m_1 = 0; 1:1$ и 2:1 (рисунок 3.11).

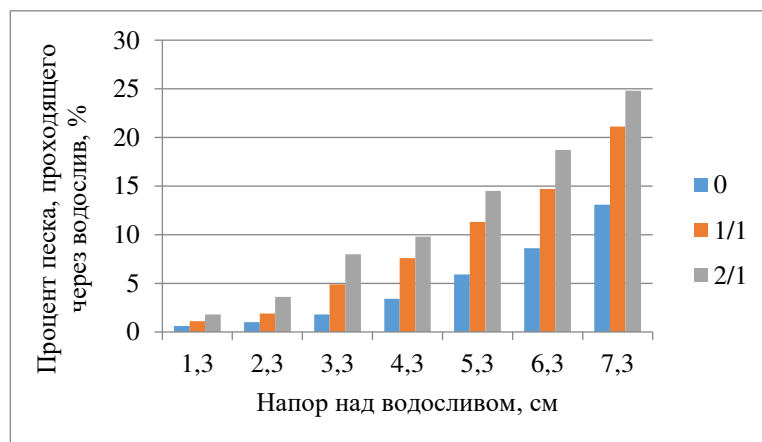


Рисунок 3.11 – Графики зависимости процента песка от напора при $\alpha = 90^\circ$

Установлено, что при $\alpha=30^\circ$; 45° ; 60° и $\alpha=90^\circ$ процент песка, проходящего через полигональное подпорное сооружение, увеличивается с ростом заложения верхового откоса, как видно из рисунка 3.11. Максимальный процент песка, прошедшего через водослив при $\alpha=90^\circ$ град составляет 24,8 % при заложении верхового откоса 2:1. Среднее процентное увеличение транспорта песка через порог 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 3.12-3.14) приводятся эмпирические зависимости средней скорости потока от процента песка, проходящего через водослив 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 водослива при $\alpha=90^\circ$.

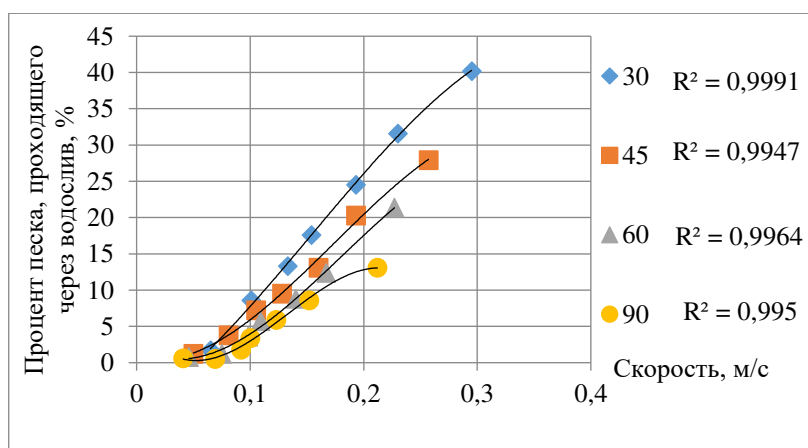


Рисунок 3.12 – Эмпирические зависимости $\Pi\% = f(v, \alpha)$ для верхового откоса $m_1 = 0$

При нулевом заложении верхового откоса и для $\alpha=30^\circ$; 45° ; 60° и 90° , при изменении средней скоростей 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 полигональный водослив практического профиля, 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 полигональный водослив, для $\alpha=30^\circ$; 45° и 60° больше на 80,81 %; 67,86 % и 35,86 %, соответственно, по сравнению с классическим водосливом.

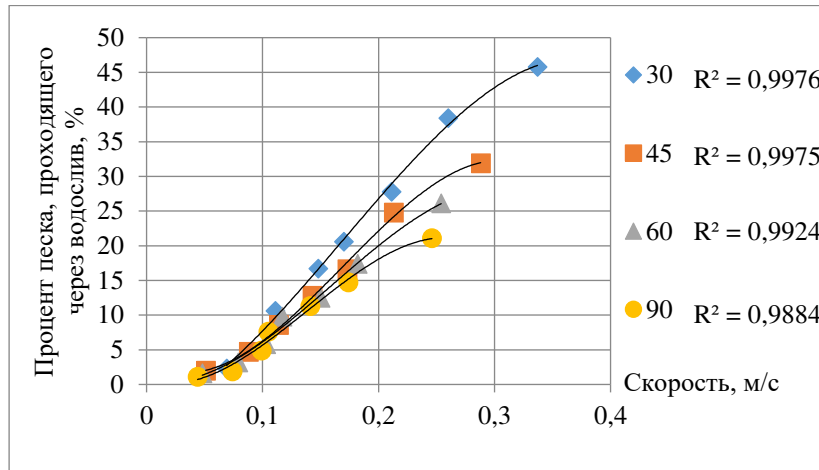


Рисунок 3.13 – Эмпирические зависимости $\Pi\% = f(v, \alpha)$
для верхового откоса – 1:1

При изменении 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 3.13, для водослива с углами - $\alpha = 30^\circ$; 45° ; 60° и 90° , соответственно, процент песка, проходящего через водослив, 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 водослив для углов $\alpha = 30^\circ$; 45° и 60° , больше на 65,15 %; 44,25 % и 23,67 %, соответственно, по сравнению с классическим водосливом при $\alpha = 90^\circ$ [100].

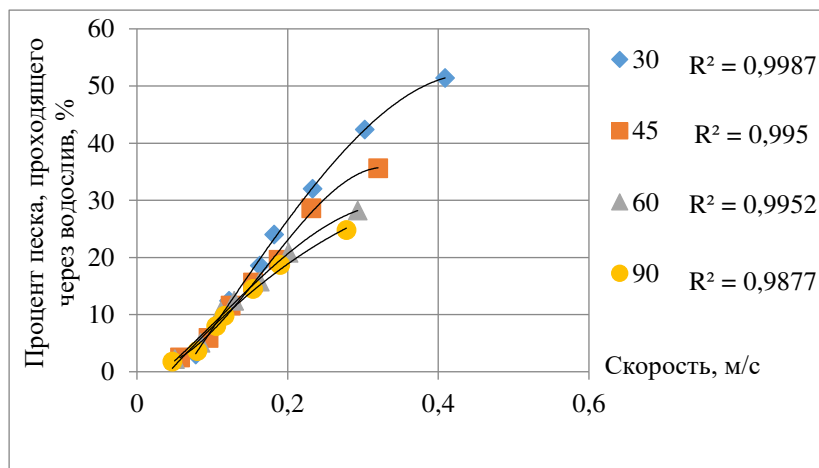


Рисунок 3.14 – Эмпирические зависимости $\Pi\% = f(v, \alpha)$
для верхового откоса – 2/1

Из рисунка 3.14 видно, что при $m_1=2:1$ и для $\alpha = 30^\circ$; 45° ; 60° и 90° , при изменении 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 водослив, 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 водослив для углов – $\alpha = 30^\circ$; 45° и 60° , больше на 55,64 %; 32,31 % и 17,54 %, соответственно, по сравнению с классическим водосливом.

В результате обработки опытных данных и на основании полученных графиков получили уравнения (3.9), характеризующее зависимость П% от относительной ширины порога водослива v :

$$П\% = u_1(v)^3 + u_2(v)^2 + u_3v + u_4; \quad (3.9)$$

где u_1 , u_2 , u_3 и u_4 – коэффициенты полиномиального уравнения из эмпирических графиков (рисунки 3.13, 3.14, 3.16).

Таблица 3.3 – даны значения коэффициентов уравнения (3.9) для различных конструкций рассматриваемых водосливов.

Таблица 3.3 – Эмпирические коэффициенты для уравнения (3.9)

Заложения верхового откоса порога водослива	α	Опытные зависимости $П\% = f(v)$	R^2 – Коэффициент корреляции
0	30°	$П\% = -1294,8v^3 + 598,43v^2 + 94,246v - 6,3615$	$R^2 = 0,9991$
	45°	$П\% = -2107,3v^3 + 1096,2v^2 - 36,079v + 0,6652$	$R^2 = 0,9947$
	60°	$П\% = -2385,5v^3 + 1298,4v^2 - 86,78v + 2,0461$	$R^2 = 0,9964$
	90°	$П\% = -6110,7v^3 + 2435,6v^2 - 204,72v + 5,2179$	$R^2 = 0,995$
1:1	30°	$П\% = -1636v^3 + 829,26v^2 + 56,425v - 4,5835$	$R^2 = 0,9976$
	45°	$П\% = -3127,1v^3 + 1588,3v^2 - 98,732v + 3,3687$	$R^2 = 0,9975$
	60°	$П\% = -2321,8v^3 + 1114,5v^2 - 33,112v + 0,6192$	$R^2 = 0,9924$
	90°	$П\% = -3147v^3 + 1309,9v^2 - 48,713v + 0,5927$	$R^2 = 0,9884$
2:1	30°	$П\% = -523,88v^3 + 142,21v^2 + 184,07v - 11,815$	$R^2 = 0,9987$
	45°	$П\% = -2278,7v^3 + 1170v^2 - 32,515v + 0,9525$	$R^2 = 0,995$
	60°	$П\% = -812,95v^3 + 262,96v^2 + 101,71v - 3,7383$	$R^2 = 0,9952$
	90°	$П\% = -166,62v^2 + 160,31v - 6,563$	$R^2 = 0,9877$

Из выполненных исследований можно сделать вывод, что процент песка, прошедшего через водослив, растет с увеличением средней скоростей потока для всех изучаемых моделей водосливов. Видно, что процент песка, прошедшего через полигональный водослив практического профиля больше по сравнению с классическим водосливом, что, соответствует выводам Филиппова Е. Г. [13, 95, 100]. Это связано с действием боковых и центральных струй набегающего потока и за счет полигональной формы в плане водосливных граней.

Процент песка, прошедшего через водослив в мелиоративных каналах, увеличивается с уменьшением угла боковых стенок водослива к его оси, что наглядно отражено графически (рисунки 3.12-3.14).

Таким образом, максимальный процент транспортируемого песка через порог полигонального подпорного сооружения был при $\alpha=30$ градусов в среднем больше на 39,64%; 60,80% и 75,35% при вертикальном заложении верхового откоса, – 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 водослива к оси 45°; 60° и 90°, соответственно.

3.5 Выводы по 3 главе:

- Установлено, что продольный профиль донных гряд, сформировавшихся у порога полигонального водослива в мелиоративных каналах, постоянно меняется, что связано с изменением скорости потока. С целью уменьшения отложения наносов размером 0,1-0,25 мм перед порогом водослива минимальные скорости потока рекомендуется принимать не менее 0,32 м/с в оросительных каналах;

- установлено, что полигональные водосливы практических профилей создают условия для гидравлической промывки отложений наносов, образовавшихся у порогов на длине L_{20} , что обеспечивает устойчивую работу водоподпорных сооружения на мелиоративных каналах, так как длина гидравлической очистки L_{20} не требует периодической механической очистки от наносов;

- установлено, что значения L_{zo} увеличивается с ростом заложения верховой грани m_1 и с уменьшением угла боковых стенок водослива к его оси α . Таким образом, модель водослива при $\alpha = 30^\circ$ и откосе 2:1 обеспечивает наибольшую длину гидравлической очистки L_{zo} от отложений наносов у порога полигонального водослива;

- установлено, что пропуск наносов из ВБ в НБ полигонального водослива 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 водослива L_n ;

- установлено, что процент песка, прошедшего через полигональную водосливную форму подпорных сооружений для угла боковых стенок водослива к его оси $\alpha = 30^\circ$ находится в пределах 1,7...51,4%; для $\alpha = 45^\circ$ находится в диапазоне 1,2...35,6%; для $\alpha = 60^\circ$ находится в пределах 0,8...28,2%; для $\alpha = 90^\circ$ находится в пределах 0,6...24,8%;

- установлено, что модель водослива с заложением верховой грани 2:1 и углом боковых стенок водослива 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 рациональное водопотребление воды на мелиоративных каналах;

- получена новая зависимость (3.9) для определения процента песка, проходящего через полигональный водослив практического профиля П% в зависимости от средней скорости потока v .

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА УРОВНИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ

При эксплуатации водозаборных сооружений и всасывающих труб НС на каналах с низкими уровнями перед нами стоит задача повысить водообеспеченность устройством водоподпорных сооружений [18, 51, 55, 74, 79, 97, 114], которые будут обеспечивать пропуск расходов и повышение уровня, следовательно, необходимо иметь данные об изменении уровней по длине у водоподпорных сооружений, обеспечивающих требуемые глубины и скорости потока, повышающие водообеспеченность мелиоративных каналов.

4.1 Исследование уровня на водоподпорных сооружениях

4.1.1 Методика исследования

Исследования уровней проводились в лаборатории кафедры гидравлики и с. х. водоснабжения ФГБОУ ВО «Кубанского ГАУ» на втором гидравлическом лотке, изображенном на рисунке 3.1. В лотке, устанавливались модели полигонального водослива практического профиля с углами боковых стенок к оси водослива $\alpha = 30; 45$ и 60 градусов при постоянной высотой пороге водослива $P = 0,07$ м и постоянном заложении низовой грани составляющей 1:2 (рисунок 2.3) [100].

Измерения уровня воды проводились по длине потока в 15 створах. Использовались компьютерные программы Microsoft Excel и AutoCAD для построения свободной поверхности. А также с использованием метода В. И. Чарномского получили длину кривой свободной поверхности L_c , которую можно использовать для размещения всасывающих труб насосной станции.

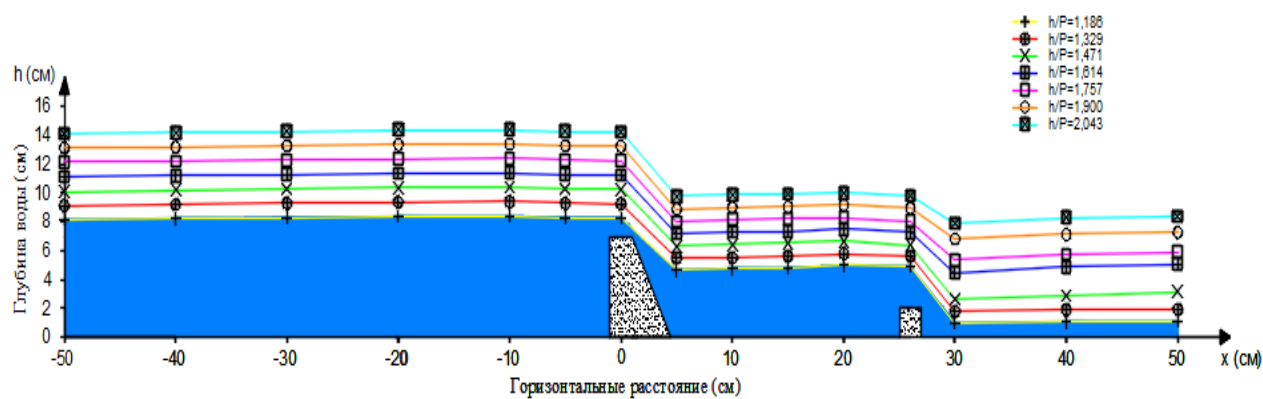
Исследования выполнялись при напорах от $1,3 \cdot 10^{-2}$ м до $7,3 \cdot 10^{-2}$ м с шагом 0,01 м, расход воды был в диапазоне $0,58 \cdot 10^{-3}$ – $9,94 \cdot 10^{-3}$ м³/с, скорости потока находилась в пределах от 0.046 м/с до 0.406 м/с. Для измерения уровней воды и отметок дна лотка использовался шпигенмасштаб с точностью 0,1 мм. Расходы измерялись объёмным методом с помощью тарированной мерной ёмкости с точностью до 2,5 %.

Эксперименты позволяют оценить интенсивность изменения продольных профилей водной поверхности при разных расходах для исследуемых моделей полигональных водосливов практических профилей. Уровни свободной поверхности и отметки дна канала для 15 створов и всех рассматриваемых моделей полигональных водосливов представлены в **приложении 5**.

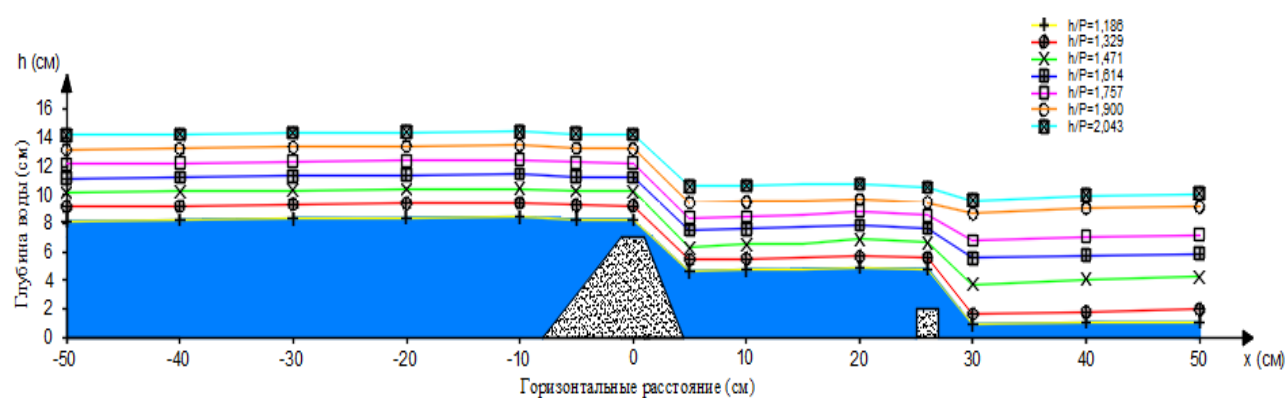
Построение профилей уровней и отметок дна по длине мелиоративного канала выполнялось в следующем порядке: на систему координат наносились точки с цифровыми значениями длины и уровня x и h . Уровень измерялся в 6 точках в ВБ с шагом 10 см до 50 см от оси водослива. И в 7 точках с шагом 10 см до 50 см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

4.1.2 Исследование уровня на водосливе в мелиоративных каналах

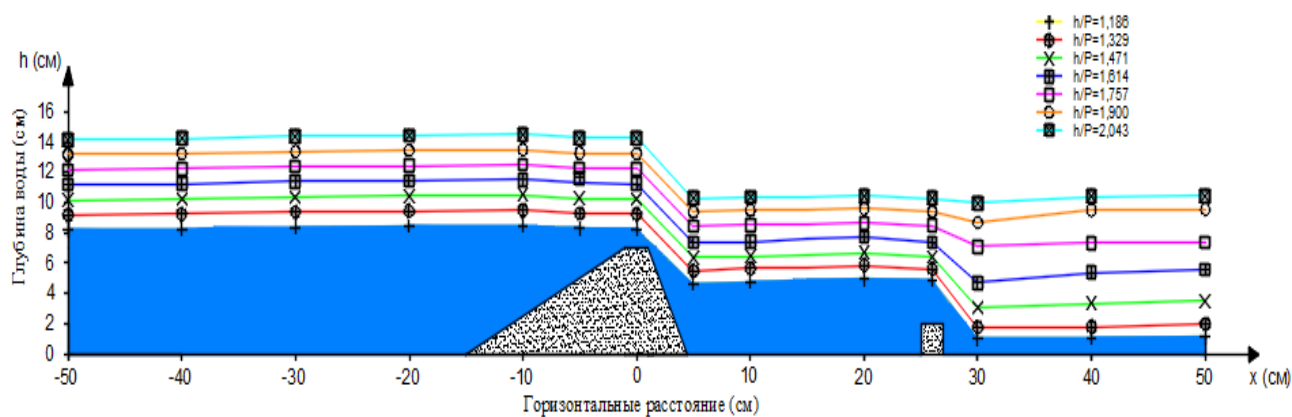
На рисунках 4.1 А; Б и В представлены продольные профили уровня в лотке для угла боковых стенок водослива к его оси $\alpha=30^\circ$ при изменении заложения верховой грани 0; 1:1 и 2:1, соответственно.



А)



Б)



В)

А) заложении верхней грани $m_l = 0$; Б) заложении верхней грани $m_l = 1:1$;

В) заложении верхней грани $m_l = 2:1$

Рисунок 4.1 – Продольные профили уровня
по длине канала для $\alpha = 30^\circ$

Из анализа полученных значений (рисунки 4.1 А; Б и В) можно сделать вывод о том, что продольные профили свободной поверхности вдоль потока без

изменения формы принимают все более высокие отметки с ростом расхода воды. Продольные профили водной поверхности перемещаются вверх по течению в верхнем бьефе, т.е. уровень воды до входа на полигональный водослив на участке от -50 см до -10 см поднимется, затем на подходе к водосливу на участке от -10 см до 0 уровень несколько понижается. На перепаде создаётся местное сжатие, обусловленное уменьшением живого сечения потока над порогом водослива. Это понижение становится заметным на расстоянии (3-5) H от гребня водослива, 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 водослив, 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 водослива на изменение уровня над гребнем водослива. На горизонтальной оси графика откладывают расстояние по длине канала, на которое распространяется (-20...+10) см от оси водослива, а на вертикальной оси – уровни. На рисунках (4.2-4.4) представлены графики профилей свободной поверхности на участке от -20 см до +10 см при изменении верхового откоса порога: 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 изменении верхового откоса порога: 0; 1:1 и 2:1, соответственно, при $\alpha=45^\circ, 60^\circ$.

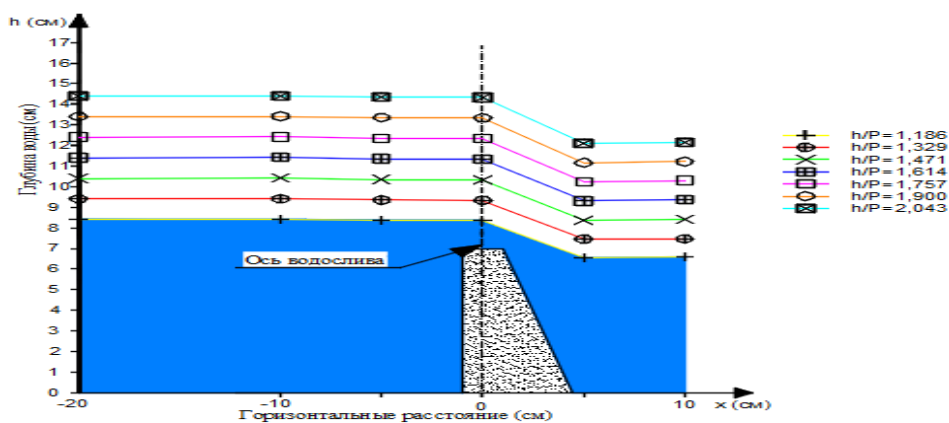


Рисунок 4.2 – Продольные профили свободной поверхности
при $\alpha = 30^\circ$ и $m_l = 0$

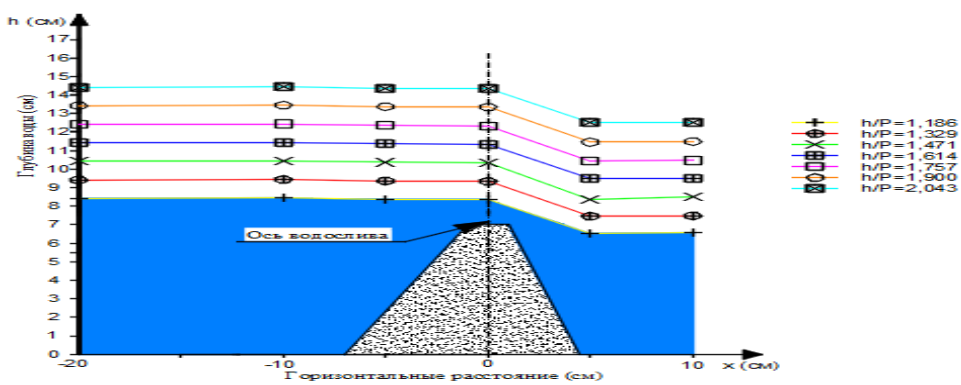


Рисунок 4.3 – Продольные профили свободной поверхности
при $\alpha = 30^\circ$ и $m_l = 1:1$

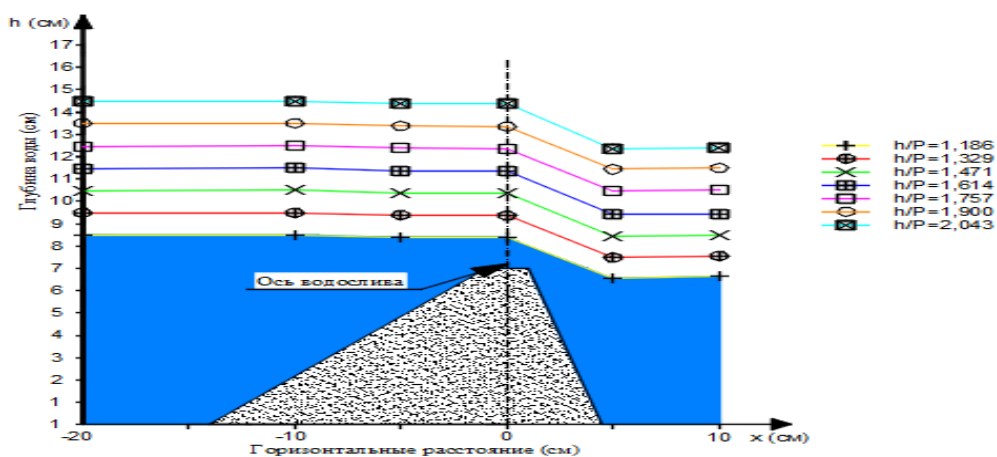


Рисунок 4.4 – Продольные профили свободной поверхности
при $\alpha = 30^\circ$ и $m_l = 2:1$

Из опытных данных (рисунки 4.2- 4.4) установлено, что с ростом заложения верховой грани и значения h/P продольные профили свободной поверхности перемещаются вверх по течению. Для углов боковых стенок водослива к оси водослива $\alpha=30^\circ$ и при заложении верховой грани $m_1=2:1$ кривые свободной поверхности потока несколько повышаются до 0,20% и 0,37% по сравнению с водосливами с заложениями верховой грани 1:1 и 0, соответственно.

Аналогичные данные получили для полигональных водосливов практического профиля при углах боковых стенок к оси водослива $\alpha=45^\circ$ и 60° и заложениях верхового откоса порога 0; 1:1 и 2:1, соответственно.

Можно сделать следующие выводы:

1- модель полигонального водослива практического профиля 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 модели и будет обеспечивать стабильную работу насосной станции на мелиоративных каналах;

2 - при движении потока на полигональном водосливе 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.

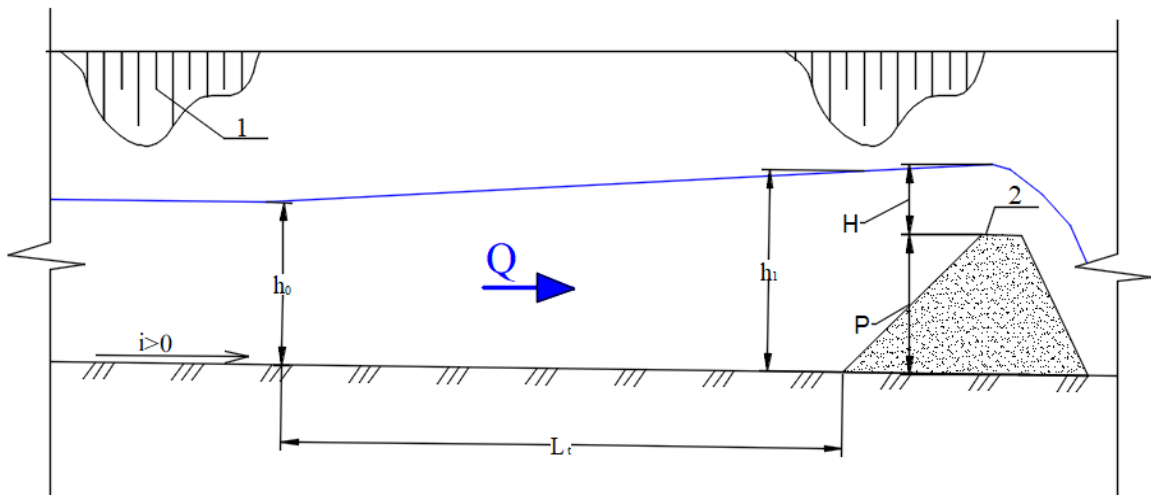
4.1.3 Исследование уровня в ВБ мелиоративного канала у водоподпорного сооружения

Основной целью исследования является установление влияния водоподпорного сооружения на длину участка, где возможно расположение всасывающих труб насосной станции на мелиоративном канале. Для определения

длины участка L_t и места установки всасывающих труб насосной станции использовался уравнение В. И. Чарномского [14, 98] при $i > 0$, которое имеет вид:

$$L_t = \frac{\mathfrak{E}_1 - \mathfrak{E}_0}{i - i_{fcp}}, \quad (4.1)$$

где $\mathfrak{E}_1$ – удельная энергия сечения при глубине h_1 у 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 4.5 приведена расчетная схема участка с кривой подпора a_1 ., т.к. $i < i_{кр}$.



1 – бровка канала; 2 – полигональный водослив; L_t – длина кривой свободной поверхности; h_0 – нормальная глубина, при которой линии водной поверхности начинают стабилизироваться; h_1 – глубина у водослива

Рисунок 4.5 – Длина кривой свободной поверхности у порога водослива

Удельная энергия вычисляется по следующему соотношению:

$$\mathfrak{E}_i = h_i + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_i^2}, \quad (4.2)$$

где Q – расход воды в канале, $\text{м}^3/\text{с}$; ω_i – площадь живого сечения канала, м^2 ; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; α – коэффициент Кориолиса, $\alpha=1,1$; b – ширина сечения потока, м ; m – коэффициент заложения откоса.

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

$$i_{fi} = \left(\frac{q}{\omega_i W_i} \right)^2, \quad (4.3)$$

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

Гидравлический радиус R_i определяется по выражению:

$$R_i = \frac{\omega_i}{X_i}, \quad (4.4)$$

где X_i – длина смоченного периметра.

В таблице 4.1 представлен расчет длины кривой свободной поверхности L_t для изучаемых моделей полигонального водослива практического профиля при угле боковых стенок водослива к его оси $\alpha = 30^\circ$ с изменением заложения верхового откоса 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 полигонального водослива $\alpha = 45^\circ$ и 60° , соответственно, представлены в таблицах 7.1-7.2 **приложение 7**.

Установлено, что длина кривой свободной поверхности L_t в ВБ канала возрастает с увеличением заложения верховой грани полигонального водослива. 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 4.1).

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

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

4.1.4 Анализ опытных данных по размещению насосных станций в ВБ мелиоративных каналов

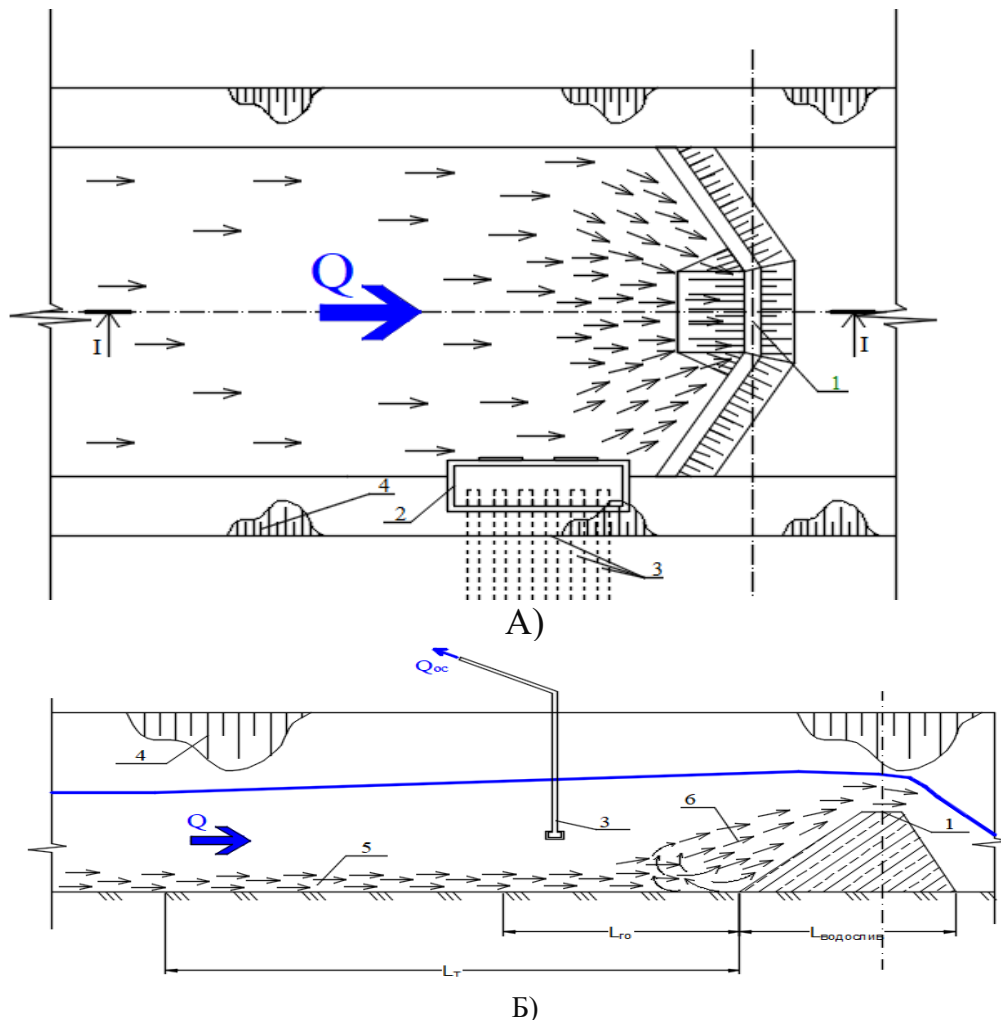
В условиях дефицита воды в источниках орошения эксплуатация мелиоративных насосных станций на основе ресурсосберегающих технологий является первостепенной задачей. Увеличение межремонтных сроков службы сооружений и оборудования, обеспечение экономии электрической энергии, рациональное водопользование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

Таблица 4.1 – 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

Выбор места установки всасывающих труб насосной станции в ВБ мелиоративных каналах (рисунок 4.6) имеет решающее значение для рационального водопользования оросительных систем.

Однако вопрос точного размещения всасывающих труб насосной станции у водоподпорного сооружения оставался недостаточно определённым. Опыты, выполненные на физических моделях водослива, позволяют установить место расположения всасывающих труб насосной станции перед порогом, при котором полигональный водослив обеспечивает промыву наносов гидравлическими струями перед порогом на расстоянии $L_{го}$, что обеспечивается боковыми и центральными струями набегающего потока (рисунок 4.6).



А) план; Б) разрез I-I

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

Рисунок 4.6 – Место гидравлической очистки от наносов перед полигональным водосливом

На основании результатов измерений уровня воды в ВБ и с использованием метод В. И. Чарномского [98] получили длину кривой свободной поверхности L_t , которую можно использовать для размещения НС. На данном участке устанавливаются уровни, которые обеспечивают бесперебойную эксплуатацию НС. Анализ данных по движению наносов и результаты измерений отложения донных наносов перед порогом водослива определяют зону гидравлической очистки на дине L_{zo} , которую можно считать наиболее стабильной зоной для размещения НС, как показано на рисунок 4.6. В таблице 4.2 представлены значения длины гидравлической очистки L_{zo} , длины кривой свободной поверхности L_t , относительный параметр $L_{го}/L_t$, и относительный параметр $L_{го}/h$ для физических моделей полигональных водосливов.

В таблице 4.2 получены отношения L_{zo}/h для полигональных водосливов практического профиля при угле боковых стенок водослива к его оси $\alpha = 30, 45$ и 60 град. Наилучшие результаты установлены для водослива с заложением верхового откоса 2:1 и углом 30 град. Для этого водослива получено max соотношение $L_{zo}/h = 2,74$.

Таблица 4.2 – 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,	$L_{го}/L_t$	$L_{го}/h$
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 любой глубине имеем максимальное расстояние влияния свободной поверхности уровня в канале от подпорного сооружения для моделей водослива.

Кроме того, водослив при угле боковых стенок к оси 30° и заложении верхового откоса 2:1 обеспечивает наибольшее расстояние гидравлической очистки от отложений наносов перед порогом полигонального водослива до $(1.51-2.74)h$, т.е. обеспечивает наилучшую очистку до 51.4 % от отложений наносов перед порогом полигонального водослива, что создаёт устойчивую работу мелиоративных насосных станций при рациональном водопользовании.

4.2. Выводы по 4 главе:

- построены продольные профили свободной поверхности потока у водоподпорного сооружения при углах боковых стенок водослива 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 перемещается вверх по течению с увеличением заложения верховой грани и с уменьшением угла боковых стенок водослива к его оси, т.е. конструкция водослив с уклоном боковых стенок $\alpha = 30^\circ$ и заложением верхового откоса порога $m_1=2:1$ обеспечивает наибольший уровень перед порогом водоподпорного сооружения;

- на основании уравнения В. И. Чарномского рассчитаны длины кривой свободной поверхности L_t в ВБ канала перед порогом полигонального водослива и получено, что длина кривой свободной поверхности L_t для угла боковых стенок водослива к его оси $\alpha=30^\circ$ больше на 15,11 %; 17,00 % и 24,98 % по сравнению с водосливом при $\alpha=45^\circ$ и больше на 28,20 %; 31,62 % и 37,09 % по сравнению с водосливом 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 водослива к его оси;

- установлено, что длина кривой свободной поверхности L_t и длина гидравлической очистки L_{zo} были максимальны при угле боковых стенок водослива к его оси $\alpha=30^\circ$ и заложении верхового откоса порога $m_I=2:1$, что связано с полигональной формой водослива и действием боковых и центральных струй набегающего потока [100];

- получено, что для полигонального водослива практического профиля с углом боковых стенок водослива к его оси $\alpha=30^\circ$ лучшее место для расположения всасывающих труб на мелиоративном канале находится на расстоянии $(1,51-2,74) h$, при $\alpha=45^\circ$ - на расстоянии $(1,23-2,47) h$, при $\alpha=60^\circ$ - на расстоянии $(0,82-2,05) h$ от его порога, соответственно.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПОДПОРНОГО СООРУЖЕНИЯ НА НОВОКУБАНСКОМ КАНАЛЕ

5.1 Краткая характеристика водоподпорного сооружения на Новокубанском канале

Водоподпорное сооружение расположено на Новокубанском канале в 1,53 км от водозаборного сооружения на р. Кубань, которое обслуживает Новокубанский мелиоративный канал общей протяжённостью 72 км. Канал проходит по двум районам. Новокубанском и Гулькевичском с трассой вдоль р. Кубань, расстояние от устья до головы канала 576 км. Канал считается магистральным оросительно-обводнительных и построен в 1954 года для подачи воды из р. Кубань к орошаемым земельным участкам [51, 57, 67, 85]. Проектный максимальный расход канала 18,0 м³/с. Канал находится в удовлетворительном состоянии с максимальной пропускной способностью – 11,5 м³/с на данный момент времени. В таблице 5.1 даны средние расходы воды в Новокубанском канале по данным ФГБУ «Управления «Кубаньмелиоводхоз» за 10 лет и расходы воды в канале за 2019 г., средний многолетний расход воды по каналу составляет – 8,47 м³/с и средние глубины в канале находятся в диапазоне 0,3-2,5 м в зависимости от времени года и прохождения паводков [85, 99].

Таблица 5.1 – Среднемноголетние расходы и расход за 2019 г. Новокубанского канала

Месяц	Ср. расход м ³ /с	Расход, м ³ /с	Месяц	Ср. расход м ³ /с	Расход, м ³ /с
Январь	6,13	7,17	Июль	10,53	10,15
Февраль	6,15	6,47	Август	10,77	10,25
Март	6,48	6,63	Сентября	10,97	10,01
Апрель	7,13	7,13	Октябрь	9,12	10,35
Май	8,83	8,35	Ноябрь	8,62	9,09
Июнь	9,73	9,06	Декабрь	7,22	8,18

Водоподпорное сооружение на Новокубанском канале построено в 2018г по проекту кафедры гидравлики и с. х. водоснабжения КубГАУ и работает как подпорное и регулирующее сооружение для подачи воды в ООО «Южная плодоовощная компания» Новокубанского района Краснодарского края для системы капельного орошения на площади 800 га (Патент №2614798С1 от 29.03.2017г.) [72].

Водоподпорное сооружение (рисунок 5.1) в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания состоит из подводящего и отводящего участка. За водосливом имеется водобойная стенка, имеется рисберма, по центру которой в шахматном порядке установлены рассеиватели. Подпорное сооружение с боковыми стенками, которые расположены под углом 60° к оси движения потока и в местах примыкания к боковым устоям укреплены дополнительными береговыми устоями [72].



Рисунок 5.1 – Водоподпорное сооружение на Новокубанском канале

Сооружение (рисунок 5.1) имеет следующие параметры: высота порога водослива $P=0,8$ м; заложение верхового откоса 2:1; заложение низового откоса 1:1,4; углы боковых стенки 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 водослива $L_n = 0,5$ м; напор над водосливом в диапазоне 0,24-1,2 м.

На левом берегу канала (рисунок 5.2) установлено водозаборное сооружение, содержащее рыбозащитное устройство, на расстоянии 1,5 м от левого устоя водослива и представляет собой аванкамеру закрытого типа с 6 всасывающими трубами диаметром 300 мм, расположенными от дна на 0,5 м.



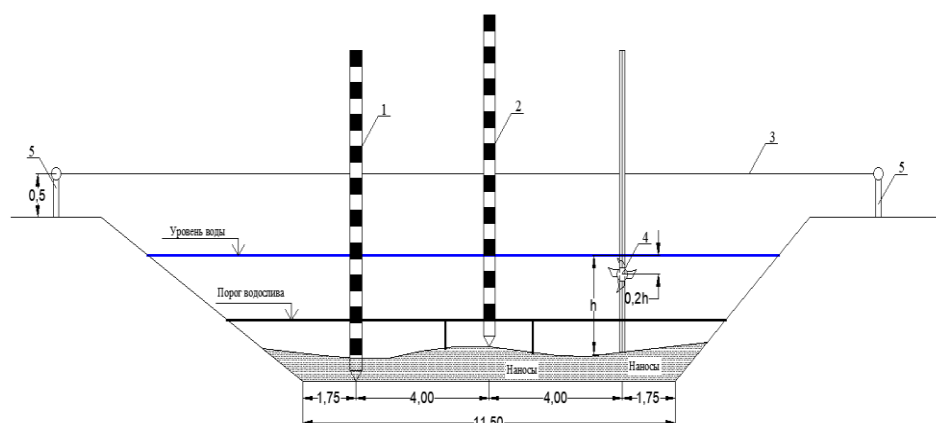
Рисунок 5.2 – Водозаборное сооружение на Новокубанском канале
в ООО «Южная плодоовощная компания»

Трасса канала проходит в тяжелых и средних суглинках. Сечение канала устойчивое и обеспечивает пропуск паводковых вод. Канал выполнен в выемке, русло канала практически лишено растительности, берега же зарастают в вегетативный период тростником и камышом. Вода в Новокубанском канале имеет мутность р. Кубань находится от 100 до 500 г/м³[52, 51, 57, 67, 82, 83, 99].

5.2 Методика исследования

Топографические и гидрометеорологические исследования проводились в 2018 году при проектировании и в 2022 году 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 водосливе. 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, 2 (рисунок 5.3).



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

Рисунок 5.3 – 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 (5.1):

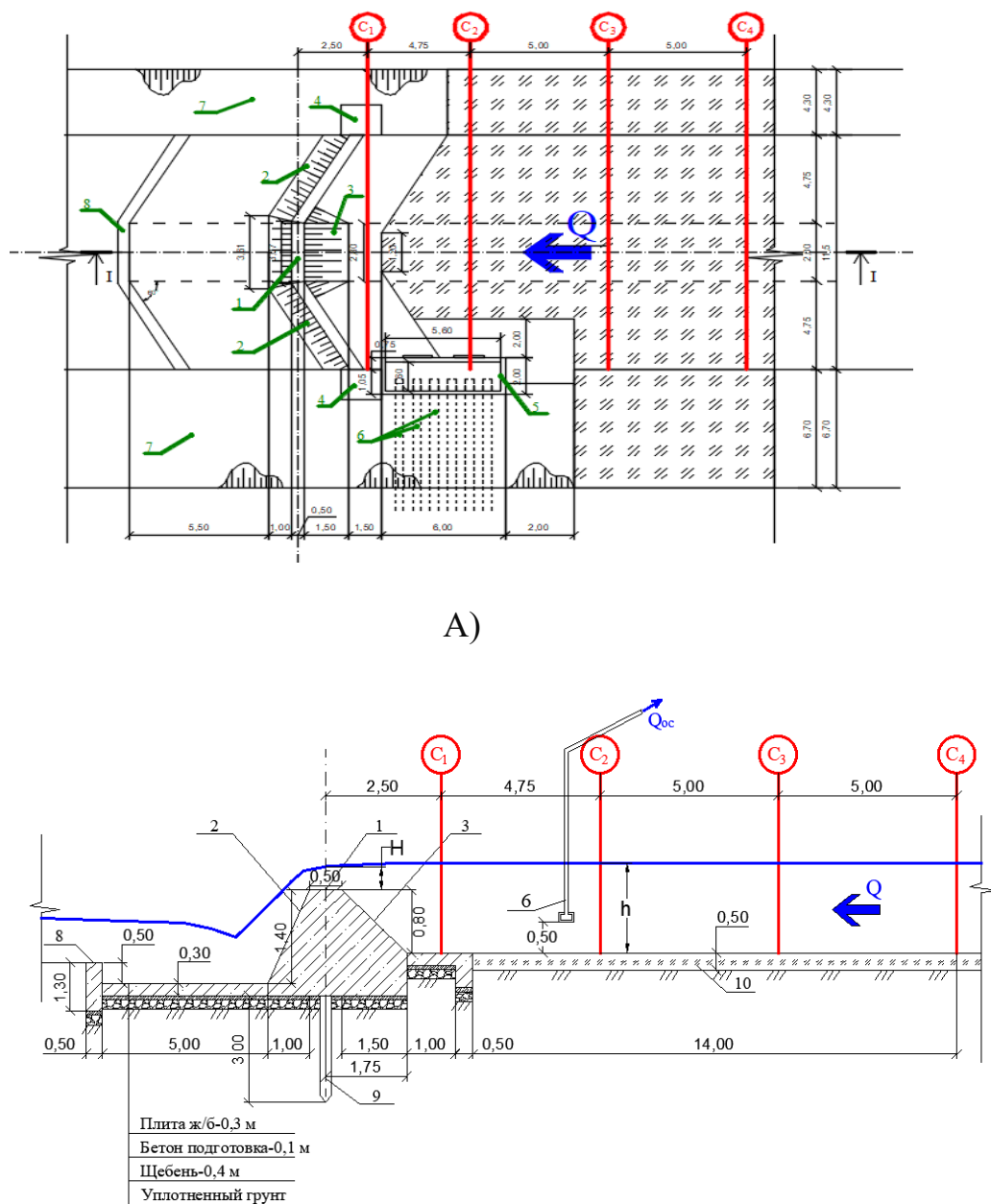
$$V_{\text{ср}} = \frac{V_{0,2} + 2 \cdot V_{0,6} + V_{0,8}}{4}, \quad (5.1)$$

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

Гидрометрические измерения проводили в вегетационный период на четырех створах C_1 ; C_2 ; C_3 и C_4 перед полигональным водосливом в ВБ 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 5.4 А и Б.

В каждом створе измеряли глубину канала, толщину донных отложений, глубину воды и среднюю скоростью потока на 3 вертикалях с расстоянием 1,75 м от края дна канала и 4,00 м от середины канала (рисунок 5.3).

На рисунке 5.4 дано водоподпорное сооружение в Новокубанском канале.



Б)

А – План; Б – разрез I-I

1 – порог полигонального водослива; 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 5.4 – Водоподпорное сооружение в Новокубанском канале

Для определения расхода воды в канале использовалась формула (5.2):

$$Q = m_n \cdot B_{\text{п}} \cdot \sqrt{2gH^3}, \quad (5.2)$$

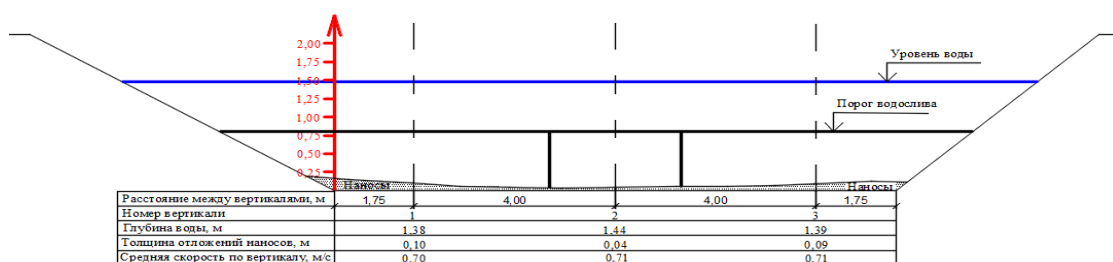
где Q – среднееголетний расход канала, м³/с; m_n – коэффициент расхода полигонального водослива составляет 0,373 при $\alpha=60^\circ$; $B_{\text{п}}$ – длина водосливного фронта полигонального водослива, м; H – напор над водосливом, м.

5.3 Исследование эффективности водоподпорного сооружения в створе водозабора Новокубанского канала

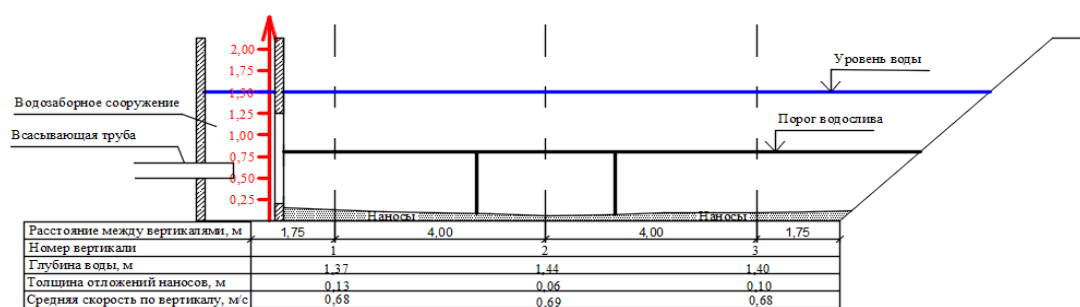
Для определения эффективности работы водоподпорного сооружения на Новокубанском канале были определены гидравлические параметры перед порогом водослива в период вегетации (рисунок 5.9 А; Б; В и Г). Глубина воды, толщина отложений наносов и средняя скорость определялась в створах C_1 , C_2 , C_3 и C_4 в августе 2022г.

Рисунки 5.5 (А; Б; В и Г) показывают, что средняя глубина воды была 1,40 м; 1,38 м; 1,28 м и 1,15 м, средняя толщина отложений наносов составляла 0,08 м; 0,10 м; 0,20 м и 0,31 м, средняя скорость – 0,71 м/с; 0,69 м/с; 0,68 м/с и 0,67 м/с и уровень воды был 1,48 м; 1,47 м; 1,46 м и 1,45 м в створах C_1 , C_2 , C_3 и C_4 , соответственно.

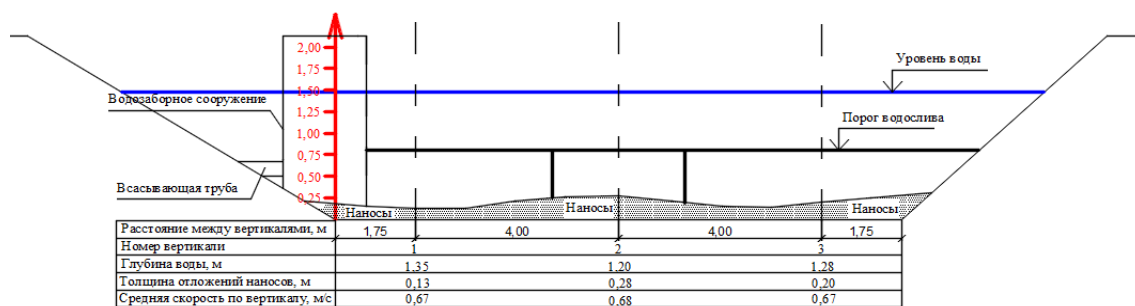
Таким образом, глубина и скорость воды в Новокубанском канале увеличивается по мере приближения к порогу водоподпорного сооружения, а толщина отложений наносов уменьшается. Это связано с действием боковых и центральных струй водослива за счет полигональной формы в плане водосливных граней, аналогичные исследования получали на физических моделях.



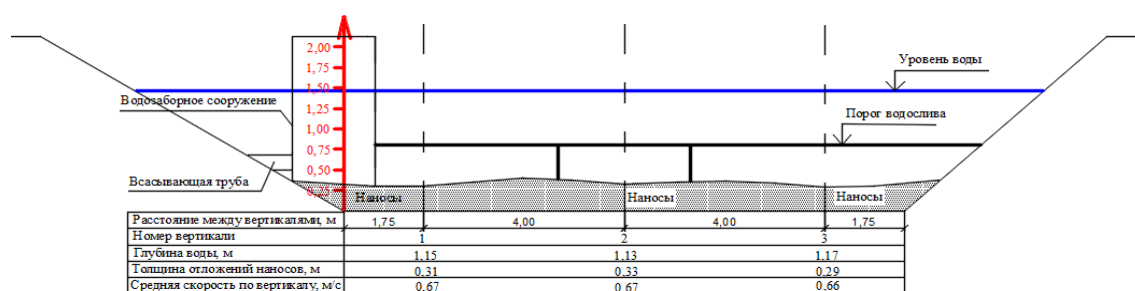
А)



Б)



В)



Г)

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

Рисунок 5.5 – Профили Новокубанского канала перед полигональным водосливом в августе 2022г.

По результатам лабораторных исследований установлено, что при скорости потока 0,32 м/с частицы начинают сдвигаться из верхнего в нижний бьеф водослива, а в натуре все скорости в створах были > 0,32 м/с, этим объясняется перенос отложений наносов из ВБ в НБ водослива.

Результаты показывают, что средняя толщина наносов, отложившихся у порога водоподпорного сооружения и водозаборного сооружения в створах С₁ и С₂, составляет 0,08-0,10 м, меньше, чем заглубление всасывающих труб насосной станции 0,5 м. Наносы практически не попадают в водозаборное сооружение, это связано с формой полигонального водослива, которая создаёт гидравлические условия очистки наносов у порога сооружения.

По уровням в вегетационный период 2022г из уравнения (5.2) рассчитаны расходы воды в Новокубанском канале (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Расчетный расход Новокубанского канала в вегетационный период

Месяц	Напор воды в канале (h, м)	Напор воды над водосливом (H, м)	Расход воды в канале (Q, м ³ /с)
Июнь	1,37	0,57	9,16
Июль	1,42	0,62	10,42
Август	1,47	0,67	10,45
Сентября	1,41	0,61	10,09

Для оценки влияния водоподпорного сооружения на уровень в канале была рассчитана зависимость $Q=f(h)$ в Новокубанском канале без водослива. Для этого применяли данные таблицы 5.2 и уравнение:

$$Q = \frac{1}{n} \omega R^{1/6} \sqrt{RI}, \quad (5.3)$$

где n – коэффициент шероховатости русла составляет 0,03; $\omega = h(b + mh)$ – площадь живого сечения, м²; b – ширина дна канала, м; h – напор 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, который составляет 0,001.

На рисунке 5.6 представлены кривые зависимости расходов воды (Q , м³/с) от напоров воды (h , м) в канале с и без водоподпорного сооружения.

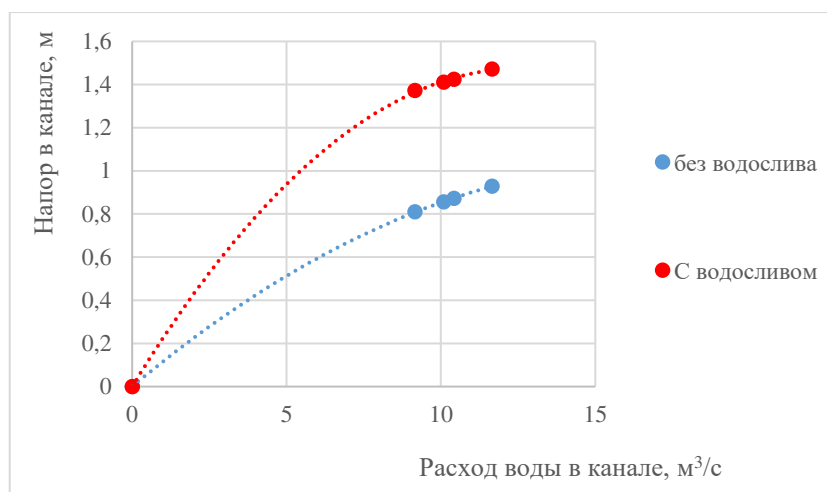


Рисунок 5.6 – Зависимости расходов воды от напоров воды в Новокубанском канале для водоподпорного сооружения и без него

Результаты показывают, что напор воды в Новокубанском канале при отсутствии водоподпорного сооружения находится в пределах 0,81-0,93 м, а при его наличии находится в пределах 1,37-1,47 м при соответствующих расходах. Это ведёт к увеличению скорости течения воды у водоподпорного сооружения и к стабильному водозабору.

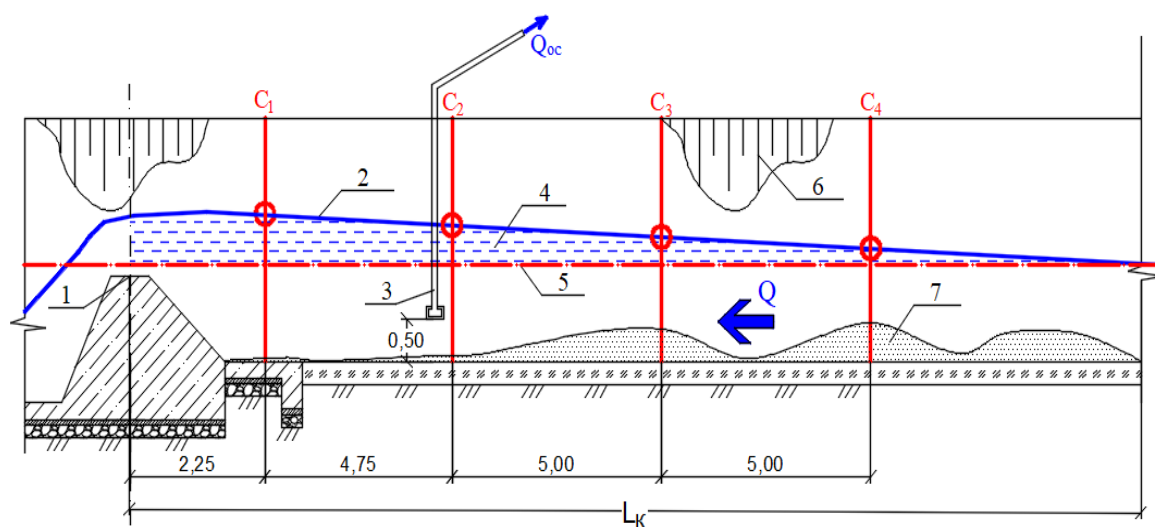
Из рисунка 5.6 видно, что водоподпорное сооружение обеспечивает повышение уровня воды в канале на 36-40 %, т.е. увеличению объема воды в канале, что способствует повышению водообеспеченности канала при орошении. На рисунке 5.7 показана кривая свободной поверхности воды в Новокубанском канале без сооружения и с ним. Разница объёмов между ними даёт дополнительные объём воды для орошения.

Дополнительный объем воды (V_d) в канале рассчитывается с использованием уравнения В. И. Чарномского [14, 98] и по формуле (5.4), и представлены в таблице 8.1 (приложение 8):

$$V_d = (A_c - A_6) \cdot L_k / 2, \quad (5.4)$$

где A_c – площадь живого сечения канала при наличии водослива, м²; A_6 – площадь

живого сечения канала при отсутствии водослива, м^2 ; L_k – длина кривой поверхности воды, м.



1 – водослив; 2 – опытная кривая подпора при наличии водослива; 3 – всасывающие трубы НС; 4 – дополнительный объем воды в канале; 5 – расчётная кривая уровня воды в канале без водослива по уравнению (5.3); 6 – бровка канала; 7 – наносы;

Рисунок 5.7 – Кривые свободной поверхности воды в канале без водоподпорного сооружения и с ним

На рисунке 5.8 представлены дополнительные секундные объемы воды, обеспечиваемые водосливом, в вегетационный период 2022г.

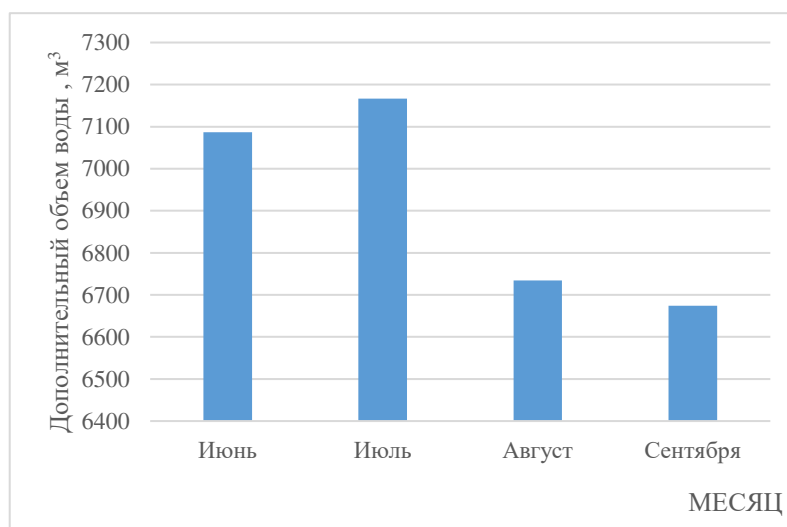


Рисунок 5.8 – Дополнительные секундные объемы воды
в Новокубанском канале

Из рисунка 5.8 установлено, что средний секундный дополнительный объем воды в Новокубанском канале, который водоподпорное сооружение обеспечивает для орошения составляет 6915 м^3 , обеспечивает повышение объема воды на 41 % по сравнению с объемом воды в канале без сооружения, и, следовательно, увеличивает водообеспеченность оросительной системы.

5.3.1 Обоснование эколого-экономической эффективности водоподпорного сооружения

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 $0,8 \text{ м}^3$.

Стоимость очистки от наносов участка Новокубанского канала по данным ФГБУ «Управления «Кубаньмелиоводхоз» составляет 195,2 тыс. руб./км, следовательно, стоимость очистки участка канала от водозаборного сооружения на р. Кубань до водоподпорного сооружения длиной 1,52 км можно рассчитать:

$$C_{\text{дв}} = L_{\text{дв}} \cdot C_1, \quad (5.5)$$

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 (5.5) установлено, что стоимость очистки участка канала перед водосливом составляет 296,7 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 0,67-0,71 м/с и водосливной формой самого водоподпорного сооружения, чрез которое пропуск наносов доходит до 51,7 %.

Следовательно, эколого-экономическая эффективность от расчистки русла Новокубанского канала составила – 445,1 тыс. руб./год.

5.4 Выводы по 5 главе:

- Водоподпорное сооружение на Новокубанском канале повышает уровень в вегетационный период на 36-40%, стабилизируя работу насосной станции ООО «Южная плодоовощная компания»;

- полигональный водослив на Новокубанском канале обеспечивает секундный дополнительный объем воды, который составляет 6915 м³, увеличивая водообеспеченность стока канала для орошения;

- получено, что средняя скорость воды в Новокубанском канале в створах С₁, С₂, С₃ и С₄ составляет 0,71 м/с, 0,69 м/с, 0,68 м/с и 0,67 м/с, что способствует движению и пропуску наносов через порог водослива и снижению заиления русла Новокубанского канала, при этом установлен эколого-экономический эффект от расчистки русла Новокубанского канала, который составил – 445,1 тыс. руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны модели водослива с заложением верховой грани $m_l = 0$; 1:1 и 2:1 и углами боковых стенок к осям $\alpha = 30^\circ$; 45° и 60° , которые можно считать эффективными, обеспечивающими покрытие дефицита воды в вегетационный период культур, благоприятные условия для транзита наносов; очистку участка канала гидравлическими струями в ВБ для устойчивого водозабора.

2. Исследован коэффициент расхода полигонального водоподпорного сооружения, получены новые формулы для определения коэффициентов расхода при различных заложениях верховой грани 0; 1:1 и 2:1 и углах боковых стенок к оси водослива 30° ; 45° и 60° . Установлены диапазоны применимости этих формул: при изменении расходов в диапазоне $0,11 \cdot 10^{-3} - 4,30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и напоров $3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \leq h \leq 21 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; для относительной ширины порога водослива $0,081 \leq h/L_n \leq 0,938$ и относительной длины полигонального фронта $0,004 \leq h/B_n \leq 0,044$. Получен коэффициент расхода: для угла $\alpha = 30^\circ$ в диапазоне 0,344-0,421, для $\alpha = 45^\circ$ в диапазоне 0,336-0,410 и для $\alpha = 60^\circ$ в диапазоне 0,326-0,403. При этом расходы в канале изменялись в диапазоне 0,34-13,44 $\text{м}^3/\text{с}$ и напоры были 0,08-0,53 м.

3. Исследовано движение наносов диаметром частиц песка 0,1-0,25 мм при скорости потока - 0,041-0,409 м/с. Процент песка, прошедшего через модели полигональных водосливов, для углов $\alpha = 30^\circ$; 45° ; 60° и 90° находился в диапазоне 3,0-51,4 %; 2,5-35,6 %; 2,2-28,2 % и 1,8-24,8 %, соответственно. Получена новая зависимость (3.9) для процента пропуска наносов $\Pi\%$ от скоростей воды v у полигонального водослива при расходах в диапазоне $0,58 \cdot 10^{-3} - 9,94 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и напоров $1,3 \cdot 10^{-2} - 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Модель полигонального водослива с углом боковых стенок водослива к его оси 30° и заложением верховой грани $m_l = 2:1$ можно считать наиболее эффективной, т.к. она обеспечивает наибольший пропуск наносов до 51,4 % при максимальном m_n .

4. Водоподпорное сооружение создаёт требуемую водообеспеченность во время вегетации культур за счет создания подпоров уровней длиной до 1 км в

Новокубанском канале, обеспечивая устойчивый водозабор. Всасывающие трубы насосной станции необходимо установить на расстоянии $(1,5 - 2,75) h$ от порога сооружения, при этом уровни достигают наибольшей величины 1,37-1,47 м.

5. Установлено экспериментально, что в вегетационный период полигональный водослив повышает уровень воды в Новокубанском канале в створе водозабора ООО «Южная плодоовощная компания» на 36-40 %, обеспечивая дополнительный объем воды в канале, который составляет в среднем 6915 м³. Эколого-экономический эффект от гидравлической самоочистки русла Новокубанского канала в верхнем бьефе водоподпорного сооружения составляет 445,1 тыс. руб./год.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

С целью повышения водообеспеченности оросительных каналов и защиты мелиоративных насосных станций от взвешенных наносов необходимо проектировать и внедрять водоподпорные сооружения в виде полигонального водослива практического профиля прямолинейного очертания, которые улучшат качество воды для оросительных систем за счет уменьшения наносов при водозаборе, повысят глубины на участках канала и водообеспеченность, а также снизят стоимость эксплуатации мелиоративных каналов.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Проектирование и строительство полигональных водоподпорных сооружений на мелиоративных каналах повысят водообеспеченность каналов при дефиците водных ресурсов, обеспечат оросительные системы необходимым количеством воды в вегетационный период сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ

- 1- Абакаров, А. Т. Повышение эксплуатационной надежности оросительных систем / А. Т. Абакаров // Агроинженерия, – 2008. – N5/1. – С. 99-103.
- 2- 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.
- 3- 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.
- 4- Айдаров, И. П. Проблемы мелиорации земель и водопользования / И. П. Айдаров //Мелиорация и рекультивация, экология. – 2008. – № 2. – С.5-19.
- 5- Александрович, М. П. Сопряжение бьефов и безопасность работы водосбросного сооружения Краснодарского гидроузё в современных условиях / М. П. Александрович, Х. В. Абрамович // Природообустройство. – 2010. – № 1. – С. 55-59.
- 6- 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.
- 7- Алексеевский, Н. И. Формирование и движение речных наносов / Н. И. Алексеевский. – М.: Изд -во Моск. ун-та, 1998. – 202 с.
- 8- Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1978. – 25 с.
- 9- 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, 1961. – 160 с.

10- Андреев, Е. В. Совершенствование методов оценки эксплуатационной надежности низконапорных грунтовых плотин: дис. ... канд. технических наук: 05.23.07 / Андреев, Евгений Владимирович. – Москва, 2013. – 211 с.

11- 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.

12- 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.

13- 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. – № 1. – С. 52-63.

14- 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.

15- Бракени, А. Пропускная способность треугольного водослива практического профиля: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.16 / Бракени, Абдеррезак. – Москва, 1996. – 23 с.

16- Вали, У. Г. Разработка методов определения пропускной способности гидрометрических параболических лотков в малых трапецеидальных каналах: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.16 / Вали Умару Гарба. – Москва, 2002. – 27 с.

17- Великанов, М. А. Движение наносов/ М. А. Великанов. – Москва: изд-во и 1-я тип. Речиздата, 1948. – 210 с.

18- 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.

- 19- Гидротехнические сооружения: Учебники и учебн. 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.
- 20- Гидротранспорт (вопросы гидравлики) / Н. А. Силин, Ю. К. Витошкин, В. М. Карасик, В. Ф. Очеретько. – Киев: Наукова думка, 1971. – 156 с.
- 21- 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.
- 22- 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. – №4. – С.493-506.
- 23- 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.
- 24- Голченко, М. Г. Совершенствование конструкций сооружений для организации поверхностного стока на мелиоративных системах / М. Г. Голченко, Д. В. Желязко // Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства: сб. науч. трудов. – В.9. – Рязань, 2011. – С. 40-47.
- 25- Горбачев, В. А. Исследование вычислимых моделей развивающейся экономики: автореф. дис... кандидата физико-математических наук: 05.13.18 / Горбачев Владимир Александрович. – Москва, 2012. – 19 с.
- 26- ГОСТ Р 58376-2019. Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения. Эксплуатация. Общие требования. – Дата введения 2019-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 36 с.
- 27- Гришанин, К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 311 с.

- 28- Гришанин, К. В. Устойчивость русел рек и каналов / К. В. Гришанин. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 144 с.
- 29- Дерюгин, Г. К. Гидравлическое обоснование пропуска расходов в период эксплуатации бурейского гидроузла: монография / Г. К. Дерюгин. – Санкт-Петербург :2018. – 56 с.
- 30- 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.
- 31- Долгушев, И. А. Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов / И. А. Долгушев. – М.: «Колос», 1975. – 136 с.
- 32- Ершов, К. С. Гидравлическое обоснование методов прогноза пропускной способности высокопороговых водосбросов с горизонтальной вставкой на гребне: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.16 / Ершов Константин Сергеевич. – Москва, 2011. – 25 с.
- 33- Железняков, Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек / Г. В. Железняков. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
- 34- Жук, Г. П. Влияние водной растительности на пропускную способность каналов / Г. П. Жук // Гидротехника и мелиорация, – 1984. – №6. – С. 37-41.
- 35- Замарин, Е. А. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах / Е. А. Замарин. 2-е изд., перераб. – М. –Л., 1951. – 84 с.
- 36- Знаменская, Н. С. Донные наносы и русловые процессы / Н. С. Знаменская. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. – 191 с.
- 37- Зоммер, Т. В. Высота поднятия частиц донных и взвешенных наносов / Т. В. Зоммер, А. Г. Ходзинская. // Вестник МГСУ. – 2014. – С. 161-170.
- 38- Ивашинцов, Д. А. Современные подходы в гидравлических исследованиях гидротехнических сооружений и водотоков / Д. А. Ивашинцов, А. Б. Векслер, В. И. Климович, А. М. Швайнштейн // Гидротехническое строительство. – 2003. – №8.

- 39- Исмагилов, Х. А. Гидравлические основы расчета противоселевых сооружений для предгорной зоны Средней Азии: автореф. дис... доктора технических наук: 05.23.16 / Исмагилов Хамидулла Абдурахманович. – Москва, 1991. – 46 с.
- 40- Ищенко, А. В. Теоретическая модель водопроницаемости бетонопленочного противифльтрационного покрытия канала / А. В. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 93-97.
- 41- Иёпиро, Х. Ш. Определение поперечного сечения русел каналов по условию обеспечения транспорта наносов. / Х. Ш. Иёпиро // Гидротехническое строительство. – 1981. – № 6. – с.38-40.
- 42- Карапетян, М. А. Очистка мелиоративных каналов от наносов, заилений и растительности / М. А. Карапетян, А. Х. Арсланбекович //Агроинженерия. – 2016. – № 2. – С. 1-3.
- 43- Караушев, А. В. Теория и методы расчета речных наносов / А. В. Караушев. – Ленинград, 1977. – 272 с.
- 44- 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.
- 45- Кондратьев, Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Сنيщенко. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.
- 46- Косиченко, Ю. М. Исследование гидравлически выгодного профиля полигонального сечения крупных каналов и их гидравлических сопротивлений / Ю. М. Косиченко, Е. Г. Угроватова // Природообустройство. – 2014. – № 2. – С. 85-89.
- 47- Косиченко, Ю. М. Влияние эксплуатационных факторов на пропускную способность земляных русел каналов / Ю. М. Косиченко // Мелиорация и гидротехника, – 2011. – №3(03). – С.1-13.

- 48- 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.
- 49- Круглов, Г. Г. Гидравлические исследования водосливной плотины Гродненской ГЭС // Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – № 1. – С. 80-88.
- 50- 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.
- 51- Кузнецов, Е. В. Повышение эффективности рыбозащитных сооружений на мелиоративных водозаборах нижней кубани / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, С. М. Драгунова // Природообустройство. – 2020. – № 4. – С. 55-60.
- 52- 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.
- 53- Кузнецов, Е. В. Сельскохозяйственный мелиоративный комплекс для устойчивого развития агроландшафтов / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди: монография. Краснодар: ид – во «ЭДВИ», 2014. – 199 с.
- 54- Кузнецов, Е. В. Прогноз изменения агресурсного потенциала агроландшафтов под влиянием водно-солевого режима оросительной воды / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди // Перспективы развития науки и образования: сборник науч.трудов по материалам Международной научно-практической конференции 29 ноября 2013 г. в 7 частях. Ч.VII. Мин-во обр. и науки – М.: «АР - Кон-салт». – 2013. – С.25-28.
- 55- Кузнецов, Е. В. Методика разработки физической модели рыбо-защитного сооружения на водозаборах для оптимизации водопользования / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 23 с.
- 56- Кузнецов, Е. В. Исследование переноса наносов и распределение мутности в потоке для охраны предгорных агроландшафтов / Е. В. Кузнецов, Т. Ю.

Хаширова // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 15. – С. 159-163.

57- Кузнецов, Е. В. Значение природно – ресурсного потенциала для обеспечения устойчивого функционирования агроландшафтов степной зоны Кубани / Е. В. Кузнецов, С. А. Владимиров, Н. П. Дьяченко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. - 2007. – № 9. – С. 176-179.

58- 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.

59- 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.

60- Кыстаубаев, К. Ж. Очистные-рыбозащитные водозаборные сооружения на фильтрующем основании: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.07 / Кыстаубаев Каршига Жебегенович. – Москва, 1992. – 23 с.

61- 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.

62- Леви, И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. – Л.: Энергия, 1967. – 210 с.

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

64- Магомедова, М. Р. О факторах, обуславливающих процесс транспорта руслоформирующих наносов / М. Р. Магомедова, А. В. Магомедова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2013. – № 2. – С. 6-7.

- 65- 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.
- 66- Михеева, О. В. Необходимость мониторинга гидротехнических сооружений / О. В. Михеева, Э. Б. Калинин, Э. Ю. Мизюрова// Аграрный научный журнал.– 2024. – N9. – С. 128-133.
- 67- Никитина, Т. А. Состояние водных экологических систем бассейна реки Кубань (среднее и нижнее течение) / Т. А. Никитина, Е. В. Белан // Современные наукоемкие технологии. –2010. – № 1. – С. 66-68.
- 68- 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.
- 69- Ольгаренко, Д. Г. Технический уровень и эффективность эксплуатации мелиоративных систем / Д. Г. Ольгаренко // Мелиорация и гидротехника, – 2015. – N4(20). – С. 287-295.
- 70- 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.
- 71- Павловский, Н. Н. Гидравлический справочник: / Н. Н. Павловский. – Ленинград-Москва: ОНТИ НКТП СССР, 1937. – с. 390-398.
- 72- 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.
- 73- 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.

- 74- Петраш, А. Д. Исследование пропускной способности (экспериментальное и с помощью ЭЦВМ) водосливов трапецеидального профиля: автореф. дис. ... канд. технических наук: 05.00.00/ Петраш Александр Дмитриевич. – Киев, 1966 – 23 с.
- 75- 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.
- 76- Пхи, Л. Водосбросные сооружения с полигональными тонкостенными водосливами: автореф. дис... кандидата технических наук: 05.23.07 / Пхи Лида. – Москва, 1992. – 21 с.
- 77- Рабкова, Е. К. Проектирование и расчет оросительных каналов в земляном русле / Е. К. Рабкова. – М.: УДН, 1990. – 252 с.
- 78- Разумихина, К. В. Натурное исследование и расчет транспорта наносов / К.В. Разумихина. – Труды ГГИ, 1967. – Вып. 141. – С. 5-34.
- 79- Сатункин, И. В. Водообеспеченность территории России и стран СНГ / И. В. Сатункин, Г. В. Соболин, Л. Н. Хилько, А. А. Прядкин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2006. – № 2(10). – С. 119-123.
- 80- Сахненко, М. А. К вопросу надёжности строительных конструкций портовых гидротехнических сооружений / М. А. Сахненко // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2015. – № 2(15). – С. 12-17.
- 81- Свистунов, Ю. А. Основы расчета тканевых оболочек гидротехнических сооружений: учебное пособие / В. А. Волосухин, Ю. А. Свистунов. – Краснодар: 1994. – с 105
- 82- СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 964/пр: введены в действие 17.06.2017. – Москва: АО НИЦ "Строительство", 2017. – 33 с.
- 83- 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.

84- Степанов, П. М. Справочник по гидравлике для мелиораторов / П. М. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын. – М.: Колос, 1984. – 207 с.

85- 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.

86- Тищенко, А. И. Сетевые гидротехнические сооружения / А. И. Тищенко. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2008. – 245 с.

87- 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.

88- Ткачев, А. А. Совершенствование диспетчерского управления водораспределением на оросительных каналах мелиоративных систем / Ю. Г. Иваненко, А. А. Ткачев // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2016. – № 12(84). – С. 173-187.

89- 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.

90- Ткачев, А. А. Расчет расходов воды в магистральных каналах для неустановившегося режима течения / А. А. Ткачев // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 3. – С. 42-46.

91- Ткачев, А. А. Оптимизация процессов управления водораспределением на магистральных оросительных каналах / А. А. Ткачев. – Новочерк. гос. мелиор. академия. Новочеркасск: Оникс+, 2007. – 146 с.

92- Ткачев, А. А. Переходные гидравлические процессы в магистральных каналах оросительных систем для условий динамического регулирования

водораспределения: Автореф. дис. ... кандидата технических наук: 05.23.16 / Ткачев Александр Александрович. – Новочеркасск, 2000. – 136 с.

93- Угинчус, А. А. Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов / А. А. Угинчус. – М.: Стройиздат, 1965. – 274 с.

94- Устройство нижнего бьефа водосбросов: монография / Н. П. Розанов, Н. Т. Кавешников, Е. И. Китов [и др.]. – Колос, 1984. – 269 с.

95- Филиппов, Е. Г. Гидравлика гидрометрических сооружений для открытых потоков / Е. Г. Филиппов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 288 с.

96- Фомичева, Н. Н. Гидравлическое моделирование при изучении пропуска льда через гидротехнические сооружения / Н. Н. Фомичева // Инновации и инвестиции, – 2019. – №9/19. – С.298-300.

97- 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.

98- Хаджиди, А. Е. Гидравлический расчет открытых русел и гидротехнических сооружений: учеб. пособие / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, С. Ю. Орленко. – Краснодар: КубГАУ, 2009. – 74 с.

99- Харин, К. В. Исследование химического состава донных отложений верховьев реки кубань / К. В. Харин, И. В. Бегдай, К. Ю. Шкарлет, И. Ю. Каторгин // Наука. Инновации. Технологии. – 2013. – №3. – С. 115-122.

100- 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. – 2024г. – №3(75). – С. 195-202.

101- 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. – N2(66). – С. 353-364.

102- 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.

103- 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.

104- 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.

105- 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.

106- 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.

107- 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.

108- Хасан, М. Сравнение влияния капельного и внутрпочвенного на продуктивности растений сои в экстремальных условиях на рисовых почва / М. Хасан, А. Алматар, Е. В. Кузнецов // 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. 19-23.

109- 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). стр. 110-116.

110- Хасан, М. Влияние фронта увлажнения микроорошением на всхожесть бобов сои в экстремальных условиях / Е. В. Кузнецов, М. Хасан, А. Алматар // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2021г. – №4(84). – С.112-118.

111- Хасан, М. Расчет потерь напора в трубопроводах систем капельного орошения / Е.В. Кузнецов, М. Хасан, А. Алматар // Сборник статей по материалам IV Международной Научной Экологической Конференции. – 2020г. – С 208-215.

112- 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.

113- Хасан, М. Разработка сооружения для устойчивого забора воды на оросительную систему / Е. В. Кузнецов, М. Хасан // Сборник тезисов по материалам Международной конференции. – 2018г. – С. 50.

114- 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.

115- Ходзинская, А. Г. Высота поднятия частиц донных и взвешенных наносов / А.Г. Ходзинская, Т.В. Зоммер// Вестник МГСУ. – 2014. –№11. – С.161-170.

- 116- 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.
- 117- Чертоусов, М. Д. Гидравлика. Специальный курс / М.Д. Чертоусов. учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М., Л.: Госэнергоиздательство, 1957. – 678 с.
- 118- Чоу, В. Т. Гидравлика открытых каналов / В. Т. Чоу: [пер. с англ.]. – М.: Стройиздат, 1969. – 464 с.
- 119- Чуб, В. Е. Особенности формирования мутности воды в каналах и коллекторах в низовьях амударьи / В. Е. Чуб, Н. Г. Верещагина, А. А. Щетинников // Гидрометеорология и экология, –2016. –№3. – С. 91-96.
- 120- Шарп, Д. Ж. Гидравлическое моделирование / Д. Ж. Шарп. – М.: Мир, 1984. –279 с.
- 121- Шелонин, В. А. Движение воды в верхнем бьефе при наличии входного восходящего потока / В. А. Шелонин, Александрович А. А.// Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, – 2022. – N2(51). – С. 81-89.
- 122- Ширяев, С. Г. Влияние гидравлических условий истечения потока на пропускную способность низконапорных щитовых плотин речных гидроузлов автореф. дис... кандидат технических наук: 05.23.16 / Ширяев Сергей Григорьевич. – Новочеркасск, 2004. – 28 с.
- 123- Шмакова, М. В. К вопросу о расчетах расхода взвешенных наносов / М. В. Шмаков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. –2020. - № 1. - С. 49-71.
- 124- Штеренлихт, Д. В. Гидравлика: учеб. для вузов / Д. В. Штеренлихт. 3-е изд., перераб. и доп. М.: КолосС, 2004. – 655 с.
- 125- Щедрин, В. Н. Состояние и перспективы развития мелиорации земель на юге России / В. Н. Щедрин, Б. Г. Трифионович // Мелиорация и гидротехника, – 2014. – N3(15). – С. 1-15.
- 126- 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. – 657 с.

127- 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.

128- Щедрин, В. Н. О Концепции развития правовой и нормативно-технической базы мелиорации в России на период 2010-2020 годы / В. Н. Щедрин, В. Я. Бочкарев // Мелиорация и гидротехника. – 2011. – № 1(01). – С. 1-15.

129- Щедрин, В. Н. Безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Е. И. Шкуланов. – М.: Росинформагротех, 2011. – 268 с.

130- Щедрин, В. Н. Мелиорация земель основа устойчивого развития АПК России / В. Н. Щедрин, Балакай Г. Т. // Вестник аграрной науки Дона. – 2010. – № 3 – С. 98-107.

131- Щедрин, В. Н. Новая стратегия оросительных мелиораций - циклическое орошение / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, Т. П. Андреева // Вопросы мелиорации. – 2008. – № 34. – С. 7-20.

132- Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надёжность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов. – Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 388 с.

133- Einstein, H. A. Bed-load transport as a probability problem / H. A. Einstein // Sedimentation. Fort Collins. Colorado, 1972. Pp. 1—105.

134- 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.

135- Recent advances in maitcnoceof irrigation channels and drainage. Источник: International Commission on Irrigation and Drainage. Amirul Bulletin, 1966, pp. 33-39.

136- Timmons, F. L. Control of weeds harmful to water uses in the west / F. L. Timmons// Ж. Journal of the waterways and harbors division. – Feb. 1966. – Vol. 92. N1. – pp. 47-58.

137- Guide to weed control. Ж. The New Zealand farmer. 1966. T. 87. N12., pp. 22.

Приложение 1

Таблица 1.1 – Коэффициент расхода полигонального водослива с боковыми стенками водослива к осям $\alpha=30^\circ$ и заложениями верховой грани $m_l=0, 1:1$ и $2:1$.

$\alpha=30^\circ$				
Длина водосливного фронта ($B=0,757$ м)				
№	Фактический расход	Напор над водосливом	Теоретический расход	Коэффициент расхода
	$Q, \text{ м}^3/\text{с},$	$h, \text{ м}$	$Q^*, \text{ м}^3/\text{с}$	m_n
Водослив с заложением верховой грани $m_l=0$				
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
Водослив с заложением верховой грани $m_l=1:1$				
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
Водослив с заложением верховой грани $m_l=2:1$				
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 полигонального водослива с боковыми стенками водослива к осям $\alpha=45^\circ$ и заложениями верховой грани $m_l = 0, 1:1$ и $2:1$.

$\alpha = 45^\circ$				
Длина водосливного фронта (B=0,563м)				
№	Фактический расход	Напор над водосливом	Теоретический расход	Коэффициент расхода
	$Q_f, \text{м}^3/\text{с}$	$h, \text{м}$	$Q^*, \text{м}^3/\text{с}$	m_n
Водослив с заложением верховой грани $m_l=0$				
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
Водослив с заложением верховой грани $m_l=1:1$				
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
Водослив с заложением верховой грани $m_l=2:1$				
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 полигонального водослива с боковыми стенками водослива к осям $\alpha=60^\circ$ и с заложениями верховой грани $m_l=0, 1:1$ и $2:1$.

При $\alpha = 60^\circ$				
Длина водосливного фронта (В=0,474м)				
№	Фактический расход	Напор над водосливом	Теоретический расход	Коэффициент расхода
	Q, м ³ /с,	h, м	Q*, м ³ /с	m_n
Водослив с заложением верховой грани $m_l=0$				
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
Водослив с заложением верховой грани $m_l=1:1$				
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
Водослив с заложением верховой грани $m_l=2:1$				
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

Приложение 2

Таблица 2.1 – Зависимость коэффициента расхода m_n полигонального водослива 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 полигонального водослива 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 полигонального водослива 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

Таблица 3.1 – Экспериментальные значения коэффициента расхода водослива m_n

α	Заложение верховой грани m_l	y	X_1	X_2	X_3	X_4
		m_{II}	h/L_{II}	h/B_{II}	$\sin\theta$	$\sin\alpha$
1	2	3	4	5	6	7
30°	0	0,344	0,081	0,0040	1,000	0,5
		0,350	0,162	0,0079	1,000	0,5
		0,363	0,243	0,0119	1,000	0,5
		0,378	0,323	0,0159	1,000	0,5
		0,384	0,404	0,0198	1,000	0,5
		0,399	0,485	0,0238	1,000	0,5
		0,398	0,566	0,0277	1,000	0,5
	1:1	0,356	0,081	0,0040	0,707	0,5
		0,364	0,162	0,0079	0,707	0,5
		0,373	0,243	0,0119	0,707	0,5
		0,384	0,323	0,0159	0,707	0,5
		0,395	0,404	0,0198	0,707	0,5
		0,407	0,485	0,0238	0,707	0,5
		0,407	0,566	0,0277	0,707	0,5
	2:1	0,371	0,081	0,0040	0,454	0,5
		0,381	0,162	0,0079	0,454	0,5
		0,392	0,243	0,0119	0,454	0,5
		0,402	0,323	0,0159	0,454	0,5
		0,416	0,404	0,0198	0,454	0,5
		0,421	0,485	0,0238	0,454	0,5
		0,421	0,566	0,0277	0,454	0,5
45°	0	0,336	0,112	0,005	1,0000	0,707
		0,344	0,225	0,011	1,0000	0,707
		0,357	0,337	0,016	1,0000	0,707
		0,368	0,449	0,021	1,0000	0,707
		0,377	0,562	0,027	1,0000	0,707
		0,385	0,674	0,032	1,0000	0,707
		0,385	0,787	0,037	1,0000	0,707
	1:1	0,346	0,112	0,005	0,707	0,707
		0,357	0,225	0,011	0,707	0,707
		0,368	0,337	0,016	0,707	0,707
		0,378	0,449	0,021	0,707	0,707
		0,388	0,562	0,027	0,707	0,707
		0,397	0,674	0,032	0,707	0,707
		0,397	0,787	0,037	0,707	0,707
	2:1	0,370	0,112	0,005	0,454	0,707
		0,377	0,225	0,011	0,454	0,707
		0,384	0,337	0,016	0,454	0,707
		0,394	0,449	0,021	0,454	0,707
		0,402	0,562	0,027	0,454	0,707
		0,410	0,674	0,032	0,454	0,707
		0,410	0,787	0,037	0,454	0,707

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
60°	0	0,326	0,134	0,006	1,000	0,866
		0,334	0,268	0,013	1,000	0,866
		0,347	0,402	0,019	1,000	0,866
		0,357	0,536	0,025	1,000	0,866
		0,367	0,670	0,032	1,000	0,866
		0,378	0,804	0,038	1,000	0,866
		0,379	0,938	0,044	1,000	0,866
	1:1	0,340	0,134	0,006	0,707	0,866
		0,351	0,268	0,013	0,707	0,866
		0,360	0,402	0,019	0,707	0,866
		0,370	0,536	0,025	0,707	0,866
		0,381	0,670	0,032	0,707	0,866
		0,388	0,804	0,038	0,707	0,866
		0,389	0,938	0,044	0,707	0,866
	2:1	0,358	0,134	0,006	0,454	0,866
		0,368	0,268	0,013	0,454	0,866
		0,376	0,402	0,019	0,454	0,866
		0,385	0,536	0,025	0,454	0,866
		0,396	0,670	0,032	0,454	0,866
		0,403	0,804	0,038	0,454	0,866
		0,403	0,938	0,044	0,454	0,866

Таблица 3.2 – Результаты математического анализа коэффициента расхода водослива по (МНК)

$y=\ln z$	$x_1=\ln u_1$	$x_2=\ln u_2$	$x_3=\ln u_3$	$x_4=\ln u_4$	y^*x_1	y^*x_2	y^*x_3
1	2	3	4	5	6	7	8
-1,068	-2,515	-5,531	0,000	-0,693	2,685	5,906	0,000
-1,049	-1,822	-4,838	0,000	-0,693	1,910	5,073	0,000
-1,013	-1,416	-4,432	0,000	-0,693	1,435	4,490	0,000
-0,972	-1,129	-4,144	0,000	-0,693	1,097	4,029	0,000
-0,956	-0,906	-3,921	0,000	-0,693	0,866	3,749	0,000
-0,919	-0,723	-3,739	0,000	-0,693	0,665	3,437	0,000
-0,922	-0,569	-3,585	0,000	-0,693	0,525	3,304	0,000
-1,034	-2,515	-5,531	-0,347	-0,693	2,600	5,717	0,358
-1,010	-1,822	-4,838	-0,347	-0,693	1,839	4,884	0,350
-0,987	-1,416	-4,432	-0,347	-0,693	1,398	4,375	0,342
-0,958	-1,129	-4,144	-0,347	-0,693	1,081	3,970	0,332
-0,928	-0,906	-3,921	-0,347	-0,693	0,840	3,640	0,322
-0,900	-0,723	-3,739	-0,347	-0,693	0,651	3,365	0,312
-0,899	-0,569	-3,585	-0,347	-0,693	0,512	3,223	0,312
-0,992	-2,515	-5,531	-0,790	-0,693	2,495	5,486	0,783
-0,966	-1,822	-4,838	-0,790	-0,693	1,760	4,673	0,763

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	
-0,936	-1,416	-4,432	-0,790	-0,693	1,326	4,149	0,739	
-0,912	-1,129	-4,144	-0,790	-0,693	1,029	3,779	0,720	
-0,876	-0,906	-3,921	-0,790	-0,693	0,794	3,436	0,692	
-0,865	-0,723	-3,739	-0,790	-0,693	0,625	3,233	0,683	
-0,865	-0,569	-3,585	-0,790	-0,693	0,492	3,099	0,683	
-1,090	-2,186	-5,234	0,000	-0,347	2,383	5,706	0,000	
-1,068	-1,493	-4,541	0,000	-0,347	1,595	4,850	0,000	
-1,030	-1,087	-4,135	0,000	-0,347	1,120	4,258	0,000	
-1,000	-0,800	-3,848	0,000	-0,347	0,800	3,849	0,000	
-0,974	-0,577	-3,625	0,000	-0,347	0,562	3,532	0,000	
-0,955	-0,394	-3,442	0,000	-0,347	0,376	3,286	0,000	
-0,955	-0,240	-3,288	0,000	-0,347	0,229	3,139	0,000	
-1,061	-2,186	-5,234	-0,347	-0,347	2,320	5,554	0,368	
-1,030	-1,493	-4,541	-0,347	-0,347	1,538	4,678	0,357	
-1,000	-1,087	-4,135	-0,347	-0,347	1,088	4,137	0,347	
-0,972	-0,800	-3,848	-0,347	-0,347	0,777	3,740	0,337	
-0,946	-0,577	-3,625	-0,347	-0,347	0,546	3,430	0,328	
-0,923	-0,394	-3,442	-0,347	-0,347	0,364	3,179	0,320	
-0,923	-0,240	-3,288	-0,347	-0,347	0,222	3,036	0,320	
-0,995	-2,186	-5,234	-0,790	-0,347	2,175	5,206	0,786	
-0,974	-1,493	-4,541	-0,790	-0,347	1,455	4,425	0,769	
-0,957	-1,087	-4,135	-0,790	-0,347	1,041	3,958	0,756	
-0,932	-0,800	-3,848	-0,790	-0,347	0,745	3,586	0,736	
-0,912	-0,577	-3,625	-0,790	-0,347	0,526	3,304	0,720	
-0,893	-0,394	-3,442	-0,790	-0,347	0,352	3,072	0,705	
-0,892	-0,240	-3,288	-0,790	-0,347	0,214	2,934	0,705	
-1,121	-2,010	-5,063	0,000	-0,144	2,254	5,677	0,000	
-1,095	-1,317	-4,369	0,000	-0,144	1,443	4,785	0,000	
-1,058	-0,912	-3,964	0,000	-0,144	0,964	4,192	0,000	
-1,029	-0,624	-3,676	0,000	-0,144	0,642	3,782	0,000	
-1,002	-0,401	-3,453	0,000	-0,144	0,402	3,459	0,000	
-0,973	-0,219	-3,271	0,000	-0,144	0,213	3,181	0,000	
-0,971	-0,065	-3,117	0,000	-0,144	0,063	3,026	0,000	
-1,080	-2,010	-5,063	-0,347	-0,144	2,170	5,465	0,374	
-1,047	-1,317	-4,369	-0,347	-0,144	1,380	4,577	0,363	
-1,021	-0,912	-3,964	-0,347	-0,144	0,931	4,046	0,354	
-0,994	-0,624	-3,676	-0,347	-0,144	0,620	3,653	0,345	
-0,964	-0,401	-3,453	-0,347	-0,144	0,386	3,328	0,334	
-0,946	-0,219	-3,271	-0,347	-0,144	0,207	3,093	0,328	
-0,943	-0,065	-3,117	-0,347	-0,144	0,061	2,940	0,327	
-1,028	-2,010	-5,063	-0,790	-0,144	2,067	5,205	0,812	
-1,001	-1,317	-4,369	-0,790	-0,144	1,318	4,372	0,790	
-0,979	-0,912	-3,964	-0,790	-0,144	0,893	3,881	0,773	
-0,955	-0,624	-3,676	-0,790	-0,144	0,596	3,510	0,754	
-0,926	-0,401	-3,453	-0,790	-0,144	0,371	3,199	0,731	
-0,909	-0,219	-3,271	-0,790	-0,144	0,199	2,973	0,718	
-0,910	-0,065	-3,117	-0,790	-0,144	0,059	2,836	0,718	
-61,459	-64,215	-255,647	-23,864	-24,859	64,290	251,056	22,666	sum

Таблица 3.3 – Результаты математического анализа коэффициента расхода водослива по (МНК)

$y \cdot x_4$	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,740	6,325	30,589	0,000	0,480	13,910	0,000	1,743	0,000	3,834	0,000
0,727	3,319	23,402	0,000	0,480	8,813	0,000	1,263	0,000	3,353	0,000
0,702	2,006	19,644	0,000	0,480	6,278	0,000	0,982	0,000	3,072	0,000
0,674	1,274	17,177	0,000	0,480	4,678	0,000	0,782	0,000	2,873	0,000
0,663	0,820	15,377	0,000	0,480	3,551	0,000	0,628	0,000	2,718	0,000
0,637	0,523	13,980	0,000	0,480	2,704	0,000	0,501	0,000	2,592	0,000
0,639	0,324	12,851	0,000	0,480	2,040	0,000	0,394	0,000	2,485	0,000
0,717	6,325	30,589	0,120	0,480	13,910	0,872	1,743	1,918	3,834	0,240
0,700	3,319	23,402	0,120	0,480	8,813	0,632	1,263	1,677	3,353	0,240
0,684	2,006	19,644	0,120	0,480	6,278	0,491	0,982	1,537	3,072	0,240
0,664	1,274	17,177	0,120	0,480	4,678	0,391	0,782	1,437	2,873	0,240
0,643	0,820	15,377	0,120	0,480	3,551	0,314	0,628	1,360	2,718	0,240
0,624	0,523	13,980	0,120	0,480	2,704	0,251	0,501	1,296	2,592	0,240
0,623	0,324	12,851	0,120	0,480	2,040	0,197	0,394	1,243	2,485	0,240
0,688	6,325	30,589	0,624	0,480	13,910	1,986	1,743	4,367	3,834	0,547
0,669	3,319	23,402	0,624	0,480	8,813	1,439	1,263	3,820	3,353	0,547
0,649	2,006	19,644	0,624	0,480	6,278	1,118	0,982	3,500	3,072	0,547
0,632	1,274	17,177	0,624	0,480	4,678	0,891	0,782	3,273	2,873	0,547
0,607	0,820	15,377	0,624	0,480	3,551	0,715	0,628	3,096	2,718	0,547
0,599	0,523	13,980	0,624	0,480	2,704	0,571	0,501	2,953	2,592	0,547
0,599	0,324	12,851	0,624	0,480	2,040	0,449	0,394	2,831	2,485	0,547
0,378	4,779	27,394	0,000	0,120	11,442	0,000	0,758	0,000	1,815	0,000
0,370	2,229	20,619	0,000	0,120	6,779	0,000	0,518	0,000	1,574	0,000
0,357	1,183	17,101	0,000	0,120	4,497	0,000	0,377	0,000	1,434	0,000
0,347	0,640	14,805	0,000	0,120	3,077	0,000	0,277	0,000	1,334	0,000
0,338	0,332	13,137	0,000	0,120	2,090	0,000	0,200	0,000	1,257	0,000
0,331	0,155	11,849	0,000	0,120	1,357	0,000	0,137	0,000	1,193	0,000
0,331	0,058	10,811	0,000	0,120	0,790	0,000	0,083	0,000	1,140	0,000
0,368	4,779	27,394	0,120	0,120	11,442	0,758	0,758	1,815	1,815	0,120
0,357	2,229	20,619	0,120	0,120	6,779	0,518	0,518	1,574	1,574	0,120
0,347	1,183	17,101	0,120	0,120	4,497	0,377	0,377	1,434	1,434	0,120
0,337	0,640	14,805	0,120	0,120	3,077	0,277	0,277	1,334	1,334	0,120
0,328	0,332	13,137	0,120	0,120	2,090	0,200	0,200	1,257	1,257	0,120
0,320	0,155	11,849	0,120	0,120	1,357	0,137	0,137	1,193	1,193	0,120
0,320	0,058	10,811	0,120	0,120	0,790	0,083	0,083	1,140	1,140	0,120
0,345	4,779	27,394	0,624	0,120	11,442	1,726	0,758	4,133	1,815	0,274
0,338	2,229	20,619	0,624	0,120	6,779	1,179	0,518	3,586	1,574	0,274
0,332	1,183	17,101	0,624	0,120	4,497	0,859	0,377	3,266	1,434	0,274
0,323	0,640	14,805	0,624	0,120	3,077	0,632	0,277	3,038	1,334	0,274
0,316	0,332	13,137	0,624	0,120	2,090	0,455	0,200	2,862	1,257	0,274
0,309	0,155	11,849	0,624	0,120	1,357	0,311	0,137	2,718	1,193	0,274
0,309	0,058	10,811	0,624	0,120	0,790	0,190	0,083	2,596	1,140	0,274
0,161	4,042	25,630	0,000	0,021	10,178	0,000	0,289	0,000	0,728	0,000
0,158	1,735	19,092	0,000	0,021	5,756	0,000	0,190	0,000	0,629	0,000

Продолжение таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,152	0,831	15,713	0,000	0,021	3,615	0,000	0,131	0,000	0,570	0,000
0,148	0,390	13,515	0,000	0,021	2,295	0,000	0,090	0,000	0,529	0,000
0,144	0,161	11,924	0,000	0,021	1,385	0,000	0,058	0,000	0,497	0,000
0,140	0,048	10,698	0,000	0,021	0,715	0,000	0,031	0,000	0,471	0,000
0,140	0,004	9,714	0,000	0,021	0,201	0,000	0,009	0,000	0,448	0,000
0,155	4,042	25,630	0,120	0,021	10,178	0,697	0,289	1,755	0,728	0,050
0,151	1,735	19,092	0,120	0,021	5,756	0,457	0,190	1,515	0,629	0,050
0,147	0,831	15,713	0,120	0,021	3,615	0,316	0,131	1,374	0,570	0,050
0,143	0,390	13,515	0,120	0,021	2,295	0,216	0,090	1,275	0,529	0,050
0,139	0,161	11,924	0,120	0,021	1,385	0,139	0,058	1,197	0,497	0,050
0,136	0,048	10,698	0,120	0,021	0,715	0,076	0,031	1,134	0,471	0,050
0,136	0,004	9,714	0,120	0,021	0,201	0,022	0,009	1,081	0,448	0,050
0,148	4,042	25,630	0,624	0,021	10,178	1,588	0,289	3,998	0,728	0,114
0,144	1,735	19,092	0,624	0,021	5,756	1,040	0,190	3,450	0,629	0,114
0,141	0,831	15,713	0,624	0,021	3,615	0,720	0,131	3,130	0,570	0,114
0,137	0,390	13,515	0,624	0,021	2,295	0,493	0,090	2,903	0,529	0,114
0,133	0,161	11,924	0,624	0,021	1,385	0,317	0,058	2,727	0,497	0,114
0,131	0,048	10,698	0,624	0,021	0,715	0,173	0,031	2,583	0,471	0,114
0,131	0,004	9,714	0,624	0,021	0,201	0,051	0,009	2,461	0,448	0,114
23,997	93,534	1065,067	15,619	13,049	288,450	24,324	28,325	96,838	103,64	9,416

Таблица 3.4 – Оценка точности рассчитанных значений m_n коэффициента расхода водослива 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	0,340	0,0115
0,350	0,358	0,0209
0,363	0,369	0,0153
0,378	0,377	0,0043
0,384	0,383	0,0038
0,399	0,388	0,0268
0,398	0,393	0,0132
0,356	0,351	0,0131
0,364	0,370	0,0142
0,373	0,381	0,0219
0,384	0,389	0,0138
0,395	0,396	0,0006
0,407	0,401	0,0139
0,407	0,406	0,0034
0,371	0,366	0,0136
0,381	0,385	0,0118
0,392	0,397	0,0121
0,402	0,405	0,0092
0,416	0,412	0,0099
0,421	0,418	0,0079
0,421	0,423	0,0033
0,336	0,332	0,0109
0,344	0,350	0,0185

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3
0,357	0,361	0,0101
0,368	0,369	0,0022
0,377	0,375	0,0072
0,385	0,380	0,0134
0,385	0,384	0,0020
0,346	0,343	0,0076
0,357	0,362	0,0129
0,368	0,373	0,0132
0,378	0,381	0,0061
0,388	0,387	0,0030
0,397	0,392	0,0124
0,397	0,397	0,0010
0,370	0,358	0,0322
0,377	0,377	0,0016
0,384	0,388	0,0112
0,394	0,397	0,0074
0,402	0,403	0,0036
0,410	0,409	0,0020
0,410	0,414	0,0094
0,326	0,325	0,0020
0,334	0,342	0,0236
0,347	0,353	0,0159
0,357	0,360	0,0085
0,367	0,366	0,0022
0,378	0,371	0,0176
0,379	0,376	0,0080
0,340	0,336	0,0114
0,351	0,354	0,0080
0,360	0,364	0,0112
0,370	0,372	0,0056
0,381	0,378	0,0078
0,388	0,384	0,0123
0,389	0,388	0,0034
0,358	0,350	0,0212
0,368	0,369	0,0024
0,376	0,380	0,0110
0,385	0,388	0,0080
0,396	0,394	0,0039
0,403	0,400	0,0076
0,403	0,404	0,0046
Средняя относительная погрешность		0,00998

Приложение 4

Таблица 4.1 – Результаты исследований процента песка, проходящего через полигонального водослив при изменении верхового откоса 1:1 и 2:1 и $\alpha = 30^\circ$.

Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 1:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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
Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 2:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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 4.2 – Результаты исследований процента песка, проходящего через водослив для верхового откоса– 0; 1:1 и 2:1 при $\alpha = 45^\circ$.

Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1 = 0$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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 4.2

Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 1:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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
Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 2:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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 4.3 – Результаты исследований процента песка, проходящего через водослив при изменении верхового откоса– 0; 1:1 и 2:1 при $\alpha = 60^\circ$.

Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 0$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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 4.3

Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 1:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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
Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 2:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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 4.4 – Результаты исследований процента песка, проходящего через водослив при изменении верхового откоса– 0; 1:1 и 2:1 при $\alpha = 90^\circ$.

Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 0$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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 4.4

Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 1:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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
Полигонального водослив с заложением верховой грани $m_1= 2:1$							
№	Напор над водосливом	Средняя скорость,	Вес добавленного песка. 10^{-3}	Вес остаточного песка. 10^{-3}	Вес песка, прошедшего через водослив, 10^{-3}	Расход песка,	Процент песка, проходящего через водослив
	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

Таблица 5.1 – Отметки свободной поверхности воды в канале и его дна для полигональных водосливов при $\alpha = 30^\circ$

$\alpha = 30^\circ$								
Заложение верховой грани $m_l = 0$								
Уровень воды над водосливом h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [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 $m_l = 1:1$								
Уровень воды над водосливом h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [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 5.1

Заложение верховой грани $m_1=2:1$								
Уровень воды над водосливом h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]
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 5.2 – Отметки свободной поверхности воды в канале и его дна для полигональных водосливов при $\alpha=45^\circ$

при $\alpha=45^\circ$								
Заложение верховой грани $m_1=0$								
Уровень воды над водосливом h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]
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 5.2

Заложение верховой грани $m_l= 1:1$								
Уровень воды над водосливом 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 $m_l= 2:1$								
Уровень воды над водосливом 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 5.3 – Отметки свободной поверхности воды в канале и его дна для полигональных водосливов при $\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 60^\circ$								
Заложение верховой грани $m_l = 0$								
Уровень воды над водосливом h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]
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 водосливом h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]
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 5.3

Заложение верховой грани $m_l = 2:1$								
Уровень воды над водосливом h , см		1,3	2,3	3,3	4,3	5,3	6,3	7,3
Точка №	x [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]	y [см]
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

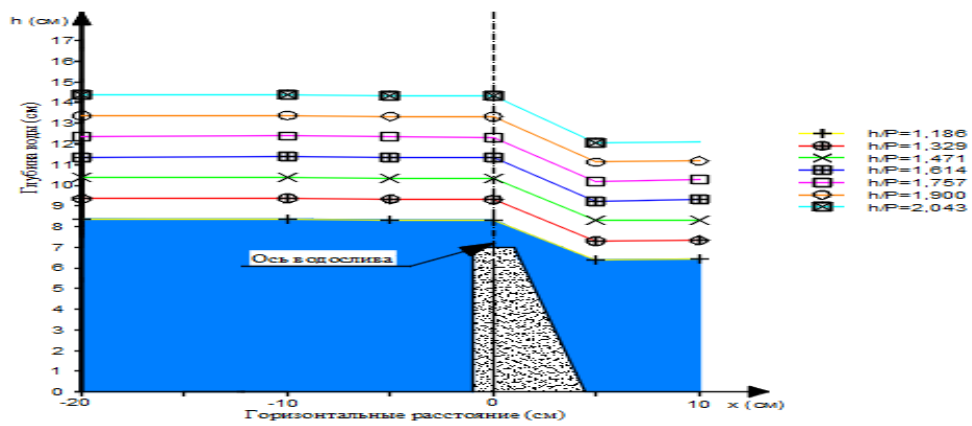


Рисунок 6.1 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 45^\circ$ и $m_l = 0$

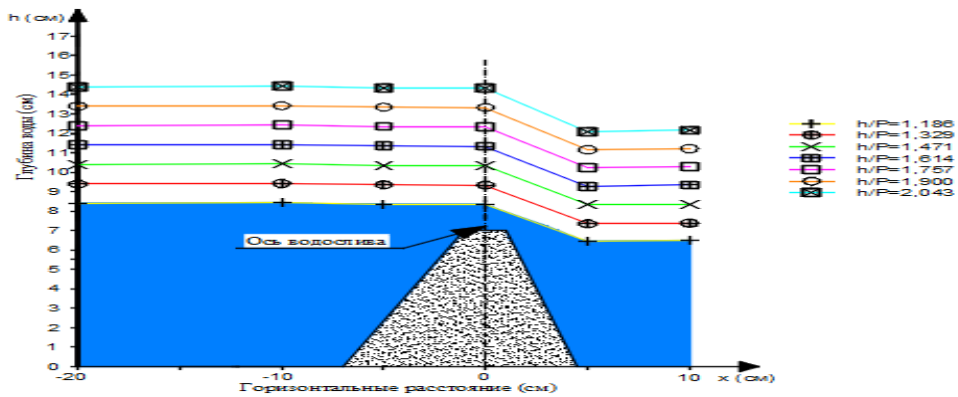


Рисунок 6.2– Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 45^\circ$ и $m_l = 1/1$

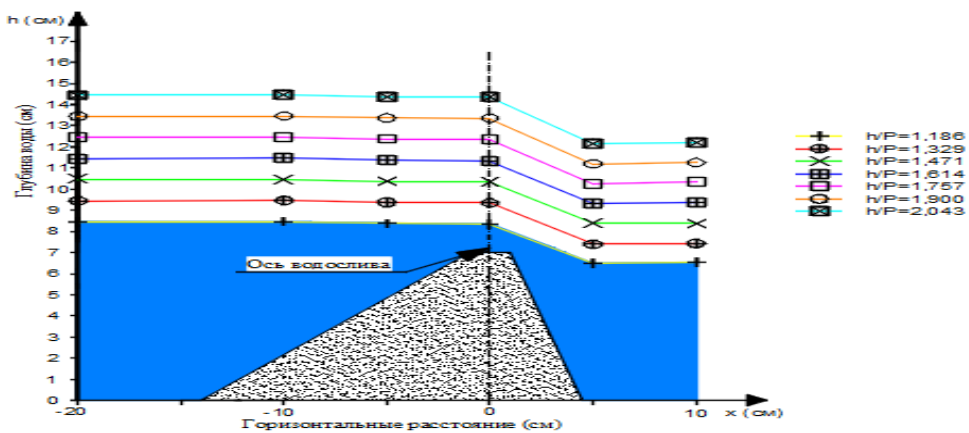


Рисунок 6.3 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 45^\circ$ и $m_l = 2/1$

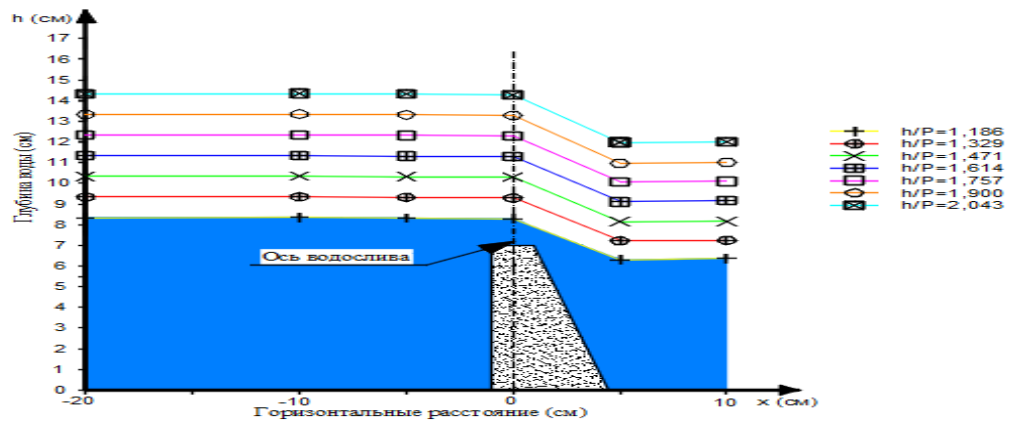


Рисунок 6.4 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 60^\circ$ и $m_l = 0$

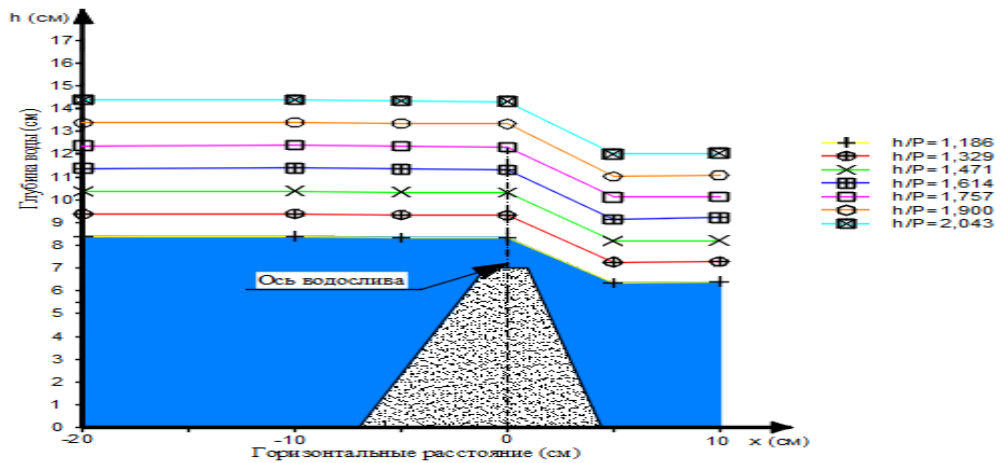


Рисунок 6.5 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 60^\circ$ и $m_l = 1/1$

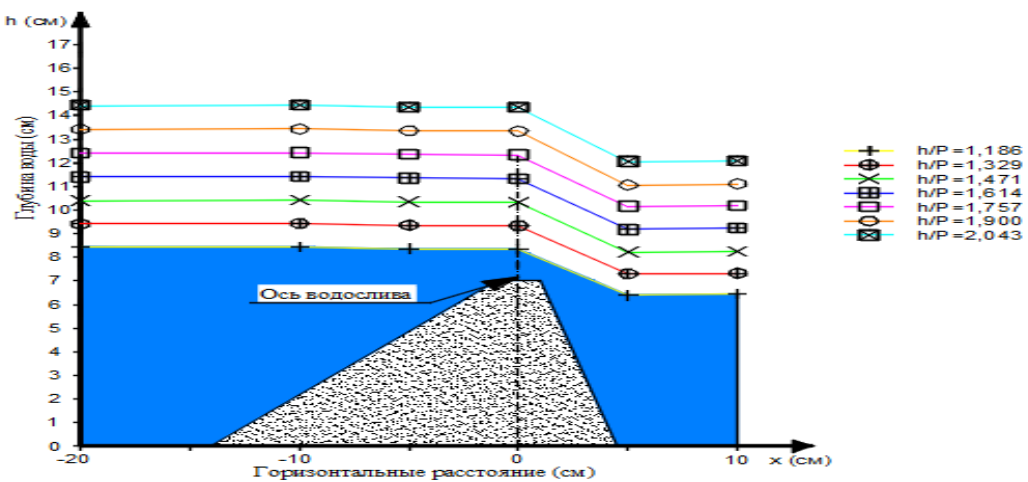


Рисунок 6.6 – Продольные профили свободной поверхности воды при $\alpha = 60^\circ$ и $m_l = 2/1$

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	Θ_0	Θ_1	$i_{\text{фср}}$	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_1 , м	R_{i0} , м	R_{i1} , м	Ξ_0	Ξ_1	$i_{\text{фр}}$	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

Приложение 8

Таблица 8.1 – Расчет длины кривой свободной поверхности (L_k)

Месяц	b, м	h_n , м	h_{max} , м	R_{in}	R_{imax}	Q	Ξ_n	Ξ_{max}	if_{cp}	L_k
Июнь	11,5	0,81	1,37	0,68	1,06	9,12	0,8453	1,3808	0,00062	1412,13
Июль		0,88	1,43	0,73	1,10	10,53	0,9180	1,4403	0,00063	1428,83
Август		0,93	1,47	0,77	1,13	11,65	0,9736	1,4841	0,00062	1348,87
Сентября		0,86	1,41	0,72	1,09	10,09	0,8993	1,4218	0,00061	1339,91