

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

АЛСАДЕК ЕЛИАС САДЕК

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ ЭНЕРГОГАСЯЩИХ
УСТРОЙСТВ НИЖНЕГО БЬЕФА В ДЕФОРМИРУЕМОМ РУСЛЕ**

Специальность 2.1.6 - Гидротехническое строительство, гидравлика и
инженерная гидрология

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Ханов Нартмир Владимирович

Москва – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАНЕЕ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАШЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ.....	11
1.1 Гидравлика потока в нижнем бьефе водосбросных сооружений низкого и среднего напора.....	11
1.2 Современные конструкции устройств нижнего бьефа водосбросов низкого и среднего напоров.....	17
1.3 Особенности мало пролетных водопропускных сооружений.....	27
1.4 Выбор исследуемых конструкций нижнего бьефа.....	32
1.5 Деформации русла при гидротехническом строительстве.....	34
Выводы по первой главе.....	40
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РУСЛА РЕКИ СЕВЕРНЫЙ КЕБИР И ГИДРОУЗЛА 16 ТИШРИН В САР.....	41
2.1 Природно-топографические условия района строительства	41
2.2 Природно - климатические условия долины реки Северный Кебир и её изученность.....	43
2.3 Гидрологические условия.....	44
2.4 Инженерно-геологические условия.....	47
2.5 Анализ и результаты прогноза формирования русла реки Северный Кебир (САР)	51
2.6 Состав сооружений гидроузла	68
2.7 Расчёты водобойного колодца шахтно-башенного водосброса.....	74
Выводы по второй главе.....	77

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	80
3.1 Общие принципы физического моделирования.....	80
3.2 Описание экспериментальной установки и обоснование размеров модели.....	81
3.3 Методика лабораторных исследований гидравлических процессов.....	87
3.4 Оценка погрешности измерительной аппаратуры и ошибок полученных результатов.....	91
Выводы по третьей главе.....	93
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТРОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ШАХТНО-БАШЕННОГО ВОДОСБРОСА ГИДРОУЗЛА.....	94
4.1 Результаты расчета допускаемых скоростей в нижнем бьефе.....	94
4.2 Результаты измерений скоростей течения в нижнем бьефе в рамках проектного варианта (схема 1).....	95
4.3 Результаты исследования скоростей в нижнем бьефе после установки энергогасителей по типу водосброса Нижне-Кафирниганского гидроузла (схема 2).....	101
4.4 Результаты исследования скоростей в нижнем бьефе после установки энергогасителей по типу водосброса Шамхорского гидроузла (схема3).....	107
4.5 Исследование кинематики потока в нижнем бьефе после установки разработанной и экспериментально обоснованной схемы энергогасителей (схема 4).....	114
Выводы по четвертой главе.....	121
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ГАСИТЕЛЕЙ.....	123
5.1 Сравнительный анализ эффективности исследованных схем энергогасителей.....	123

5.2 Оценка устойчивости грунта за жёсткой рисбермой в нижнем бьефе шахтно- башенного водосброса.....	129
5.3 Выводы по пятой главе.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обуславливается необходимостью прогнозного учета деформации русла за водосбросными сооружениями, связанной с размывами в результате строительства гидротехнических сооружений и предложением обоснованных оптимальных мероприятий для предотвращения таких деформаций. Расчет прогноза деформаций за водосбросами в нижнем бьефе имеет большое значение для определения оптимальных размеров и геометрических форм водосбросных сооружений и водобойных устройств, что обеспечивает надежность и безопасность плотины и водосброса при работе в течение длительных периодов времени и при больших расходах паводка.

В современной практике гидротехнического строительства для стабилизации нижнего бьефа и обеспечения безопасного и надежного отвода сбрасываемых потоков в каналы или русла рек применяются различные устройства, предназначенные для гашения энергии [27, 39, 53, 92]. Использование таких конструкций в мировой гидротехнике признается одним из наиболее эффективных методов борьбы с формированием локальных размывов грунта, возникающих за сооружениями. Рассматриваемые в данной работе типы гасителей энергии находят применение в ситуациях, когда нижний бьеф водопропускных сооружений функционирует продолжительное время при минимальных параметрах водного потока в отводящем водотоке или вообще при отсутствии воды в нижнем бьефе в засушливые периоды [48, 50, 65, 66, 89, 91]. Параметры концевых устройств трубчатых водосбросов с системами для гашения энергии, несмотря на их широкое применение в условиях сухих климатов и низкой водности, требуют более глубокого анализа.

Для повышения эффективности гашения энергии и устойчивости гидравлического режима при различных гидрологических условиях необходимы дополнительные исследования. Таким образом, акцент на эти аспекты является крайне важным для усовершенствования конструкции водопропускных систем,

что в свою очередь позволит повысить их надежность и безопасность, а также снизить риск негативного воздействия на окружающую среду и инфраструктуру.

Степень разработанности темы исследования.

Анализ функционирования нижнего бьефа трубчатых водовыпускных сооружений и проблемы их укрепления представляют собой важные и сложные аспекты в области оформления гидротехнических конструкций. Эти сооружения требуют детального изучения, что было инициировано рядом научных исследований, проведенных такими учеными, как Н.П. Розанов, Н.Т. Кавешников, И.С. Румянцев, О.Н. Черных и другими исследователями [30, 31, 90]. В их работах рассматриваются различные подходы к решению вопросов, связанных с эффективностью работы нижнего бьефа и предотвращением возможных нарушений в потоках, что свидетельствует о значимости данных исследований для дальнейшего развития гидротехнической отрасли.

Следует отметить, что функционирование нижнего бьефа играет ключевую роль в обеспечении стабильности и долговечности водосбросных систем. Неправильная эксплуатация или неудовлетворительное состояние этих сооружений могут привести к серьезным последствиям, таким как эрозия берегов и затопление прилегающих территорий. Поэтому углубленный анализ и разработка рекомендаций для конструкций нижнего бьефа являются неотъемлемой частью обеспечения надежности гидротехнических объектов.

Цели и задачи исследования. Цель настоящей работы заключается в теоретическом и экспериментальном обосновании параметров энергогасящих устройств с учетом понижения отметок русла реки за водосбросом в результате деформации русла.

Для достижения этой цели автором были поставлены следующие задачи:

- выполнить обзор научно-технической литературы с целью изучения существующих энергогасящих устройств и гидравлических условий их работы;
- провести теоретические исследования деформации русла за водосбросными сооружениями, работающими в нерегулируемом режиме;

- построить физическую модель выходного участка сопряжения в нижнем бьефе за закрытым водосбросным сооружением для исследования вариантов энергогасящих устройств на нём и провести экспериментальные исследования;

- установить параметры энергогасящих устройств, обеспечивающих безопасную эксплуатацию нижнего бьефа и водосбросного сооружения в течение нормативного срока службы.

Научная новизна исследования. В настоящее время для контроля деформаций русла реки за водосбросными сооружениями необходимо определить размеры и оптимальную высоту положения энергогасящего устройства, при которой достигаются допустимые скорости на рисберме и в нижнем бьефе, не превышающие скоростей, вызывающих эрозию и деформацию нижнего бьефа.

На основании полученных данных разработаны рекомендации по оптимизации проектирования энергогасящих устройств в деформируемых руслах. Это включает в себя предложенные изменения в конструкции и расположении энергогасящих устройств, которые могут повысить эффективность работы и долговечность участка сопряжения, снизить риск размыва русла за креплением нижнего бьефа.

Экспериментальные исследования: Проведены оригинальные экспериментальные исследования, которые подтвердили теоретические выводы. Эксперименты включали в себя тестирование различных конфигураций энергогасящих устройств в условиях контролируемого деформируемого потока, что демонстрирует практическую применимость полученных результатов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для совершенствования конструкции водобойных устройств водосбросных сооружений гидроузлов, и их можно рекомендовать для сходных конструктивных и гидравлических условий таких сооружений.

Методология и методы научного исследования. Были исследованы гидравлические параметры потока при наличии энергогасящих устройств нижнего

бьефа в виде расширяющегося водобойного колодца без установки гасителей энергии и при их наличии, и влияние этих гасителей на диссипацию энергии воды в нижнем бьефе после рисбермы, где скорости оказались меньше допустимых и не вызывают деформаций в русле.

Результаты лабораторных исследований были обработаны и проанализированы с целью получения наилучшего выбора энергогасящих мероприятий в водобойном колодце и на рисберме, обеспечивающих безопасность нижнего бьефа от возникновения деформаций в русле.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты обзора предыдущих исследований гашения избыточной энергии потока в нижнем бьефе;
- результаты расчётов возможных деформаций русла реки Северный Кебир в Сирии;
- результаты экспериментов по определению распределения скоростей в нижнем бьефе после расширяющегося водобойного колодца и сравнение полученных результатов со скоростями, допустимыми для течения воды в нижнем бьефе, а также разработка мероприятий для того, чтобы это не вызывало деформации русла и понижения отметки дна реки;
- результаты анализа установки энергогасителей в водобойном колодце и на рисберме в зависимости от распределения скоростей потока в нижнем бьефе;
- общие выводы по результатам анализа степени эффективности применения дополнительных энергогасителей в водобойном колодце и на рисберме по распределению и снижению скоростей в нижнем бьефе, чтобы обеспечить отсутствие деформаций в отводящем участке реки, надёжную и безопасную работу гидроузла при эксплуатации.

Степень достоверности и апробация результатов работы. При проведении лабораторных опытов использовались современные оборудование и приборы, хорошо известные в гидротехнике. Обработка полученных опытных

данных проводилась с помощью известных программных комплексов (в основном Microsoft Excel 2010 и AutoCAD 2020).

Публикации. По теме диссертационной исследования опубликована 7 научных работ, в том числе 2 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации, одна статья опубликована в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus.

Основные результаты лабораторных исследований докладывались на заседаниях выпускающей кафедры «Гидротехнические сооружения», а также на различных конференциях и семинарах:

- Всероссийская с международным участием научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 7-9 июня 2021 г.;

- Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова. Москва, РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 6-8 июня 2022 г.;

- V Всероссийского научно-практического семинарам «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». Москва, НИУ МГСУ, 2022 г.;

- VI Всероссийского научно-практического семинара «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». Москва, НИУ МГСУ, 2023 г.;

- XIV Национальная конференция с международным участием «Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения». Саратов, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 25-26 апреля 2024 г.

- VII Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». Москва, НИУ МГСУ, 2024 г.

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит 147 стр. машинописного текста и имеет введение, пять глав, заключение, список

литературы и приложения. В диссертацию также входят 66 рисунков, 13 таблиц, список литературных источников из 95 наименований, из которых 11 на иностранных языках.

ГЛАВА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАНЕЕ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАШЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ

Вопросы гашения избыточной энергии потока в нижнем бьефе изучались в различных теоретических и экспериментальных исследованиях, например, в работах: Н.П. Розанова, Н.Т. Кавешникова, И.С. Румянцева, О.Н. Черных. Они рассматривали трубчатые сооружения, для которых большую роль играл недостаточно изученный вопрос обеспечения отсутствия сбойности потока в нижнем бьефе.

1.1 Гидравлика потока в нижнем бьефе водосбросных сооружений низкого и среднего напора

Для рационального проектирования водосбросных сооружений необходимо изучать движение водного потока в их нижних бьефах. Поток в нижнем бьефе сооружений находится в бурном состоянии, глубина его в сжатом сечении h_c меньше критической $h_{кр}$, число Фруда изменяется от 1-2 до 12-16 за низконапорными и от 16 до 80 за средне- и высоконапорными сооружениями.

На гладком водобое часто наблюдаются сложные гидравлические явления, такие как сбойные течения, за креплением русла – размывы и резкое изменение процессов переформирования русел. Указанные явления также могут возникать при неправильном выборе противосбойных и гасительных устройств нижнего бьефа.

При проектировании сооружений низкого и среднего напора решаются следующие задачи:

1. Определение наиболее оптимальных размеров и схем размещения устройств нижнего бьефа (минимально допустимая толщина и длина крепления в нижнем бьефе по скоростям, по нагрузкам на гасители и плиту водобоя).

2. Предотвращение сбойности течения при всех вариантах маневрирования затворами.

3. Уменьшение размывов русла и береговых деформаций за сооружением. На участке сопряжения бьефов происходит превращение потенциальной энергии в кинетическую. Гашение избытка кинетической энергии осуществляется в гидравлическом прыжке (при переходе от бурного состояния - $F_r > 1$ к спокойному - $F_r < 1$) и при помощи хорошо подобранных гасителей энергии.

В гидравлическом прыжке образуются замкнутые области интенсивной циркуляции воды – вальцов из-за неравномерности скоростей по вертикали и по длине потока. Между транзитной струей и вальцами существуют большие градиенты скоростей, что вызывает интенсивное перемешивание жидкости и связанную с ним макро-пульсацию. Возникновение такого перемешивания резко увеличивает тангенциальные усилия между контактирующими слоями жидкости, что является причиной интенсивного гашения кинетической энергии. Поэтому гидравлический прыжок можно рассматривать как простейший гаситель энергии.

Явление гидравлического прыжка довольно широко освещено в литературе [7, 19, 23, 29, 33].

Для водосбросных сооружений, имеющих плавное соединение сливной части с гладким креплением в нижнем бьефе, в зависимости от степени бурности потока в сжатом сечении гидравлический прыжок может иметь две формы. При $F_r < 3$ наблюдается волнистый гидравлический прыжок или прыжок – волна, при $F_r > 3$ – совершенный гидравлический прыжок.

Волнистый прыжок характеризуется отсутствием вальцов и возникновением стоячих волн за сжатым сечением, высота которых уменьшается в направлении течения потока. Поскольку интенсивность гашения энергии при волнообразовании мала, то волны распространяются на значительное расстояние в сторону нижнего бьефа.

Отсутствие в волнистом прыжке вальцевых водоворотных зон обуславливает и отсутствие в потоке повышенной турбулентности. Но

осредненные скорости по длине участка сопряжения периодически изменяются, уменьшаются в сечениях гребней волн и увеличиваются в сечениях впадин между волнами. Давление на дно плавно и постепенно увеличивается вниз по течению от минимального в сжатом сечении перед прыжком до величины, равной давлению при нормальной глубине в нижнем бьефе за прыжком. Плавный характер изменения давления на дно объясняется возникновением центробежных сил в массе жидкости, вызванных искривлением струек в прыжке.

Сопряжение бьефов по форме совершенного гидравлического прыжка характеризуется наличием развитого поверхностного вальца, который обеспечивает интенсивное гашение избыточной энергии и вызывает высокую турбулизацию потока. В совершенном гидравлическом прыжке возникают пульсационные импульсы, распад которых гасит энергию.

На участке прыжка происходит гашение большей части избыточной энергии и в основном заканчивается процесс восстановления потенциальной энергии. За прыжком (послепрыжковый участок) происходит переформирование гидравлической структуры потока. Оно заключается в выравнивании вертикальной эпюры осредненных скоростей до нормальной эпюры скоростей равномерного потока и в затухании повышенной турбулентности [8].

Таким образом, поверхностный прыжок чаще всего бывает неустойчивым и характеризуется низкой степенью гашению избыточной кинетической энергии. В свою очередь совершенный гидравлический прыжок обеспечивает интенсивное гашение этой энергии. По этой причине в нашей работе он был принят в качестве основной формы сопряжения бьефов. Однако такой режим сопряжения имеет свои недостатки, такие как близость расположения области повышенных скоростей ко дну и удлинение крепления.

В настоящее время разработан целый ряд конструкций нижнего бьефа открытых малопролетных сооружений [70, 72, 81]. Однако не все вопросы, необходимые для рационального проектирования устройств нижнего бьефа, в нужной степени разрешены. По ряду их, еще нет надлежащих обобщенный по выбору рациональных типов и расположению гасителей. Поэтому главная задача

нашей работы заключается в усовершенствовании конструкции нижнего бьефа малопроектных водосбросных сооружений. В работе [70] автор применил теорию планирования экспериментов в исследовании нижнего бьефа. Однако при выборе одного из факторов автор принимал относительный удельный расход на водосбросе, диапазон изменения которого не отличается от диапазона для многопроектных сооружений. Поэтому следовало бы выбрать критерий бурности потока в качестве фактора эксперимента.

Многочисленные исследования, проводимые в работе [8], позволили создать научно-обоснованную методику расчета креплений при наличии гасителей. Эти исследования были направлены на изучение режимов сопряжения, гидравлической структуры потока и сил, действующих на крепление. К сожалению, рассмотренные в работе [8] противосбойные устройства, за исключением прорезной стенки (шашки, носок – трамплин и т. д.), не могут эффективно работать при маневрировании затворами.

Вследствие несимметричных сбросов потока (при маневрировании затворами) на гладком водобое возникает сбойность течения в нижнем бьефе.

Для улучшения гидравлических условий в нижнем бьефе – гашения энергии, уменьшения местных размывов, борьбы со сбоем устанавливаются на водобое специальные гасители энергии: водобойные стенки, повышенная шероховатость увеличивающая сопротивление у дна, шашечные гасители, разрезные или зубчатые пороги, струенаправляющие стенки [8].

Д.И.Кумин [36] указал на три типа воздействия гасителей энергии на поток: реактивное, диссипационное и распределительное.

Реактивное воздействие заключается в том, что гаситель, выступая над дном, подпирает поток на водобое. Это приводит к затоплению прыжка. Реактивный эффект гасителя на поток заключается в том, что он создает реакцию направленную против течения (рис. 1.1). Такой эффект широко используется на практике, чтобы получить затопленный прыжок ($h_{нб} > h''$).

Под диссипационным воздействием гасителей подразумевается влияние, которое они оказывают на интенсификацию процесса рассеивания (диссипацию) энергии. Установка гасителей ведет к образованию в потоке дополнительных вальцевых областей и зон раздела с большими градиентами скоростей. Это обуславливает повышение турбулентного перемешивания жидкости и увеличение пульсационных напряжений вязкости между контактирующими слоями и в результате ведет к более интенсивному рассеиванию избыточной кинетической энергии. Наибольшее диссипационное воздействие будут оказывать шашечные гасители, зубчатые и прорезные пороги, которые расщепляют поток на большое количество струй и этим увеличивается площадь поверхностей раздела. Как показывают результаты опытов [8, 42, 72, 74], зубчатые и прорезные пороги утолщают общую зону раздела между основной транзитной струей и данным вальцем. Такое утолщение служит причиной возникновения пульсационных импульсов, опасных для крепления.

Распределительное воздействие гасителя заключается в том, что гаситель, отклоняя набегающую на него транзитную струю к свободной поверхности, переводит поток с донного на поверхностный режим истечения с резким уменьшением придонной скорости (рис.1.1).

Вследствие этого уменьшается размывающее воздействие потока на дно за гасителем.

Проводимые исследования [8] показали, что применение водобойного колодца для затопления прыжка усложняет гидравлическую структуру потока на участке сопряжения бьефов. Вследствие чего на практике удлиняют рисберму. Кроме этого, пособия и нормативные документы проектирования не дают никаких рекомендаций относительно выбора высоты и конфигурации водобойного уступа, при которых обеспечивалась бы благоприятная гидравлическая структура потока на рисберме. Поэтому при проектировании высоту водобойного колодца очень часто назначают без расчета и принимают исходя из того, что рисберма за колодцем размещается на отметках дна реки.

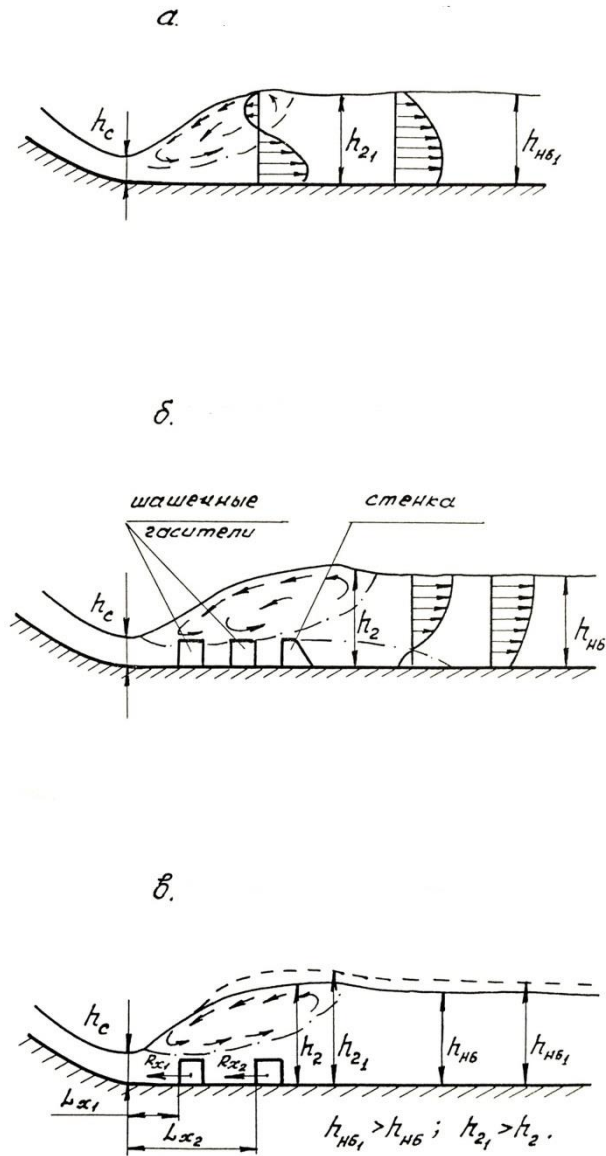


Рисунок 1.1 - Распределительное и реактивное воздействия гасителей на поток: а- гладкий водобойж; б- водобой с гасителям; в- эффект гасителей

Для создания на рисберме поверхностного режима Н.И.Беляшевский [8] рекомендует применить пороги, шашки, носки.

Следует отметить, что первый ряд гасящих устройств часто выполняет функции растекателей потока, направляющих поток в желательном направлении. Далее располагают, если это требуется, дополнительные ряды гасителей и растекателей и стенку или несколько стенок. Тип и число рядов гасителей (стенок) зависит от местных условий (числа пролетов, чисел Фруда, отношения V/h).

1.2 Современные конструкции устройств нижнего бьефа водосбросов низкого и среднего напоров

Целый ряд публикаций [70, 72, 81, 82] показывает, что в настоящее время широко применяют водобой с шашечными гасителями и со сплошной или прорезной стенкой. Разработанные открытые малопроелетные сооружения не всегда отвечают требованиям гидравлики сооружений [72, 81]. Для таких конструкций недостаточно изучен вопрос обеспечения отсутствия (или снижения до минимума) обойности потока в нижнем бьефе. Для малопроелетных сооружений целесообразно применять и растекатели.

В общем случае при рациональном проектировании устройств нижнего бьефа малопроелетных сооружений необходимо: выбрать надежный вид и параметры гасящих устройств; стремиться к снятию, по возможности, всех ограничений по открытиям отверстий; провести расчет сопряжения бьефов; провести расчет устойчивости и прочности элементов с учетом гидродинамических воздействий потока; прогнозировать местные размывы за креплением.

Теоретический подход к рациональному проектированию таких конструкций сложен, что обусловлено сложной природой течения (особенно при маневрировании затворами). Поэтому приходится использовать данные экспериментальных и натурных исследований аналогичных сооружений.

В работе [35] отмечается о предпринятой разными учеными попытке классифицировать существующие сооружения и предложить типовые решения для нескольких диапазонов гидравлических характеристик потока, поступающего на водобой [8, 11, 60, 72] .

Для низко- и средненапорных гидроузлов Баронин В.В. [24] предложил конструкции и их расчетные зависимости (рис.1.2 и 1.3).

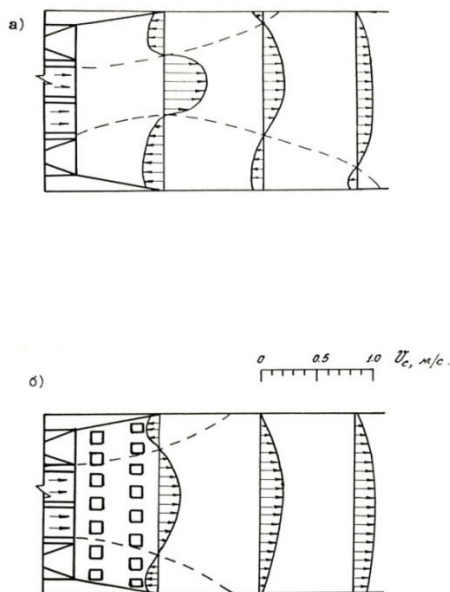


Рисунок 1.2 - Распределительное воздействие гасителей на поток (в плане):

а- гладкий водобой; б- водобой с гасителями

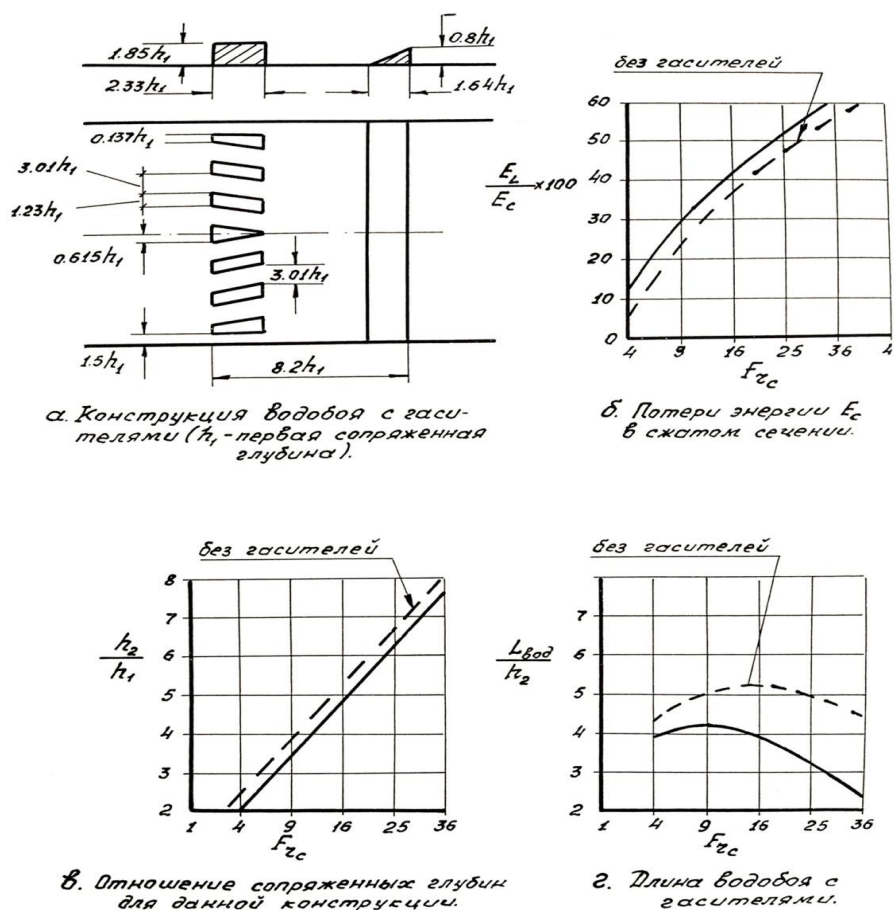


Рисунок 1.3 - Конструкция водобоя с гасителями, предложенная В.В Баронином для многопролетных плотин низкого и среднего напоров $h_1 = h_c$

Эти конструкции работают в плоских условиях сопряжений бьефов, при числах Фруда в сжатом сечении $F_r = 4,5 - 20,5$. Для таких конструкций приведены графики относительной длины водобоя (рис.1.3г и рис.1.4д) и относительных величин геометрических размеров гасящих устройств (рис.1.4б, в, г) как функция от чисел Фруда. Автор также дает эмпирические зависимости, позволяющие определить геометрические параметры гасителей энергии и их местоположение на водобое (рис.1.4 а) .

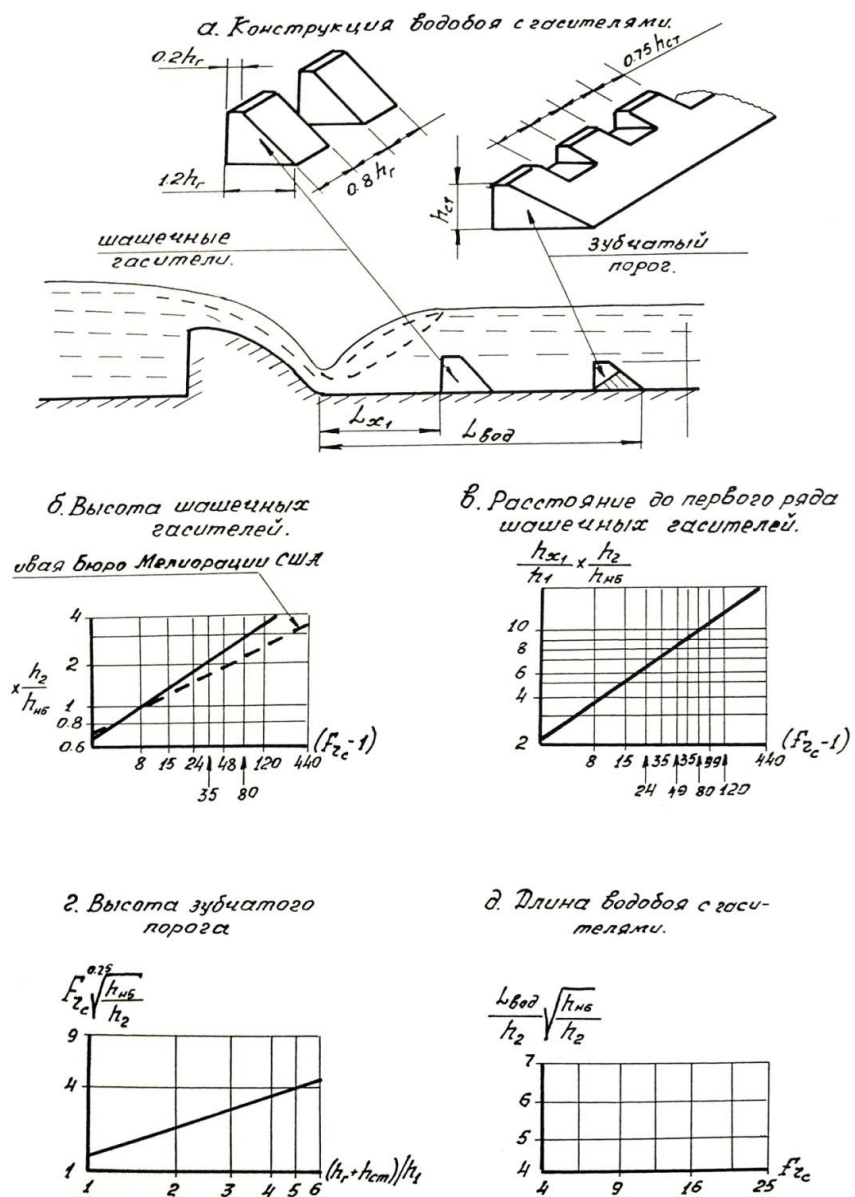


Рисунок 1.4 - Модификация конструкции водобоя с гасителями, предложенная В.В. Баронином

Конструкции Бюро Мелиорации США, разработанные и доведенные до применения, делят на несколько типов. В настоящее время рекомендовано применение следующих типов: водобойный колодец II, водобойный колодец III и водобойный колодец IV (рис. 1.5). Последний отличается от других тем, что имеет внезапное понижение дна и расширение водобоя.

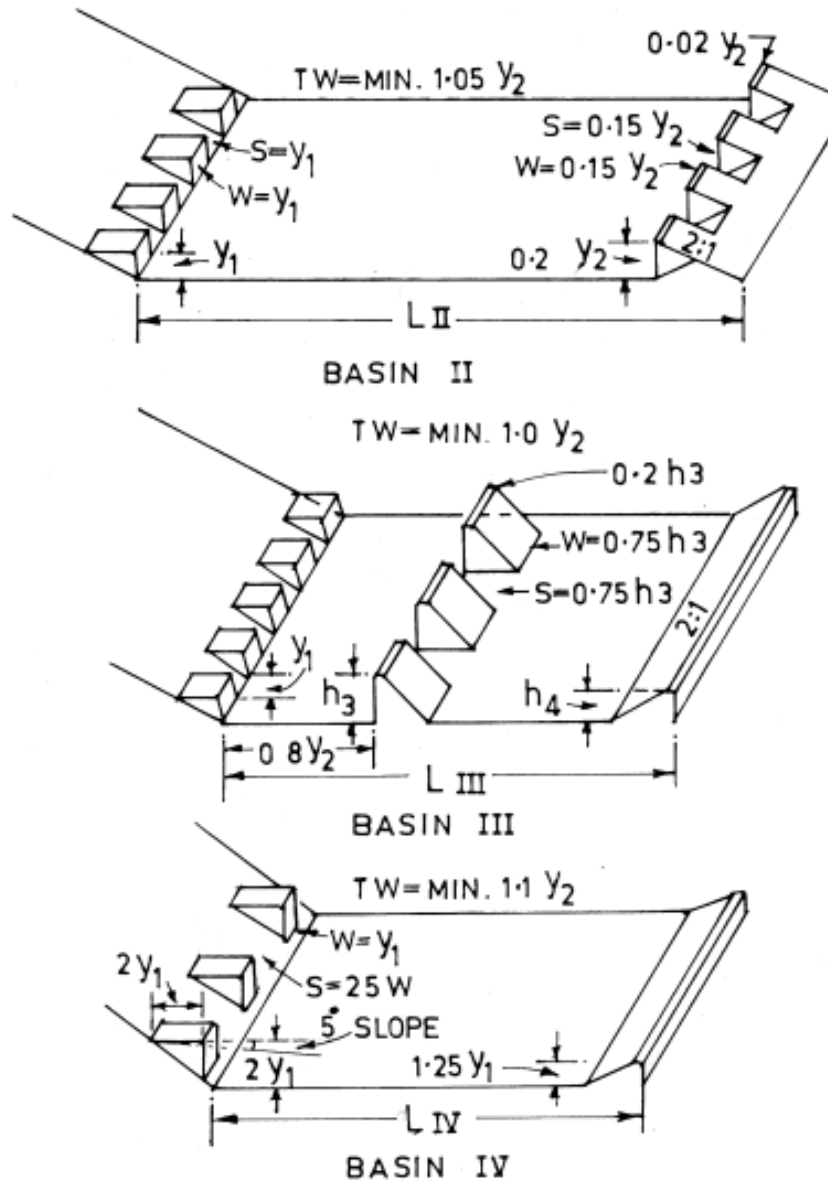


Рисунок 1.5 - Модификации устройств "Водобойного колодца I, III и IV"

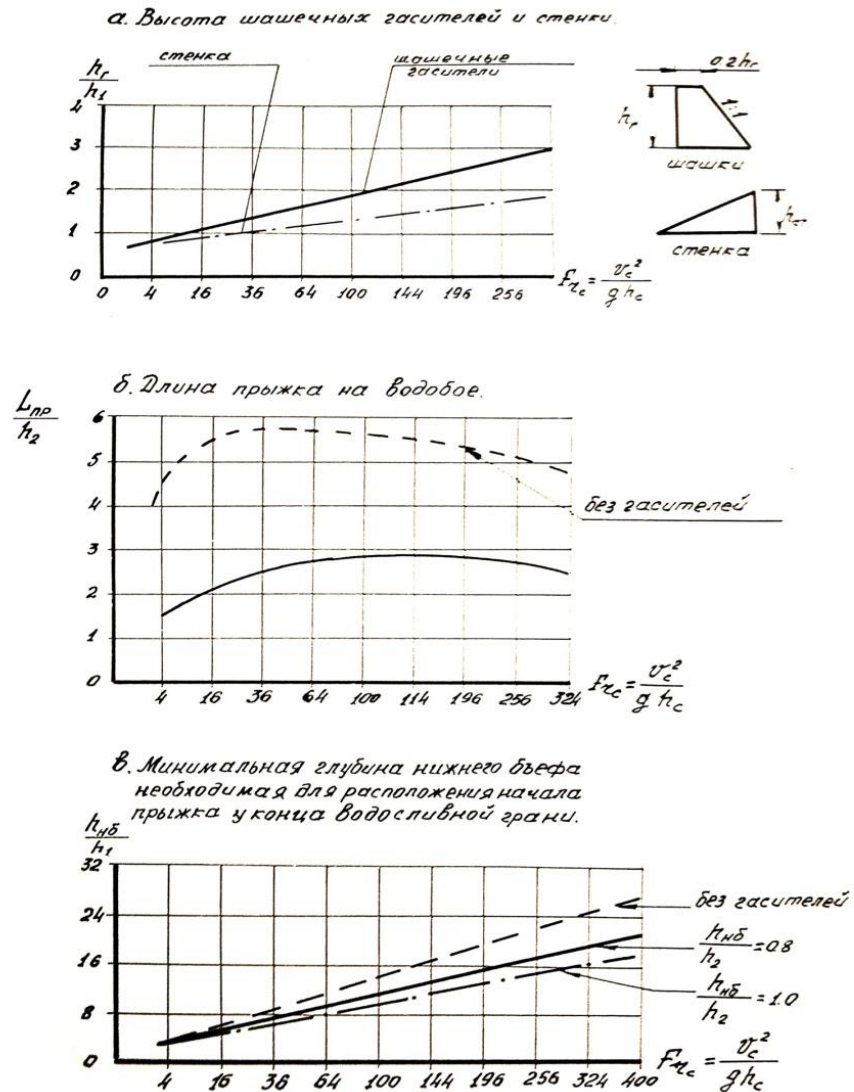


Рисунок 1.6 - Зависимости для определения размеров гасителей и прыжка в водобойном колодце ШБМ США

Конструкции и расчетные зависимости для параметров гасителей и глубин, необходимые для получения критического положения прыжка показаны на (рис.1.5 и 1.6).

Разработанные конструкции водобойных бассейнов не только улучшают диссипационные характеристики гидравлического прыжка, стабилизируют его положение, но и уменьшают необходимую глубину водобоя, на котором он должен поместиться. Это увеличивает надежность работы сооружений. На водобое этих сооружений размещены расщепители, пирсы и стенки (рис.1.5). Расщепители предусмотрены в начале водобоя, они режут и расщепляют струю в

вертикальном плане. Реакция потока на пирс помогает гидравлическому давлению нижнего бьефа стабилизировать прыжок. Стенка в конце водобоя поднимает поток от дна нижнего бьефа и создает обратный ток.

Советские исследователи разработали интересные и перспективные конструкции нижнего бьефа трубчатых [21, 61, 72, 76] и открытых [20, 21, 22, 33, 34, 72, 81] водосбросных сооружений.

При проведении исследований [81] были выбраны 12 вариантов конструкций малопроектных сооружений. Отмечено, что лучшие результаты показали варианты с заложением стенки на выходе из колодца $m = 2$, где отсутствует явление разделения потока на две струи со значительными скоростями вдоль откосов канала. Полученные результаты полностью согласуются с данными Бюро Мелиорации США. Однако следует отметить, что полученные конструкции громоздки для практического применения. На (рис. 1.7) показаны два варианта конструкций, разработанных В.С. Чехонадским [81].

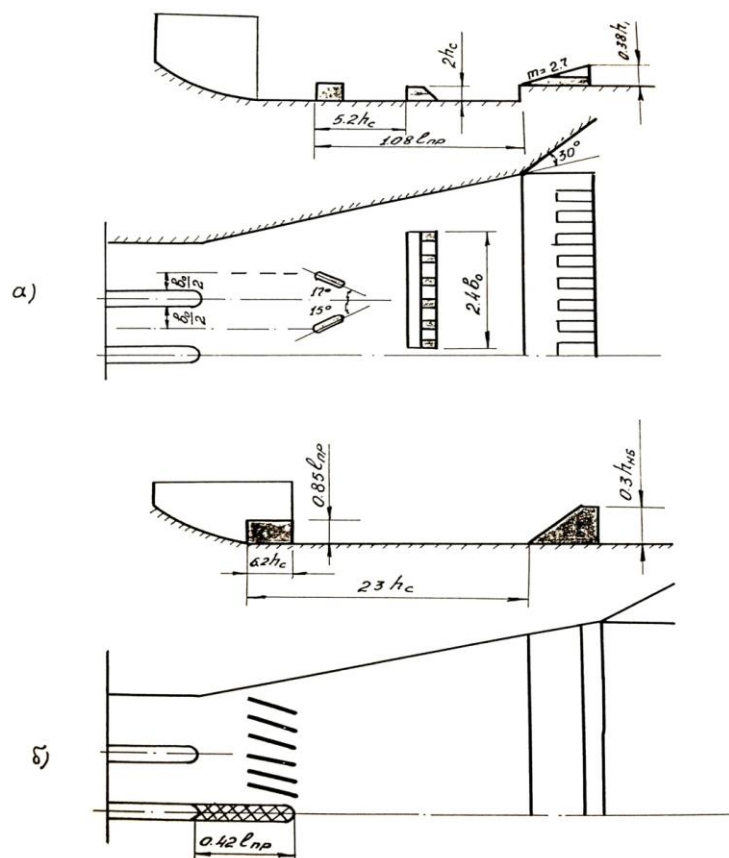


Рисунок 1.7 - Разработки В.С. Чехонадских [81]

Конструкции, разработанные Н.С.Розановым [61] и Н.Н.Пашковым [21] показаны на (рис. 1.8). Эти конструкции состоят из системы растекателей и водобойных стенок и могут быть использованы для борьбы со сбойностью потока.

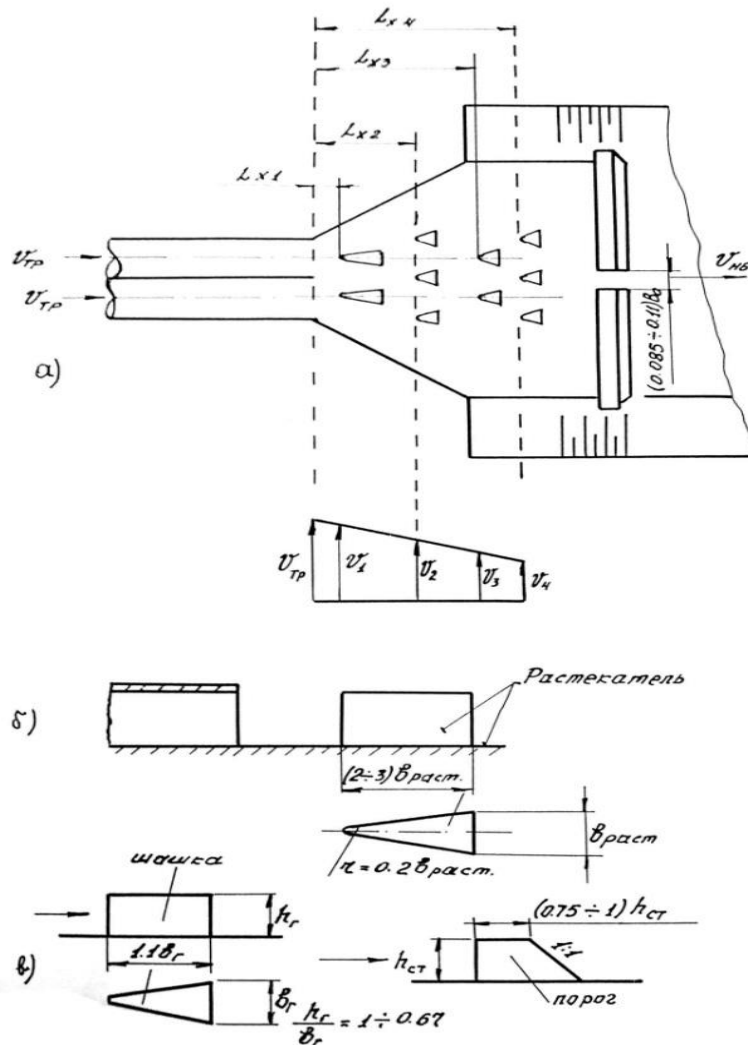


Рисунок 1.8 - Разработки Н.П.Розанова [61]

В работе [76] отмечается, что возникновение сбойного течения (в пространственных условиях) зависит от угла расширения θ . При $\theta < 7^\circ$ бессбойная работа обеспечивается в широком диапазоне глубин в отводящем канале. Сбойные течения возникают при $\theta > 7^\circ$. Чем больше угол расширения потока, тем меньше диапазон глубин, при которых отсутствует сбой. На рисунках 1.9 и 1.10, 1.11 показаны рекомендуемые конструктивные схемы устройств нижнего бьефа трубчатых сооружений и их расчетных зависимостей.

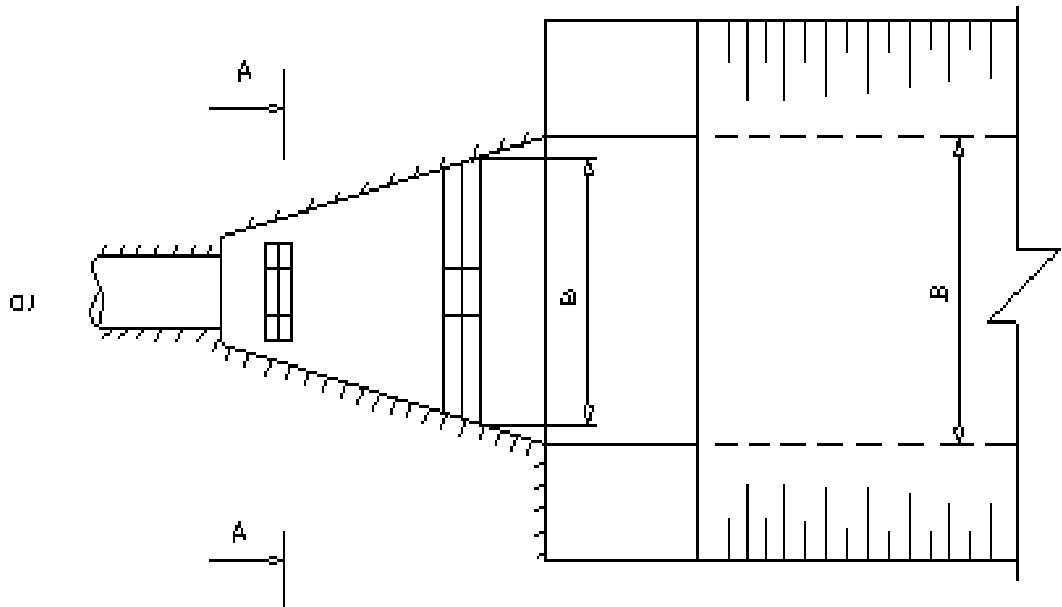


Рисунок 1.9 - Гаситель, предложенный Н.П. Розановым и Н.Т. Кавешниковым для одночкового трубчатого сооружения

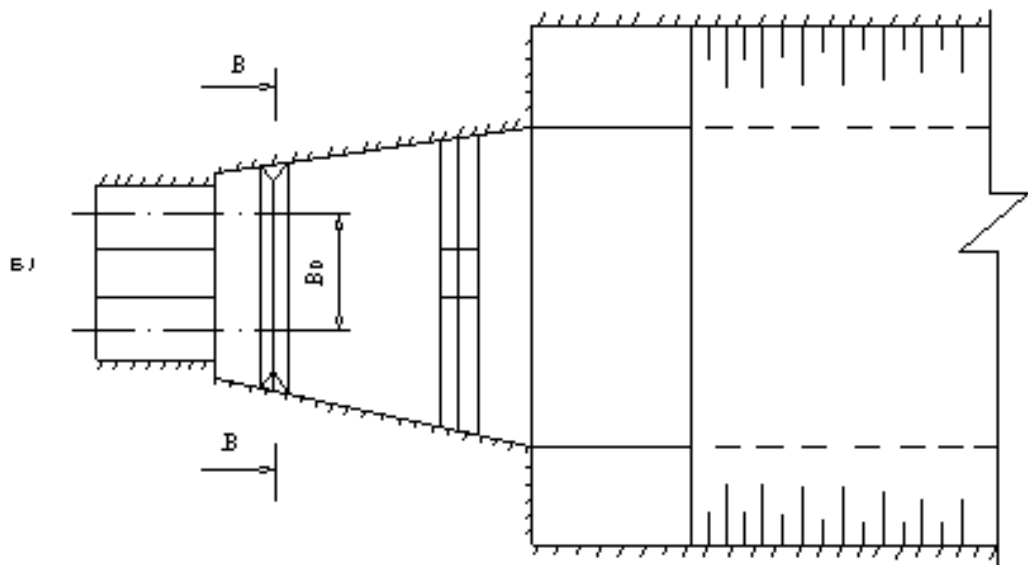


Рисунок 1.10 - Гаситель, разработанный Н.П. Розановым, Н.Т. Кавешниковым для двухчкового трубчатого сооружения

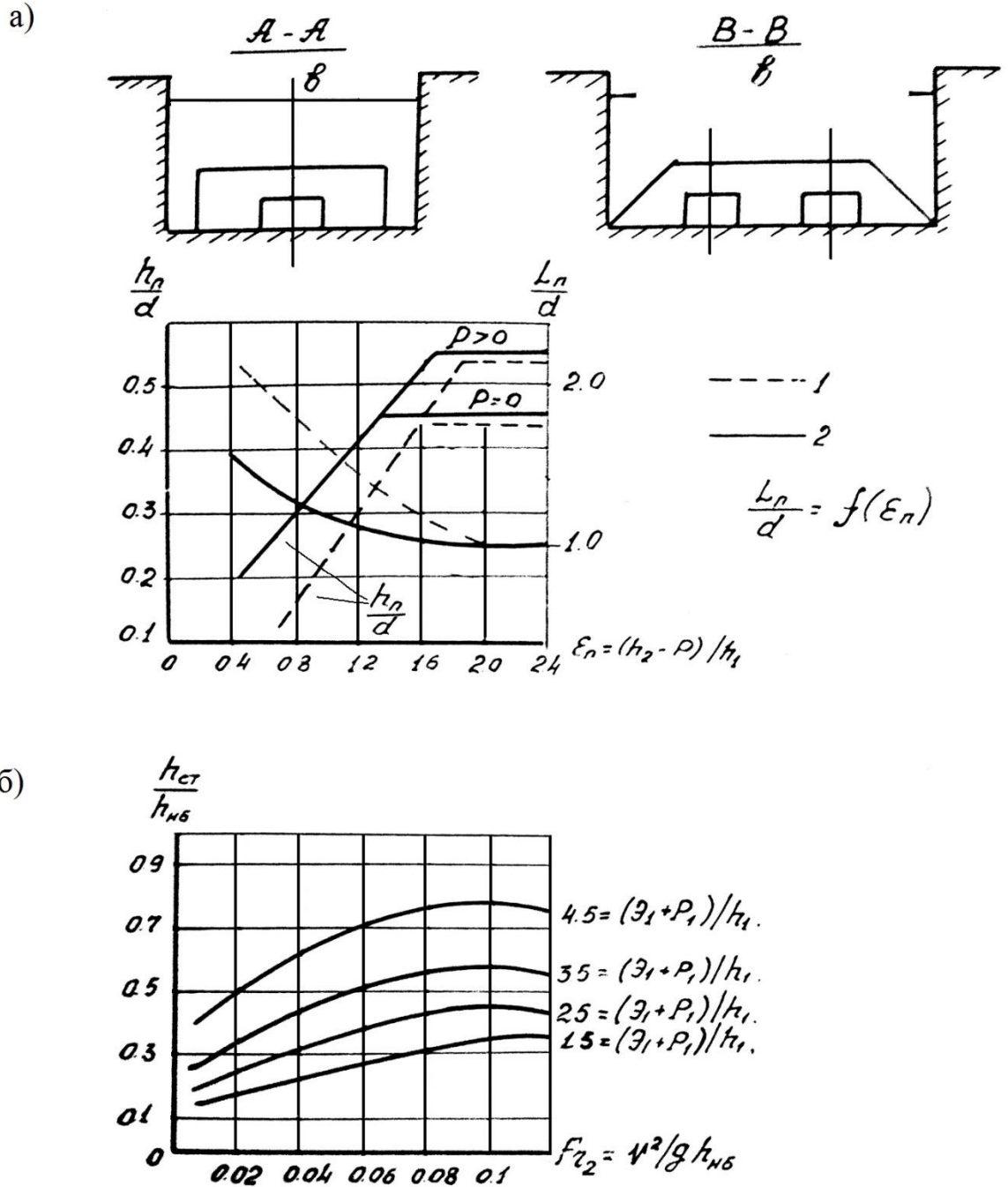


Рисунок 1.11 - Графики для определения размеров гасителей [19,76]:

- а) графики для определения высоты и местоположения рассеивающего порога: 1 – одноочковые и 2 – двух- и трехочковые трубчатые сооружения [19, 76]; б) графики для определения высоты водобойной стенки двух очковых сооружений при центральном угле раструба $\theta \pm 30^\circ$ [19, 76].

Высоту водобойной стенки для одного-, двух- и трех очковых сооружений определяют по зависимости:

$$h_{\text{ст}}/h_2 = f\left((\mathcal{E}_1 + P)h_1 \cdot F_{r_2}\right) \quad (1.1)$$

где: $h_{\text{ст}}$ - высота водобойной стенки; h_2 - глубина потока в отводящем канале; $\mathcal{E}_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g}$ - удельная энергия потока на выходе из труб; $F_{r_2} = \frac{V^2}{gh_2}$ - число Фруда в отводящем русле; P - перепад на выходе из труб (см. рис. 1.9); h_1 - глубина потока выхода из труб при напорной работе трубы; V_1 - скорость на выходе из трубы.

Конструкции, исследованные Н.В.Крупновым [8], показаны на (рис. 1.12).

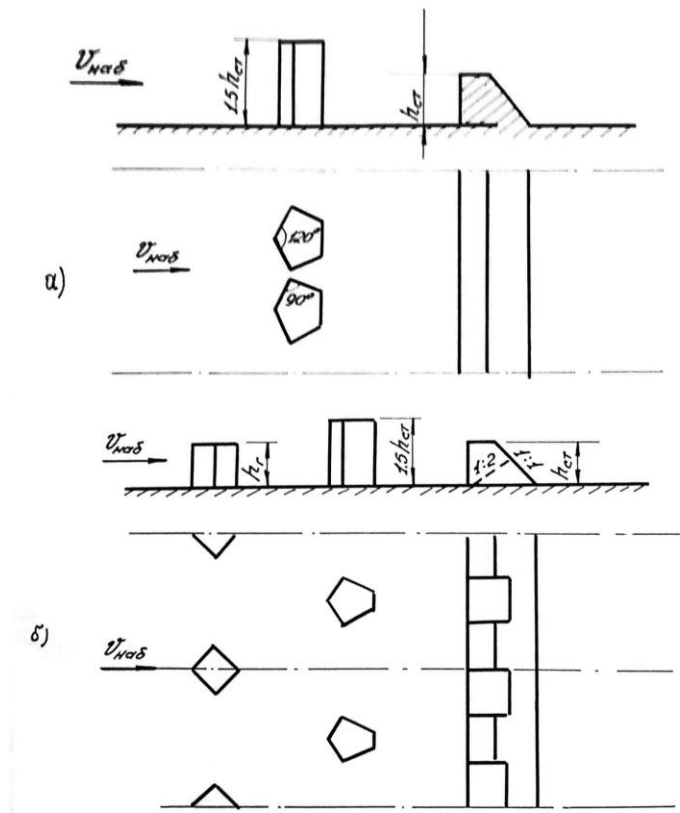


Рисунок 1.12 - Шашечные гасители, исследованные Н.В.Крупновым [8]:

а - один ряд шашек + сплошная водобойная стенка;

б - один ряд шашек + один ряд шашек + прорезная стенка.

Опыты показали, что первая конструкция оказывает распределительное воздействие на поток, вторая конструкция позволяет получить почти равномерное распределение придонных скоростей на рисберме. Отсутствие

крупномасштабных пульсаций скорости за рисбермой было подтверждено результатами замера спектральных и взаимно корреляционных функций и нормированной спектральной плотности пульсаций скорости. Исследования этих конструкций на размыв показали незначительную глубину ямы размыва.

В работе [61] предложена интересная методика расчета некоторых типов гасителей энергии. Для осуществления расчета автор рекомендует пользоваться графиками и зависимостями, полученными им на основе теории планирования экспериментов. Предлагаемая методика, на наш взгляд, полезна для прогнозирования параметров гасящих устройств нижнего бьефа сооружений.

1.3 Особенности мало пролетных водопропускных сооружений

Проектирование рациональных устройств нижнего бьефа представляет собой трудную задачу в том случае, когда сбросной поток характеризуется малыми значениями чисел Фруда $F_r < 3 - 4.5$. Это вызвано тем, что формирующийся при этом гидравлический прыжок является неустойчивым, волнистым [31, 70, 72]. Следствием этого является: повышенная турбулентность водоворотных зон, большие градиенты скоростей и перепады давлений. Разрушительное воздействие потока на элементы крепления нижнего бьефа водосбросов в результате подобных эффектов многократно возрастает. Для таких случаев Бюро Мелиорации США рекомендует конструкцию водобоя типа IV (рис. 1.13).

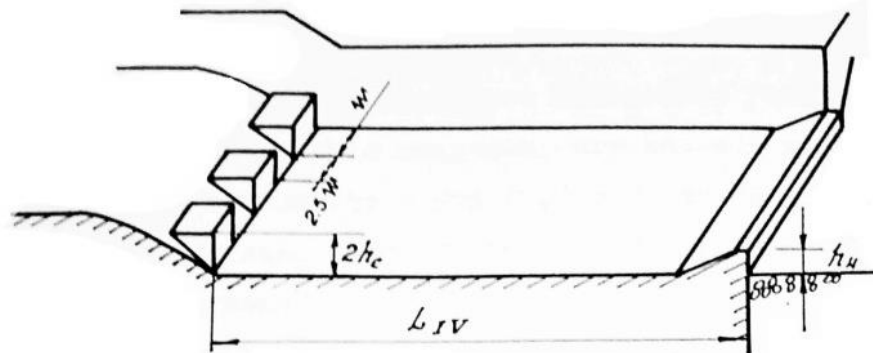


Рисунок 1.13- Водобой типа IV (U.S.B.R)

В 1964 году Пиллай и др. исследовали конструкции с гасителями клинообразного профиля (рис. 1.14) показали, что струи потока отклонялись в наружную сторону к передним углам гасителей и вновь смыкались с боковых сторон дальше по течению, что вызывало снижение реакции гасителей вследствие уменьшения площади турбулентной зоны. Было показано, что лобовое сопротивление таких гасителей возрастает с увеличением угла при вершине. При разработке конструкции нижнего бьефа были применены гасители, имеющие угол при вершине 120° и скос в заднюю сторону под углом 90° . Такие гасители хорошо работали для чисел Фруда $F_r = 5 - 9$. Для значений чисел фруда $F_r = 2,85 - 4,57$ было найдено возможным увеличить угол при вершине до 150° . Разработанные новые гасители в сочетании со сплошной водобойной стенкой предотвращают сбойные течения и дают меньшее значение величины ямы размыва.

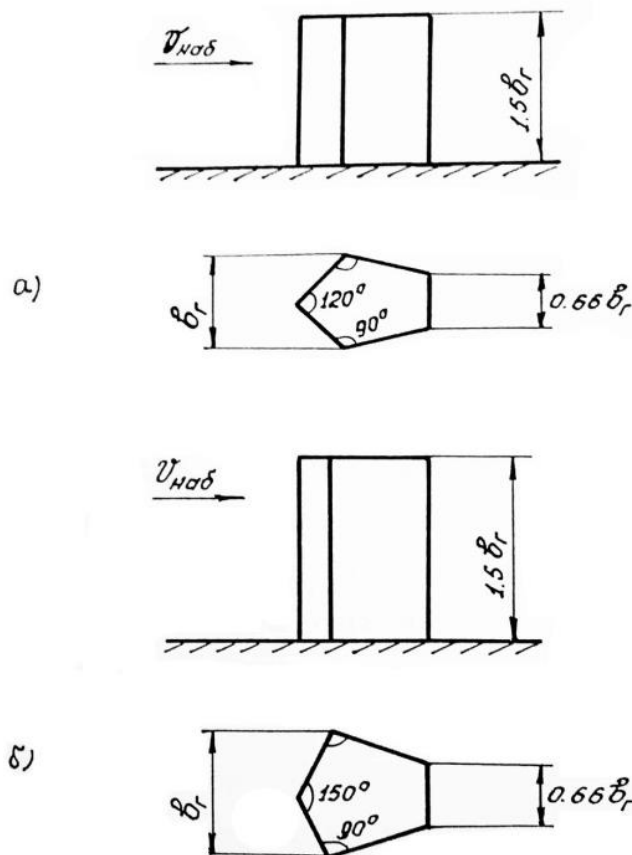


Рисунок 1.14 - Гасители клинообразного профиля [72]

Малопроектные водосбросы и регуляторы работают в условиях низких и средних напоров. Такие конструкции работают как при симметричном, так и при несимметричном режиме пропуска расходов. Многочисленные опыты эксплуатации таких сооружений показывают, что неправильное проектирование или отсутствие лабораторного исследования проектирования может вызывать разрушение сооружения.

Такие примеры неудачных проектов широко освещены в литературе [72].

Так, в течение 8 лет эксплуатации на шлюзе-регуляторе № 2 Кубань-Калаусской оросительной системы появились недопустимые размывы, приводящие к большим затратам на ремонт. При расходе $100 \text{ м}^3/\text{с}$ и напоре 2,7 м глубина ямы размыва достигала 8,9 м. Крепление рисбермы оказалось разрушенным и размывы подошли к водобойной части (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 - Нижний бьеф шлюза-регулятора № 2 Кубань-Калаусской оросительной системы после 8 лет эксплуатации: поверхностные и донные линии токов

Двухпролетная бетонная водосливная плотина Верхне-Упинского гидроузла работает на расход $726 \text{ м}^3/\text{с}$. При пропуске расчетного расхода через два пролета на водобое и рисберме наблюдается свободное растекание бурного потока с образованием косых стоячих волн на свободной поверхности. Ковш, как элемент, хорошо себя зарекомендовавший при многопролетных сооружениях, оказался неудачным. В нем образуется гидравлический прыжок с криволинейным фронтом и боковыми водоворотными областями (рис. 1.16). В результате образования сбойного течения в канале возникло неравномерное распределение удельных расходов.

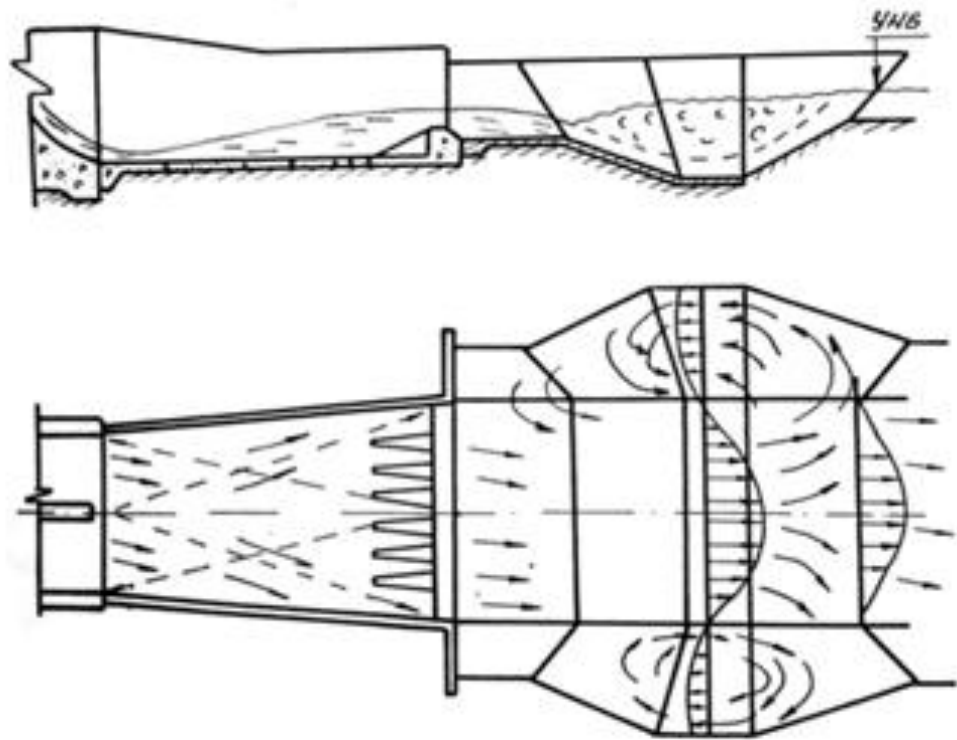


Рисунок 1.16- Растекание потока при пропуске максимального расхода на модели проектного варианта водосброса Верхне-Упинского гидроузла

В поиске улучшения гидравлических условий гашения энергии потока были исследованы другие варианты конструкций энергогасящих устройств нижнего бьефа (рис. 1.17). Наилучшее плановое растекание потока при всех вариантах маневрирования затворами, а также наименьшие значения скоростей наблюдались в варианте с удлиненным водобоем.

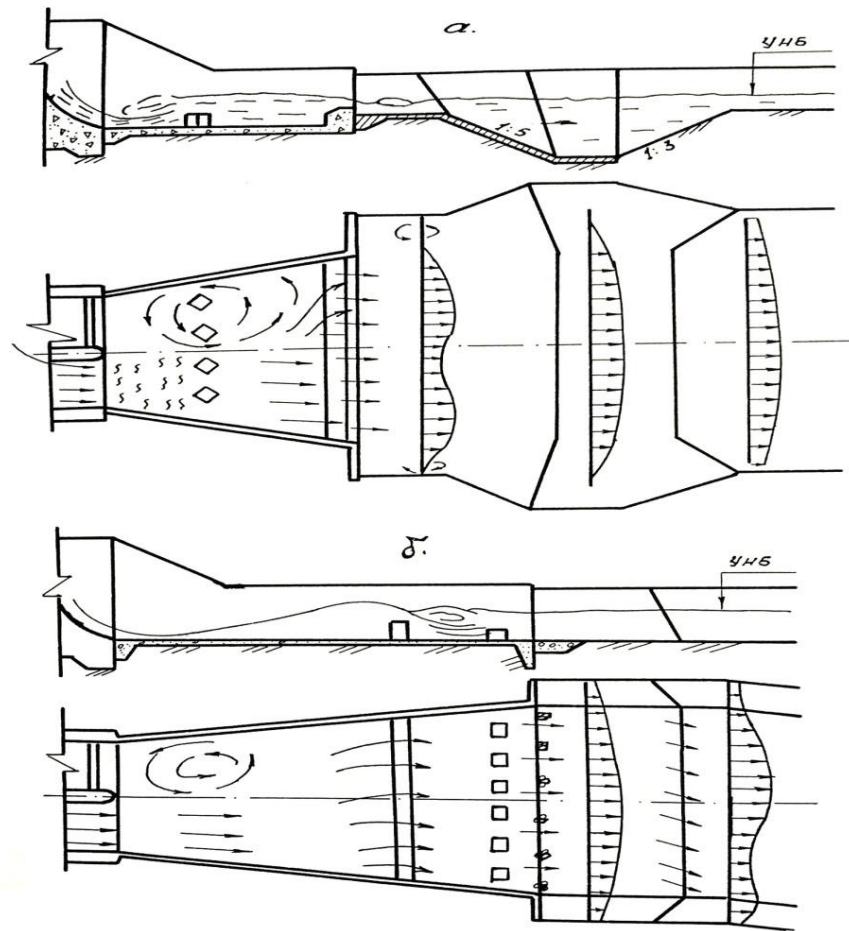


Рисунок 1.17 - Конструкции водосброса с пониженным (а) и удлинённым (б) водобоем при работе одного пролета

Довольно большой интерес представляет рассмотрение водосброса Подольского гидроузла. Он представляет собой двухпролетную бетонную водосливную плотину на р. Пахре. Гидравлические исследования показали неэффективную работу водобойного колодца (элемент хорошо работает при многопролетных сооружениях). Было установлено, что при пропуске максимального расхода через два пролета плановое распределение скоростей в колодце носило несимметричный характер. Средние и придонные скорости в створах, расположенных в начале колодца, оказались у бортов в 1,4-1,6 раза большим, чем на оси. Неравномерное распределение скоростей наблюдалось при всех вариантах маневрирования затворами на рисберме и в отводящем канале. Для улучшения гидравлических условий работы нижнего бьефа был

ликвидирован колодец и принят горизонтальный водобой, снабженный растекателями и водобойной стенкой.

В настоящее время при проектировании многопролетных сооружений стремятся к тому, чтобы эти сооружения работали как малопролетные. При этом удлиняют бычки на всю длину водобоя. Таким образом, после сжатого сечения бычки представляют собой отдельные стенки. Примерами таких конструкций являются водосбросы Итайпу (Бразилия), Каруона (Иран), Тарбела (Пакистан).

В работе отмечается, что в настоящее время довольно широко освещены успехи проектирования водосбросов, здесь же уделяется внимание неудовлетворительной работе этих сооружений. В качестве примера могут служить водосбросы Тарбела (Пакистан) и Малпасо (Мехико). Их водобои получили повреждения из-за долговременных воздействий расходов, значение которых близки к максимальному Q_{max} . Основной причиной повреждения послужили пульсационные давления, которые раскачивали плиты крепления водобоя. Поэтому при проектировании водосбросных сооружений большое место имеет изучение гидродинамических нагрузок на их элементы крепления нижнего бьефа.

1.4 Выбор исследуемых конструкций нижнего бьефа

При выборе исследуемых конструкций нижнего бьефа были учтены распространенность конструкции, ее простота, удовлетворительная работа конструкции как в плоских, так и в пространственных условиях сопряжения бьефов.

Форма гасителей выбиралась из таких соображений, чтобы она охватывала как можно большее число уже существующих на практике гасителей, представленных в п. 1.2. Такой выбор давал возможность широкого сравнения и использования полученных зависимостей. Кроме того, гасители энергии располагались на водобое таким образом, чтобы водобой был не перегруженным

и доступным для проведения экспериментальных исследований. Более подробно исследованные конструкции гасящих устройств изложены в п. 4.5. Рассматриваемые типы гасителей и конструкций нижнего бьефа приведены на рисунках 1.18.

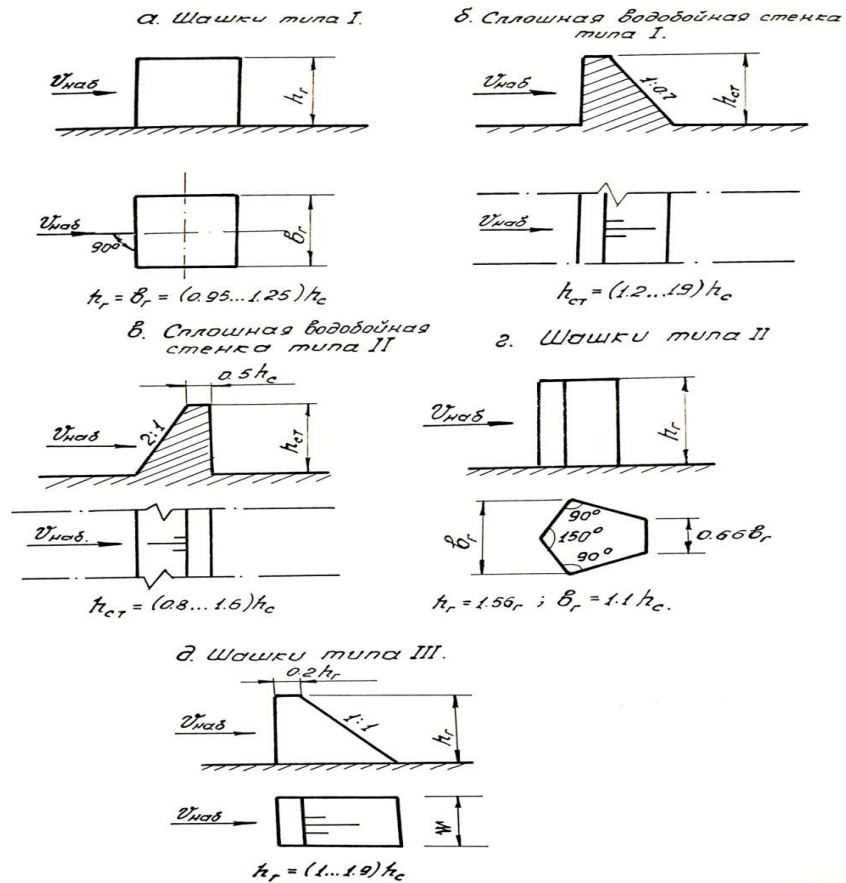


Рисунок 1.18 - Различные типы гасителей, применяемых в практике гидротехнического строительства

Шашки Бюро Мелиорации США достаточно исследованы как в лабораторных условиях, так и в натуре. Их выбор позволяет сопоставить результаты различных гидравлических гидродинамических исследований. Шашки Бюро Мелиорации США были исследованы в работах [35, 70], однако при этом исследованные нагрузки на водобой не проводились, либо проводились только по оси водобоя, хотя при маневрировании затворами, картина нагрузок по всему водобоем неодинакова. Поэтому при проведении исследований большое внимание уделялось этому вопросу.

1.5 Деформации русла при гидротехническом строительстве

Гидроузел вносит существенное изменение в режим течения воды в реке на участках до и после сооружений. В водохранилище по мере уменьшения скорости течения воды с ростом глубины транспортируемые потоком наносы начинают выпадать (осаждаться) на дне, раскладываясь на убывающие по крупности фракции в направлении гидроузла. Этот процесс называется аккумуляцией наносов (твёрдого стока) в верхнем бьефе.

Стеснение речного потока в плане у водопропускных сооружений, увеличенные в сравнении с бытовыми, пропускаемые через гидроузел удельные расходы воды, осветление (освобождение от наносов) воды в водохранилище значительно повышают размывающую способность поступающего в нижний бьеф потока, интенсифицируют русловые процессы, ведут к переформированию русла. Различают два основных вида переформирования (трансформации) русла в нижнем бьефе: общие и местные размывы.

Общими размывами (трансформациями) называют изменения очертания дна и берегов реки на участках значительной протяженности; они ведут к изменениям уровенного режима, что проявляется в нарушении естественной бытовой связи расходов и уровней воды (УВ) в реке. Под местными размывами подразумевают изменения очертания русла на участках, примыкающих к креплению нижнего бьефа и влияющих на условия эксплуатации как крепления, так и сооружения в целом.

Расчет переформирования (трансформации) русел рек в нижнем бьефе гидроузлов включает:

- прогноз понижения уровней воды вследствие общего размыва;
- определение параметров ямы (воронки) местного размыва;
- расчет планового расширения потока и уточнение на его основе результатов расчета местного размыва.

Физика процесса размыва. Твёрдые частицы грунта, расположенные на дне русла, подвержены действию следующих сил: тяжести G , взвешивания A ,

лобовой F , подъемной T и пульсационной T' , вызванной турбулентностью движущейся воды.

На лобовой части поверхности частицы, подверженной воздействию набегающего потока, возникает избыточное гидродинамическое давление, а на тыльной части поверхности наблюдается понижение давления вследствие отрыва потока от поверхности частицы и образования зоны отрыва. Горизонтальная составляющая равнодействующей гидродинамического давления по всей поверхности частицы представляет собой лобовую силу, величину которой определяют по известной формуле (1.2). Вертикальная составляющая равнодействующей гидродинамического давления является подъемной силой, которая вычисляется по аналогичной формуле:

$$T = \rho \omega_y c_y \frac{v^2}{2} \quad (1.2)$$

где: ω_y - площадь горизонтальной проекции частицы; c_y - коэффициент подъемной силы.

По исследованиям А.М. Дементьева [38], отношение подъемной силы к лобовой изменяется от 0,35 до 0,7 в зависимости от формы частицы и ее расположения по отношению к набегающему потоку. Росту подъемной силы способствует несимметричное обтекание потоком частиц, лежащих на дне.

При увеличении скорости потока в паводок, при работе водопропускных сооружений начинают расти лобовая и подъемная силы на наиболее выступающие над дном частицы, что приводит сначала к вибрации, а затем к их перекачиванию и переносу в виде скачков под действием проходящих турбулентных вихрей. Скорость, при достижении которой отмечается начало процесса движения частиц, называют неразмывающей скоростью и обозначают u_0 .

При дальнейшем возрастании скорости потока наблюдается массовое движение наносов в придонном слое и образование на дне гряд или ряби, т. е. движение наносов переходит в состояние грядового перемещения. Еще большее

увеличение скорости приводит к постепенному исчезновению гряд и транспортированию наносов путем взвешивания их потоком.

Для мелкозернистых, связных и скальных грунтов физика эрозионного процесса более сложна, связана с усталостным разрушением грунта на отдельные агрегаты (блоки, отдельности), проникновением пульсаций давления в трещины, действием фильтрующей по трещинам и порам грунта воды.

Общий размыв русла реки. Поступающая в нижний бьеф осветленная (без наносов) вода, воздействуя на незащищенное дно и на берега, постепенно размывает русло, насыщаясь наносами, т. е. восстанавливая свою мутность и транспортирующую способность. В первоначальный период эксплуатации гидроузла интенсивная трансформация русла проявляется на участке непосредственно ниже крепления. Затем по мере увеличения глубины размыва деформации распространяются дальше вниз по течению. Так, за 10 лет эксплуатации Цимлянского гидроузла на Дону по этой причине уровень воды в нижнем бьефе понизился на 1,0 м [52].

Длина участка L_p , на которой происходит размыв дна за время Δt , вычисляется по формуле:

$$L_p = \sqrt{2w/B(i - i_0)} \quad (1.3)$$

где: w - сток наносов за расчетный период Δt ; i - естественный уклон реки (до размыва); $i_0 = u_0^3 / C^2 q$ - уклон реки (после размыва); при котором средние скорости течения равны неразмывающей скорости u_0 (здесь q - удельный расход воды в реке; C - коэффициент Шези русла реки; B - средняя ширина реки).

По найденным величинам i и L_p определяют глубину размыва и понижение уровня Δh :

$$\Delta h = (i - i_0)L_p \quad (1.4)$$

Размыв русла в глубину прекращается, когда скорости течения уменьшаются в результате увеличения глубины потока до неразмывающих для данного грунта значений u_0 или поток вскрывает нижележащие слабо размываемые грунты. Если дно сложено из неоднородного грунта, то

стабилизация размыва наступает в результате вымывания мелких частиц и образования отмостки из крупных частиц (процесс самоотмостки).

Прогноз изменения уровня режима реки вследствие общего размыва дна и берегов необходим при расчетах общей устойчивости сооружений, фильтрации под сооружениями и в обход их, сопряжения бьефов и конструкций крепления нижнего бьефа, а также при обосновании высотного положения турбин и насосов, водозаборов, порогов судопропускных сооружений.

Местный размыв русла реки. У гидроузлов вследствие нарушения естественного гидравлического режима рек происходят местные размывы русел.

В верхнем бьефе местные размывы могут происходить непосредственно перед понурами низконапорных сооружений (плотины, здания ГЭС), а в нижнем бьефе за креплением дна при выходе потока в незащищенное русло.

Имеются различные методы определения параметров местного размыва русел: К.И. Россинского, В.С. Кнороза, Ц.Е. Мирцхулавы и других отечественных и зарубежных исследователей. Способы расчета размыва русла далеки от совершенства. Ниже используются в основном зависимости Б.И. Студеничкикова, полученные с учетом рассмотрения многочисленных предшествующих работ с привлечением обширного экспериментального материала [28].

При глубине потока h , м, неразмывающая средняя скорость для несвязного неоднородного грунта ($d_{10}/d_{50}=0,2\div 0,3$) со средним диаметром d_{50} м, соответствующим 50% по кривой гранулометрического состава, может быть вычислена по формуле 1.5:

$$u_0 = 1,15\sqrt{g}(hd_{50})^{0,25} \sqrt{\frac{1,1}{\alpha}} \quad (1.5)$$

где: α - коэффициент кинетической энергии.

Выражая скорость через удельный расход: $u_0=q/h$ и решив это уравнение относительно h , получим глубину потока после завершения размыва:

$$h_p = \left(\frac{\alpha}{1,1}\right)^{0,4} \sqrt[1,25]{\frac{q}{(1,15\sqrt{g}d_{50}^{0,25})}} \quad (1.6)$$

или, введя дополнительно обозначения:

$$h_p = k_p^{1,25} \sqrt{\frac{q}{(1,15\sqrt{g}d_{50}^{0,25})}} \quad (1.7)$$

где $k_p = (\alpha / 1,1)^{0,4}$ - коэффициент размывающей способности потока, зависящий от коэффициента кинетической энергии α и условия схода потока с рисбермы (рис. 1.19); κ - коэффициент неравномерности распределения удельного расхода, равный отношению максимального удельного расхода в данном сечении к среднему: $\kappa = q_{max}/q = 1,1 \div 1,3$.

По формуле (1.7) можно определить глубину потока в яме размыва и в случае связных грунтов [47], для которых неразмывающая скорость зависит главным образом от удельного сцепления, коэффициента пористости ε и эквивалентного диаметра d , агрегатов, на которые распадается связный грунт (табл. 1.1). Принимая $d_{50} = d_s$, по формуле (1.7) вычисляют глубину размыва.

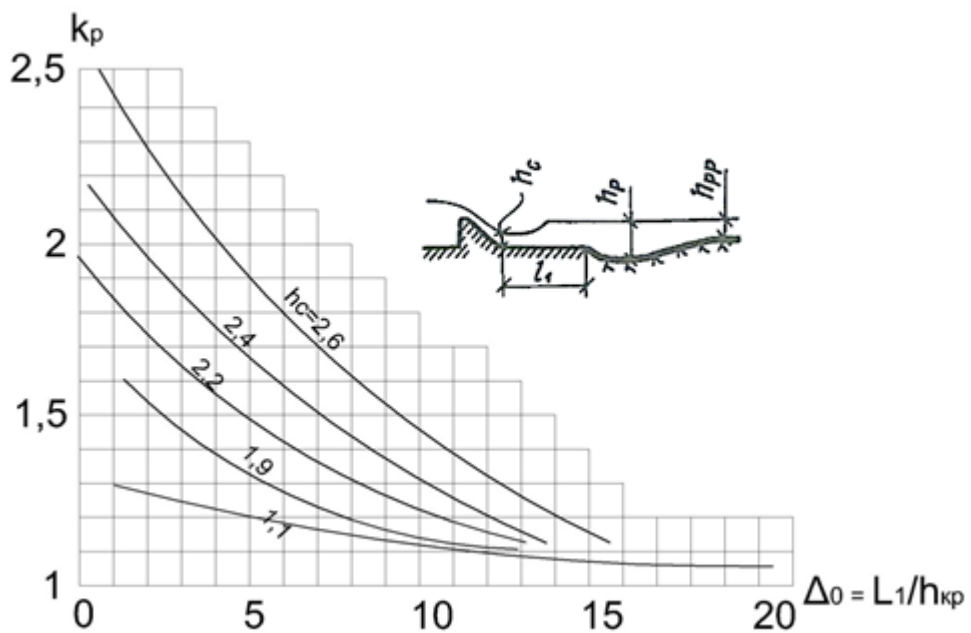


Рисунок 1.19 - Зависимость коэффициента размывающей способности k_p , от относительной длины крепления l_1/h_{kp} и бурности потока h_{kp}/h_c

Таблица 1.1- Эквивалентный диаметр d_3 агрегатов связных грунтов

Грунты	Содержание частиц, (%) размером, мм		Эквивалентный диаметр d_3 , мм, Для частиц различных грунтов			
	0,005	0,005-0,05	Малоплотных $\varepsilon > 1,2$	Среднплотных $\varepsilon = 1,2 \div 0,6$	Плотных $\varepsilon = 0,6 \div 0,3$	Очень плотных $\varepsilon = 0,3 \div 0,2$
Глины	30-50	50-70	0,15	2	10	50
Тяжелые суглинки	20-30	70-80	0,15	3	10	50
Тощие суглинки	10-20	80-90	0,15	3	10	50
Лессовидные при закончившихся просадках	--	--	0,05	1.5	5	20

Неразмывающие скорости для скальных грунтов по нормам определяют в зависимости от временного сопротивления грунта сжатию (при изменении временного сопротивления в пределах 5-100 МПа (50-1000 кгс/см²): скорость u_{01} при глубине $h = 1$ м изменяется практически линейно от 3 до 11 м/с. Но в тоже время сопротивление скалы размыву зависит от размеров отдельностей, на которые разрушается скальный грунт под воздействием потока. При объеме отдельностей w их условный диаметр равен и обычно меньше 1 м:

$$d_3 = \sqrt[3]{6w/\pi} \quad (1.7)$$

Определяя по формуле (1.7) глубину размыва скальных грунтов, следует иметь в виду, что, рассматривая скальный грунт как бы состоящим из отдельностей определенного диаметра, не учитывают ни их действительные формы, ни те связи, которые существуют между ними.

Выводы по первой главе

Материал, приведенный в первой главе и посвященный опыту применения энергогасящих устройств в нижнем бьефе ряда водосбросных сооружений, показал актуальность вопроса и необходимость поиска новых конструктивных элементов (устройств) для различных конфигураций сооружений и гидравлических условий в них.

Анализ изучения литературных источников, отражающих теоретические и экспериментальные исследования сопряжения бьефов в пространственных условиях, позволяет сделать следующие краткие выводы:

1. Существующие теоретические и экспериментальные зависимости для определения сопряженных глубин в пространственных условиях при отсутствии гасителей энергии имеют ограниченное применение при центральных углах расширения больших, чем угол естественного растекания потока.

2. Для расширения угла растекания потока в плане, без образования сбойных течений, необходимы специальные конструктивные энергогасящие элементы (гасители энергии, растекатели потока и т.д.). Местоположение этих элементов в нижнем бьефе определяется экспериментальным путем.

3. Имеющиеся зависимости для расчета конструкций нижнего бьефа с учетом дополнительных гасителей получены лишь для конкретных сооружений с ограниченным диапазоном применения и не исчерпывают потребности проектирования и строительства водосбросных сооружений.

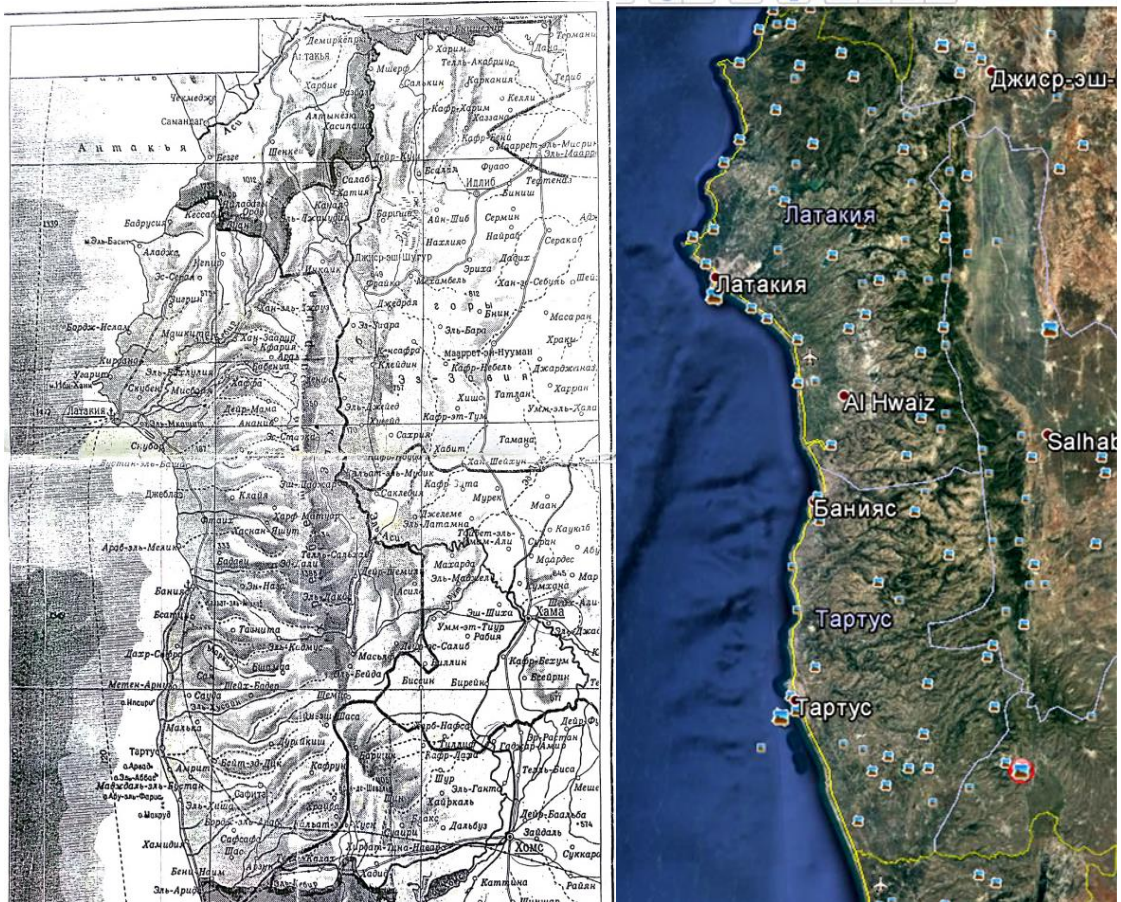
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РУСЛА РЕКИ СЕВЕРНЫЙ КЕБИР И ГИДРОУЗЛА 16 ТИШРИН В САР

2.1 Природно-топографические условия района строительства гидроузла на реке Северный Кебир

Сирийская Арабская Республика - государство, расположенное на восточном побережье Средиземного моря и относится к странам передней или Малой Азии. По своим климатическим условиям Сирия разделяется на две зоны: с мягким субтропическим средиземноморским климатом в прибрежных областях и континентальным сухим во внутренних районах, которые занимают более 80 % территории страны. Во внутренних районах страны величина среднегодовых осадков находится в пределах всего 100...300 мм/год, хотя в прибрежных районах могут достигать в горах и 1000 мм/год. По этой причине во внутренних районах преобладают пустыни и полупустыни. В Сирии имеется всего пять рек, в которых летом имеется вода, или хотя бы её следы. Самая крупная река Сирии Евфрат, истоки которой находятся в Турции и после Сирии она течёт по Ираку. После строительства водохранилища им. Ататюрка на Евфрате в Турции, сток реки летом резко сократился, что ещё более ухудшило обеспечение водой внутренних районов. Кроме Евфрата, летний сток имеют его левый приток Хабур; река Эль Асси, начинающаяся в горах массива Эш - Шейх в Ливии и протекающая на север вдоль средиземноморского побережья и в Турции впадающая в Средиземное море.

Две реки, Южный Кебир и Северный Кебир, находятся в Прибрежном районе Сирии, который расположен вдоль берега Средиземного и ограничен с востока горной грядой, хребет которого Ансария расположен параллельно побережью на расстоянии 25...30 км. На рисунке 2.1а показана карта Прибрежного района, а на рисунке 2.1б космическое фото.

Вершины хребта Ансария достигают отметок 1550 м над уровнем моря. Река Южный Кебир протекает с востока на запад на юге Прибрежного района вдоль границы Сирии с Ливаном.



а)

б)

Рисунок 2.1 - Карта и аэросъемка прибрежного района Сирии

а - карта Прибрежного района, б - космическое фото

Река Северный Кебир протекает с северо - востока на юг - запад на севере Прибрежного района вблизи границы Сирии с Турцией, впадает в Средиземное море немного южнее города Латакия – четвёртого по величине города Сирии. Длина реки Северный Кебир, по европейским меркам, не очень большая - всего около 89 км. Но её роль в производстве сельхозпродуктов весьма значительна. Выходя из горной зоны, она протекает по пойме, которая достигает ширину местами до 3 - х километров.

Наличие в пойме лёгких плодородных почв и субтропический климат, при котором зимой температура воздуха редко опускается ниже $+10...12^{\circ}\text{C}$,

позволяет выращивать субтропические и овощные культуры, некоторые из которых могут давать по два урожая в год, превращая тем самым её в одну из основных баз производства сельскохозяйственной продукции. Однако, уже многие десятилетия наблюдается процесс понижения русла реки, которое ведёт к развитию эрозионных процессов и деградации поймы, вследствие чего культурные площади быстро сокращаются.

2.2 Природно - климатические условия долины реки Северный Кебир и её изученность

При оформлении настоящего раздела были использованы материалы [71].

Бассейн реки Эль Кебир Шемали (Северный Кебир) находится в субтропической зоне со средиземноморским климатом. Этот климат известен жарким и коротким летом обилием осадков в зимний период. Средняя годовая температура воздуха колеблется от $19,4^{\circ}\text{C}$ на побережье до $12,5^{\circ}\text{C}$ в горах. Абсолютный максимум температуры воздуха наблюдается в августе - от 39°C до $42,7^{\circ}\text{C}$, а абсолютный минимум (в январе - феврале) - от -11°C до $0,2^{\circ}\text{C}$.

Общий среднегодовой уровень осадков составляет 818 мм на побережье и 1390 мм в предгорных районах. Его объем (до 97 процентов) приходится на холодное время года с октября по май. Наиболее высокие значения ежедневных осадков были зарегистрированы в июле 1963 года в Айн Аида (170 мм).

Среднегодовая скорость ветра в районе Латакии составляет $4,2\text{ м}^3/\text{сек}$. Максимальная скорость ветра, достигшая $27\text{ м}^3/\text{с}$, была зарегистрирована в июне 1965 года и в январе 1968 года. С октября по май преобладают северо- восточные ветра. В тёплое время года они меняются на юго – западное направление.

Средняя относительная влажность воздуха равна 61-75 процентов, но в летний сезон случаются периоды со 100 % - ой влажностью при температуре воздуха днем и ночью $30...33^{\circ}\text{C}$, когда невозможно даже высушить бельё. Испарение в этот период снижается до нуля, хотя в остальное время испарение со свободной водной поверхности может достигать 1300мм /год.

2.3 Гидрологические условия

Река Северный Кебир образуется из нескольких притоков, формирующихся в горах Северной Анталии в Турции, которые сливаясь с потоком горы Ансария на высоте 1600 м над уровнем моря на протяжении 5-и км, примерно, в 10 км от границы с Турцией формируют на территории Сирии реку Северный Кебир, которая впадает в Средиземное море в пяти км к югу от горда Латакия. Длина реки составляет 89 км, площадь бассейна составляет 1100 км. Примерно в 30 км от устья река выходит на пойменный участок в районе села Эль - Бахлулия. В зоне выхода в предгорный район отметки дна реки составляют порядка 33 м. абс. с уклоном дна $i = 0,023$.

Из водомерных постов следует отметить водопосты у села Касьмин, в поселке Хан Занур у дороги Латакия - Алеппо и водопост на реке Ар-Русс у села Сафаркия. Для реки Северный Кебир были изучены гидрологически только низкие расходы неподалёку от Хан Аталла (1949-1975 годы) и Сафиум (1960-1974-е годы). Данные наблюдений низкого качества. Этому способствовала непрерывная деформация русла, что требовало постоянной корректировки кривой связи уровней воды и расходов $Q=f(h)$, чего не производилось. С марта 1975 года вплоть до апреля 1976 года, гидрологические работы в Хан Аталла и недалеко от деревни Косьмин, т.е. в районе строительства, советские и сирийские специалисты дополнили наблюдения за расходами реки. Эти данные наблюдения позволили скорректировать информацию, полученную специалистами из Сирийской Арабской Республики за предыдущие годы, но её достоверность все равно оставалась низкой.

Гидрологический режим рек характеризуется длительными наводнениями (с октября по май), в сопровождении многочисленных дождей, и стабильно низкие уровни в засушливый период. Выше 95 процентов сток воды происходит в паводковый период. Максимальный расход воды чаще всего наблюдается в период с января по март, минимальный - обычно в августе - ноябре. В течении нескольких лет некоторые участки реки могут пересыхать в летний период.

Поскольку наблюдения за стоком Северный Кебир вблизи створа гидроузла велись в течение довольно короткого периода времени, все расчёты, характеризующие значения стока реки, были приняты на основе данных наблюдений водопоста Хан Аталла, расположенного в трёх километрах вниз по течению от створа гидроузла.

В таблице 2.1 приведены расчётные значения основных гидрологических характеристик реки Северный Кебир в створе гидроузла. Эти данные представлены с учётом их корреляции на долгосрочный период по годовым осадкам.

Таблица 2.1 - Гидрологические характеристики стока реки Северный Кебир в створе гидроузла 16 Тишрин

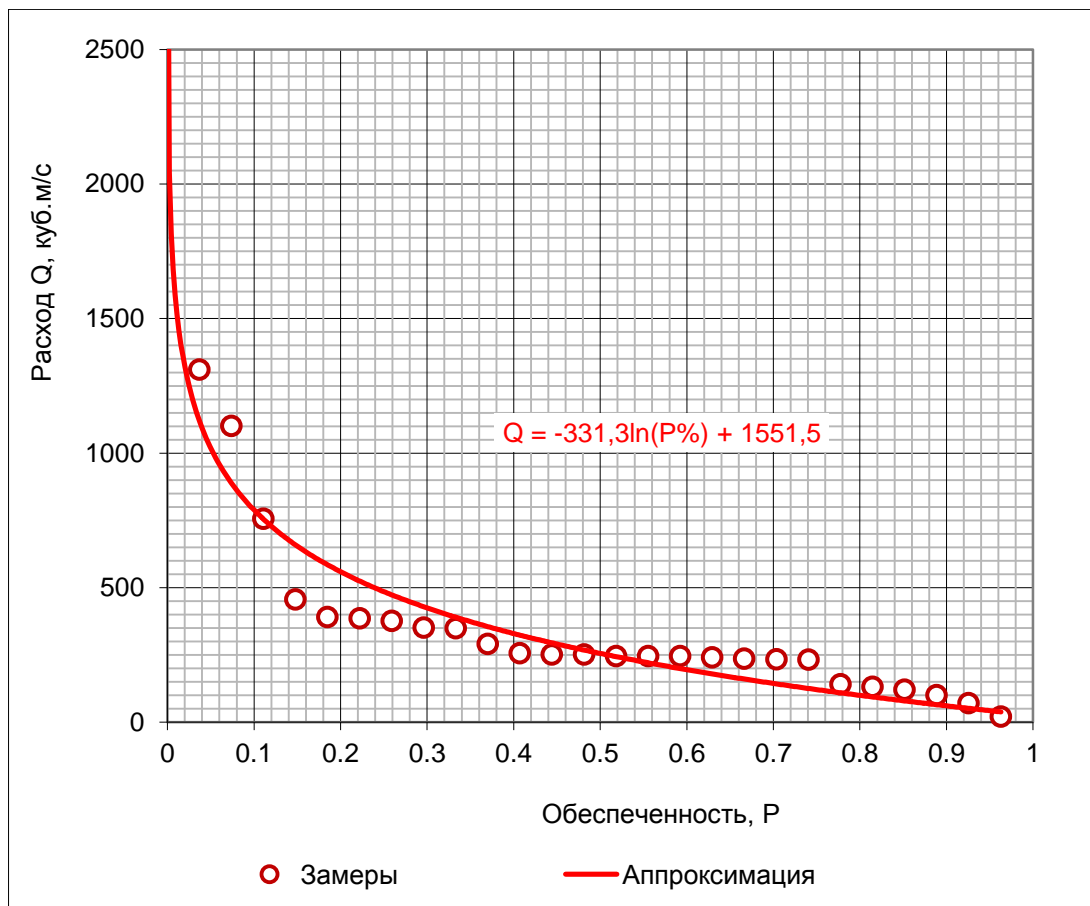
Характеристика	Параметр			Величина с обеспеченностью, %				
	Q	C_v	C_s	0.1	1	5	10	20
Годовой расход м ³ /с	366	0,99	$4C_v$	3380	1800	1020	753	524
Минимальный расход м ³ /с	284	0,66	$2C_v$	1220	889	648	534	420
Характеристика	Параметр			Величина с обеспеченностью, %				
	Q_0	C_v	C_s	50	75	90	95	97
Годовой расход м ³ /с	10,0	0,62	$2C_v$	8,78	5,43	3,36	2,41	1,89
Минимальный расход м ³ /с	1,19	0,72	1,0	1.05	0.57	0,23	0,06	0,00

Среднегодовое значение взвешенных наносов реки Северный Кебир на створе гидроузла составляет около 19,0 кг/сек. Предполагаемый общий объём твёрдого стока равен 720 тыс. т, по данным [71].

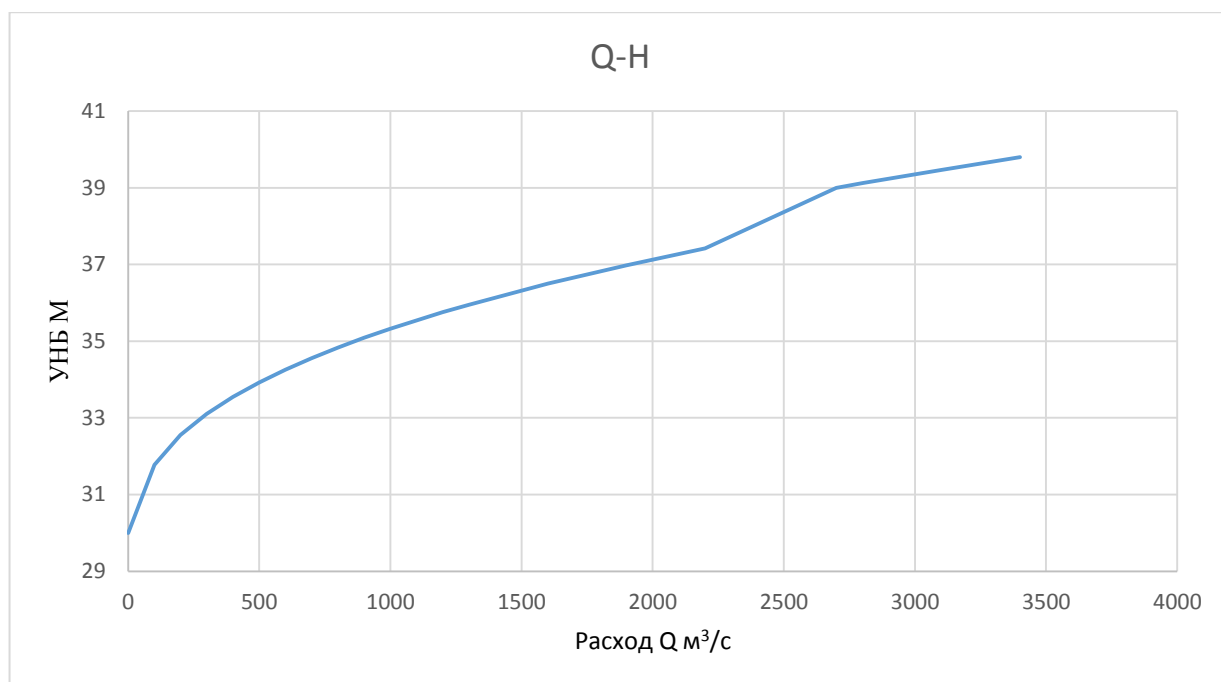
Твёрдый сток реки и анализ его фракционного состава, практически не изучался, а потому выводы о его характеристиках, приведенных в [71], заслуживают серьёзного сомнения в достоверности, особенно относительно количества и гранулометрического состава влекомых наносов, которые для реки Северный Кебир являются основным фактором руслоформирующих процессов. Вода реки Северный Кебир относится к гидрокарбонатному типу с умеренным

содержанием соли. Это умеренно жёсткая, не агрессивная к бетонам на портландцементе вода.

По данным имеющихся наблюдений и опросам старожилов были рассчитаны величины максимальных расходов, кривая обеспеченности которых приведена на рисунке 2.2. В соответствии с данными этой кривой, пиковые величины максимальных расходов обеспеченностью 10, 5 и 1 % составляют 752, 1020 и, 1800 м³/с соответственно. Максимальный пиковый расход гидроузла расчётной обеспеченности $p = 0,1$ % составляет 3300 м³/с, но с учётом трансформации гидрографа паводка в верхнем бьефе водохранилища максимальный расход нижнего бьефа составит 2700 м³/с.



а)



б)

Рисунок 2.2 - Кривые обеспеченности расходов (а) и зависимость уровней воды от расхода реки (б)

В дальнейшем при анализе режимов реки в качестве расчётных приняты расходы 753, 1020, и 1800 м³/с.

2.4 Инженерно-геологические условия

Гидротехнический комплекс и бассейн реки Северный Кебир в нижнем течении находятся в зоне геоструктуры Латакии в месте контакта двух структур: массива Бассит и углубления реки Северный Кебир. Комплекс гидротехнических объектов и верхней части водохранилища расположен в массиве Бассит, в нижней части течения водоема - в зоне углубления реки Северный Кебир.

Геологическое строение состоит из мезо-кайнозойских пород, в том числе комплексов верхнего триаса, Верхнего Триасового, мела, палеогена, неогена и четвертичной системы. Породы, которые составляют массив Бассита, частично смещены и уничтожены многочисленными тектоническими дислокациями, что сопровождалось образованием тектонических геоструктур Латакии. Верхнетриасовые осадки в массиве Бассит представлены основными и

ультраосновными породами офиолитовых образований. Они из числа отдельных блоков среди последних осадочных пород. По степени изменения эти породы могут быть разделены на три группы: твердые породы, Атаклазиты и милониты.

Твердые породы, образованные из базальтов, диабазов, габбро, расчлененные густой сетью трещин, заполненных вулканизированным кальцитом, кварцем и демоническим шпатом.

Катаклазиты представляют собой комплекс дробленых метаморфических пород, сцементированных глинистым цементом. Размер отдельных фрагментов варьируется от миллиметров до 1-1,5 м. Катаклазиты состоят из диабазов, порфиритов, базальта, туфа, брекчий и габбро, или полностью преобразованы в хлоритизированную с большим количеством талька в зацементированной сланцевую массу. Толщина катаклазитов составляет 60 м.

Последние продукты выветривания основных и ультраосновных пород - это милониты. В милонитах встречаются обломки серпентинитов, базальтов и диабазов. Малая часть представлена вулканическим пеплом, вулканическим стеклом и обломками основных и ультраосновных пород. Толщина слоев милонитов составляет 250 м.

Верхняя Триасово-Юрская толща пород представляет смешанные, в основном красные, скалы, которые широко распространены. Скалы состоят из тонких слоев, представленных прослоями глин, радиоляритов, силицитов, аргиллитов, алевролитов и известняков. От поверхности до 30 м в глубину происходят главным образом глины. Толщина слоев Триасово-Юрских осадков достаточно велика, около 600 м.

Известково-мергелистый слой Мелового, Палеогенового и Неогенового периодов лежит на породах Верхнего Триасского и Юрского массива Басит со стратиграфическим и угловым несогласием.

Углубление реки Северный Кебир характеризуется более комфортабельным наложением пород. Оно неустойчиво со смещением только в непосредственной близости от тектонических геоструктур. Области углублений состоят из меловых,

палеогеновых, неогеновых осадочных пород, в основном представленных известняками и мергелями.

Четвертичные отложения представлены на рассматриваемой территории, главным образом породами из суглинков, глин и гравийногалечных отложений.

Подземные воды в объекте происходят в аллювиальных отложениях долины реки Северный Кебир, известковых породах мелового, палеогенового и неогенового периодов, а также пород вулканического происхождения Верхнего Триаса. Глинистые, без сегментированных отложений, породы Верхнего Триасово-Юрского периода и милонитов Верхнего Триаса служат в качестве региональных непроницаемых пород. В непосредственной близости от области Проекта сложился водоносный пласт осушенного русла реки Северный Кебир. Речные долины асимметричны. На левом берегу четко прослеживается профиль первой и второй надпойменных террас. На правом склоне более крутой, террасы не прослеживаются в нем. Пойма имеет ширину от 180 м до 2-х км.

В граничащих частях створа плотины в основе и наклоне возникают породы офиолитовых образований представляя собой милониты ($\phi = 18^\circ$, $C = 1,07 \text{ кг/см}^2$), катаклазиты. ($\phi = 34,2^\circ$, $C = 0,74 \text{ кг/см}^2$) и юрских глин ($\phi = 15^\circ$, $C = 0,3 \text{ кг/см}^2$).

В Юрских глинах залегают милониты. В правом склоне обнаружено обнажение милонитов по всей зоне примыкания плотины. В левом склоне обнаружено обнажение милонитов в нижней второй надпойменной террасе. В левом склоне долины на скалах обнаружены офиолитовые образования, занимающие отдельный блок из мергелей и известняков, среди которых можно встретить везикулярные известняки. Минимальная высота основания этого блока в плотине составляет 75 м. Слой везикулярных известняков из верхнего бассейна покрыта глиной. В этой части долины поймы милониты с катаклазитами являются интеркалированными с прослойками гравийногалечных осадков до 27 м.

Коренные породы в практически водонепроницаемые. Удельное водное поглощение Юрского периода меньше, чем $0,001 \text{ л/ мин.м}^2$, а именно: милонитов составляет $0,0015 \text{ л/ мин.м}^2$, эти катаклазиты является $0,0035 \text{ л/мин.м}^2$. От земной поверхности до глубины 5 м увеличивается водопоглощение катаклазитов до

0,025 л/ мин.м². Коэффициент фильтрации гравийно-галечных осадков колеблется в пределах 15-190 м/сут, что создаёт возможность в летний период при малых расходах превращать поверхностный сток в русловой. Он уменьшается по мере приближения к склонам долины.

Первоначальная сейсмичность гидротехнического комплекса в целом считается равным 7 баллов по шкале Рихтера, аналогичные проекты повторного строительства и расширение морского порта Латакии и строительство железной дороги Латакия-Алеппо. Детальное уточнение сейсмичности района было поручено соответствующим специалистам СССР и Сирийской Арабской Республики в связи с тем, что гидротехнический комплекс расположен в зоне альпийской складчатости, которая характеризуется интенсивной сейсмичностью, а сейсмического районирования не проводилось. В результате этого зоны сейсмической активности плотины и нижнего участка бассейна реки Северный Кебир были увеличено до 8 баллов.

По преобладающим комплексам пород, которые составляют склоны долины, вся территория нижнего участка долины реки Северный Кебир может быть разделена на три региона. Первый регион занимает водохранилище в нижней части, непосредственно примыкающей к плотине. Это область развитых Верхних Триас-Юрских отложений, представленных в основном глинами. Вторая область расположена в водохранилище средней части и характеризуется образованием офиолитовых пород, существующих там - диабазы, порфириты, габбро, туфобрекчиями, катаклазигы. Третий регион водохранилища находится вверх по течению. Он состоит из известняков и мергелей.

Геологические изыскания для решаемой задачи представляют интерес в двух аспектах:

-как источник информации о гранулометрическом составе и мощности пород, слагающих ложе русла реки;

-как источник информации о глубине залегания коренных пород подстилающих породы ложа русла реки.

В этой части имеющиеся геологические материалы имеют весьма ограниченный объем информации.

По гранулометрическому составу грунта ложа русла реки Северный Кебир имеются сведения в створе сооружений гидроузла 16 Тишрин (Таблица 2.2).

Таблица 2.2- Гранулометрический состав грунта реки Северный Кебир в створе гидроузла

Номер слоя	Глубина слоя отбора проб, м	Процентное содержание частиц крупностью, мм									
		100-50	50-20	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1
1	0-0,5	41,2	20,7	3,5	3,2	4	3,2	4,3	11,2	7,4	1,3
2	0,5-2,5	42,2	35,8	4,8	1,1	2,5	6,9	3	2,9	0,2	0,6
3	2,5-3,0	1,5	2,5	5	10,1	17,6	29,6	13,9	15,5	3,9	0,4
4	3,0-5,0	31,3	21,7	22,9	10,4	7,8	3,5	0,7	0,8	0,7	0,2
5	5,0-6,0	49,6	8	10,3	4,5	8	9	4	5,3	1,1	0,2

2.5 Анализ и результаты прогноза формирования русла реки Северный Кебир (САР)

Вопросы речной гидравлики интересуют специалистов более двух веков, со времён развития интенсивного орошения в Индии и Пакистане, когда пришлось решать вопросы проектирования каналов с устойчивыми формами поперечного сечения. С той поры десятки учёных во многих странах мира десятилетиями занимались проблемами руслоформирования речных долин. В ряду этих учёных видное место занимают учёные России и СССР. Сложность процессов, происходящих при движении воды по речной долине, вызвало появление многочисленных теорий, позволяющих определить параметры устойчивых сечений русла и дать прогноз направленности этих процессов. Однако, количество факторов, влияющих на эти процессы, настолько велико, что пока нет возможности связать воедино их влияние на процессы, происходящие в речном русле. Это связано с тем, что одни и те же параметры в различных климатических,

инженерно-геологических и др. условиях вносят совершенно различный вклад, от нечувствительности восприятия в одних условиях, до взаимно разнонаправленных в других условиях. Этим можно объяснить наличие большого количества теорий формирования русловых процессов. Тем не менее, в совокупности эти теории позволили выделить наиболее важные факторы, влияющие на эти процессы.

Основная закономерность руслового процесса заключается в непрерывном взаимном приспособлении и изменении форм речного стока и структуры потока. Эта внутренняя закономерность руслового процесса, при которой русло реки и в то же время ей не отвечает, и является внутренним источником развития руслового процесса.

Отрыв частиц от дна, их перенос и отложение зависят от гидравлической структуры потока, которая при прочих равных условиях в свою очередь определяется рельефом русла. Оторванные от дна, перенесённые и отложенные частицы изменяют форму речного русла, что сказывается на структуре потока. Размыв и отложение грунта как бы сглаживает ранее существовавшее несоответствие между структурой потока и формами речного русла, но в то же время зарождает новое несоответствие между "старой" структурой потока и "новыми" формами русла.

Русло под действием поступающего в него постоянного расхода Q постепенно достигает относительно стабильных форм и размеров - в данном случае он становится руслоформирующим расходом Q_p .

Степень продольной устойчивости русла может характеризоваться двумя взаимно связанными друг с другом параметрами: параметром устойчивости донных отложений и степенью разработанности речного русла по ширине, что может быть определено по относительной глубине русла $(h/b)^m$.

В. М. Лохтиным [41] предложен показатель устойчивости речного русла D_y в целом:

$$D_y = D/h, \quad (2.1)$$

где: D - приведенный диаметр или гидравлическая крупность частицы; h - глубина потока.

При этом показатель продольной устойчивости русла дополняется критерием Великанова М. А. [14] - показателем устойчивости частицы D_{yc} :

$$D_{yc} = g \cdot D / V^2, \quad (2.2)$$

где: $g=9,81$ м/с² - ускорение свободного падения; V - скорость потока.

По существу, зависимость (2.2) представляет собой обратную величину числа Фруда, подсчитанного по диаметру частицы донных отложений.

Как отмечено выше, на устойчивость русла влияет множество факторов, в связи с чем критерии (2.1) и (2.2) могут в достаточной степени характеризовать местные условия формирования русла. По этой причине в процессе изучения параметров русел в более разнообразных физико-геологических условиях, учёными вносились коррективы в параметры Лохтина-Великанова. Достаточно подробная сводка этих критериев приведена в [57].

Кроме определения критериев продольной устойчивости русла важное значение имеет вопрос поперечной устойчивости русла, поскольку она, с одной стороны. Зависит от условий формирования продольной формы русла, а с другой стороны, в значительной степени является определяющим фактором продольной устойчивости и плановой стабильности русла. Н. А. Ржаницин [57], дополняя показатель Великанова относительной глубиной русла $(h/b)^m$, получил общий показатель устойчивости поперечного сечения русла:

$$D_y = \frac{D \cdot b}{i \cdot h^2} \quad (2.3)$$

Н.И. Маккавеев, принимая за основу показатель Лохтина, степень разработанности русла характеризует его шириной b , что даёт суммарный показатель в виде [44]:

$$D_y = \frac{D}{i \cdot b} \quad (2.4)$$

Однако, введение только одного из факторов, определяющих поперечное сечение русла, недостаточно и придаёт этому показателю частное значение.

Поэтому многие исследователи пытались найти показатель, который выражал бы интегральные характеристики, отображающие процесс формирования устойчивого поперечного сечения русла. Понимая это обстоятельство, Н. И. Маккавеев в качестве такого интегрального показателя принимает форму меженного русла, индикатором которого принят показатель "А" [45]:

$$A = \frac{lg h}{lg b} \quad (2.5)$$

Для того, чтобы получить показатель для участка реки достаточного протяжения, необходимо определить значения этого показателя для ряда сечений и затем установить значение "А", характерное для всего участка.

Зависимость (2.5) позволяет определить ширину устойчивого поперечного сечения русла в пределах его бровок:

$$b = h^{1/A} = h^m \quad (2.6)$$

- Исходные положения

Степень устойчивости русла, находящегося в стадии выработки относительно устойчивых форм, Ржаницыным Н.А. рекомендовано определять по отношению ширины b по урезу русла к его глубине h . Здесь отношение $k = b/h$ представляет собой показатель разработанности поперечного сечения [14].

$$k = \frac{B}{h} \quad (2.7)$$

На рис. 2.3 представлено изменение показателя разработанности поперечного сечения для 110 поперечников теодолитной съемки по фарватеру русла реки Северный Кебир от гидроузла до устья.

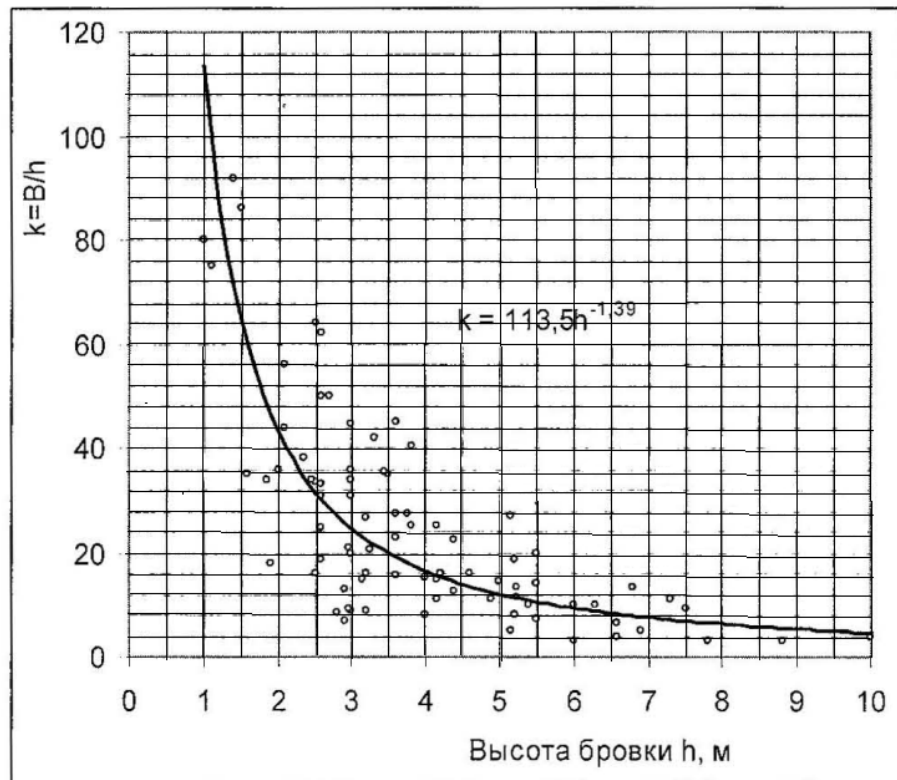


Рисунок 2.3 - Зависимость показателя разработанности поперечного сечения k от высоты бровки

На графике изменения параметра « k » по длине реки прослеживается определенная закономерность изменения этого параметра. Эта закономерность заключается в последовательной чередующейся смене участков русла с узким ($k < 10-15$) и распластанным ($k > 25-30$) профилем сечения. Это связано с наличием и чередованием плесов и перекатов, которое характерно для рек с развитым процессом руслообразования, дно которого сложено несвязным материалом в виде гряд. Этот вывод подтверждает и продольный профиль реки Северный Кебир на котором прослеживается чередование плесов и перекатов.

Количественные характеристики диапазона изменения параметра сечения русла k , который расположен в пределах от 4 до 50-60, косвенно свидетельствует о физико-механических свойствах ложа русла.

Как известно [57], узкий устойчивый профиль имеют русла, сложенные из связного материала, типа тяжелых глин и суглинков (скальное основание в данном случае не рассматривается).

Уменьшение сил сцепления грунта приводит к уплощению профиля сечения, что характерно для менее связных грунтов типа средних и легких суглинков, крупнообломочного основания. Эти русла характеризуются параметром $k = 15-25$. Более распластанные профили имеют русла в легких суглинках и песках, в которых параметр k достигает величин порядка 40-50. Здесь следует отметить, что приведенные выше соображения относятся к руслам со значительной глубиной, поскольку при малых наполнениях сформировавшегося русла его нижняя часть относительно более пологая.

Поскольку для анализа возможных деформаций профиля реки имеют решающее значение большие расходы, обеспеченностью $P-10\%$ и менее, которые начинают формировать форму и размеры русла (руслоформирующие расходы), то при дальнейшем анализе учитывался диапазон изменения параметра сечения русла при расходах $Q = 753 \text{ м}^3/\text{с}$ для обеспеченности $P = 10\%$, $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$ с обеспеченностью $P = 5\%$ и $Q = 1800 \text{ м}^3/\text{с}$ с обеспеченностью $P = 1\%$. Для выявления возможности аппроксимации поперечных сечений русла реки Северный Кебир параболической кривой, имеющей уравнение:

$$B = 2bh^m \quad (2.8)$$

было проанализировано 14 сечений с большими глубинами в пределах бровок.

- Определение показателя разработанности поперечного сечения

Определение параметров параболы "b" и "m" выполнялось по следующей методике. Если прологарифмировать уравнение (2.8), то в логарифмических координатах получим уравнение прямой линии:

$$\ln\left(\frac{B}{2}\right) = \ln b = \ln h \quad (2.9)$$

Если взять две точки на кривой замеренного поперечного сечения русла с ненулевыми координатами h_1, x_1 и h_2, x_2 , где: x - расстояние от оси сечения до рассматриваемой точки, то получим выражения для определения коэффициентов "m" и "b":

$$m = \frac{\ln(x_1) - \ln(x_2)}{\ln(h_1) - \ln(h_2)} \quad (2.10)$$

$$b = \frac{x_1}{h_1^m} = \frac{x_2}{h_2^m} \quad (2.11)$$

Аппроксимация профиля устойчивого русла выполнялась параболой, проходящей через бровку в верхней точке профиля, дно сечения и через одну из характерных точек профиля таким образом, чтобы площадь поперечного сечения аппроксимированного сечения соответствовала площади поперечного сечения естественного русла.

Обработка материалов в XL резко упрощает процесс подбора оптимальных параметров коэффициентов, поскольку изменения одной из пар координат (h, x) немедленно изменяет положение аппроксимирующей кривой, что даёт возможность с минимальной затратой времени получить максимальное приближение аппроксимирующей кривой к очертаниям поперечного сечения по данным топографической съёмки.

Поскольку река в плане сильно меандрирует, то повсеместно в пределах криволинейных участков развиты характерные формы русла: обрывистые берега у вогнутого берега и пологие, пляжного типа, у выпуклого. Поэтому, для анализа форм сечений на криволинейных участках принималась во внимание половина русла, примыкающая к крутому берегу, которая является определяющей при разработке русла потоком. Для прямолинейных участков использовалось полное сечение русла. Ширина "В" поперечного сечения принималась на максимальной отметке бровки.

Параметры проанализированных сечений охватывают диапазон изменения глубин от 2,5 до 7,3 м, а параметр сечения В/h от 6,05 до 49, такая упрощенная аппроксимация, как вписывание параболы по трём точкам, дает удовлетворительную сходимость принятой предпосылки, а подбор параметров параболы, например, по методу наименьших квадратов или принципу правдоподобия, не существенно изменил бы эти параметры, значительно усложнив при этом обработку данных.

Обобщение результатов обработки основных морфологических параметров поперечных сечений приведено в таблице 2.3[4].

Таблица 2.3 - Параметры поперечных сечений русла реки Северный Кебир

Расстояние от устья реки X, км	Отметка Дна, м	Параметры параболы		Средний диаметр Отложений Русла d_{50} , мм
		b	m	
0	-2,3	-	-	64,9
1,48	-1,85	17,5	0,35	46,8
1,84	-2,3	14,6	0,71	43,5
3,35	-2,2	5,9	0,73	33,7
4,53	-1,0	47,2	0,51	29,3
5,33	-0,3	45,3	0,52	27,5
7,13	0,4	14,4	0,54	25,6
10,53	4,3	13,0	1,17	25,2
14,43	8,9	45,1	0,51	23,9
19,78	15,4	11,3	0,32	18,9
21,43	18,7	27,0	0,43	17,3
22,63	21,3	19,1	0,27	16,1
24,53	24,0	39,6	0,49	14,0
25,88	28,3	44,2	0,55	3,0

Для прогноза возможного положения русла воспользуемся связью гидравлических параметров потока с геометрическими характеристиками русла. Устойчивое состояние русла определяется зависимостью:

$$[V_{\text{разм}}] \geq V \geq [V_{\text{заи}}], \quad (2.12)$$

где: V - средняя скорость потока; $[V_{\text{разм}}]$ - размывающая скорость потока; $[V_{\text{заи}}]$ - заиляющая скорость потока.

При прогнозе деформации русла в далёкой перспективе интересует понижение русла, связанное с понижением базиса эрозии. Пределом этого понижения будет такой профиль и формы поперечного сечения, когда по всей длине реки, при прохождении паводка редкой повторяемости, будет соблюдаться постоянство произведения всех членов, входящих в уравнение Шези:

$$\omega_x \cdot C_x \cdot \sqrt{R_x \cdot i_x} = \text{const} = Q \quad (2.13)$$

где: ω_x - площадь живого сечения потока на расстоянии x от устья реки; $C_x = \frac{n_x}{R_x^y}$ - коэффициент Шези; $R_x = \frac{\omega_x}{X_x}$ - гидравлический радиус потока; X_x - смоченный периметр живого сечения потока, и во всех сечениях при этом установится допустимая скорость $[V]$ по условиям размыва.

Для определения величины допустимой скорости можно воспользоваться формулой Ц.Е. Мирцхулавы [47,32]:

$$[V] = \left(\lg \frac{8.8 h}{d} \right) \cdot \sqrt{\frac{2mgd}{0.44n}} \sqrt{\left(1 - \frac{\rho_{\text{во}}}{\rho_{\text{гр}}} \right)}, \quad (2.14)$$

где: h - глубина потока; d - средний диаметр частиц, слагающих русло реки; $\rho_{\text{гр}} = 2650 \text{ кг/м}^3$ - плотность частиц грунта; $\rho_{\text{во}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ - плотность воды; $m = 1,4$ - коэффициент, учитывающий мутность воды; n - коэффициент учитывающий пульсацию донной скорости:

$$n = 1 + \frac{1}{0,3 + \sqrt[3]{\frac{v^2}{g} \cdot \frac{1}{d}}} = 4,32 \quad (2.15)$$

где: $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ - коэффициент кинематической вязкости воды; $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ - ускорение свободного падения.

с учётом чего для частиц грунта, крупнее $1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$ получаем $n=4,32$.

$$[V] = 4,88 \cdot \left(\lg \frac{8,8 h}{d} \right) \cdot \sqrt{d} \quad (2.16)$$

Действительная скорость потока может быть определена из уравнения неразрывности:

$$V = \frac{Q}{\omega} \quad (2.17)$$

и по уравнению Шези:

$$V = C\sqrt{Ri} \quad (2.18)$$

Коэффициент Шези C может быть определён по зависимости:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (2.19)$$

Коэффициент гидравлического трения λ можно определить по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\frac{\Delta}{4R}} \quad (2.20)$$

для осреднённой величины выступов шероховатости Δ [55]. Этот график при $d \geq 5$ мм может быть аппроксимирован зависимостью для Δ в мм:

$$\Delta = \frac{d}{1,8} + 1,61, \quad (2.21)$$

Для мелких фракций с $d < 5$ мм зависимостью:

$$\Delta = 1,001 \cdot d - 0,0226 \cdot d^2 \quad (2.22)$$

С учётом (1.19), (1.20) и (1.21) уравнение (1.18) примет вид при $d > 5$:

$$V = 34,2\sqrt{i} \left(\frac{R^5}{\frac{d}{1,8} + 0,00161} \right)^{0,125} \quad (2.23)$$

а при $d < 5$ мм

$$V = 34,2\sqrt{i} \left(\frac{R^5}{1,0012 \cdot d + 0,0226 \cdot d^2} \right)^{0,125}. \quad (2.23')$$

Поперечное сечение устойчивого русла, аппроксимированное уравнением (2.8) параболы $X = b \cdot h^m$ для площади потока с живым сечением глубиной h позволяет определить его геометрические характеристики.

Площадь живого сечения потока ω при несимметричном сечении русла может быть определена по зависимости:

$$\omega = \frac{P_1 \cdot h^{m_1+1}}{m_1 + 1} + \frac{P_2 \cdot h^{m_2+1}}{m_2 + 1}, \quad (2.24)$$

где индексы "1" относятся к левой половине русла, а индексы "2" относятся к правой половине русла.

Гидравлический радиус R определяется по зависимости:

$$R = \frac{\omega}{X} \quad (2.25)$$

где: X - смоченный периметр.

Величина смоченного периметра для параболической формы сечения русла в общем виде определяется по зависимости:

$$X = \int_0^h dS = \int_0^H \sqrt{(dx)^2 + (dh)^2} = \int_0^h \sqrt{(x')^2 + 1} \cdot dh \quad (2.26)$$

Интеграл (2.25) в общем виде в элементарных функциях не берётся, в следствии чего он определяется численными методами.

Уклон определится по зависимости:

$$i = \frac{0,000856 \cdot V^2}{R} \cdot \sqrt[4]{\frac{d}{1,8} + 0,00161} \cdot \frac{1}{R} \quad (2.27)$$

Вниз участке реки Северный Кебир ниже створа гидроузла 16 Тишрин имеется 14 поперечников, для которых выполнены геологическая съёмка с гранулометрическим составом грунта. Эта информация позволяет по вышеприведенной методике рассчитать уклоны, которые требуются для пропуска заданного расхода в русле, имеющем устойчивое поперечное сечение в грунте с данным гранулометрическим составом.

Проведя комплексные натурные обследования русла реки, можно получить поперечные разрезы характерных сечений и геологическое строение грунтов, по изменению уклонов вдоль реки, можно выполнить аппроксимацию характера этого изменения полиномом вида:

$$i = ax^n + bx^{n-1} + cx^{n-2} + \dots + mx + n \quad (2.28)$$

С физической точки зрения при малой величине уклон $i = \frac{dz}{dx}$, с учётом чего вместо (2.28) получаем:

$$\frac{dz}{dx} = ax^n + bx^{n-1} + cx^{n-2} + \dots + mx + n \quad (2.27')$$

откуда после интегрирования уравнения (2.27') по (x) можем получить уравнение линии дна при прохождении заданного расхода Q после стабилизации процесса деформации русла реки:

$$Z = \frac{a}{n+1} x^{n+1} + \frac{b}{n} x^n + \frac{c}{n-1} x^{n-1} + \dots + \frac{m}{2} x^2 + nx + c \quad (2.29)$$

Для определения постоянной интегрирования C в уравнении (2.29) необходимо вычислить параметры поперечного сечения в устье реки, разместив в нём начало координат. При $x = 0$ все члены уравнения (2.28), кроме свободного, обращаются в нуль. Приняв за $z = 0$ уровень воды в Средиземном море, отметку дна в устье реки получим как $z = -h_x = 0 = C$. Глубина $h_x = 0$ в устье реки для рассматриваемого расхода Q определяется по (2.13).

-Результаты расчётов

По приведенной методике были выполнены соответствующие расчёты, связанные с прогнозом положения русла реки Северный Кебир при прохождении паводков различной обеспеченности. Как указывалось выше, в качестве расчётных приняты паводки трёх обеспеченностей: $P = 10\%$, с $Q = 753 \text{ м}^3/\text{с}$, обеспеченностью $P = 5\%$ с $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$ и обеспеченностью $P = 1\%$ с $Q = 1800 \text{ м}^3/\text{с}$.

Предварительно, были построены по зависимости (2.16) кривые максимальных средних неразмывающих скоростей $[V] = f(h=\text{var}, d_{50\%}=\text{const})$. Эти кривые приведены на рис 2.4.

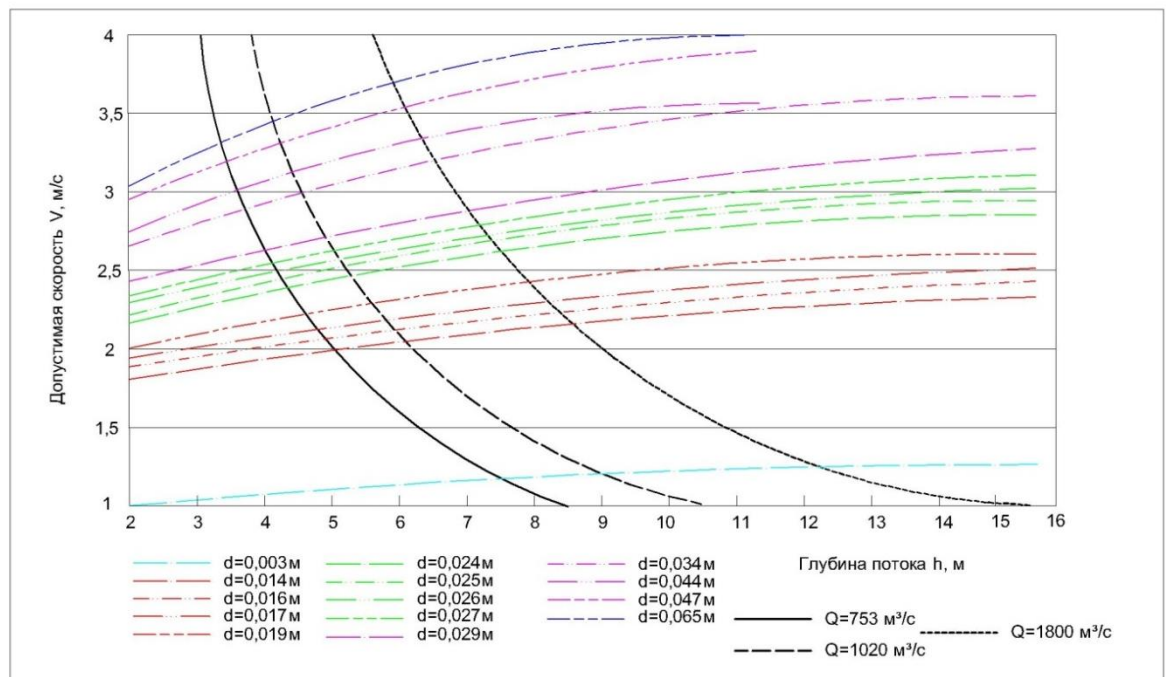


Рисунок 2.4 - Кривые зависимости неразмывающих скоростей потока в зависимости от его глубины $V = f(h)$ при $d_{50\%} = \text{const}$

Затем определяются площади живого сечения в зависимости от глубины наполнения из уравнения неразрывности определяется зависимость скорости потока от глубины потока для данного расхода. Затем на графики рисунка 2.4 наносится кривая зависимости $V = f(h)$. Точка пересечения этой кривой с кривой $V = f(h)$ с $d_{50\%}$, соответствующей среднему диаметру фракций отложений в данном сечении, даст искомые значения допускаемой скорости V и соответствующей ей глубине h . Таким образом, определяются три основных параметра, определяющие уклон русла i по зависимости (2.27), предварительно по (2.25) определив гидравлический радиус R .

Как пример, на рисунке 2.5 приведено изменение расчётных значений уклона i по длине русла для расхода $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$ обеспеченностью $P = 5\%$. На поле графиков этого рисунка приведены аппроксимирующие уравнения кривой изменения уклонов. Аппроксимация выполнена тремя кривыми, которые наилучшим образом огибают расчётные точки.

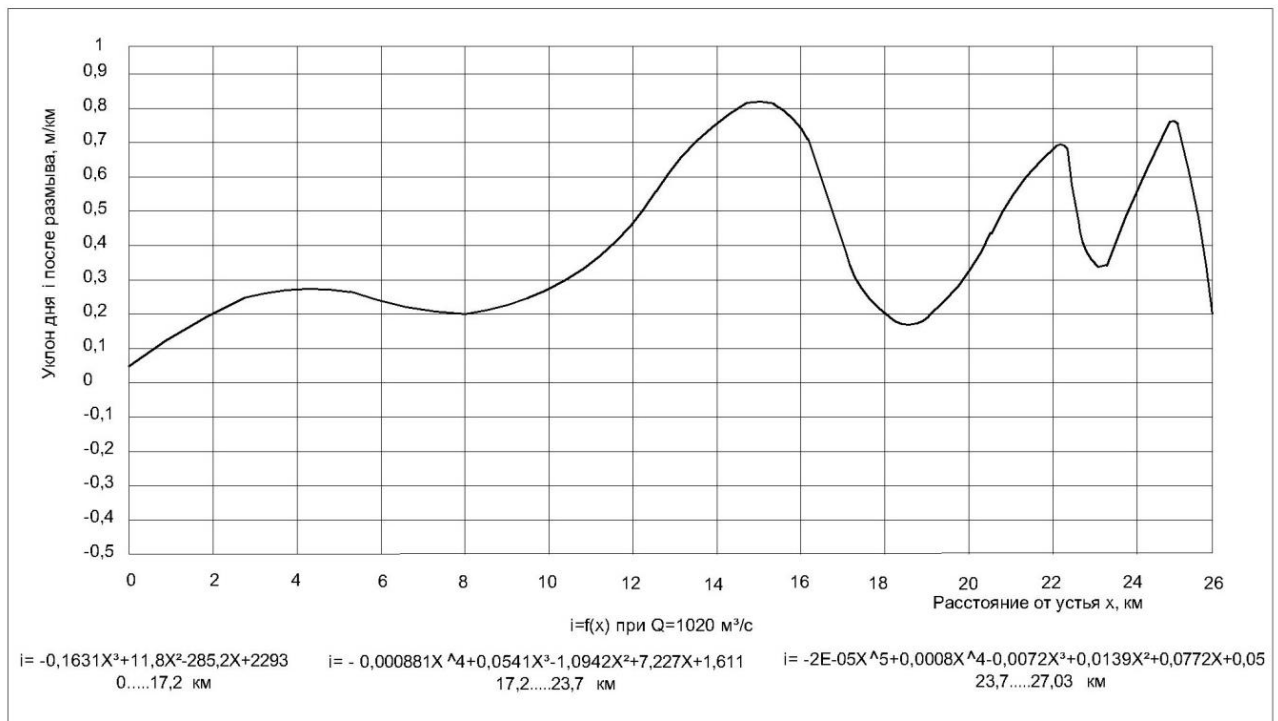


Рисунок 2.5 - Изменение уклона по длине реки Северный Кебир после прохождения поводка $Q = 1020 \text{ м}^3/\text{с}$

Интегрирование этих уравнений даёт уравнения дна для соответствующих участков русла после прохождения соответствующего паводка (рис. 2.6). На рисунке. 2.6 приведены так же кривые существующего положения дна русла реки Северный Кебир и положение скального грунта, на котором расположены аллювиальные отложения поймы и долины нижнего течения реки Северный Кебир.

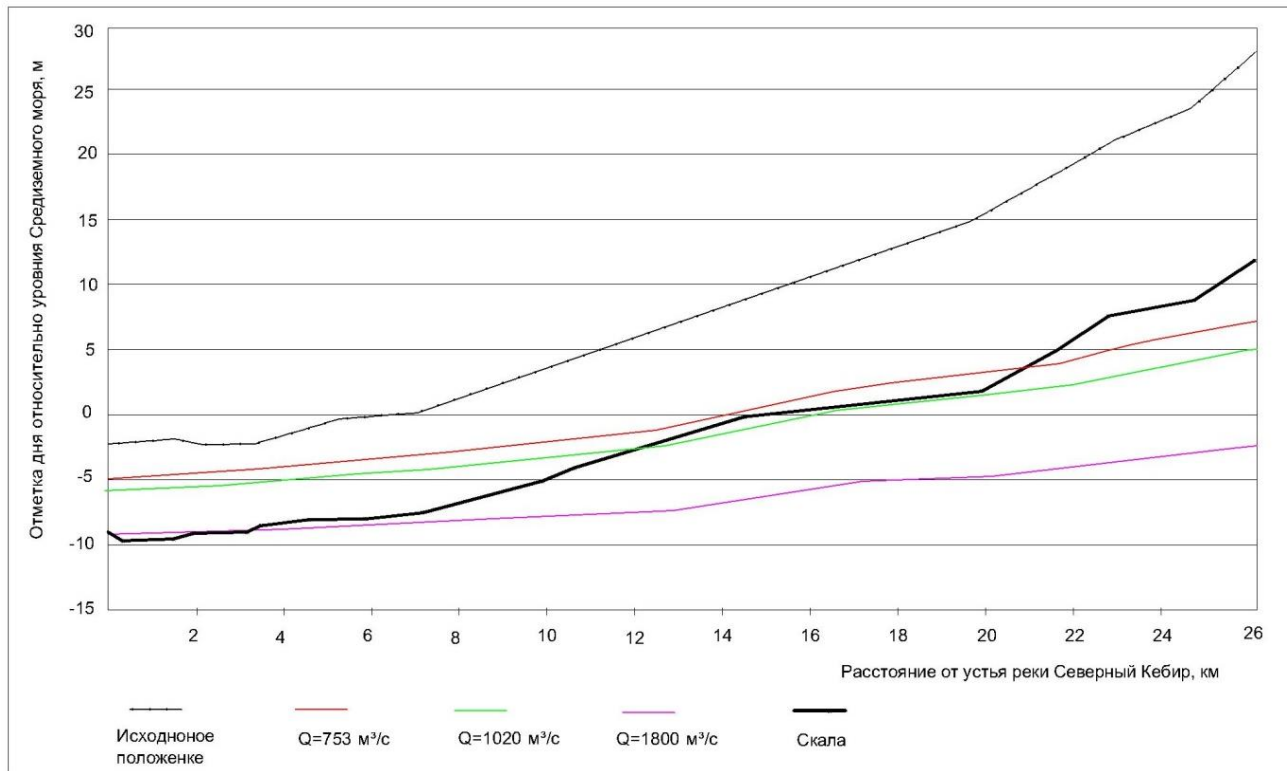


Рисунок 2.6 - Результаты расчетов прогноза положения русла реки Северный Кебир

В таблице 2.4 приведены результаты расчета положения дна русла реки Северный Кебир, полученные по расчетам для расходов $Q = 753, 1020$ и $1800 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 2.4- Изменение расчётной ширины русла реки Северный Кебир

Расстояние от устья реки, км	Исходная ширина русла b , м	Ширина русла B , м, при расходе Q , м ³ /с			Увеличение ширины русла $B-b$, м, при расходе Q , м ³ /с		
		753	1020	1800	753	1020	1800
25,55	34,5	78,8	85,3	100,8	44,3	50,8	50,8
25,19	47,8	113,9	123,5	112,0	66,1	75,7	75,7
23,68	19,6	63,4	71,5	84,8	43,8	51,9	51,9
23,68	31,4	81,0	87,0	102,7	49,6	55,6	55,6
22,5	134,4	211,0	223,5	251,9	76,6	89,1	89,1
21,7	129,9	208,6	221,7	250,1	78,6	91,8	91,8
19,9	41,9	88,5	97,7	108,7	46,6	55,8	55,8
17,2	89,2	128,3	136,2	149,9	39,1	47,0	47,0
16,5	58,5	232,3	249,1	318,0	173,8	190,6	190,6
12,6	128,4	214,8	219,5	247,6	86,3	91,1	91,1
7,25	28,2	41,8	43,8	48,0	13,6	15,6	15,6
5,6	72,8	122,5	130,0	146,9	49,8	57,3	57,3
4,4	46,1	63,1	65,6	70,4	17,0	19,5	19,5
87,7	111,2	187,4	198,9	226,0	76,2	87,7	87,7
0	120,8	209,7	223,0	262,2	89,0	102,3	102,3

На рис. 2.7 показано изменение расчётной ширины русла реки Северный Кебир на момент принятия исходных параметров и после прохождения принятых расчётных паводков.

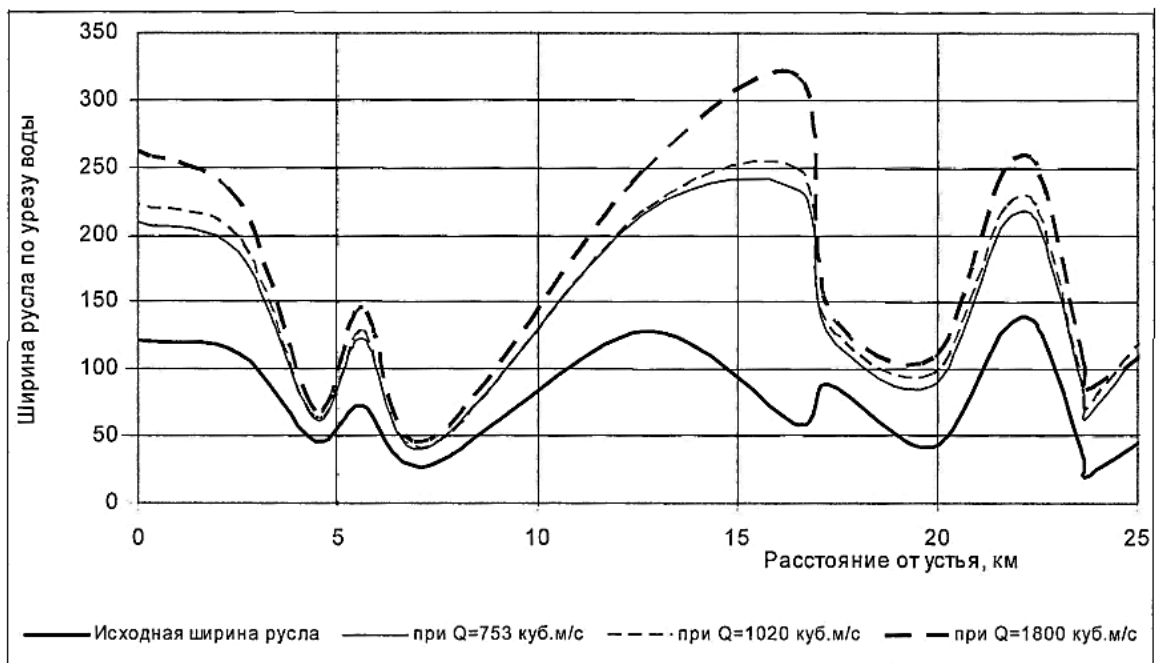


Рисунок 2.7 - Изменение ширины русла реки Северный Кебир после прохождения паводков

-Анализ результатов

Результаты расчётов возможных деформаций русла реки Северный Кебир, приведенные в таблице 2.4 и на рисунках 2.6 и 2.7, позволяют предположить следующее.

Как видно по рисунку 2.6, на большей длине рассматриваемого участка русла, аллювиальные грунты русла могут быть размывы до скальных пород уже при прохождении расхода $Q = 753 \text{ м}^3/\text{с}$ обеспеченностью $P = 10\%$.

В зависимости от обеспеченности расходов паводка, ширина русла на уровне современной поймы может увеличиться более чем на 100...150 метров и более. При этом следует учесть, что приведенные на рисунке 2.7 графики соответствуют схемам полной врезки русла в аллювиальные отложения. В условиях ограничения развития глубины русло будет расширяться в ширину до тех пор, пока размывающая способность потока не иссякнет. Этого следует ожидать при большей ширине размывающего русла, чем в пропорциональной величине изменения соответствующих глубин.

Кроме того, все расчёты выполнены для условного спрямлённого русла, так что степень увеличения ширины русла при его предельной врезке, как может показаться, не так уж и большая, так что может и нет оснований для особого беспокойства относительно состояния поймы.

На самом деле, река постоянно меняет своё положение, протекая то вдоль левого, то вдоль правого берега. При изменении места протекания, она течёт местами поперёк поймы. В этом случае при углублении русла в полной мере будут разрушаться плодородные пойменные земли. Кроме того, усилятся вторичные эрозионные процессы. При углублении русла возрастёт подмыв вогнутых берегов, что повлечёт за собой разрушение не только пойменных земель, но и плодородных земель долины.

Вторая опасностью эрозии плодородных земель связано с усилением эрозии почв дождевыми водами. Этот вывод основывается на том, что при врезке русла возрастёт высота падения дождевых водотоков на 5...6 и более метров. Это соответственно увеличит их мощность и размывающую способность. Можно

представить себе картину размыва при таком увеличении высоты падения потока, на котором высота водопада дождевых вод составляет немногим более 1,6м. Это соответственно увеличит их мощность и размывающую способность.

Расчёты прогноза деформаций русла реки Северный Кебир, выполненные в настоящей работе, носят предварительный, качественный характер. В настоящее время не существует надёжной методики, позволяющей выполнить такие прогнозы, что связано со сложностью процессов, определяющих протекание размывов. Тем не менее, полученные данные могут быть приняты в качестве первого приближения для разработки мероприятий, обеспечивающих сохранность ценных пойменных земель в нижнем течении реки Северный Кебир.

При разработке таких решений возможны два принципиальных технических решения:

1. С запретом разработки русловых отложений с последующим использованием их в нуждах экономики страны.
2. Необходимость отыскания таких решений, которые позволяют в полном объёме использовать пригодные для строительства русловые отложения.

Для обеспечения выполнения этих задач необходим более углублённый теоретический анализ протекающих русловых процессов.

При этом анализе необходимо:

1. Учесть влияние деформации русла на гидравлические параметры потока. Принятие в проведенных расчётах зависимости параметров потока только от уклона дна допустимо только в первом приближении. Первые же деформации русла приводят к изменению гидравлического уклона водного потока, который становится определяющим его гидравлические параметры. В свою очередь, изменённые параметры потока соответственно изменяют степень трансформации русла и т. д. до тех пор, пока не придут в соответствие все факторы, определяющие параметры потока и русловые процессы.

2. Расчёты выполнены по среднему диаметру русловых отложений. В действительности, в русле будет происходить самоотмостка за счёт уноса мелких фракций и накоплением крупных, более устойчивых к размыву фракций.

3. На глубинах более 6 м от дна русла повсеместно наблюдается резкое снижение содержания крупных фракций, образующих самоотмостку. Эту особенность русла реки Северный Кебир так же необходимо учитывать в расчётах

4. Следует отметить недостаточный объём материала по физико-геологическим характеристикам пород, слагающих русло реки Северный Кебир.

2.6 Состав сооружений гидроузла

Гидроузел 16 Тишрин на реке Северный Кебир построен для создания водохранилища для сезонного регулирования речного стока. Основной целью создания водохранилища является орошение прилегающих земель, расположенных в долине реки Северный Кебир, возвышенности, литоральной равнины и на плато-водохранилище. Вода для орошения будет доставляться различными способами. К землям, расположенным в пойме, на левом берегу, вода подаётся через главный канал, который проходит по левому берегу параллельно реке. Для доставки воды на прибрежную равнину предназначен ирригационный туннель.

Структурный состав гидроузла определяется его назначением и условиями подачи воды на орошаемые земли. При размещении сооружений гидроузла были учтены инженерно-геологические и топографические условия участка площадки. Сооружения гидроузла включают в себя: плотину, береговой и шахтно-башенный водосбросы, а также два водозаборных сооружения.

Береговой и шахтно-башенный водосбросы расположены на правом склоне долины. Трасса берегового водосброса выбрана на расстоянии 200 м от речного русла и проходит по пологим склонам поверхности, что позволяет уменьшить длину наклонного лотка. Ось шахтно-башенного водосброса проходит через нижние отметки русла, что позволяет уменьшить объем земляных работ при сооружении фундамента.

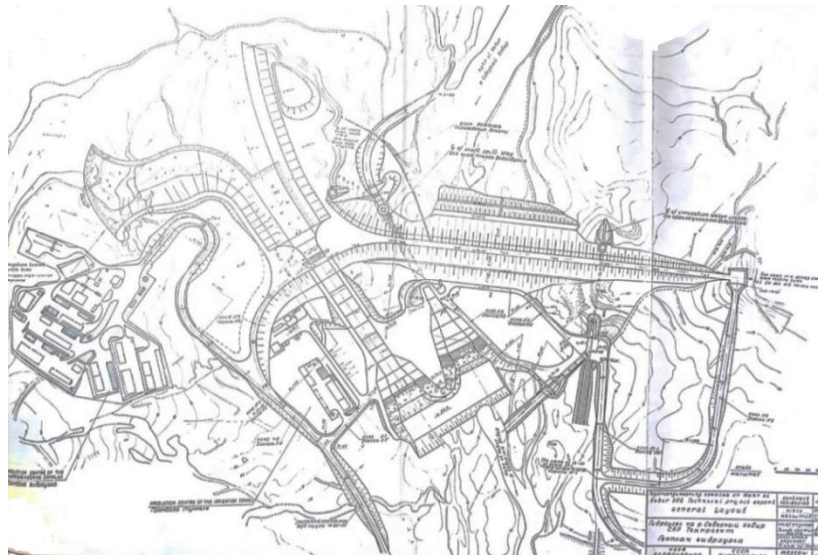
Задача пропуска паводков гидроузла 16 Тишрин и подачи воды на орошение определили состав гидротехнических сооружений.

Состав сооружений:

- Глухая грунтовая плотина;
- Регулируемый береговой водосброс;
- Нерегулируемый шахтно-башенный водосброс;
- Левобережный ирригационный водовыпуск;
- Правобережный ирригационный водовыпуск.

На рисунке 2.8 показаны сооружения гидроузла 16 Тишрин. На рисунке 2.8-а показан космический снимок гидроузла, а на рисунке 2.8-б – план размещения сооружений.





б)

Рисунок 2.8 - Основные сооружения гидроузла 16 Тишрин:

а - снимок гидроузла из космоса; б - план размещения сооружений:

1-грунтовая плотина; 2- регулируемый береговой водосброс; 3- нерегулируемый шахтно-башенный водосброс; 4-левобережный ирригационный водовыпуск; 5- ирригационный правобережный туннель

Регулируемый береговой водосброс предназначен для пропуска повышенного речного стока и регулирования расходов. Его проектный расход составляет $1800 \text{ м}^3/\text{с}$. Береговой водосброс включает в себя подводящий канал, регулятор с сегментными затворами, быстроток и водобойный колодец с рисбермой. На рисунке 2.9 показано продольный разрез по оси запроектированного берегового водосброса.

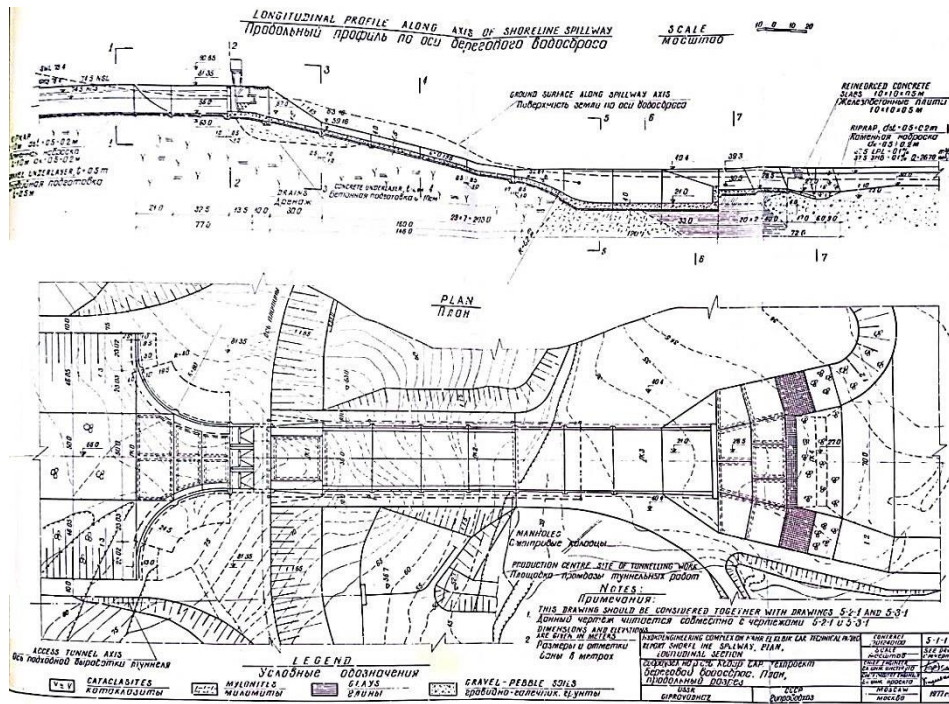


Рисунок 2.9 - План и продольный разрез по оси берегового водосброса

В соответствии с проектом, водобойный колодец размещался позади участка с выходом на поверхность габро и диабазов в связи с назначением уклона быстротока, равного $i=0,196$. Проектная глубина котлована под водобойный колодец составляла 25 м.

Сечение подводящего канала запроектировано трапециевидного поперечного сечения. Его ширина нижней части колеблется от 50 до 100 м, заложение откосов составляет 1:3, длина канала 400 м. Канал имеет обратный уклон, равный $i = 0,0001$. Канал сопряжён с подводящим участком посредством криволинейных железобетонных стен.

Береговой водосброс имеет три пролёта шириной 10 м, которые разделены бычками шириной по 3,0 м. Пролёты закрыты секторными затворами с размерами 10 x 9 м. Предусмотрены ремонтные плоские затворы, устанавливаемые перед секторными затворами для осмотра и ремонта последних.

Размеры водобойного колодца определялись по условиям гашения энергии при прохождении расчётного расхода. Прямоугольный в плане бассейн спроектирован доковой конструкции. Он имеет длину 81 м, ширину 36 м и глубину 19,4 м. Принятая глубина и длина обеспечивают гашение энергии потока

независимо от уровня воды в реке ниже по течению, что обеспечивает надежную работу водосброса в случае падения уровня воды в реке за рисбермой.

Рисберма водосброса плавно расширяется от 36 до 70 м, что обеспечивает снижение удельного расхода до $22 \text{ м}^2/\text{с}$. Отводящий канал имеет трапецеидальное поперечное сечение. Его дно и откосы защищены от размыва бетонными плитами. В конце рисбермы устроен ковш, заполненный камнем, и предназначен для защиты примыкающего участка русла от размыва.

Нерегулируемый шахтно-башенный водосброс предназначен для пропуска расходов паводка высокой повторяемости. Его конструкция показана на рисунке 2.10, где представлено продольное сечение по оси сооружения. В течение периода строительства его труба используется для пропуска строительных расходов. Проектный расход шахтного водосброса составляет $900 \text{ м}^3/\text{с}$. В течение периода строительства через трубу предусмотрен пропуск расхода $552 \text{ м}^3/\text{с}$. Шахтно-башенный водосброс включает в себя башню, ствол с одним отверстием, водопроводящую одночковую трубу и водобойный колодец.

Водоприёмная воронка выполнена круглоцилиндрической диаметром 21,2 м на отметке гребня водослива. Отметка гребня водоприёмной воронки располагается на уровне НПУ 74,5. Внутренняя поверхность водоприёмной воронки выполнена по форме нижней поверхности кольцевой струи. На высоте 60,5 м башня шахты запроектирована как прямоугольная труба прямоугольного поперечного сечения $b \times h = 15 \times 4,8 \text{ м}$. Башня сопряжена с отводящим трубопроводом с помощью колена с дефлектором, что обеспечивает отрыв потока от потолка отводящей трубы и безнапорный режим движения воды во всём диапазоне возможных расходов.

Размер водобойного колодца шахтно-башенного водосброса определен по условию гашения энергии потока с расходом $900 \text{ м}^3/\text{с}$. Он запроектирован плавно расширяющимся в плане от 15 до 30 м. Глубина колодца принята 9 м из условия для гашения энергии потока независимо от уровня воды в реке в нижнем бьефе. Конструкция рисбермы шахтно-башенного водосброса аналогична конструкции рисбермы берегового водосброса.

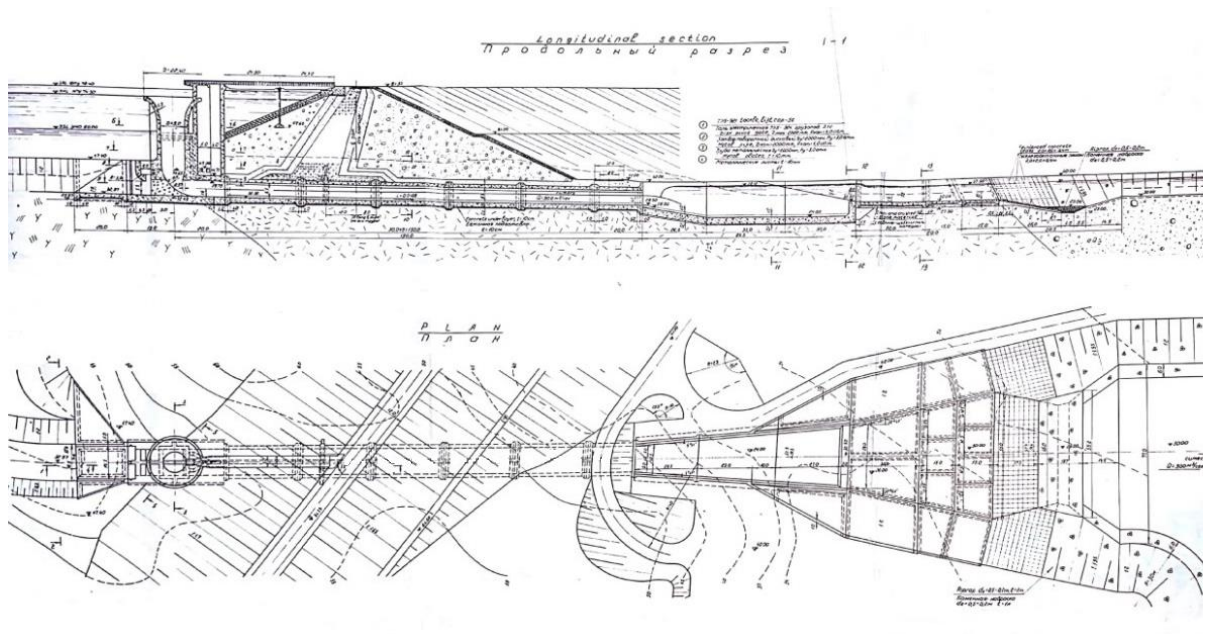


Рисунок 2.10 - Продольный разрез по оси шахтно-башенного водосброса

В процессе строительства и последующей эксплуатации сооружений гидроузла были обнаружены недостатки проектирования, которые привели к удорожанию сметной стоимости и изменениям проекта в процессе строительства и к дополнительным затратам на ликвидацию недостатков, обнаружившихся после начала эксплуатации.

При проектировании сооружений гидроузла не было учтено понижение отметок дна русла, связанное с интенсивным отбором гравелистого материала из русловых отложений. В результате при пропуске строительных расходов в 1984 году через трубопровод шахтно-башенного водосброса были полностью разрушены водобой и рисберма шахтно-башенного водосброса.

Не учтена интенсивная деформация русла в нижнем бьефе, в результате чего за водобойными колодцами возникли режимы с отгоном гидравлического прыжка с разрушением водобоя.

2.7 Расчёты водобойного колодца шахтно-башенного водосброса

Расчётная схема водобойного колодца показана на рисунке (2.11)

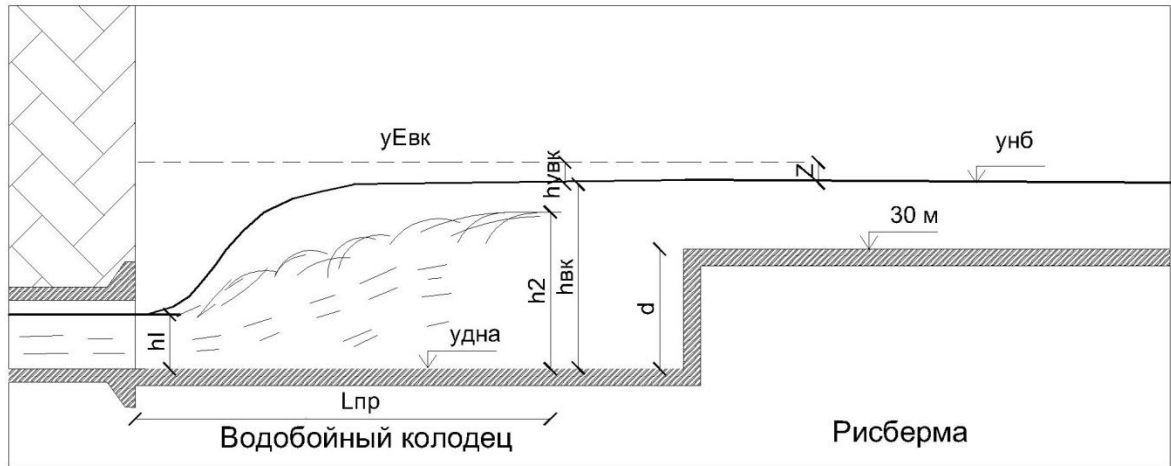


Рисунок 2.11 - Расчетная схема с обозначениями для гидравлических расчетов

Для расчетного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ при работе шахтно-башенного водосброса: на выходе из трубы установится глубина $h_{\text{вых}} = 4,025 \text{ м}$, глубина в нижнем бьефе $h_p = 4,9 \text{ м}$ [2].

Ширина водобойного колодца равна ширине трубы. $B_{BK} = 15 \text{ м}$.

Скорость потока в выходном сечении V_1 будет:

$$V_1 = \frac{Q}{b \cdot h_1} = \frac{900}{15 \cdot 4,025} = 18,6 \text{ м/с} \quad (2.30)$$

Число Фруда на выходе из трубы:

$$Fr_1 = \frac{V^2}{g \cdot h_1} = \frac{18,6^2}{9,81 \cdot 4,025} = 8,8 \quad (2.31)$$

Вторая сопряжённая глубина для призматического колодца:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{8Fr + 1} - 1) = \frac{4,025}{2} (\sqrt{8 \cdot 8,8 + 1} - 1) = 15 \text{ м} \quad (2.32)$$

Длину гидравлического прыжка определим по формуле О.М. Айвазяна [1]:

$$L_{np} = 2 \frac{(h_2 - h_1)^3}{h_2 \cdot h_1} \frac{10 + \sqrt{Fr}}{Fr} = 2 \cdot \frac{(15 - 4,025)^3}{15 \cdot 4,025} \cdot \frac{10 + \sqrt{8,8}}{8,8} = 64,5 \text{ м} \quad (2.33)$$

$$L_{BK} = 0,7 L_{np} = 0,7 \cdot 64,5 \approx 45 \text{ м} \quad (2.34)$$

Угол расширения водобоя определяем по формуле Г.И. Сухомела [69]:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{1}{\sqrt{Fr_1}} = \frac{1}{\sqrt{8,8}} = 0,34 \quad (2.35)$$

Ширина расширяющегося водобойного колодца на выходе равна:

$$B_{BK} = b + 2l \cdot \frac{\operatorname{tg}\beta}{2} = b + l \cdot \operatorname{tg}\beta = 15 + 45 \cdot 0,34 = 30,3 \text{ м} \quad (2.36)$$

Принимаем ширину водобойного колодца на выходе $B_{BK} = 30$ м.

Ф.И.Пикаловым [51] был произведен для учета Вторую сопряженную глубину для прыжка в непризматическом русле прямоугольного сечения он рекомендует определять из уравнения:

$$\frac{6 \cdot Q^2}{g \cdot B_2 \cdot h_2} + h_2^2(B_2 + 2B_1) - h_2 \cdot h_1(B_2 - B_1) = \frac{6 \cdot Q}{g \cdot B_1 \cdot h_1} + h_1^2(B_1 + 2B_2) \quad (2.37)$$

$$\frac{6 \cdot 900^2}{9,81 \cdot 30 \cdot h_2} + h_2^2(30 + 2 \cdot 15) - h_2 \cdot 4,02(30 - 15) = \frac{6 \cdot 900}{9,81 \cdot 15 \cdot 4,02} + 4,02^2(15 + 2 \cdot 30)$$

с помощью программы Excel $h_2 = 12,1$ м

Глубина воды в водобойном колодце:

$$h_{BK} = (1,1 - 1,05)h_2 = 1,1 \cdot 12,1 = 13,3 \text{ м} \quad (2.38)$$

Тогда удельный расход на выходе из колодца равен:

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{900}{30} = 30 \text{ м}^2/\text{с} \quad (2.39)$$

- Для расчетного расхода $Q = 2700 \text{ м}^3/\text{с}$ при работе обоих водосбросов, при этом через шахтно-башенный водосброс будет пропускаться тот же расход $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$, на выходе из трубы глубина $h_{вых} = 4,025$ м, глубина в нижнем бьефе $h_p = 9$ м.

Скорость на рисберме при расширяющемся водобойного колодце составит:

$$V_p = \frac{q}{h_p} = \frac{30}{9} = 3,33 \text{ м/с} \quad (2.40)$$

Скоростной напор на рисберме:

$$\frac{V_p^2}{2 \cdot g} = \frac{3,33^2}{2 \cdot 9,81} = 0,57 \text{ м} \quad (2.41)$$

Перепад Z на выходе потока из водобойного колодца:

$$Z = (\alpha + \xi) \cdot \frac{V_p^2}{2 \cdot g} = (1,1 + 0,3) \cdot 0,57 = 0,79 \text{ м} \quad (2.42)$$

где: α - коэффициент скорости; ξ – коэффициент перепад при выходе потока из водобойного колодца.

Уровень энергии потока в водобойном колодце:

$$\nabla_{\text{ЕВК}} = 30 + 9 + 0,79 = 39,79 \text{ м} \quad (2.43)$$

Скорость потока в водобойном колодце:

$$\frac{V_{\text{БК}}^2}{2 \cdot g} = \frac{Q^2}{b^2 \cdot h_{\text{БК}}^2 \cdot 2 \cdot g} = \frac{900^2}{30^2 \cdot 13,3^2 \cdot 2 \cdot 9,81} = 0,26 \text{ м} \quad (2.44)$$

$$\alpha \cdot \frac{V_{\text{БК}}^2}{2g} = 1,1 \cdot 0,26 = 0,28 \text{ м} \quad (2.45)$$

Отметка дна водобойного колодца:

$$\nabla_{\text{ДНАВК}} = \nabla_{\text{ЕВК}} - h_{\text{БК}} - \alpha \cdot \frac{V_{\text{БК}}^2}{2 \cdot g} = 39,79 - 13,3 - 0,28 = 26,2 \text{ м} \quad (2.46)$$

Высота порога водобойного колодца d :

$$d = 30 - 26,2 = 3,79 \text{ м} \approx 4 \text{ м} \quad (2.47)$$

-для расчетного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ при работе только шахтно-башенного водосброса

скорость на рисберме будет:

$$V_P = \frac{q}{h} = \frac{30}{4,9} = 6,12 \text{ м/с} \quad (2.48)$$

$$\frac{V_P^2}{2 \cdot g} = \frac{6,12^2}{2 \cdot 9,81} = 1,91 \text{ м} \quad (2.49)$$

$$Z = (\alpha + \xi) \cdot \frac{V_P^2}{2 \cdot g} = 1,4 \cdot 1,91 = 2,67 \text{ м} \quad (2.50)$$

$$\nabla_{\text{ЕВК}} = 30 + 4,9 + 2,67 = 37,57 \text{ м} \quad (2.51)$$

Скоростной напор в водобойном колодце:

$$\frac{V_{\text{БК}}^2}{2 \cdot g} = \frac{6,14^2}{2 \cdot 9,81} = 0,31 \text{ м} \quad (2.52)$$

$$\alpha \cdot \frac{V_{\text{БК}}^2}{2 \cdot g} = 1,1 \cdot 0,31 = 0,34 \text{ м} \quad (2.53)$$

$$\nabla_{\text{ДНАВК}} = \nabla_{\text{ЕВК}} - h_{\text{БК}} - \alpha \cdot \frac{V_{\text{БК}}^2}{2 \cdot g} = 37,57 - 13,3 - 0,34 = 23,93 \text{ м} \quad (2.53)$$

$$d = 30 - 23,93 = 6,07 \approx 6 \text{ м} \quad (2.54)$$

Как видно из расчётов, при работе только шахтного водосброса глубина водобойного колодца, расширяющегося в плане, потребуется равной 6 м, что больше, чем при работе всех водосбросных сооружений.

Тем не менее, скорость потока на рисберме, равная $V=6,12$ м/с, является неприемлемой, и в случае реализации подобной конструкции водобойного колодца необходимо дополнительно гасить энергию. В связи с этим требуется снизить удельные расходы на выходе из водобойного колодца путем установки энергогасящих устройств.

Таблица 2.5- Параметры водобойного колодца

Расширяющийся водобойный колодец							
Q м ³ /с	УНБ	h_p , м	V_p , м/с	Z , м	ΔBK	$\Delta \text{дна}$	d , м
2700	39	9	3,33	0,79	39,79	23,06	4
900	34,9	4,9	6,12	2,67	37,57	20,84	6

Выводы по второй главе

1. Размывы на реке Северный Кебир становятся все более значительной проблемой, особенно в нижнем бьефе после создания гидроузла 16 Тишрин. Постоянное снижение уровня русла реки, вызванное различными факторами, в том числе изменением климата, деградацией почв и ископаемого материала, приводит к эрозии и размыву берегов. Наиболее выраженные воздействия размывов наблюдаются в зимний период, когда происходит усиление стока, что приводит к разрушению берегов и потере плодородных почв. Вода, способная размывать аллювиальные отложения, ведет к уменьшению сельскохозяйственных угодий, что имеет серьезные последствия для местного населения. Были установлены связи между интенсивностью паводков и увеличением ширины русла, что также является показателем ухудшения состояния пойменных земель. Увеличение уклона русла и девиация течений способствуют усилению размывов.

Увеличение расхода воды, особенно в паводковые периоды, сопровождается резким колебанием скоростей потока в реке, что непосредственно влияет на степень размыва. Частицы донных отложений легко поднимаются в воду и могут быть перенесены на значительное расстояние. Скорость потока прямо коррелирует с размывом: чем быстрее движется вода, тем больше вероятность и сила размыва.

2. Конструкция водобойного колодца, находящаяся за шахтно-башенным водосбросом, подвержена влиянию сильных струй воды. Высокая скорость потока, выходящего из шахтно-башенного водосброса, требует особого внимания при проектировании и эксплуатации колодцев. Важно учитывать, что при слишком больших скоростях может происходить резкое увеличение размыва в нижнем бьефе, что ведет к снижению эффективности работы водобойных колодцев и разрушению их конструкций.

3. Расчёты, проведенные для водобойного колодца, показали, что для обеспечения надёжности необходимо разрабатывать дополнительные меры по снижению энергий потоков, например, устанавливать энергогасительные устройства для предотвращения ухудшения состояния русла и разрушений в местах выхода из водосбросов.

Для эффективного управления размывами необходимо регулярно проводить мониторинг состояния русла и производить соответствующие расчеты, а также учитывать климатические изменения.

4. Рекомендуется разработка профилактических мероприятий, направленных на удержание русловых отложений и восстановление береговых линий, использование биологического или технического укрепления берегов с применением геосеток и специализированных гидротехнических сооружений.

5. В особенности важно уделить внимание проектированию водобойных колодцев с учетом их эксплуатации, включая возможность регулирования расхода воды в критические моменты, чтобы предотвратить разрушительные процессы.

6. Для решения проблемы размыва в бассейне реки Северный Кебир требуется комплексный подход, включающий технические меры по проектированию и регулированию на инженерных сооружениях.

Одновременно, для «облегчения» режима работы водобойного колодца следует предусмотреть постепенное включение в работу берегового водосброса параллельно с работой шахтно-башенного водосброса при повышении отметки УВБ, например, на один метр, т.е. до $УВБ = 74,5 + 1 = 75,5$ м.

Общие рекомендации:

На основании вышеуказанных выводов рекомендуется учитывать следующие аспекты при дальнейшем проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений на реке Северный Кебир:

1- Улучшение конструкции водобойного колодца для обеспечения лучшего гашения энергии потока, включая установку усиленных энергогасительных элементов.

2- Регулярный мониторинг за состоянием русла реки и его окрестностями для более точного прогнозирования изменений в результате высоких эксплуатационных нагрузок.

3- Учет прогностических моделей и данных о стоке при проектировании новых объектов и реконструкции существующих, чтобы минимизировать риски, связанные с деформациями и эрозией.

4- Таким образом, исследование подчеркивает важность комплексного подхода к управлению водными ресурсами и предохранению земель от деградации, что в конечном итоге влияет на устойчивость экосистемы региона.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования по теме диссертации выполнялись в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова Российского государственного аграрного университета - МСХА имени К.А. Тимирязева.

3.1 Общие принципы физического моделирования

Существенный прогресс в области гидротехнического строительства способствовал развитию теоретических и численных методов расчета гидротехнических сооружений. Вместе с тем, при проектировании высоконапорных и уникальных сооружений необходимо проводить исследования на физических моделях в лабораторных условиях [6413, 64]. Для этого создается физическая модель из специально подобранных материалов в масштабе, необходимом для конкретных условий. При этом требуется учесть такие аспекты моделирования [25]:

- в каком масштабе следует выполнить модель;
- какие критерии моделирования требуется взять за основу;
- что следует измерять при проведении экспериментальных исследований;
- какую методику проведения эксперимента выбрать;
- как переносить данные, полученные на модели на натурное сооружение.

Для обеспечения надежности получения экспериментальных данных и возможности их использования для реального сооружения необходимо использовать теорию подобия, которая отвечает на поставленные вопросы [37, 83]. Одним из важных условий моделирования является создание модели с

геометрическими размерами, аналогичными натурному сооружению в определенном масштабе.

Другим важным условием проведения эксперимента является условие динамического подобия, которое состоит в том, чтобы силы в соответствующих точках на модели и на натурном сооружении были пропорциональны. Для этого безразмерные параметры, отражающие процессы в этих объектах, были равны между собой. К таким важным параметрам, в первую очередь, относятся числа Рейнольдса (Re), Фруда (Fr), Струхала (Sh), Эйлера (Eu) и другие [25,43, 64].

3.2 Описание экспериментальной установки и обоснование размеров модели

Экспериментальные исследования проводились на модели водобойного колодца, выполненной из деревообрабатывающих материалов и масштабированной к натурному сооружению в отношении 1:70.

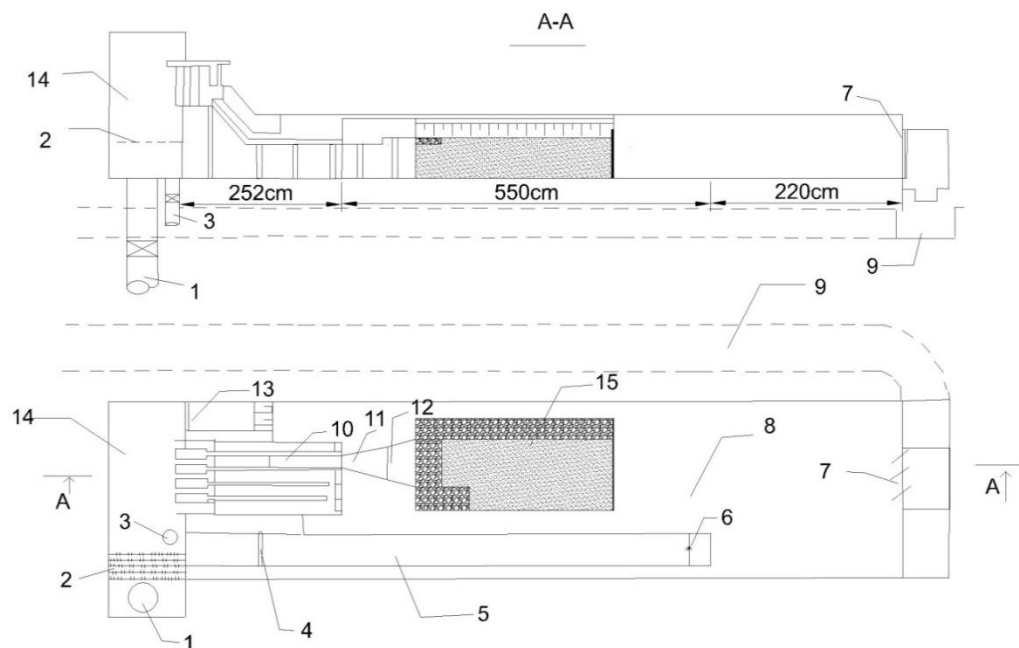


Рисунок 3.1- Общий вид экспериментальной установки: 1 – подающая труба; 2 – решетки; 3 – сливной трубопровод; 4 – затвор; 5 – канал; 6 – подъёмный механизм для регулирования уклона канала; 7 – жалюзийный затвор; 8 – пространственный лоток; 9 – отводящий лоток; 10 – используемый пролет в опытах; 11 – водобонный колодец; 12 – рисберма; 13 – пьезометрический щит; 14 – приемный бак; 15 – нижний бьеф

Вода поступала на экспериментальную установку из приемного бака 14, заполнение которого осуществлялось насосами из резервуара, который находился ниже установки модели (рис. 3.1). Поддержание требуемой величины напора выполнялось с использованием затвора, который позволял удалять излишки воды.

Эксплуатационный расход шахтного водосброса $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$), Эксплуатационный расход при работе обоих водосбросов с суммарным расходом $Q = 2700 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{НБ} = 9 \text{ м}$), размер водобойного колодца шахтно-башенного водосброса был определен в проекте по условию гашения энергии потока с расходом $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$. Он запроектирован плавно расширяющимся в плане с углом раструбности $\theta = 9,45^\circ$ и шириной, изменяющейся от 15 до 30 м. Длина водобойного колодца равна 45 м, глубина - 9 м. Рисберма за водобойным колодцем тоже плавно расширяется в плане (угол расширения $\alpha = 22,4^\circ$) на длине 40 м, имея в начале ширину 30, а в конце - 63 м. За рисбермой находится концевое устройство в виде ковша глубиной 3 м, заполненного крупным камнем диаметром от 0,1 до 0,3 м (рис. 3.2). Длина ковша составляет 28 м, а ширина нижнего бьефа на расстоянии 28 метров за ним - 150 м, это объединенный с поверхностным водосбросом нижний бьеф.

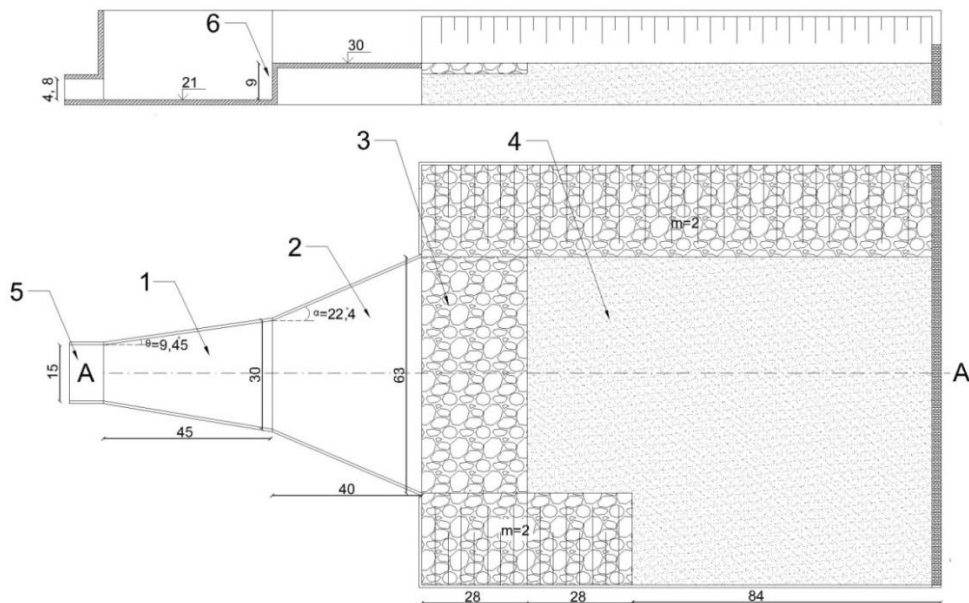


Рисунок 3.2 - Продольный разрез и план модели выходного участка шахтно-башенного водосброса, выполненного в соответствии с проектом (схема 1).

Указаны натурные размеры, м: 1 - водобойный колодец; 2 - рисберма; 3 - ковш, заполненный камнем; 4 – отводящее русло; 5 - выходная труба; 6 – порог колодца



Рисунок 3.3 - Физическая модель в лабораторных условиях

Эксперименты проводились при пропуске эксплуатационного расхода трубы шахтно-башенного водосброса с измерением фактических скоростей в нижнем бьефе за рисбермой, в бывшем ковше и русловой части нижнего бьефа в створах по длине I...IV и в створах поперек потока, расположенных на модели с одинаковым шагом, равным $B/4$, где B - ширина створа, что выбрано для наглядности изображения полей скоростей в нижнем бьефе водосброса (рис. 3.4).

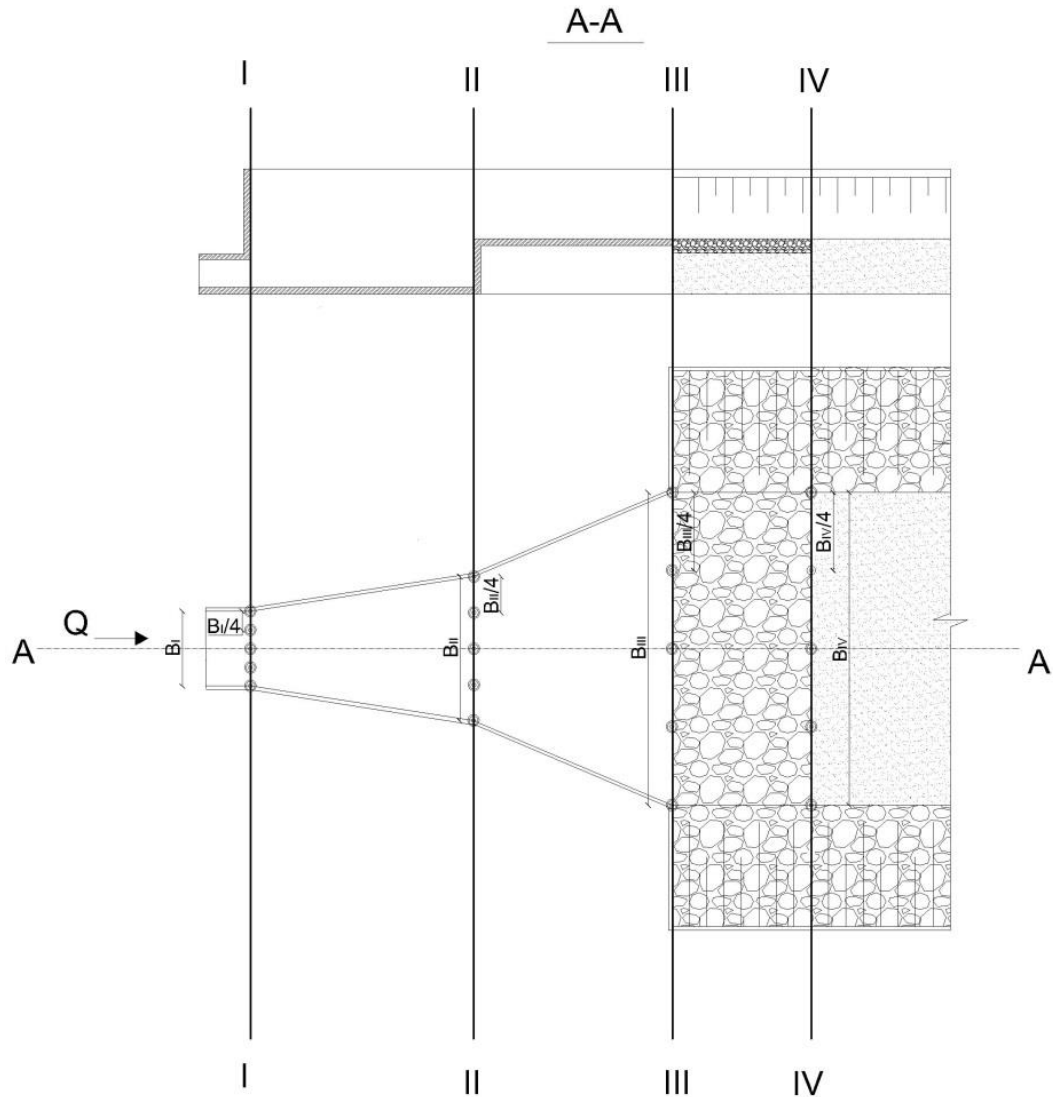


Рисунок 3.4 - Схема положения створов замера скоростей на модели в продольном и поперечном направлении: продольных створов на расстоянии $B_i/4$; I... IV - номера поперечных створов. М 1:70 (схема 1)

В процессе проведения экспериментальных исследований измеряли: расход воды глубины и скорости потока. Расход воды измерялся расходомером Днепр-7, который был установлен на подающей трубе, через которую вода поступала на установку. Скорость потока измерялась трубкой Пито, прикрепленной к шпигельмасштабу в заранее намеченных створах. Для определения отметок поверхности воды и соответственно глубин потока использовался отдельный шпигельмасштаб, точность измерения которого составляла $0,1...0,3$ мм в зависимости от величины колебания свободной поверхности в области измерения [8368, 79, 83].

Сначала проводятся измерения фактических скоростей на исследуемом участке во время достижения максимального эксплуатационного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$), когда функционирует только шахтный водосброс. Также выполняются замеры при одновременной работе обоих водосбросов, что обеспечивает суммарный расход $Q = 2700 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{НБ} = 9 \text{ м}$).

Затем на водобойном колодце и рисберме устанавливались энергогасители, аналогичные тем (см. таблицу 3.1), которые были подобраны в результате модельных многофакторных исследований на ряде гидроузлов со схожими граничными условиями [12, 17, 31], в частности, в нижнем бьефе водосбросов Нижне-Кафирниганского (рис. 3.5) [31, 94] и Шамхорского гидроузлов (рис. 3.6) [31, 79].

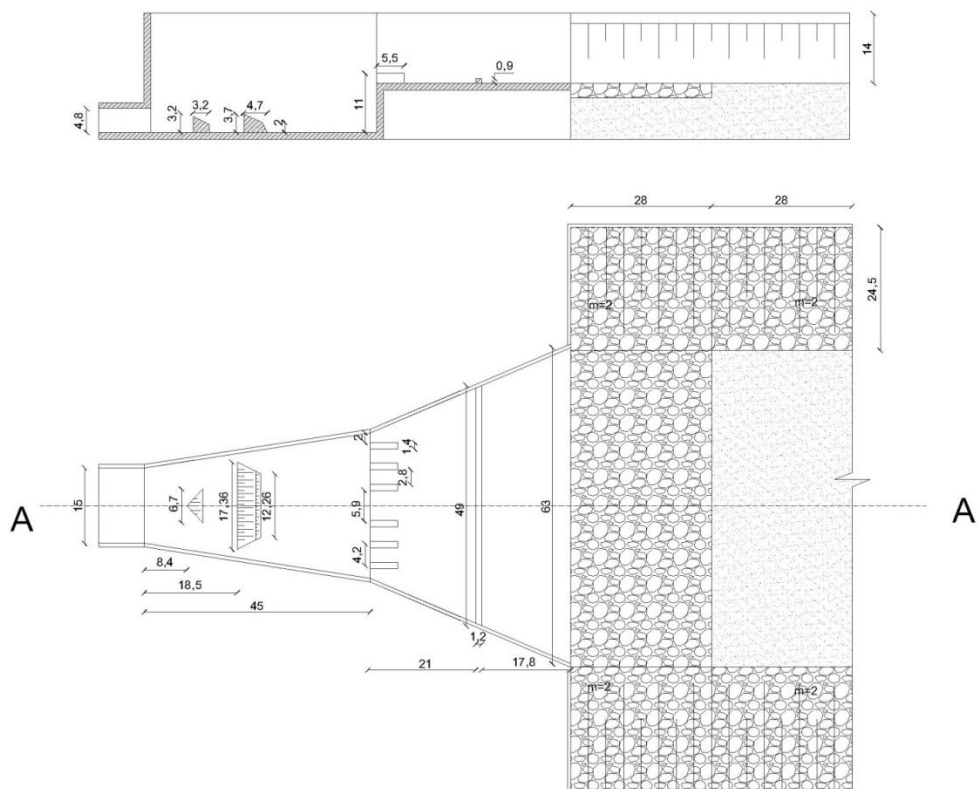


Рисунок 3.5 - Продольный разрез (по А-А) и горизонтальная проекция модели с 4-мя рядами энергогасителей (схема 2)

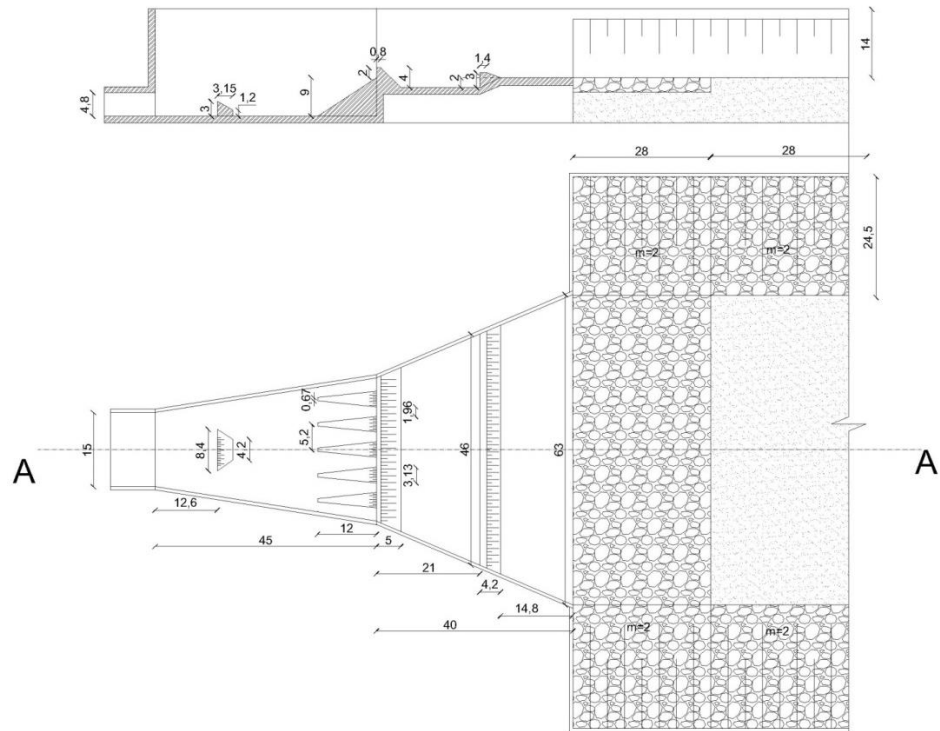


Рисунок 3.6 - Продольный разрез по оси А-А и план модели с 3-мя рядами энергогасителей (схема 3)

Таблица 3.1 - Исследованные схемы гасящих устройств участка сопряжения за шахтно-башенным водосбросом

№ п/п	Схема, №	Энергогасители	Примечание
1	1	Гладкий водобойный колодец	Проектный вариант
2	2	4 ряда гасителей: 1-треугольный растекатель; 2 – порог противэрозионного очертания; 3 – прорезная стенка в конце колодца; 4 – сплошная стенка на рисберме	Типа Нижне-Кафирниганского гидроузла
3	3	3 ряда гасителей: 1 – треугольный растекатель; 2 – растекатели и сплошная стенка в конце колодца; 3 – сплошная стенка на пониженной части рисбермы	Типа Шамхорского гидроузла
4	4	5 рядов гасители: 1-3 треугольные растекатели; 4 и 5 –сплошная и прорезная водобойные стенки	Разработанный тип

Несмотря на имеющийся целый ряд исследований, посвящённых изучению гидродинамических воздействий на водобой и подбору конструкций устройств крепления нижнего бьефа гидроузлов, анализ которых приведён в главе 1,

необходимо для ответственных сооружений прибегнуть к научным экспериментальным исследованиям, позволяющим для данного конкретного случая получить оптимальную конструкцию водобойного колодца. Критериями при выборе оптимальной конструкции гасителей для условий, характерных для гидроузла 16 Тишрин на р. Северный Кебир, являлось наиболее эффективное гашение избыточной энергии потока, растекание потока на рисберме, отсутствие сбойности потока при всех режимах работы водосбросного сооружения и уменьшение скорости за ней, снижающей риск размыва отводящего русла водотока. Конструкция гасителей, подобранная в результате теоретических и экспериментальных исследований, удовлетворяющая этим критериям представлена на рисунке 4.20.

3.3 Методика лабораторных исследований гидравлических процессов

При проведении исследований на гидравлических моделях движение воды происходит под действием силы тяжести, которая зависит от формы и геометрических размеров сооружения. В связи с этим большое значение имеет соответствие кинематических и гидродинамических критериев подобия между моделью и натурным объектом.

Движение водного потока через наш объект исследования - водобойный колодец, осуществляется под действием сил тяжести, поэтому наиболее подходящим критерием подобия можно считать число Фруда $Fr = V^2/gL$. Исходя из равенства числа Фруда в натурном сооружении и на модели имеется выражение для получения масштаба экспериментальной модели:

$$m_F = \frac{F_H}{F_M} = \frac{m_H a_H}{m_M a_M} = \frac{\rho_H W_H L_H T_H^2}{\rho_M W_M L_M T_M^2} = \frac{\rho_H L_H^2 V_H^2}{\rho_M L_M^2 V_M^2} \quad (3.1)$$

где: F – сила; m - масса; a - ускорение; ρ – плотность жидкости; L – длина; W – объём жидкости; T – время; V – средняя скорость потока; индексы «м» и «н» означают «модель» и «натура» соответственно.

Принимая тот факт, что на модели используется та же жидкость – вода, то есть плотности для модели и натуре одинаковые $\rho_m = \rho_n$, получаем критериальное условие:

$$\frac{V_H^2}{g H_M} = \frac{V_M^2}{g H_M} = Fr = idem, \quad (3.2)$$

где: H – характерная глубина потока соответственно для модели и натурального сооружения. g – ускорение свободного падения.

Исследование гидравлических явлений на физической модели возможно при выполнении гидродинамического подобия, которое заключается в соблюдении следующих условий [8, 9, 10, 64, 73, 95]:

– **геометрическое подобие.** Оно заключается в соблюдении пропорций линейных размеров, включая площади и объемы как в модели, так и в реальном объекте. Данное соотношение можно описать следующим образом:

$$\frac{L_H}{L_M} = a_l = const; \quad \frac{\omega_H}{\omega_M} = a_l^2 = cost; \quad \frac{W_H}{W_M} = a_l^3, \quad (3.3)$$

где: a_l – линейный масштаб; L – длина; ω – площади элемента; W – объемы элементов.

– **кинематическое подобие.** Под кинематическим подобием понимается совпадение полей скоростей и ускорений потока как в модели, так и в реальном объекте:

$$\frac{V_H}{V_M} = a_v = const; \quad \frac{V_{cp.H}}{V_{cp.M}} = a_{v.cp} = const; \quad \frac{g_H}{g_M} = a_g = const; \quad \frac{q_H}{q_M} = a_q = const, \quad (3.4)$$

где: a_v – масштаб скорости; $a_{v.cp}$ – масштаб средних скоростей; a_g – масштаб ускорения; a_q – масштаб удельного расхода.

– **Динамическое подобие.** Может быть достигнуто лишь при одновременном соблюдении как геометрического, так и кинематического подобия [40, 64, 86]. Это явление проявляется в постоянных отношениях между аналогичными силами:

$$\frac{F_H}{F_M} = a_f = const, \quad (3.5)$$

где: a_f - масштаб силы.

При соблюдении в качестве критерия подобия числа Фруда, следует пересчитывать основные исследуемые параметры, полученные на модели в натурные условия руководствуясь следующими масштабными коэффициентами [26, 46]:

- для пересчёта скоростей:

$$a_v = \sqrt{a_l} \quad (3.6)$$

- для пересчёта расхода:

$$a_Q = a_l^{5/2} \quad (3.7)$$

- для пересчёта удельного расхода:

$$a_q = a_l^{3/2} \quad (3.8)$$

- для пересчёта давления, выраженного в метрах водяного столба:

$$a_p = a_l \quad (3.9)$$

- для пересчёта ускорения:

$$a_g = 1 \quad (3.10)$$

- для пересчёта времени:

$$a_t = \sqrt{a_l}. \quad (3.11)$$

Кроме критерия подобия по числу Fr , при моделировании гидравлических явлений необходимо чтобы соблюдалось подобие в области автомодельности, то есть, чтобы число Рейнольдса было больше граничного $Re > Re_{gp}$ значения и находилось в диапазоне $Re \geq 10^3 \dots 10^4$ [46, 67].

Условие, при котором коэффициент гидравлического сопротивления λ остается неизменным и не зависит от числа Рейнольдса, должно соблюдаться для достижения подобия в области автомодельности. Нижняя граница

автомодельности для открытых каналов определяется на основе следующей зависимости:

$$Re_{гр} = \frac{14 \cdot R_M}{K \cdot \sqrt{\lambda}}, \quad (3.12)$$

где K — абсолютная шероховатость. Для дерева $K = 0,012$ мм; R_M — гидравлический радиус модели; λ — коэффициент гидравлического сопротивления. Коэффициент λ определялся по формуле А.Д. Альтшуля [6, 54, 63, 75]:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta\mathcal{E}}{4R} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (3.13)$$

где: $\Delta\mathcal{E} = 0,01$ мм – эквивалентная абсолютная шероховатость.

Минимальное значение числа Рейнольдса на модели находилось по уравнению:

$$Re_{min.M} = \frac{V_M R_M}{\nu}, \quad (3.14)$$

где: ν – кинетическая вязкость воды, m^2/c , принимается равной $\nu = 0,0132 \cdot 10^{-4} m^2/c$ при температуре от $9^\circ C$ до $10^\circ C$; V_M – скорость потока на модели в сжатом сечении; R_M – гидравлический радиус.

$$R_M = \frac{b \cdot h}{b + 2h}, \quad (3.15)$$

где: b – ширина лотки модели, см; h – глубина потока на модели, см.

Определяющей силой, действующей на поток при сопряжении бьефов на неразмываемом русле и установившихся во времени режимах движения, являются гравитационные силы тяжести. Силы вязкости при этом имеют меньшее значение. Поэтому моделирование проводилось по закону гравитационного подобия и основным критерием подобия в рассматриваемой задаче являлось число Фруда ($Fr = idem$) при автомодельности гидравлических явлений по числу Рейнольдса ($Re > Re_{gp}$). В нашем случае минимальное значение числа Рейнольдса на модели составило $= 5,3 \cdot 10^3$, максимальное $= 1,99 \cdot 10^4$, что больше граничного значения, следовательно, условие автомодельности для данной модели соблюдается. Это

подтверждает, что масштаб модели 1:70 выбран правильно, даже имеется возможность его укрупнения.

Это не только подтверждает правильность принятия масштаба моделирования 1:70, но и возможность его укрупнения. В соответствии с этим масштабом на модели ($a_l = 70$) максимальные эксплуатационные расходы шахтного водосброса составили во время эксперимента: $Q_m = 7,31; 14,63; 21,95$ л/с, а соответствующие им глубины воды в нижнем бьефе - $h_{НБ\ м} = 4,4; 6,14$ и $7,0$ см, и при одновременной работе обоих водосбросов $h_{НБ\ м} = 12,8$ см.

3.4 Оценка погрешности измерительной аппаратуры и ошибок полученных результатов

Расход воды, поступающий на модель, фиксировался с помощью стационарного ультразвуковой расходомер Днепр-7 (см. рис. 3.7). В соответствии с техническими характеристиками расходомер Днепр-7 имел пределы приведенной погрешности при преобразовании объемного расхода жидкости в выходной токовый сигнал $\pm 1,5 \%$.



Рисунок 3.7- Стационарный ультразвуковой расходомер Днепр-7

Глубина потока определялась как разность показаний шпитценмасштаба, снятых на уровне свободной поверхности потока и у дна [95]. Точность отсчета «Места нуля» шкалы шпитценмасштаба определялось нивелиром и составляла 0,1 мм.

Точность измерения глубин шпитценмасштабом составляла от 0,2 до 0,3 мм с учетом волнообразности свободной поверхности.

Скорости потока измерялись трубкой Пито, при этом шпитценмасштаб располагался рядом с ней на подвижной рейке с целью совместного одновременного измерения местных скоростей и глубин потока по длине и ширине лотка с моделью.

Уровень воды в верхнем бьефе фиксировался с помощью пьезометра, точность измерения составляла 0,5 мм, определяющая отметка модели привязывалась к нулевой отметке пьезометра с помощью нивелира с точностью 0,1 мм.

Для минимизации грубых и систематических ошибок, которые могут возникать при проведении экспериментов [18, 78, 80, 84], на модели производилась многократная регистрация показаний приборов (до 7-10 раз), в журнал вносились средние значения.

При увеличении расхода наблюдаются более значительные колебания уровня воды, что приводит к росту абсолютной ошибки. Однако измеренные глубины также увеличиваются, и поскольку для одинаковых отметок проводилось многократное измерение с последующим расчётом среднего значения, относительная ошибка в целом не увеличивается по сравнению с ошибкой, рассчитанной для низких расходов и глубин. Минимальная глубина, измеренная шпитценмасштабом, в экспериментах равнялась 44 мм. Минимальная относительная ошибка при этом составляла $(0,1/44) \cdot 100 = 0,22\%$, а максимальная – 1,88%. Скорости течения измерялись трубкой Пито с точностью до 2...3%.

Выводы по третьей главе

В третьей главе излагаются критерии подобия, положенные в основу моделирования гидравлических явлений в нижнем бьефе водосбросного сооружения, методика экспериментов в лабораторных условиях и методы и приборы измерения основных гидравлических параметров, полученных на модели: расхода, глубин, скоростей потока. Погрешности измерения обеспечивают надежность и достоверность данных, полученных на модели. На основании критериев моделирования, выделенных для данных задач исследования, подтверждена правильность выбранного масштаба модели, а также определены размеры модели и масштабные коэффициенты для пересчета полученных на модели основных параметров в натурное сооружение.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТРОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ШАХТНО- БАШЕННОГО ВОДОСБРОСА ГИДРОУЗЛА

4.1 Результаты расчета допускаемых скоростей в нижнем бьефе

Для дальнейшего анализа фактических скоростей, были определены допускаемые скорости. Для определения величины допускаемой скорости использовалась формула (2.16).

При нахождении среднего диаметра частиц грунта использовались данные по гранулометрическому составу грунта ложа русла реки Северный Кебир в створе сооружений гидроузла 16 Тишрин, приведённые в таблице 2.2 [5, 85]. На основании этой таблицы был рассчитан средний диаметр грунта d_{cp} , слагающего русловую часть нижнего бьефа за расширяющимся водобойным колодцем шахтного водосброса, как для первого, так и для второго слоев ложа русла и получено, что $d_{cp1} = 0,039$ м, $d_{cp2} = 0,045$ м.

На рис. 4.1 показана зависимость допустимых скоростей в районе ковша и русла от глубины воды в нижнем бьефе и от среднего диаметра грунта русла реки для первого и второго слоев грунта [3].

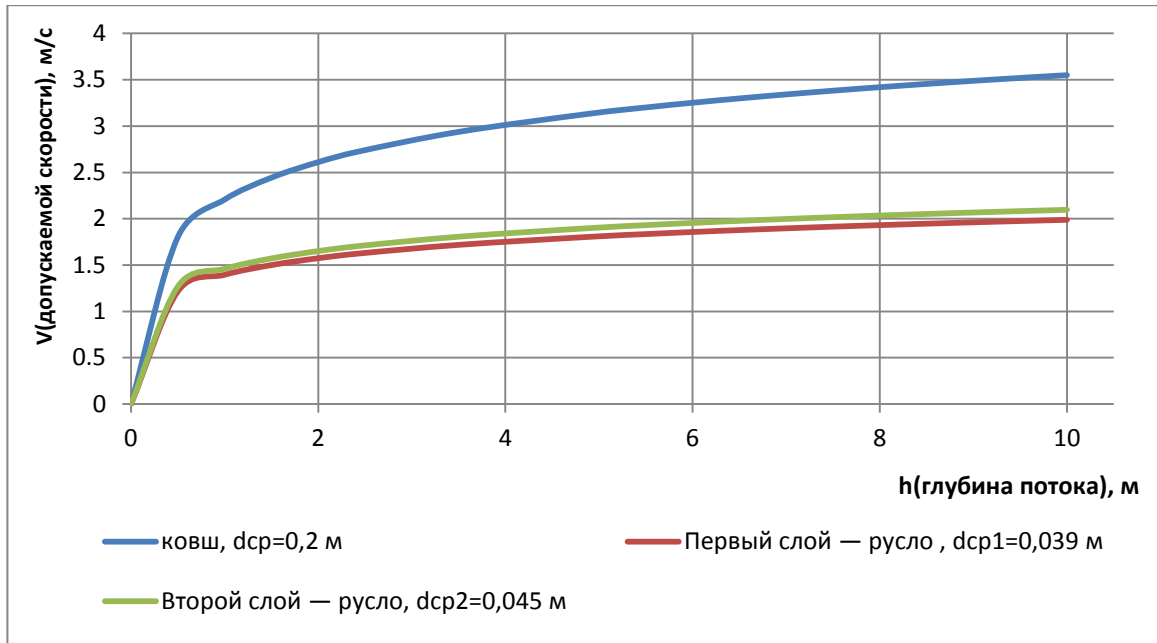


Рисунок 4.1- Кривые зависимости неразмывающихся скоростей потока в зависимости от его глубины $[V]=f(h)$ при среднем диаметре грунта $d_{50\%}$

4.2 Результаты измерений скоростей течения в нижнем бьефе в рамках проектного варианта (схема 1)

Измерения локальных скоростей потока проводились с использованием трубки Пито в сечениях поперек потока I, II, III и IV. В каждом таком створе измерялись скорости в 5 точках с расстояниями между ними $B/4$, то есть две точки рядом с боковыми границами и 3 точки в середине потока.

Для экстраполяции эпюр скорости в местах, близких к жестким боковым стенкам и дну лотка применялся метод Н.М. Щапова [84]. В соответствии с этим методом, на эпюре криволинейная площадь заменяется равновеликой трапецией, имеющей основание u_1 и неравные стороны v_1 и v_0 . При этом v_0 представляет собой фиктивную скорость, которая определяется непосредственно у стенки и вычисляется следующим образом:

$$v_0 = \frac{n-1}{n+1} v_1 \quad (4.1)$$

В этой формуле параметр n определяется на основании экспериментальных данных о скоростях в двух точках, расположенных ближе всего к стенке, а именно v_1 и v_2 , находящихся на расстояниях y_1 и y_2 от нее.

Схематическая иллюстрация, объясняющая рассматриваемый материал, представлена на рисунке 4.2.

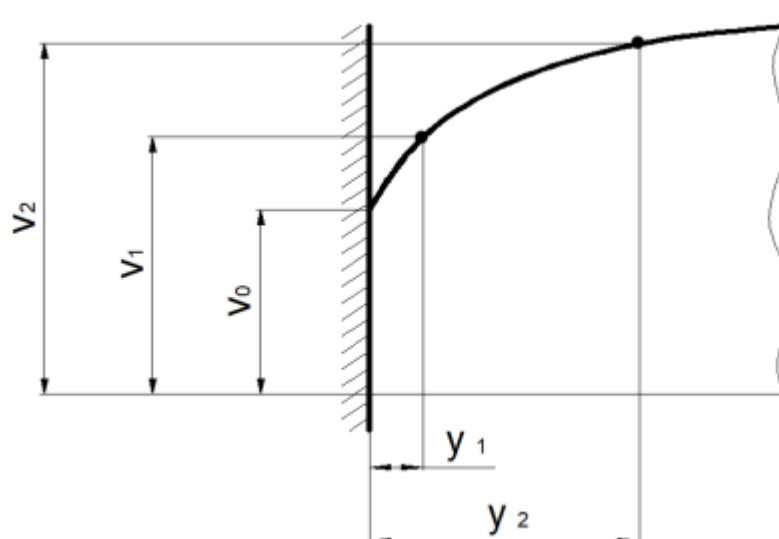


Рисунок 4.2 - Схема, иллюстрирующая процесс экстраполяции эпюр распределения скоростей к жестким стенкам лотка

Измерения скоростей проводились для расходов 300, 600 и 900 м³/с при работе исключительно шахтного водосброса. Также для расхода 2700 м³/с были собраны данные в условиях одновременной эксплуатации обоих водосбросов на максимально возможной пропускной способности, осуществляемой при глубине воды 9 м в нижнем бьефе. Результаты экспериментов представлены в виде эпюр скоростей на рисунках 4.3 и 4.4, расположенных ниже.

рассматриваются случаи разных отметок в верхнем бьефе (ниже ФПУ), при которых проходят расходы (300 м³/с, $h_{НБ} = 3,1$ м) и (600 м³/с, $h_{НБ} = 4,3$ м).

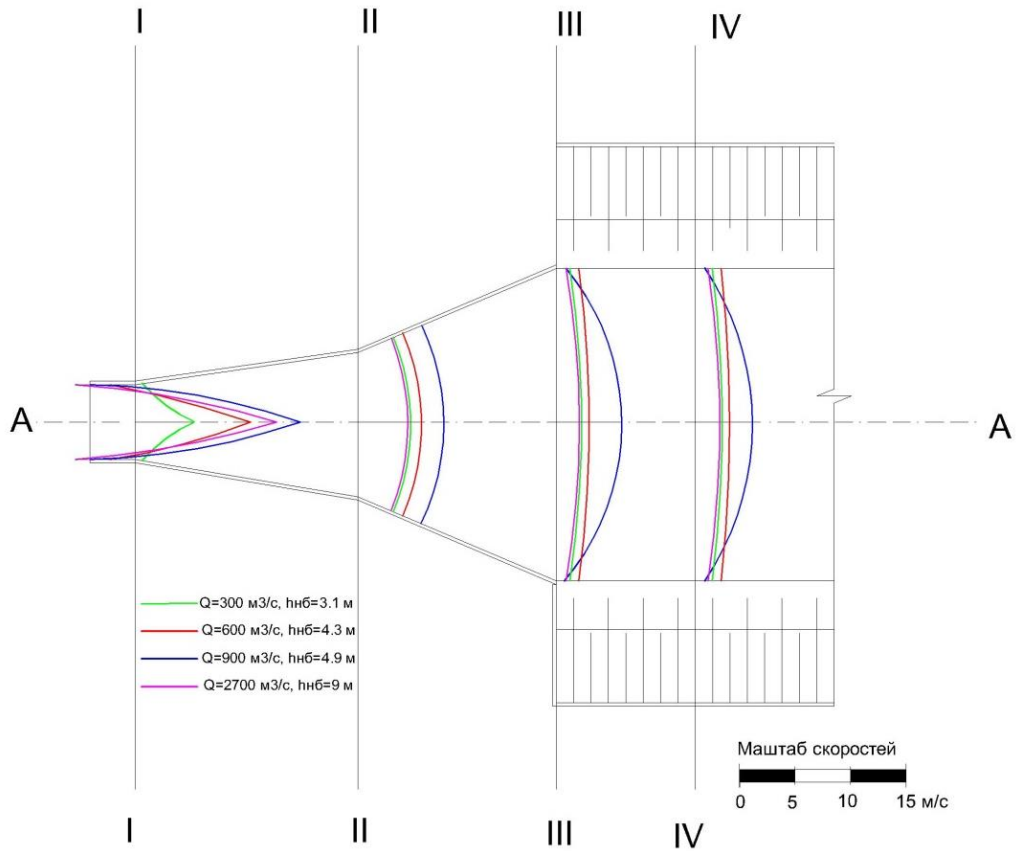


Рисунок 4.3- Измеренные донные плановые эпюры скоростей при различных расходах и глубинах в нижнем бьефе

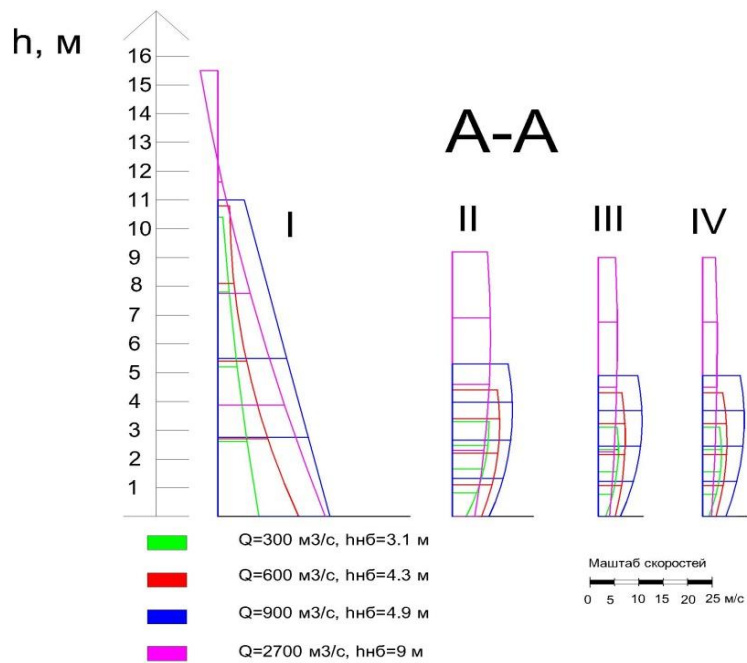


Рисунок 4.4- Эпюры скоростей в центральном продольном сечении по оси А-А в створах I... IV

Движение потока и глубина воды показаны в горизонтальной проекции при максимальном эксплуатационном расходе $900 \text{ м}^3/\text{с}$, при котором возможны максимальные скорости. Отмечаем наличие возвратных течений и водоворотов с обеих сторон на рисберме и ковша (рис. 4.5).

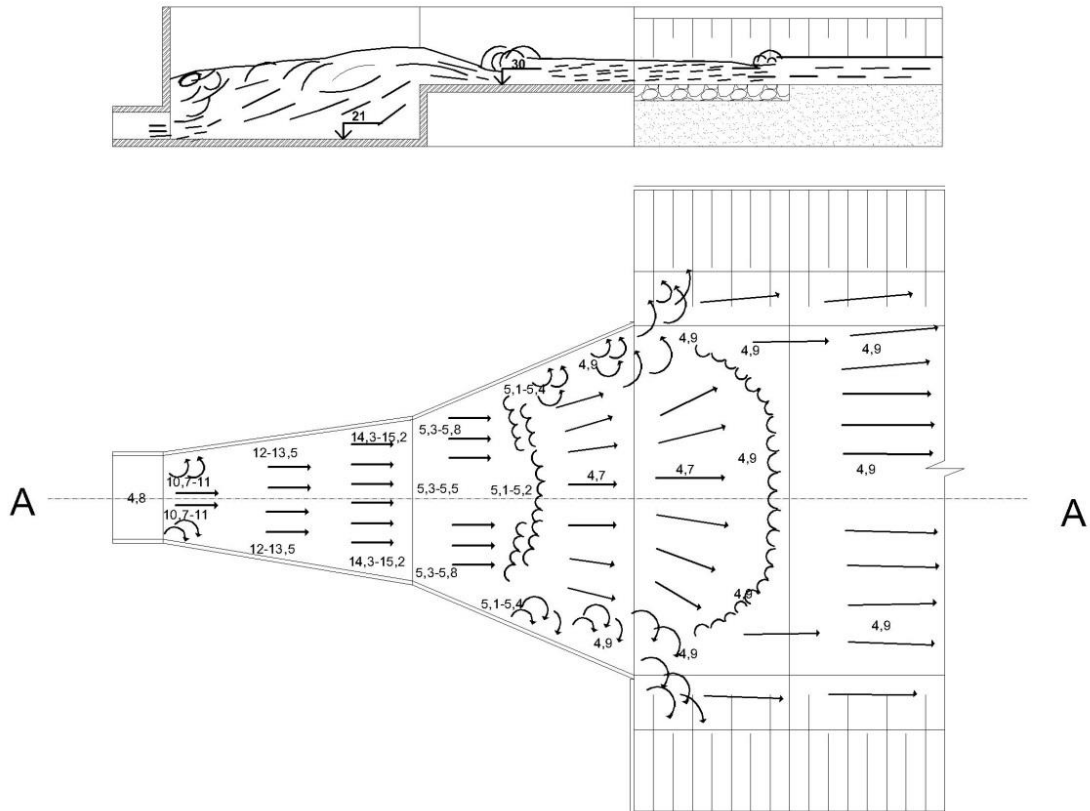


Рисунок 4.5- Картина движения потока и глубины воды при пропуске $Q=900 \text{ м}^3/\text{с}$,
 $h_{НБ}=4,9 \text{ м}$ (схема 1)

Результаты измерения донных максимальных скоростей и глубин потока в нижнем бьефе водосбросов в центральном продольном сечении по оси А-А представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Скорости и глубины воды в нижнем бьефе при разном расходе

Номер поперечных створов	При работе только шахтно-башенного водосброса						При работе обоих водосбросов	
	$Q_H=300 \text{ м}^3/\text{с}$ $h_{НБ} = 3,1 \text{ м}$		$Q_H=600 \text{ м}^3/\text{с}$ $h_{НБ} = 4,3 \text{ м}$		$Q_H = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$		$Q_H = 2700 \text{ м}^3/\text{с}$ $h_{НБ} = 9 \text{ м}$	
	Глубина $h_{н.}, \text{ м}$	Скорость $v_{нмаx.}, \text{ м/с}$	Глубина $h_{н.}, \text{ м}$	Скорость $v_{нмаx.}, \text{ м/с}$	Глубина $h_{н.}, \text{ м}$	Скорость $v_{нмаx.}, \text{ м/с}$	Глубина $h_{н.}, \text{ м}$	Скорость $v_{нмаx.}, \text{ м/с}$
I	10,4	4,2	10,8	8,3	11,00	11,90	15,5	10,2
II	3,3	3,8	4,4	4,6	5,30	7,20	9,2	3,6
III	3,1	1,82	4,3	2,4	4,90	4,70	9	1,80
IV	3,1	1,52	4,3	2,2	4,90	4,20	9	1,78

Анализ результатов лабораторных измерений скорости показал, что скорости, образующиеся в нижнем бьефе, имеют наибольшую величину при прохождении максимального эксплуатационного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ при работе только шахтного водосброса. Максимальное значение скорости потока в зоне ковша приходится на конечное сечение схода воды с рисбермы и при максимальном эксплуатационном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ при работе только шахтного водосброса, фактическая скорость достигает 4,7 м/с. Максимальное значение скорости на участке русла по оси потока приходится на конечную точку истечения воды из ковша, на расстоянии от рисбермы 28 м и при максимальном эксплуатационном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ значение фактической скорости здесь может достигнуть 4,2 м/с. Фактические скорости имеют важное значение для прогноза размывов в начале участка ковша и начале участка неукрепленного русла, в створе номер III и IV, соответственно на расстоянии от рисбермы, начиная с 0 до 28 м.

Сравнение фактических и допускаемых скоростей при разных режимах работы водосброса представлены в таблице 4.2, где допускаемые скорости рассчитывались по формуле Ц.Е. Мирцхулавы (2.16), исходя из глубины воды в нижнем бьефе и среднего диаметра грунта d_{cp} [3].

Таблица 4.2 - Сравнение максимальной фактической скорости и допускаемой скорости в нижнем бьефе для первого и второго слоев грунта русла

	$Q_H = 300 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 3,1 \text{ м}$	$Q_H = 600 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 4,3 \text{ м}$	$Q_H = 900 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$	$Q_H = 900 \text{ м}^3/\text{с},$ $h_{НБ} = 9 \text{ м}$
Створ III-III				
$V_{Hmax}, \text{ м/с}$	1,82	2,40	4,70	1,80
$V_{Hдон}, \text{ м/с}$	2,87	3,06	3,13	3,45
Створ IV-IV				
$V_{Hmax}, \text{ м/с}$	1,52	2,20	2,40	1,78
$V_{Hдон1}, \text{ м/с}$	1,69	1,77	1,80	1,96
$V_{Hдон2}, \text{ м/с}$	1,77	1,86	1,90	2,07

Результаты анализа сравнения фактических и расчетных допускаемых скоростей показали, что уточненные скорости по площади ковша в русле реки попадают в допустимые пределы за счет приемлемости заполнения ковша камнем диаметром (0,1...0,3) м, что соответствует допускаемых скоростям для потоков 600 и 300 м³/с, а также при эксплуатации обоих водосбросов фактические скорости попадают в допустимый диапазон, а скорости, создаваемые для потока с расходом $Q_H = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ при работе только шахтного водосброса, больше, чем допустимое значение скоростей $V_{Hmax} = 4,7 \text{ м/с} > V_{Hдон} = 3,13 \text{ м/с}$.

Результаты анализа распределения максимальных скоростей в начале участка русла после ковша показывают, что их значения превышают допускаемые скорости при расходе 600 м³/с. В этом месте нижнего бьефа значения скоростей достигают максимальных величин (2,2 м/с), хотя допускаемая скорость здесь не должна превышать 1,77 м/с. Это свидетельствует о том, что в нижнем бьефе здесь будут происходить деформации, что требует поиска инженерных решений по более эффективному гашению энергии потока.

Результаты анализа измерений в сечениях за ковшом показывают, что скорость 4,7 м/с, образующаяся при максимальном эксплуатационном расходе Q

= 900 м³/с, превышает допустимую скорость для первого и второго слоев грунта, в зоне ковша и после зоны ковша. Это указывает на возможность деформации и размыва [3].

4.3 Результаты исследования скоростей в нижнем бьефе после установки энергогасителей по типу водосброса Нижне-Кафирниганского гидроузла (схема 2)

Был рассмотрен вариант конструкции энергогасящих устройств нижнего бьефа, опирающегося на конструкцию гасителей водосброса Нижне-Кафирниганского гидроузла (рис 4.6) [72].

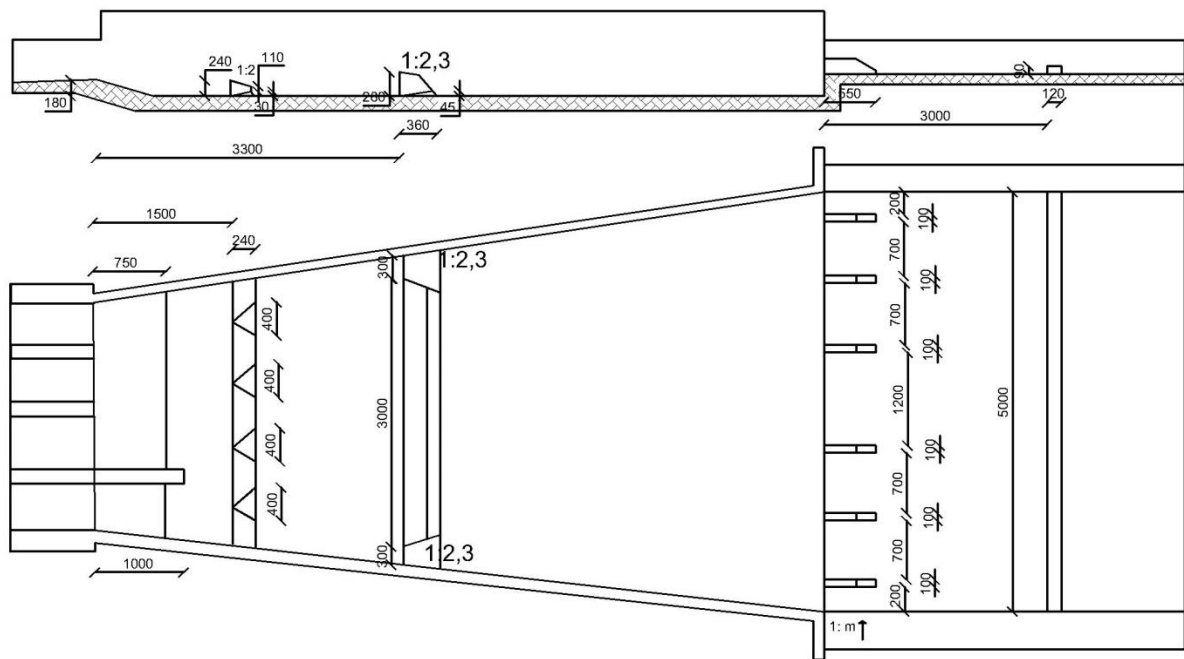


Рисунок 4.6 - Вариант конструкции устройств выходного участка нижнего бьефа водосброса Нижне-Кафирниганского гидроузла, исследованного в МГМИ [72]

Результатом проведенного проектирования и последующих экспериментальных проверок стало создание конструкции устройств нижнего бьефа – схема 2, которая показана на рисунке 4.7 [72].

Был выбран первый ряд гасящих устройств - один треугольный в плане растекатель, который устанавливался в соответствии с размером отверстия шахтного водосброса. Его геометрические параметры и высота определялись пропорционально размерам первого ряда гасителей водосброса Нижне-Кафирниганского гидроузла, а также с учетом высоты порога и высоты трубы перед входом в водобойный колодец.

Этот треугольный в плане растекатель располагается на расстоянии 8,4 м с наклоном на верховой грани, составляющем 1:2,3, геометрические параметры растекателя в горизонтальной плоскости (3,2; 6,7) м, высота 3,2 м (рис. 4.7).

Второй ряд гасящих устройств - рссеивающий порог, который располагается на расстоянии 18,5 метра от начала водобоя. Все грани этого порога, кроме фронтальной, имеют наклон по движению потока 1:2,3 (удалила про кавитацию, так как здесь она вряд ли будет, чтобы судить о том будет лди кавитация, нужно сделать прогноз кавитации, обычно она начинается при скоростях потока 15-20 м/с), геометрические параметры растекателя в горизонтальной плоскости (17,36; 12,26; 4,7) м, высота 3,7 м.

Третий ряд гасящих устройств - шесть расщепителей, имеющих высоту 2 м и толщину 1,4 м, на выходном ребре водобойного колодца, что способствует улучшению распределения потока по ширине и повышению эффективности системы гашения.

На рисберме предусмотрена установка водобойной стенки высотой 0,9 м и толщиной 1,2 м на расстоянии 21 метров от выходного ребра колодца, расположенной за расщепителями, что способствует дополнительной стабилизации потока и дополнительное рассеивание энергии.

Таким образом, предложенные подходы не только способствуют эффективному гашению энергии потока, но и гарантируют надежную эксплуатацию системы в условиях пропуска максимального расхода через шахтно-башенный водосброс.



Рисунок 4.7- Модель с энергогасителями, аналогичными схеме гасителей в нижнем бьефе водосброса Нижне-Кафирниганского гидроузла (схема 2)

Измерения гидравлических характеристик потока на модели были выполнены в тех же в створах I, II, III и IV как и для других моделей. Определялись такие гидравлические параметры как визуальные картины движения потока, места появления вихревых зон, наличие всплесков овды за гасителями, а также глубины и скорости потока.

Измерения скоростей были осуществлены при расходе воды $900 \text{ м}^3/\text{с}$ в ходе эксплуатации шахтного водосброса с глубиной в нижнем бьефе $h_{\text{НБ}} = 4,9 \text{ м}$, результаты измерения скоростей и глубин представлены на рисунках 4.8, 4.9.

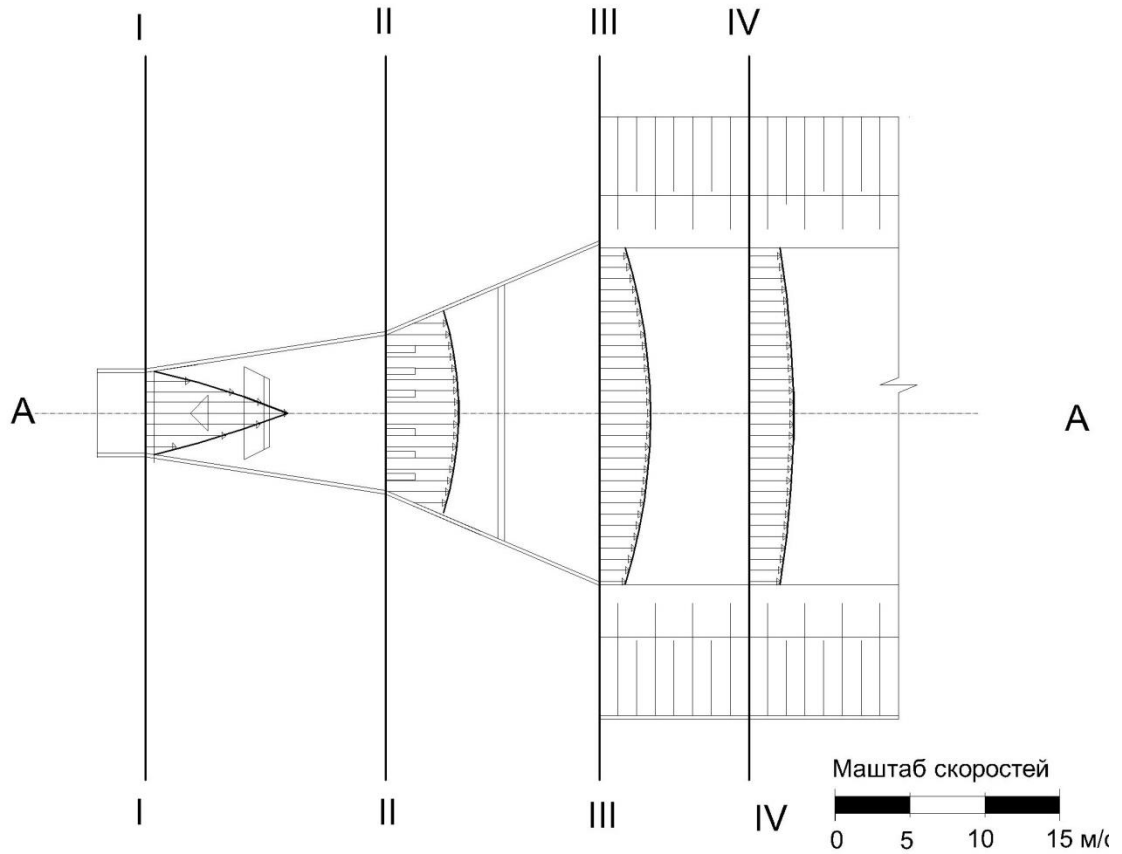


Рисунок 4.8 - Измеренные донные плановые эпюры скоростей (схема 2)

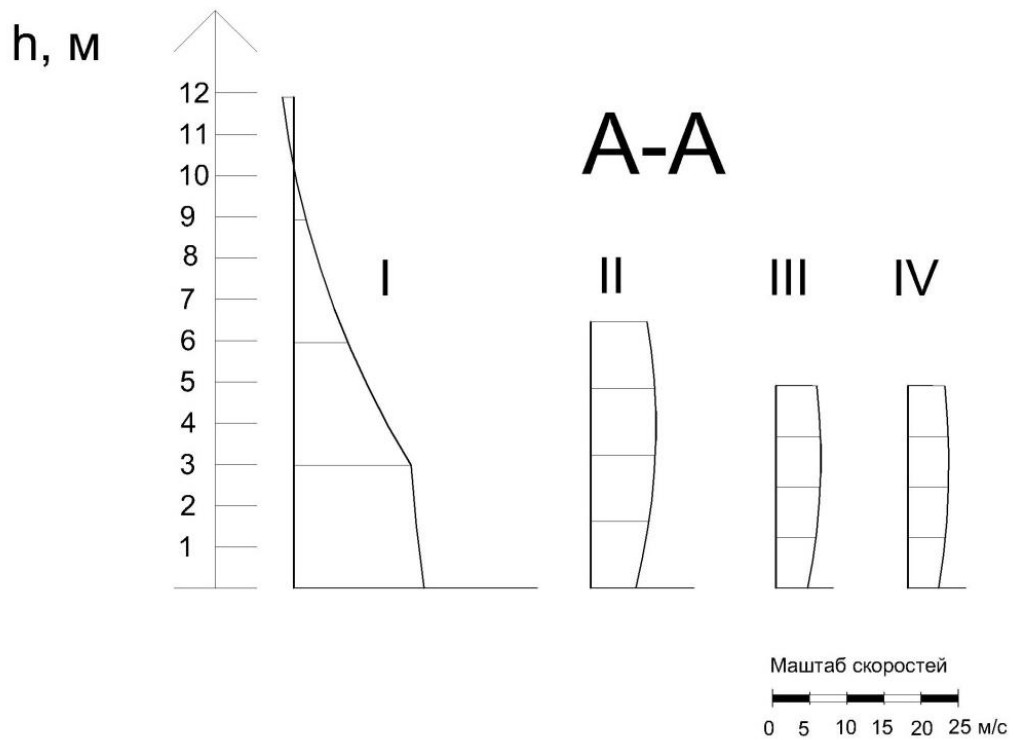


Рисунок 4.9 - Эпюры скоростей по глубине потока в центральном продольном сечении по оси сооружения «А-А» и створах I... IV (схема 2)

Глубина воды в водобойном колодце варьируется от 11,9 м до 15,5 м, и глубина воды на рисберме изменяется от 6,5 м до 4,9 м на расстоянии 25 м от начала точки рисбермы.

При наблюдении за движением воды в водобойном колодце констатируется, что в начальной зоне водобоя из-за взаимодействия с возвратным движением воды образуются вихревые структуры, которые приводят к появлению вихревых зон и отрицательным скоростям. Это явление иллюстрируется в поперечном сечении I - I (рис. 4.9), где наблюдается отрицательная скорость, достигающая 0,9 м/с.

На рисунке 4.10 также наблюдается присутствие вихрей в начальной зоне рисбермы, однако в меньшем объёме по сравнению с данными, представленными для схемы 1 (рис. 4.5).

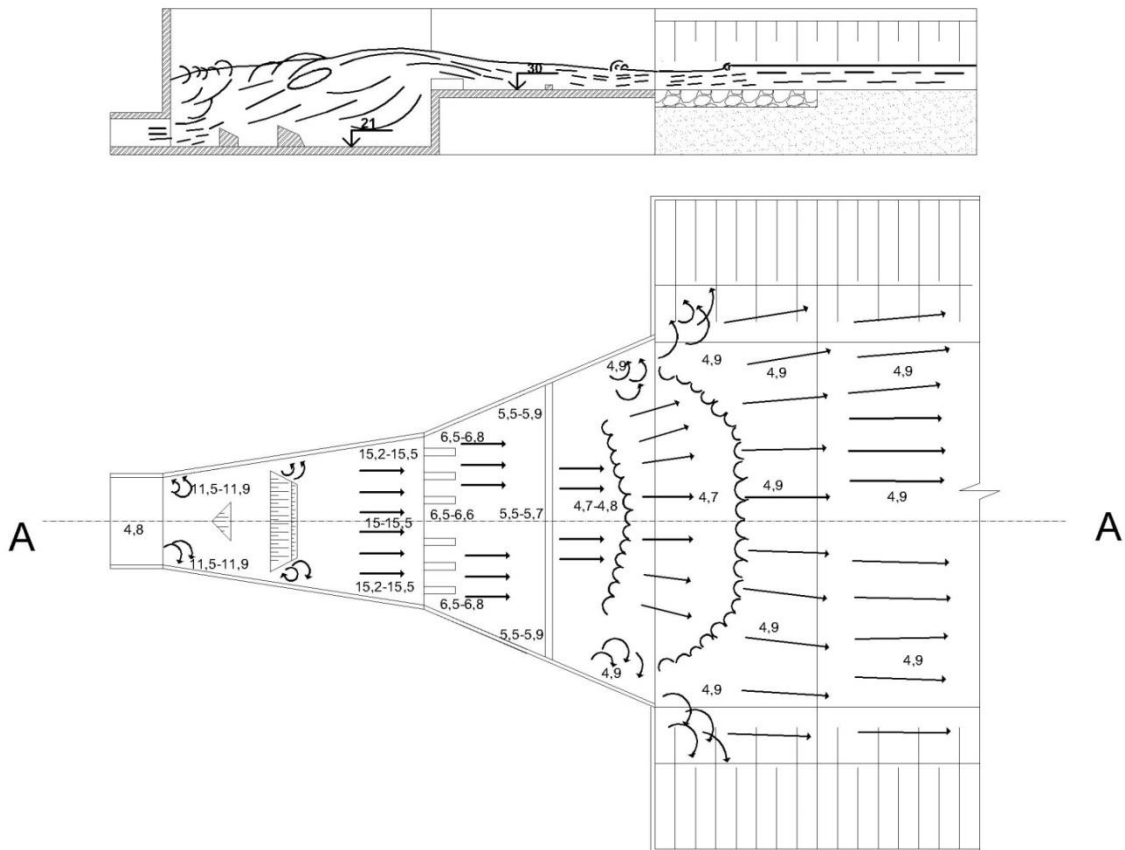


Рисунок 4.10- Картина движения потока и глубины воды $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$ (схема 2)

За рассеивающим порогом также наблюдается закручивание потока по боковым сторонам порога, близким к внутренним стенкам водобойного колодца. Это явление приводит к усилению вихрей и захвата воздуха и повышению вероятности формирования вихрей в области водобоя, как показано на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 - Плановая картина сопряжения на водобойном колодце схемы 2 при $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_{\text{НБ}} = 4,9 \text{ м}$: видны интенсивные процессы генерации вихрей и захвата воздуха в водобойном колодце

Отмечено, что расщепители, расположенные в начальной части рисбермы, обеспечивают эффективное распределение скоростей по всему сечению, что существенно увеличивает эффективность рассеивания энергии в поперечном створе II - II на рисунке 4.8.

Водобойная стенка на рисберме способствует дополнительному рассеиванию энергии и обеспечивает равномерное распределение потока, поскольку максимальная придонная скорость в конце рисбермы достигает 3,4 м/с, в то время как средняя скорость в поперечном сечении III – III составляет 2,5 м/с.

Максимальная придонная скорость 3,4 м/с в поперечном сечении III – III (конец рисбермы), хотя и меньше чем скорость по варианту водобойного колодца

по схеме 1, превышает предельно допустимую величину, рассчитанную в соответствии с формулой Ц.Е. Мирцхулавы, что отражено на рисунке 4.1. Для ковша, заполненного камнем со средним диаметром 20 см, и уровнем воды в НБ равным 4,9 м расчетная допускаемая скорость составляет $V_{\text{Доп}} = 3,13$ м/с. Превышение допускаемых значений указывает на возможное возникновение эрозионных процессов в зоне ковша, заполненного камнем диаметром (0,1...0,3) м.

Максимальная скорость в поперечном сечении IV (конец ковша), $V_{\text{Hmax}} = 3$ м/с превышает предельно допустимые значения, указанные на рисунке 4.1 для русла, где $V_{\text{Ддон1}} = 1,8$ м/с и $V_{\text{Ддон2}} = 1,9$ м/с. Это свидетельствует о возникновении деформационных процессов как в области русла, так и с возможным распространением этих деформаций на глубину до 2,5 м в пределах второго слоя грунта исследуемой зоны. В связи с этим возникает необходимость в исследовании дополнительных вариантов энергогасящих устройств, способствующих улучшению процесса рассеивания энергии и обеспечивающих уверенность в том, что эрозия не будет наблюдаться в нижнем бьефе.

4.4 Результаты исследования скоростей в нижнем бьефе после установки энергогасителей по типу водосброса Шамхорского гидроузла (схема3)

Шамхорский гидроузел, предназначенный для комплексной эксплуатации, был сооружён в период с 1975 г. по 1982 г. на реке Куре в Азербайджане, Проектные варианты его водосброса были исследованы в МГМИ, НИИЭС Гидропроекта и АЗВОДГЕО [79]. Трёхпролетный водосброс имел следующие основные параметры: максимальный расход $Q = 2980$ м³/с; напор относительно выходного сечения трубы галереи $H = 4,92d_1$, где $d_1 = 12$ м – высота прямоугольной галереи; перепад $p = 1,33d_1$; относительная удельная энергия потока, выходящего из труб $(\Theta_1 + p)/h_1 = 7,2...9,6$; $\Theta_1 = h_1 + v_1^2/2g$; h_1 и v_1 – глубина и скорость на выходе из галереи; $g = 9,81$ м/с²; глубина в отводящем

канале $h_2 = (0,63...1,08)d_1$; подтопление выходного сечения $\varepsilon_p = (h_1 - p)/h_2 = 1,9...2,7$ (рис. 4.12).

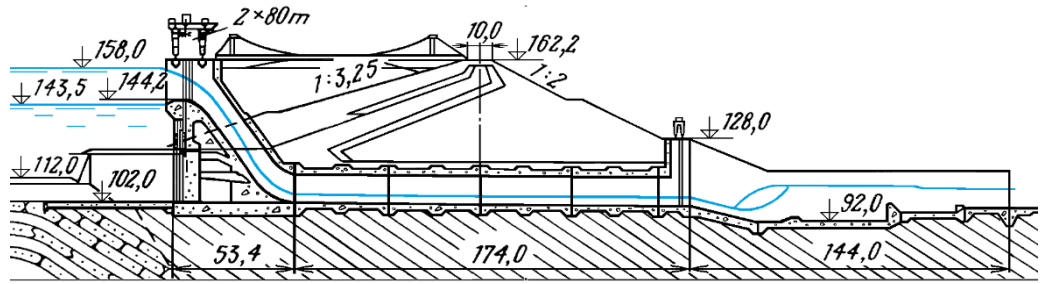


Рисунок 4.12 – Продольный разрез по водосбору Шамхорского гидроузла [79]

Система гашения состояла из трех рядов зубчатых порогов на расширяющемся водобойном колодце с углом $\theta = 240$ (рис. 4.13). За последним рядом гасителей ось сооружения поворачивала на 32047° . Особенности участка сопряжения были: высокое число Фруда в сжатом сечении (до $15...60$); расширяющийся в плане водобойный колодец; гасители специального типа; поворот отводящего канала; возможность возникновения пространственного прыжка и др.

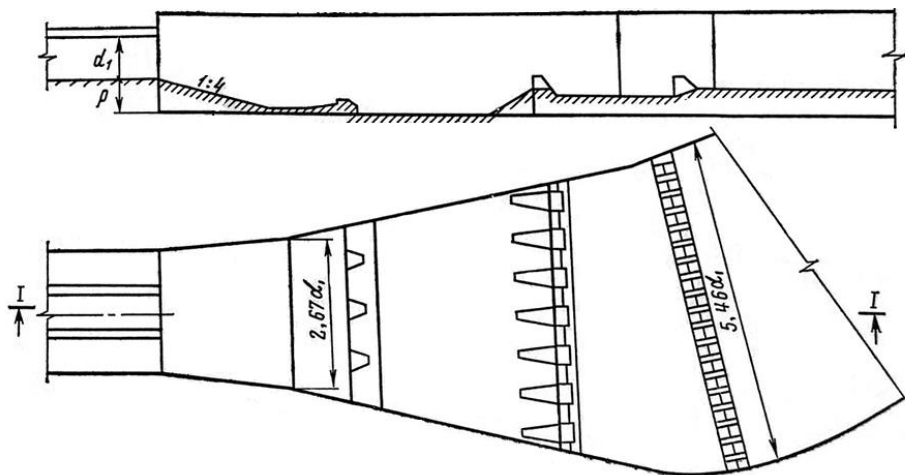


Рисунок 4.13- Схема устройств нижнего бьефа на выходном участке водосбора Шамхорского гидроузла, исследованного в МГМИ (схема 3)

Система гашения состояла из 3-х рядов. В первом ряду зубчатых порогов был установлен гаситель, состоящий из прилива трамплина и трех зубьев. Геометрические параметры и высота данного порога были определены пропорционально масштабу модели (линейный масштаб 1:50.) В натуре размеры элементов составляли 8,4 м, 4,2 м, 3,15 м. Рассеивающий порог располагался на расстоянии 12,6 м от начала водобоя. Все грани этого порога, кроме фронтальной, имеют наклон с уклоном 1:2,3, что способствует улучшению противокавитационной защиты. Во втором ряду зубчатых порогов были установлены пять безэрозионных расщепителей, с размерами: длина 12 м, высота 9 м, ширина от 0,67 м до 3,13 м. Рисберма была углублена до двух метров на расстоянии 21 м с целью снижения скорости потока и достижения более последовательного и стабильного течения. В третьем ряду зубчатых порогов была установлена водобойная стенка, возвышающаяся на метр над уровнем рисбермы, расположенной за ней. Принятая для настоящих исследований конструкция выходного участка составленная по аналогии с описанным конструктивным решением (схема 3) приведена на рисунке 4.14.



Рисунок 4.14- Установка модели с энергогасителями схемы 3

Как показали гидравлические и гидродинамические исследования [79] предложенные устройства для гашения на основе трех рядов специализированных зубчатых порогов не только способствовали эффективному уменьшению энергии потока, но также гарантировали надежную эксплуатацию системы при пропуске максимальных расходов и разных схемах маневрирования затворами водопропускных пролётов трубчатого водосброса.

Измерения скоростей проводились при расходе воды $900 \text{ м}^3/\text{с}$ в процессе функционирования шахтно-башенного водосброса с уровнем воды в нижнем бьефе $h_{\text{НБ}} = 4,9 \text{ м}$. Результаты измерений скоростей и глубин представлены на рисунках 4.15 и 4.16.

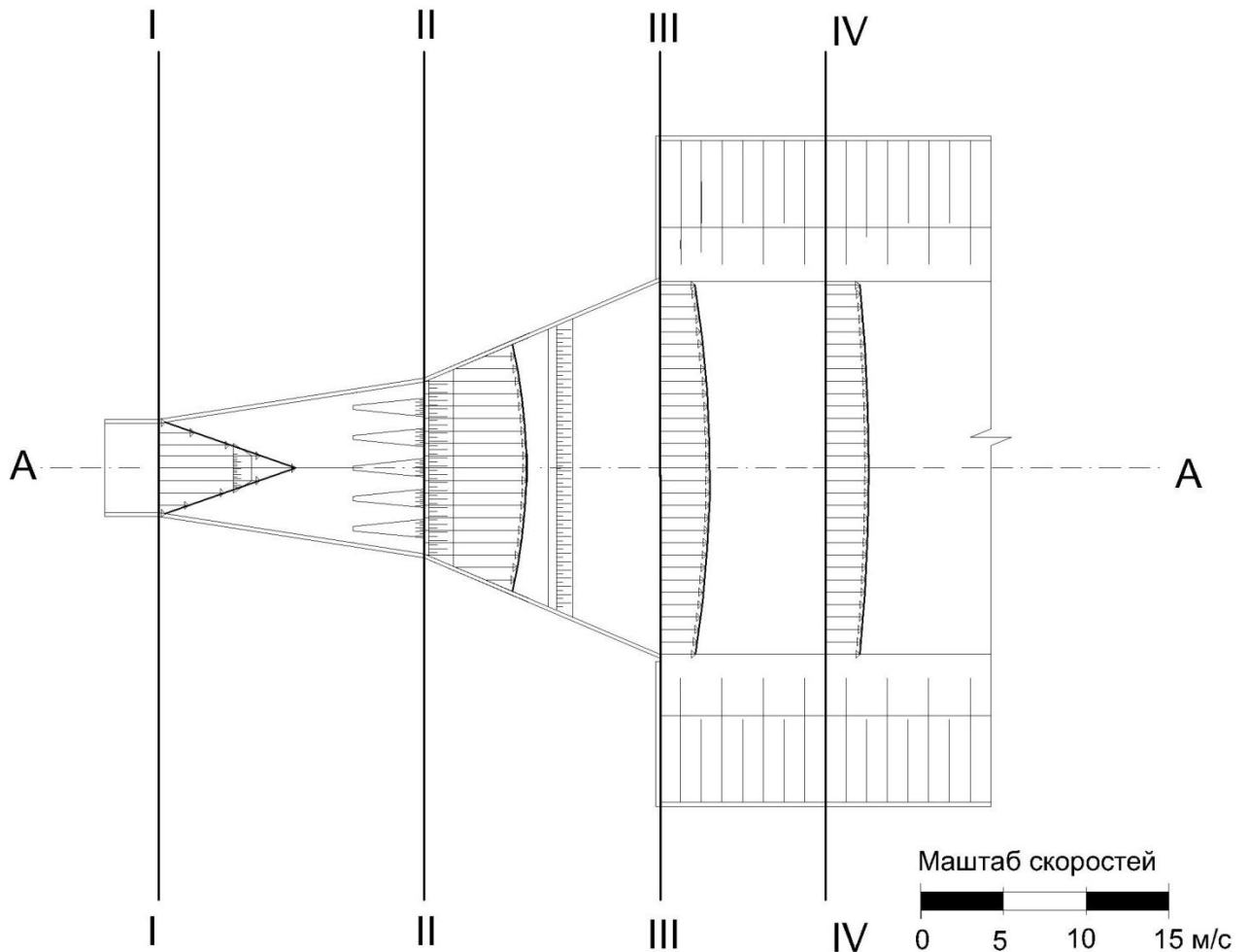


Рисунок 4.15- Измеренные донные плановые эпюры скоростей (схема 3)

Глубина воды в водобойном колодце колеблется в диапазоне от 14 м до 16 м. В то же время глубина воды на рисберме изменяется от 5 м до 9 м в средней части с пониженно отметкой, а затем снижается до 4,9 м ближе к ее концу.

При работе водобойного колодца при наибольшем расходе 900 м³/с, фиксируется выраженное волнение на поверхности воды в области конца водобойного колодца, в центральной зоне участка рисбермы с пониженной отметкой и на втором ряду зубчатых порогов-расщепителей, что иллюстрируется на рисунке (4.15).

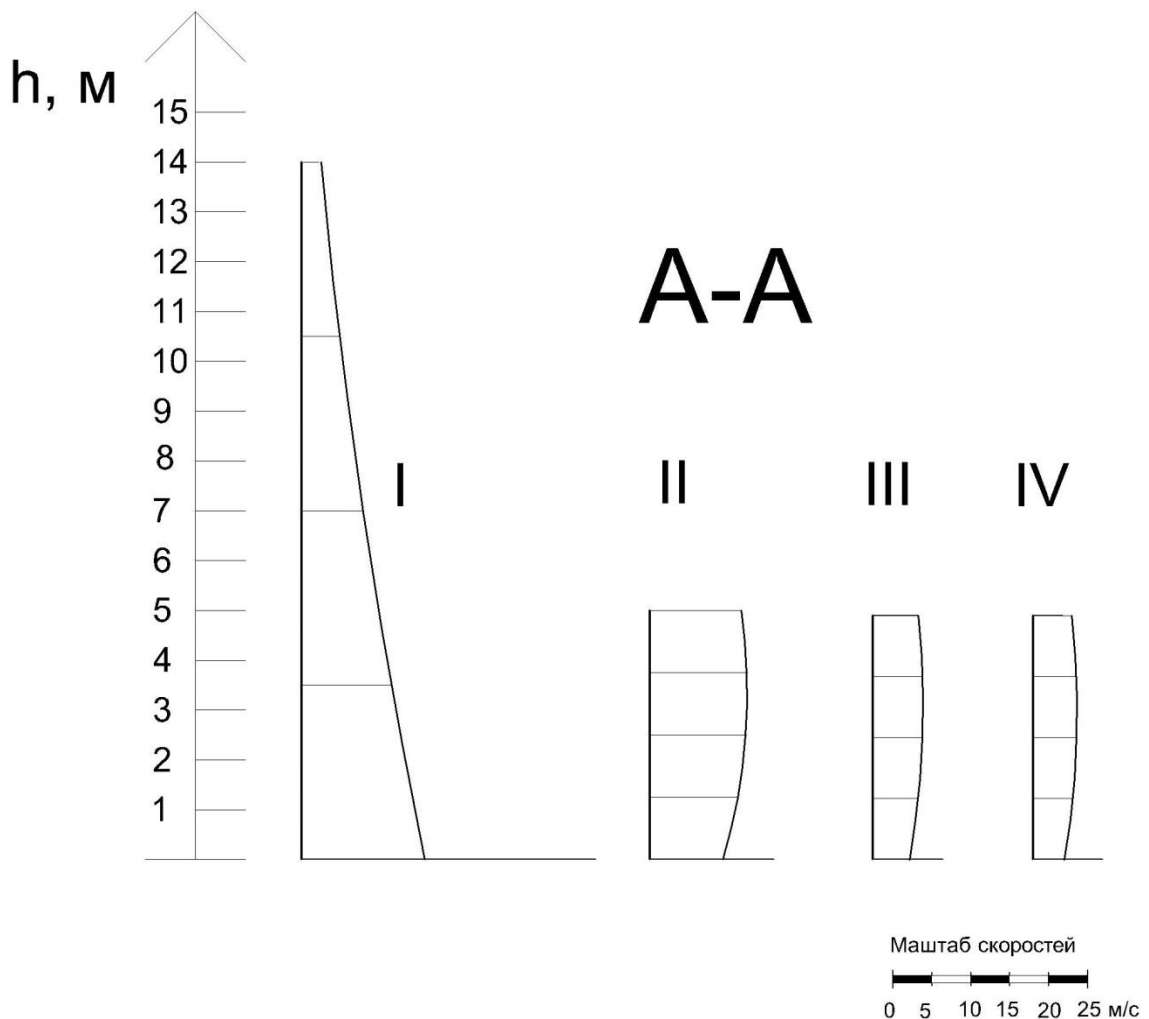


рисунок 4.16- Эпюры скоростей в центральном продольном сечении «А-А» и поперечном створе I...IV (схема 3)

На рисунке 4.17 зафиксировано наличие скачка уровня воды в углублении на рисберме, что способствует повышению эффективности рассеивания энергии воды. Также отмечается равномерное распределение потока вблизи конца

рисбермы. Это свидетельствует о том, что (схема 3) обеспечивает более эффективное рассеивание и распределение энергии по сравнению со схемой 2.

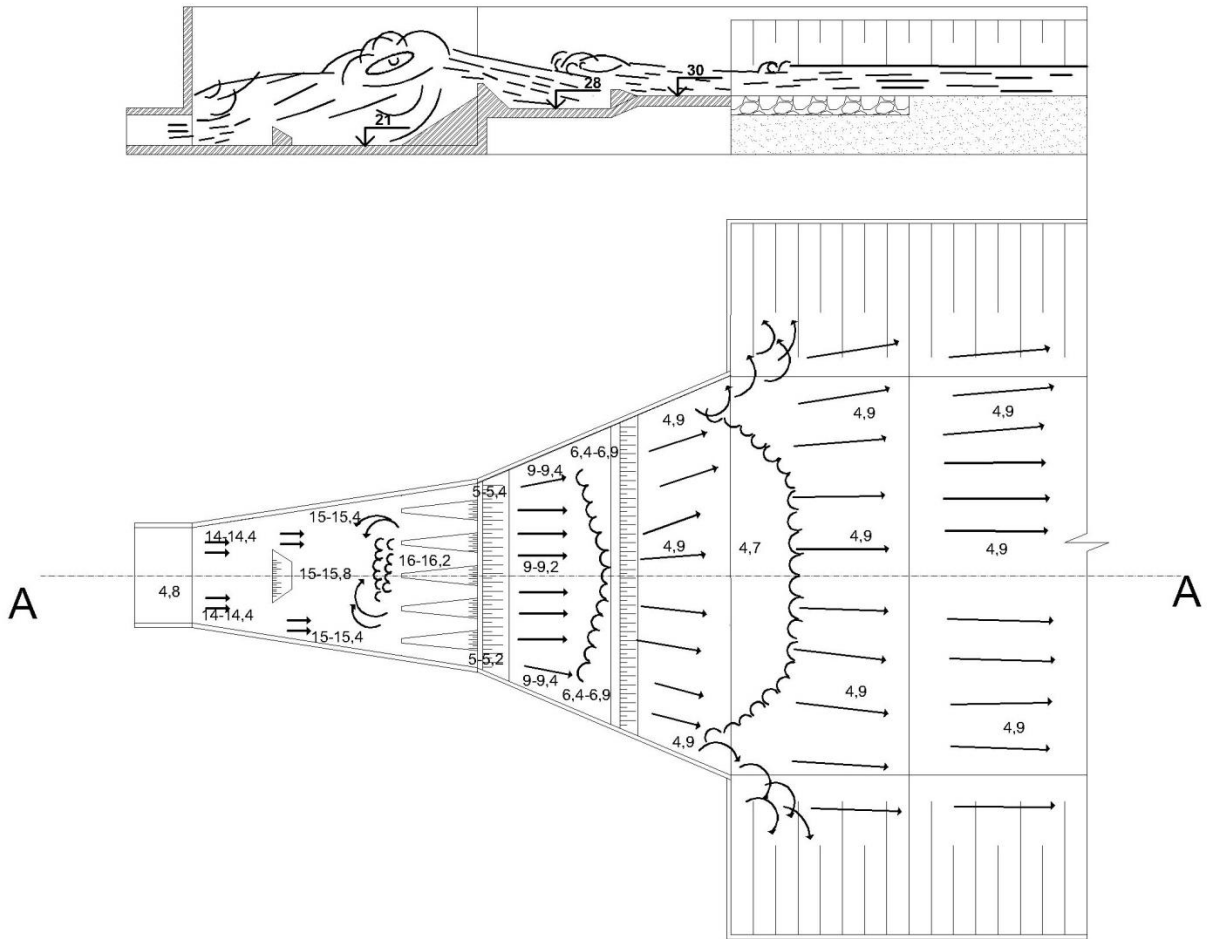


рисунок 4.17- Картина движения потока и глубины воды $Q=900 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$
(схема 3)

В результате углубления рисбермы и наличия здесь водобойной стенки в этой углубленной зоне наблюдаются обратные потоки воды, что указывает на эффективность диссипации энергии в предложенной модели (рис.4.18).

Констатируется, что водобойная стенка, размещенная на рисберме, способствует равномерному распределению скоростей по всему сечению, что значительно повышает эффективность рассеивания энергии в поперечном створе II-II, как показано на рисунке 4.15.



Рисунок 4.18- Картина работы водобойного колодца при $Q=900\text{м}^3/\text{с}$ $h_{НБ}=4,9\text{м}$
(схема 3)

Водобойная стенка играет ключевую роль в дополнительном рассеивании энергии и обеспечивает равномерное распределение потока, поскольку максимальная скорость в конце рисбермы достигает 3,1 м/с (рисунок 4.14), тогда как средняя скорость в поперечном сечении III - III составляет 2,5 м/с. При этом максимальная скорость в сечении III – III остается ниже предельно допустимого значения, рассчитанного согласно закону Ц.Е. Мирцхулавы, что продемонстрировано на рисунке 4.1. Для ковша с грунтом диаметром 20 см и глубиной воды в нижнем бьефе 4,9 м расчетная допустимая скорость равняется $V_{Ндон} = 3,13$ м/с. Это указывает на то, что благодаря эффективности предложенных гасителей, снижающих скорость потока и обеспечивающих хорошее равномерное распределение скоростей по сечению III - III, не происходит размывов и эрозий в зоне ковша (рис. 4.16).

В то же время, максимальная скорость в поперечном сечении IV, равная $V_{Hmax} = 2,65$ м/с, превышает предельно допустимые показатели, установленные для русла и зафиксированные на рисунке 4.1, где $V_{Hдон1} = 1,8$ м/с и $V_{Hдон2} = 1,9$ м/с. Это свидетельствует о наличии деформационных процессов как в самой области

русла, так и с вероятным распространением этих деформаций до глубины 2,5 м в пределах второго слоя исследуемой зоны. Таким образом, возникает необходимость в проведении дополнительных исследований различных вариантов энергогасящих устройств, направленных на улучшение процесса рассеивания энергии и для исключения эрозии и размыва в нижнем бьефе (рис. 4.14). В конструктивном отношении можно закончить рисберму каменным или бетонным зубом на глубину, превышающую возможно глубину размыва, например, на глубину до 2,5...3 м, как часто делают в практике строительства водосбросных сооружений.

Следует отметить, что устройства, установленные на рисберме, демонстрируют высокую эффективность в процессе рассеивания энергии водного потока в концевой части рисбермы. Тем не менее, гасители, размещённые в водобойном колодце, приводят к нарушениям в структуре потока и, как следствие, способствуют вовлечению воздуха в поток, что, аэрируя его, увеличивает глубину потока, а это в свою очередь может потребовать увеличения высоты стенок водобойного колодца.

Учитывая эти аспекты, возникает необходимость в разработке альтернативных решений по установке гасителей, которые обеспечивали бы большую стабильность потока в водобойном колодце.

4.5 Исследование кинематики потока в нижнем бьефе после установки разработанной и экспериментально обоснованной схемы энергогасителей (схема 4)

В результате анализа схемы 2 и схемы 3 установлено, что обе схемы демонстрируют высокую эффективность в рассеивании энергии водного потока и снижении его скорости после рисбермы. Однако, стоит отметить, что схема 3 достигает более оптимального уровня рассеяния по сравнению со схемой 2. В то же время возникает проблема: в зоне водобойного колодца в обеих схемах наблюдаются нарушения в движении воды и образование вихрей. Чтобы решить

эту проблему, в предложенной схеме 4, представленной на рисунке 4.20, рекомендуется сохранить конструкции гасителей, аналогичные тем, что используются в схеме 3, а также внедрить растекатели треугольной формы в колодце (рис. 4.19) [56, 72]. Размеры этих растекателей были тщательно рассчитаны с целью предотвращения возникновения явлений кавитации и водоворотов в части расширяющегося водобойного колодца.

Растекатели установлены симметрично в три ряда с интервалом 7,5 м между ними.

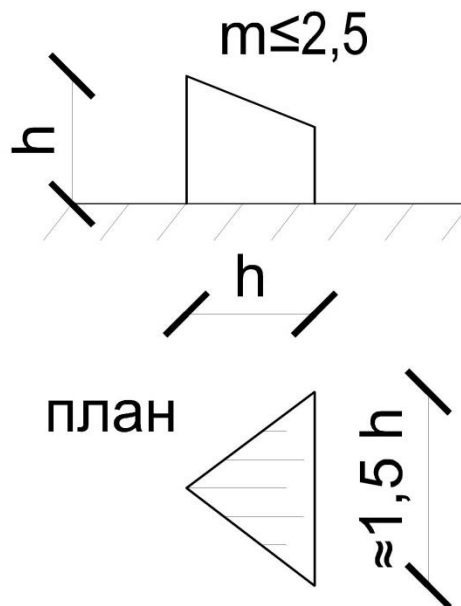
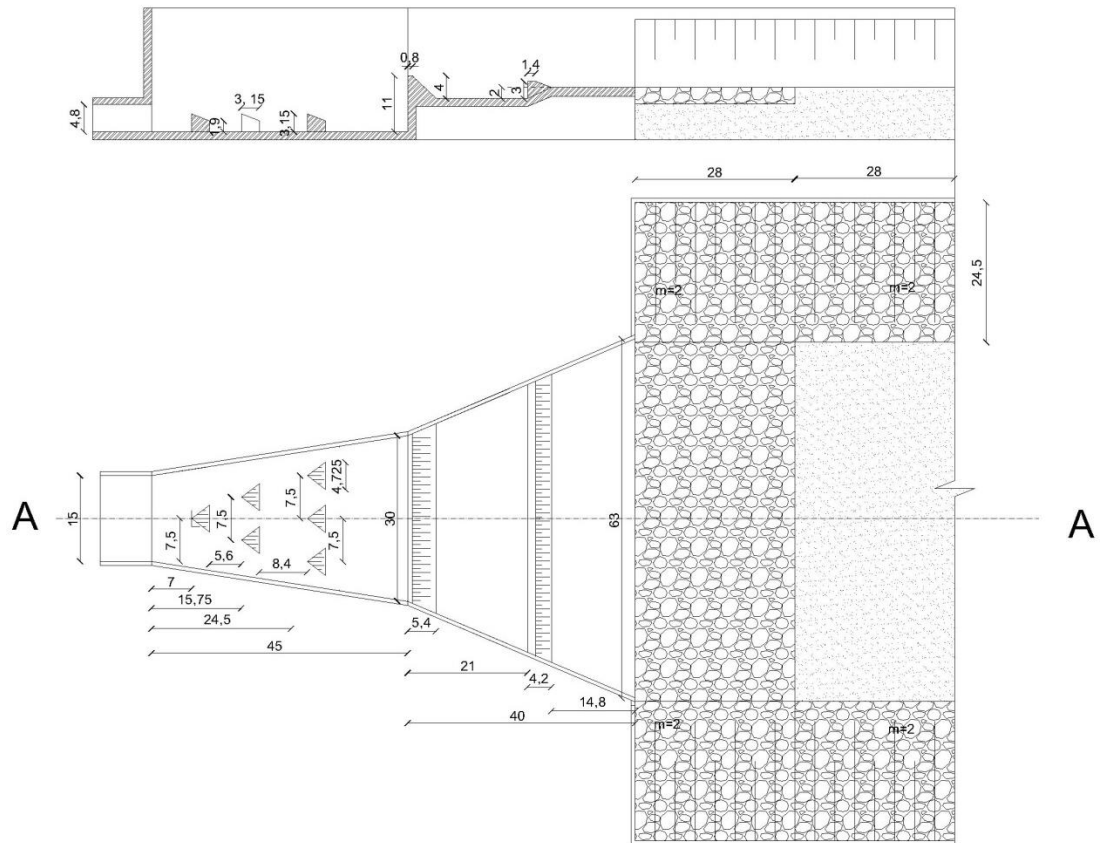


Рисунок 4.19- Тип растекателей, предложенный в исследовании [15, 63]



а)



б)

Рисунок 4.20 – Предлагаемая конструкция энергогасящих устройств в водобойном колодце с гасителями треугольной формы (схема 4)

а - детальный чертеж, б – исследуемая модель

Измерения скоростей проводились при расходе воды $900 \text{ м}^3/\text{с}$ в процессе функционирования шахтно-башенного водосброса с уровнем воды в нижнем бьефе $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$. На рис. 4.21 и 4.22 показаны результат измерений глубин и скоростей потока для схемы IV.

Максимальная донная скорость в поперечном сечении III - III и IV - IV достигает $2,90 \text{ м/с}$ и $2,58 \text{ м/с}$ в продольном сечении А-А (рис. 4.22).

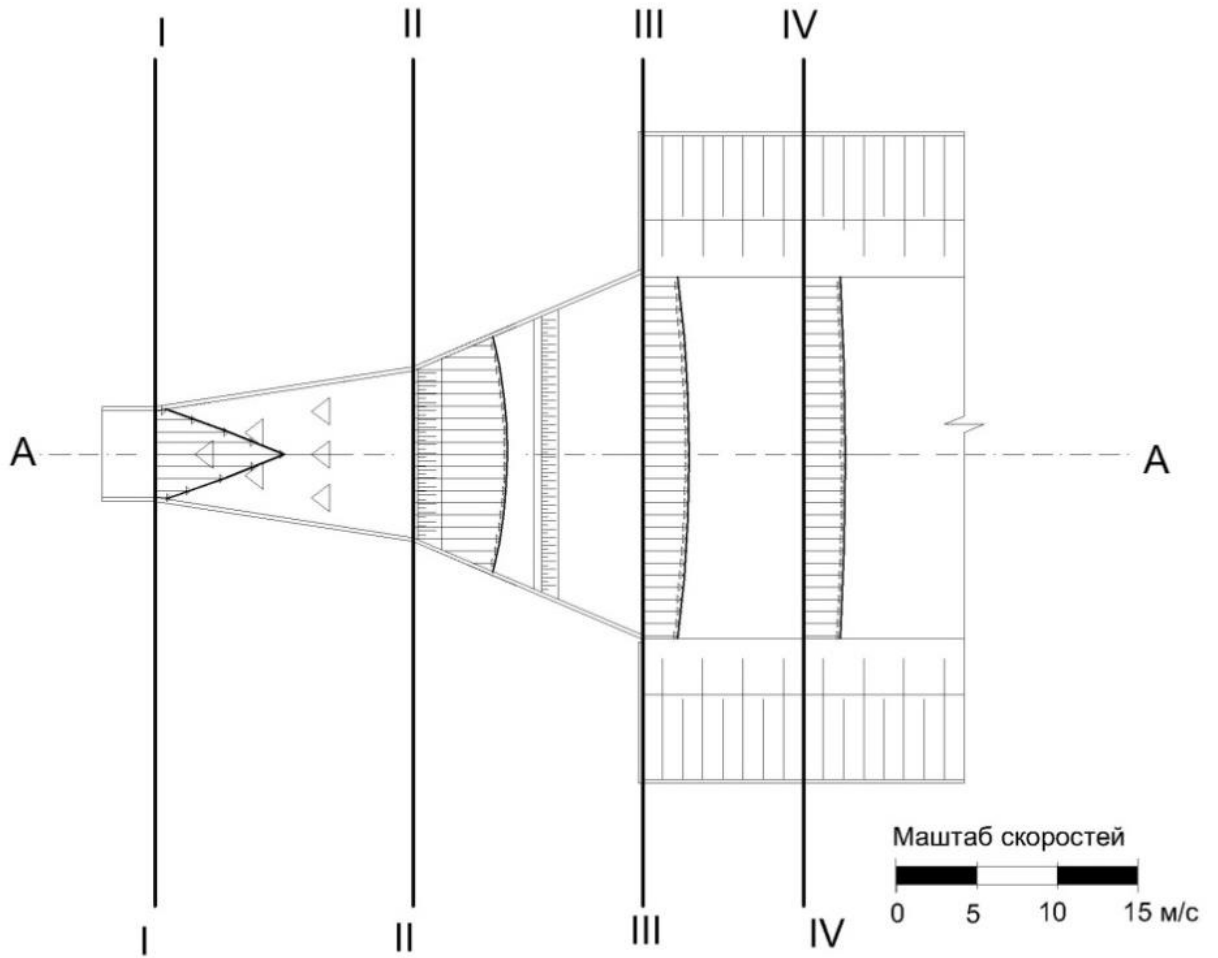
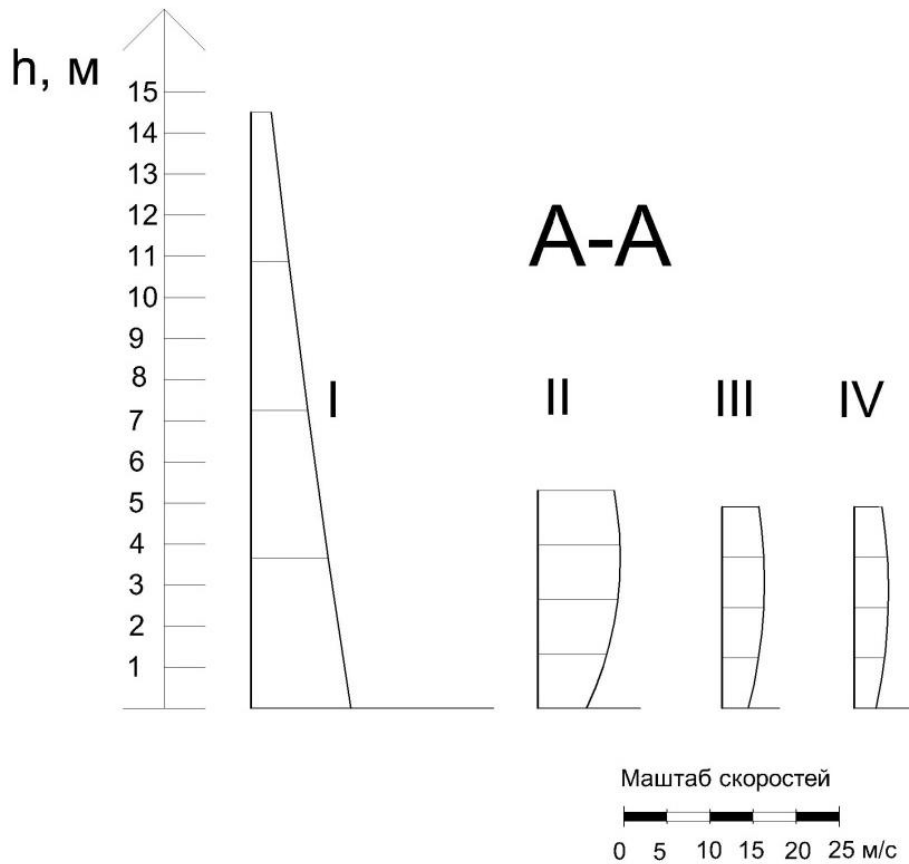


Рисунок 4.21 - Измеренные донные плановые эпюры скоростей (схема 4)



рисунк 4.22 - Эпюры скоростей в центральном продольном сечении А-А и поперечных створах I...IV (схема 4)

Глубина воды в водобойном колодце колеблется в диапазоне от 14,5 м до 16,3 м. В то же время глубина воды на рисберме изменяется от 5,3 м и в средней части углубленной области до 9,4 м, а затем снижается до 4,9 м ближе к ее концу (рис. 4.23).

Обнаружено, что скорости потока воды в поперечном сечении III - III и IV - IV согласно схеме 4 ниже, чем в схеме 3, однако различия не являются значительными. Также отмечена повышенная устойчивость движения воды в водобойном колодце при меньшем количестве вихрей, расположенных в начале колодца, что иллюстрируется (рис. 4.23).

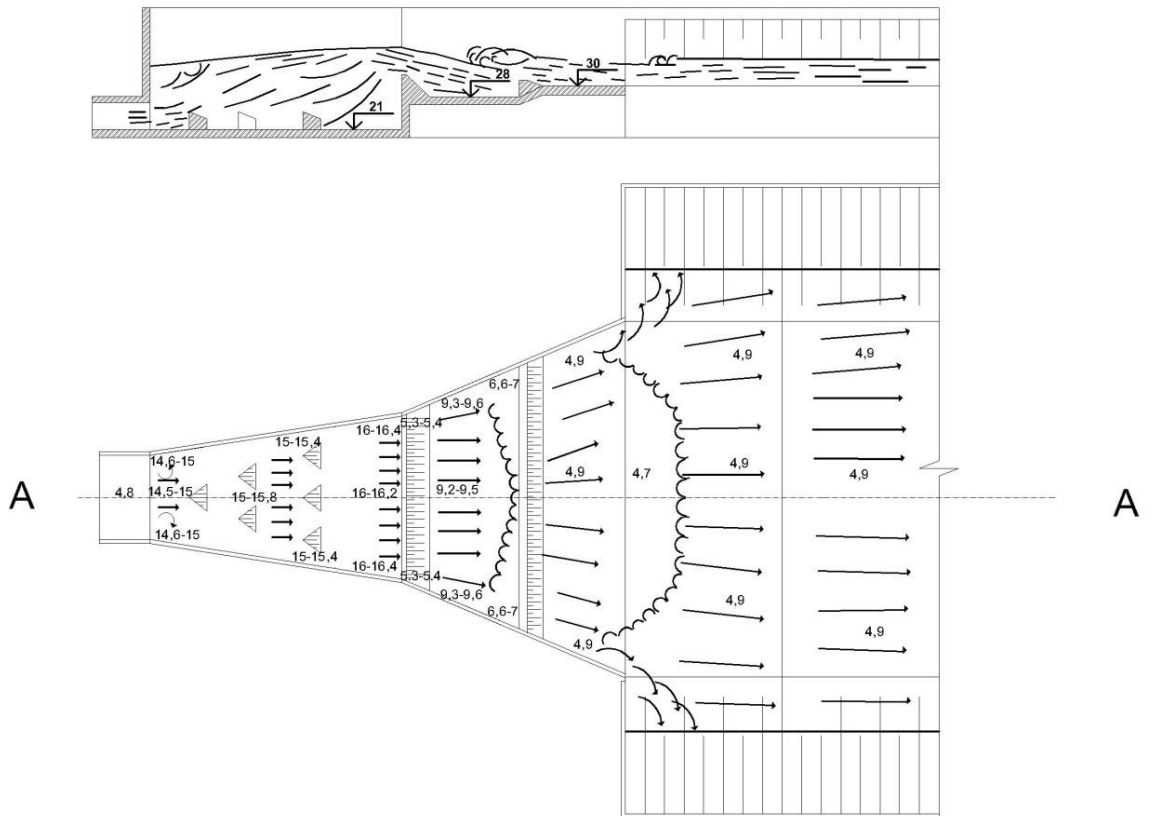


Рисунок 4.23 - Картина движения потока и глубины воды при $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$ (схема 4)



Рисунок 4.24 - Картина работы водобойного колодца при $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ $h_{НБ} = 4,9 \text{ м}$ (схема 4)

На основе проведенного анализа предыдущих результатов можно утверждать, что схема 4 демонстрирует высокую эффективность по сравнению с ранее исследованными схемами рассеивания энергии. В результате зафиксированы меньшие значения скорости в створе IV, распределены более равномерно по ширине из всех вариантов энергогасящих устройств, что обеспечивает равномерное распределение удельного расхода по ширине потока.

Максимальная скорость в сечении III - III остается ниже предельно допустимого значения, рассчитанного согласно формуле Ц.Е. Мирцхулавы, что продемонстрировано на рисунке 4.1. Для ковша с диаметром камня 20 см и уровнем воды 4,9 м расчетная допустимая скорость равняется $V_{Hдон} = 3,13$ м/с. Это указывает на то, что благодаря эффективности предложенных гасителей (схема 4), снижающих скорость потока и обеспечивающих хорошее равномерное распределение скоростей по сечению III - III, не происходит размывов и эрозий в зоне ковша (рис. 4.22).

В то же время, максимальная скорость в поперечном сечении IV - IV, равная $V_{Hmax} = 2,58$ м/с, превышает предельно допустимые показатели, установленные для грунта русла реки, зафиксированные на рисунке 4.1, где $V_{Hдон1} = 1,8$ м/с и $V_{Hдон2} = 1,9$ м/с. Это свидетельствует о наличии деформационных процессов, как в самой области русла, так и с вероятным распространением этих деформаций до глубины 2,5 м в пределах второго слоя исследуемой зоны. Установлено, что средняя скорость $V_{cp} = 2,52$ м/с в продольном сечении IV - IV является минимальной скоростью, которая может быть достигнута в этом сечении при условии полной диссипации энергии, при этом удельный расход равномерно распределен по всему продольному сечению IV - IV и превышает допустимые значения скоростей. Это не приводит к явлениям размыва, однако возникает необходимость в поиске инженерных решений, позволяющих увеличить допустимые скорости до уровней, превышающих фактические значения. Таким решением может быть, например, крепление дна и откосов отводящего канала камнем крупностью, которая обеспечит допустимые скорости, обеспечивающие отсутствие размывов русла.

Выводы по четвертой главе

В проектном варианте водобойного колодца (схема 1), при расходе $600 \text{ м}^3/\text{с}$, зарегистрированные скорости превышают допускаемые значения в створе IV – IV. Это свидетельствует о потенциальной угрозе возникновения размывов даже при расходе, меньшем максимального расхода, равного $900 \text{ м}^3/\text{с}$. Тем не менее, при достижении максимального эксплуатационного расхода, в створе III - III зафиксированы скорости, достигающие $4,7 \text{ м/с}$, что также превышает допустимые значения, несмотря на наличие крупных камней с диаметрами от 10 до 30 см. При функционировании обоих водосбросов и наличии значительной глубины потока воды в нижнем бьефе (9 м), нами отмечается, что скорости в створах III - III и IV – IV оказываются ниже допустимых, что указывает на невосприимчивость основания к размывам. Следовательно, установлено, что работа шахтно-башенного водосброса в эксплуатационный период представляет наибольший риск из-за формирования деформаций основания отводящего русла в нижнем бьефе за укрепленным участком сопряжения.

В ходе исследования была проанализирована эффективность работы каждого варианта водобойного колодца с энергогасящими гасителями (схемы 2, 3 и 4) в контексте рассеивания энергии водного потока, равномерного распределения удельного расхода и снижения максимальных скоростей в нижнем бьефе после рисбермы. Установлено, что максимальные скорости в створе III - III уменьшаются на 27,6% в схеме 2 по сравнению со схемой 1, на 33,8% в схеме 3 и на 38,2% в схеме 4. Эти результаты демонстрируют, что в рамках предложенных схем наблюдается тенденция к снижению скоростей, которые изначально превышали допустимые значения. Достижение показателей, обеспечивающих стабильность потока и предотвращающих размывы в нижнем бьефе на расстоянии 28 м от рисбермы, подтверждает успешность предложенных конструктивных решений.

В результате изучения гидравлической работы каждого из гасителей, установленных в схемах 2, 3 и 4, а также анализа результатов исследования

кинематики потока, было показано, что предложенная схема 4 демонстрирует в данных условиях наибольшую степень выравнивания скоростей и гашения энергии потока. Тем не менее, максимальная скорость, зафиксированная в створе IV, в значительной степени приближается к средней скорости в этом створе и превышает допустимые значения, при которых может происходить образование размывов отводящего канала и русла реки. Исходя из этого, можно заключить о целесообразности установки гасителей в водобойном колодце и на рисберме для снижения скорости потока и достижения более равномерного распределения удельного расхода по сечению. Это также позволит предотвратить образование размывов на расстоянии 28 м после створа III - III. Однако необходимо продолжить поиск дополнительных решений, направленных на обеспечение устойчивости грунта от начала створа IV - IV сечения на указанном расстоянии.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ГАСИТЕЛЕЙ

5.1 Сравнительный анализ эффективности исследованных схем энергогасителей

Выбор оптимальной схемы гасящих устройств нижнего бьефа водосбросного сооружения, способствующей наибольшему рассеиванию энергии и достижению допустимых скоростей в нижнем бьефе, осуществлялся на основе данных измерений, полученных в лабораторных условиях на физической модели в масштабе 1:70. Важными характеристиками для анализа и выводов являлись характер потока, его визуальная картина, глубины и скорости потока, особенно их распределение по длине и ширине водобойного колодца и рисберы.

Для формирования интегральной оценки эффективности экспериментально изученных схем был проведен анализ эпюр местных скоростей, представленных на рисунке 5.1, в области середины поперечного створа IV - IV, по оси А-А.

Анализ эпюр скорости разных схем демонстрирует снижение значений скорости в схемах 2, 3 и 4, что обусловлено введением энергогасителей и увеличением глубины участка рисбермы. При этом в схеме 4 устанавливается минимально возможная скорость в сечении IV - IV при фиксированной (для всех схем) глубине воды в нижнем бьефе. Это снижение достигается благодаря подобранным гасящим устройствам, которые приводят к оптимальному распределению скоростей по всему створу, что в свою очередь позволяет максимально приблизить их к средним значениям скоростей.

Полученные результаты приведены на рисунке 5.1 и в таблице 5.1.

Таблица 5.1- Определение удельной энергии потока в створе IV - IV

Расход Q_H , $\text{м}^3/\text{с}$	Глубина а $h_{Ив.}$, м	Ско рость $v_{срн.}$, м/с	Скоро -стной напор $h_{v_{срн.}}$, м	Полная удельная энергия E_I , м	Глубина $h_{нб.}$, м	Ско рость $v_{срн.}$, м/с	Скоро -стной напор $h_{v_{срн.}}$, м	Удельна я энергия сечения $E_{IV.}$, м	$E_I -$ $E_{IV.}$, м
Схема 1									
300	9,10	2,20	0,25	9,35	3,1	2,20	0,25	3,35	6,00
450	9,73	3,08	0,48	10,21	3,73	2,64	0,36	4,09	6,13
600	10,30	3,88	0,77	11,07	4,3	2,92	0,43	4,73	6,33
750	10,80	4,63	1,09	11,89	4,7	3,60	0,66	5,36	6,53
900	11,00	5,45	1,52	12,52	4,9	4,20	0,90	5,80	6,72
Схема 2									
300	9,10	2,20	0,25	9,35	3,1	1,82	0,17	3,27	6,08
450	9,73	3,08	0,48	10,21	3,73	2,3	0,27	4,00	6,21
600	10,30	3,88	0,77	11,07	4,3	2,45	0,31	4,61	6,46
750	10,80	4,63	1,09	11,89	4,7	2,7	0,37	5,07	6,82
900	11,00	5,45	1,52	12,52	4,9	3	0,46	5,36	7,16
Схема 3									
300	9,10	2,20	0,25	9,35	3,1	1,62	0,13	3,23	6,11
450	9,73	3,08	0,48	10,21	3,73	1,95	0,19	3,92	6,29
600	10,30	3,88	0,77	11,07	4,3	2,25	0,26	4,56	6,51
750	10,80	4,63	1,09	11,89	4,7	2,45	0,31	5,01	6,89
900	11,00	5,45	1,52	12,52	4,9	2,75	0,39	5,29	7,23
Схема 4									
300	9,10	2,20	0,25	9,35	3,1	1,42	0,10	3,20	6,14
450	9,73	3,08	0,48	10,21	3,73	1,74	0,15	3,88	6,33
600	10,30	3,88	0,77	11,07	4,3	2	0,20	4,50	6,56
750	10,80	4,63	1,09	11,89	4,7	2,3	0,27	4,97	6,92
900	11,00	5,45	1,52	12,52	4,9	2,58	0,34	5,24	7,28

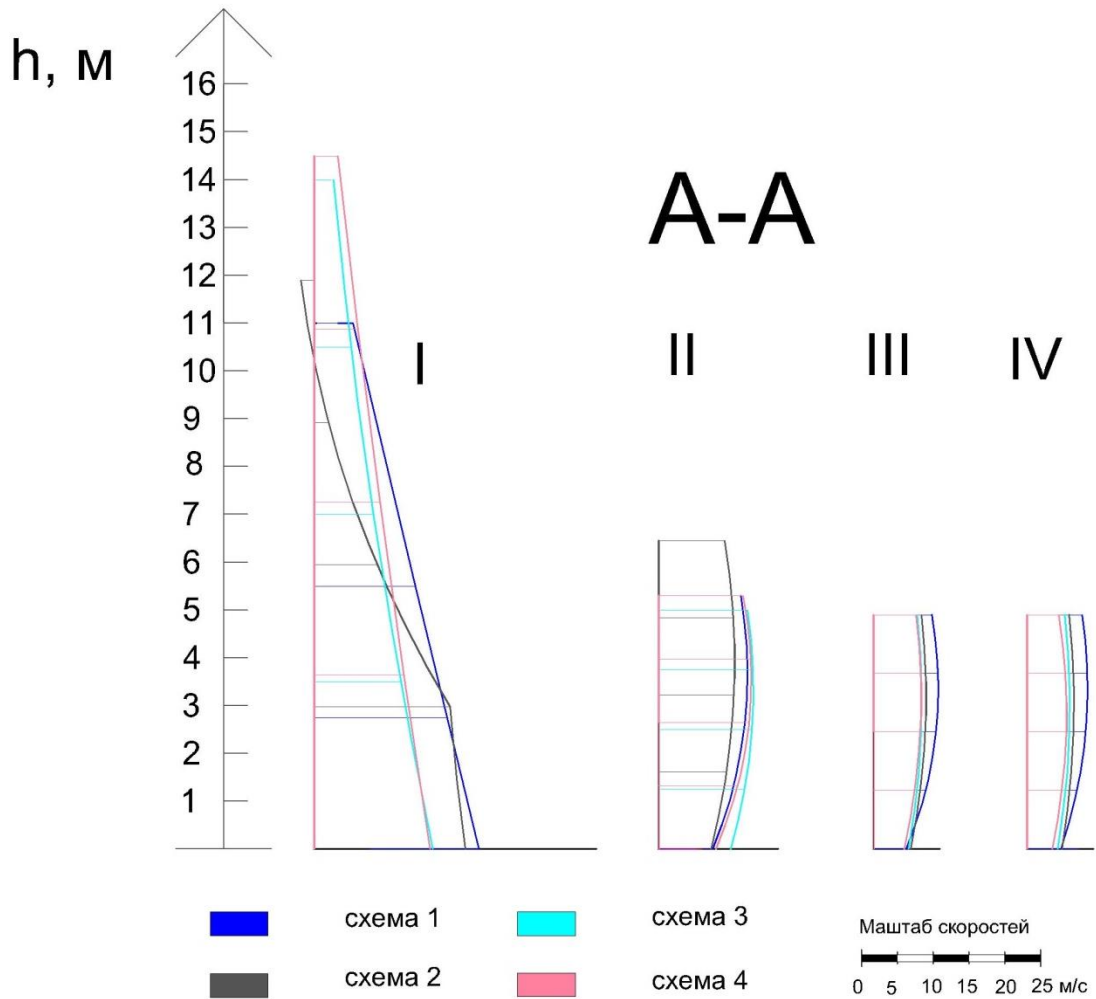
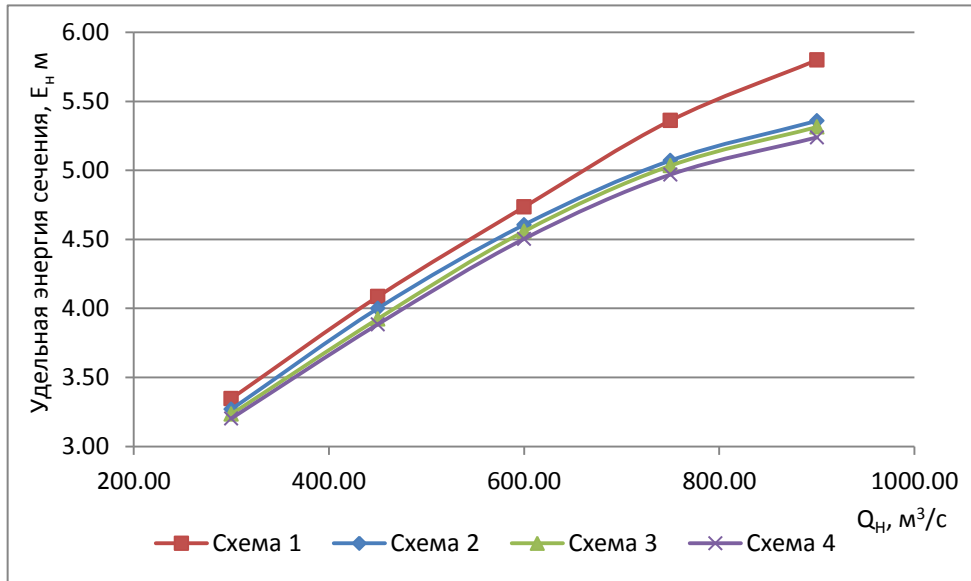


Рисунок 5.1 - Эпюры скоростей в центральном продольном сечении А-А и поперечном створе IV - IV

Избыточная энергия водного потока, погашенная с использованием энергогасящих устройств, оценивалась на основании разности между удельной энергией в сечении при исследуемой схеме и удельной энергией в сечении при схеме 1, при которой энергогасящие устройства не были применены (рис. 5.2).



рисунк 5.2 - Кривые изменения удельной энергии потока в сечении поперечного створа IV - IV при разных расходах

Для оценки эффективности той или иной конструкции необходимо определить коэффициент гашения в поперечном створе n:

$$k_n = \frac{E_I - E_n}{E_I} \quad (5.1)$$

Для анализа и сравнения полученных результатов, а также выбора в результате этого наиболее эффективного типа, формы и размеров гасителей были определены коэффициенты потерь избыточной энергии потока по длине колодца от его начала до створа IV – IV для разных схем водобойного колодца. Итоги расчета коэффициента «к» представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Определение коэффициента потерь энергии по длине водобойного колодца от его начала до поперечного створа IV - IV

Расход $Q_n, \text{ м}^3/\text{с}$	Полная удельная энергия $E_I, \text{ м}$	Удельная энергия сечения $E_{IV}, \text{ м}$	$E_I - E_{IV}, \text{ м}$	$k = \frac{E_I - E_{IV}}{E_I}$
Схема 1				
300	9,35	3,35	6,00	0,64
450	10,21	4,09	6,13	0,60
600	11,07	4,73	6,33	0,57
750	11,89	5,36	6,53	0,55
900	12,52	5,80	6,72	0,54

Приложение к таблице 5.2:

Расход $Q_H, \text{ м}^3/\text{с}$	Полная удельная энергия $E_I, \text{ м}$	Удельная энергия сечения $E_{IV}, \text{ м}$	$E_I - E_{IV},$ м	$k = \frac{E_I - E_{IV}}{E_I}$
Схема 2				
300	9,35	3,27	3,27	0,65
450	10,21	4,00	4,00	0,61
600	11,07	4,61	4,61	0,58
750	11,89	5,07	5,07	0,57
900	12,52	5,36	5,36	0,57
Схема 3				
300	9,35	3,23	6,11	0,65
450	10,21	3,92	6,29	0,62
600	11,07	4,56	6,51	0,59
750	11,89	5,01	6,89	0,58
900	12,52	5,29	7,23	0,58
Схема 4				
300	9,35	3,20	6,14	0,66
450	10,21	3,88	6,33	0,62
600	11,07	4,50	6,56	0,59
750	11,89	4,97	6,92	0,58
900	12,52	5,24	7,28	0,58

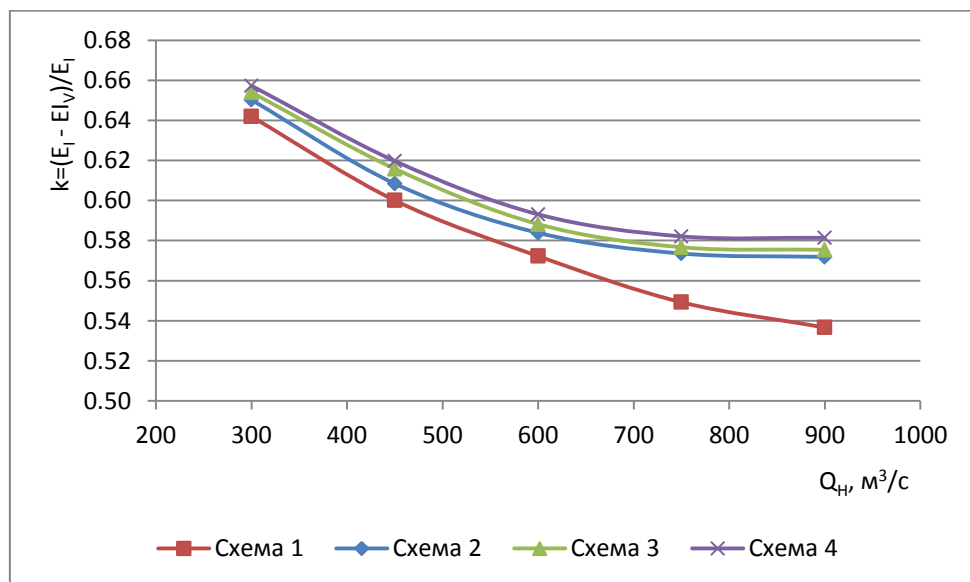


Рисунок 5.3 - Зависимость коэффициента потерь избыточной энергии «k» от расхода Q для исследованных схем водобойного колодца

Коэффициент потерь избыточной энергии потока по длине энергогасящих устройств нижнего бьефа демонстрирует стабильно высокие значения при работе водобойного колодца (схема 4) по сравнению с другими исследованными схемами.

Коэффициент гашения, представляемый в виде ($k = [E_I - E_{IV}] / [E_I]$), отражает общие потери избыточной энергии на участке от входного сечения в водобойный колодец до исследуемого сечения IV - IV. Для оценки дополнительных потерь напора, возникающих исключительно в результате установки гасителей, необходимо вычесть коэффициент гашения, полученный при проектном варианте схемы 1.

Расчеты были выполнены на основе формулы 5.2, и полученные результаты приведены в таблице 5.3. На основании формулы (5.2) были выполнены расчеты, результаты представлены в таблице 5.3.

$$k_{ш} = (k - k_I) \quad (5.2)$$

где: ($k_{ш}$) - это дополнительные потери избыточной энергии относительно проектного варианта (схема 1); k - общие потери напора; k_I - потери напора, при проектном варианте схемы 1.

Таблица 5.3 - Определение эффективности исследованных гасителей энергии

Расход $Q_{H..}$, $м^3/с$	Схема	Схема		Схема		Схема	
	1	2	3	4	5	6	7
	$K, [\%]$	Общий $K, [\%]$	Потери из за гасителей $[\%]$	Общий $K, [\%]$	Потери из за гасителей $[\%]$	Общий $K, [\%]$	Потери из за гасителей $[\%]$
300	64,19	65,03	0,83	65,40	1,21	65,73	1,54
450	60,01	60,84	0,84	61,59	1,58	61,97	1,97
600	57,23	58,39	1,16	58,82	1,60	59,31	2,08
750	54,92	57,35	2,43	57,67	2,75	58,21	3,29
900	53,67	57,19	3,52	57,54	3,88	58,14	4,47

На рисунке 5.4 представлена зависимость дополнительных потерь избыточной энергии потока от расхода для разных схем установки гасителей

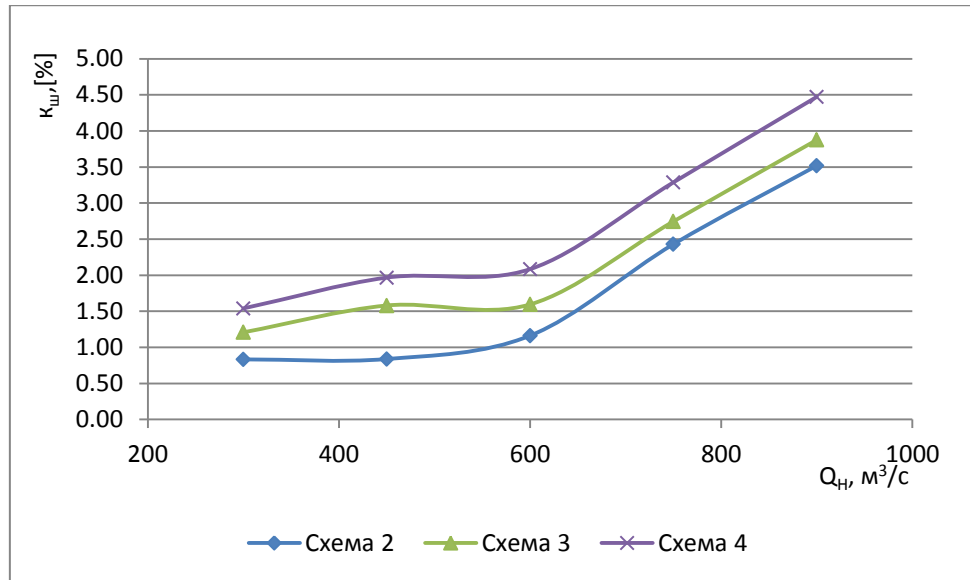


Рисунок 5.4 - Зависимость дополнительных потерь избыточной энергии потока от расхода при разных схемах установки гасителей на дне выходного оголовка

5.1 Оценка устойчивости грунта за жёсткой рисбермой в нижнем бьефе шахтно-башенного водосброса

На основании полученных результатов можно назначить необходимые параметры ковша, соответствующие длине участка, закреплённого крупным камнем и ранее подверженному размыву при эксплуатации, а также определить диаметры камня, который следует положить за рисбермой, обеспечивающие отсутствие размыва на дне нижнего бьефа за креплённой частью данного водосброса. Таким образом организовать гибкую часть рисбермы, удлинив её на необходимую величину. Для осуществления такого анализа допускаемые скорости представлены в таблице 4.2. Необходимо провести сопоставление с максимальными фактическими скоростями, возникающими при прохождении максимального эксплуатационного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ в створах III - III и IV - IV для предложенной схемы 4, которая обеспечивает минимальные значения скорости и оптимальное распределение удельного расхода по поперечным сечениям. Сравнение скоростей представлено в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Сравнение максимальных скоростей (схема 4) в створах III - III и IV - IV с допускаемыми скоростями при работе водосброса с расходом $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ и глубине на рисберме $h_{нб} = 4,9 \text{ м}$

	III	IV
$V_{Hmax}, \text{ м/с}$	2,90	2,58
$V_{Hдон1}, \text{ м/с}$	3,13	1,80

Можно констатировать, что в створе III - III и на расстоянии 28 м после рисбермы никаких размывов в грунте не происходит, поскольку максимальная скорость меньше, чем допустимая для крепления камнем больших диаметров (0,1–0,3) м.

При этом следует отметить, что на расстоянии 28 м от рисбермы и после сечения IV - IV, где залегают естественные грунты, максимальные скорости превышают допустимые значения. Следовательно, можно сделать вывод о том, что с начала сечения IV – IV, и на расстоянии 28 метров от конца расширения конструкции нижнего бьефа, возможен размыв, достигающий глубины до 2,5 м.

Необходимые средние диаметры грунта, устойчивого против размыва, рассчитывались исходя из максимальных значений фактических скоростей $V = 2,58 \text{ м/с}$, при максимальном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$. Используя формулу Ц.Е. Мирцхулавы с помощью программы Excel по формуле (2.14) было получено, что при $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ и $h_{нб} = 4,9 \text{ м}$ для защиты от размыва необходим минимальный диаметр каменного крепления более $d_{cp} = 0.083 \text{ м} \approx 9 \text{ см}$. Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения устойчивой и безопасной для других сооружений гидроузла работы нижнего бьефа целесообразно за концевым сечением существующего и заполненного крупным камнем ковша устроить крепление из отсыпки более мелким камнем с диаметром не менее 9 см глубиной до 0,5 м на длину 28 м от створа IV, то есть создать при реконструкции или капитальном ремонте за бетонным участком рисбермы гибкую концевую часть

рисбермы из каменной наброски, которую можно даже закончить зубом из бетона, камня или габионных структур глубиной не более 1 м (рис.5.5) [3].

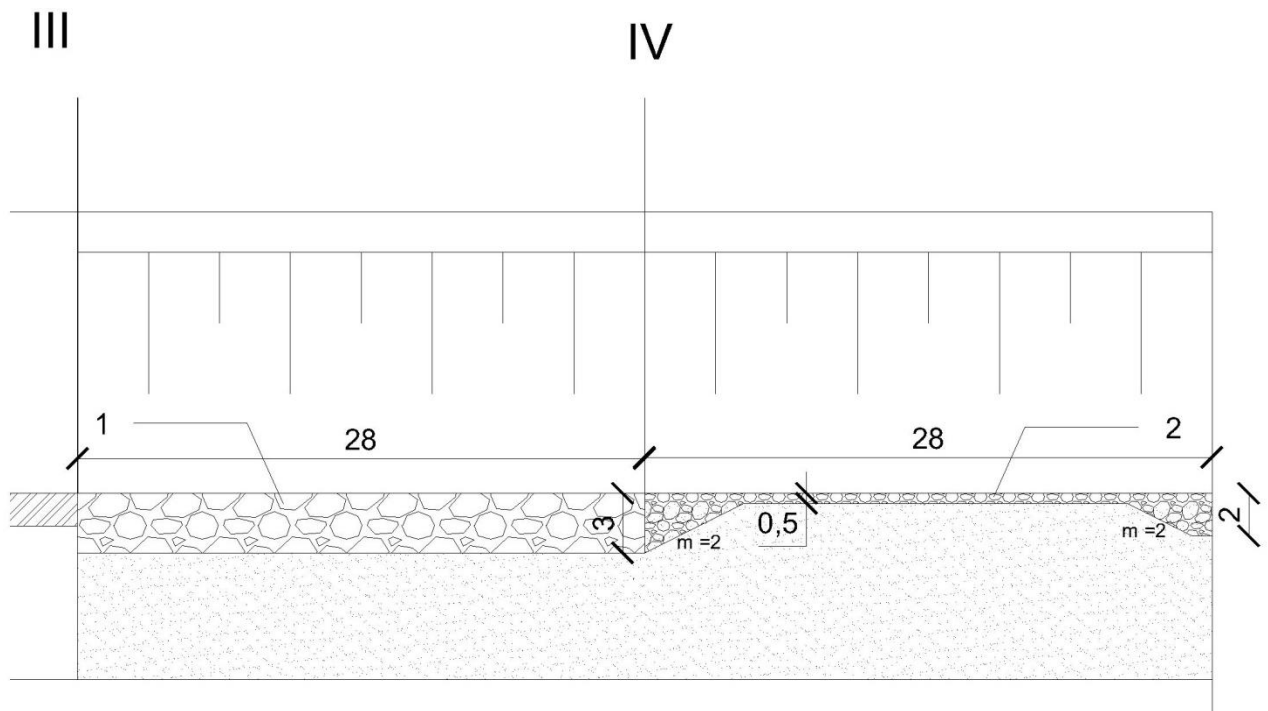


Рисунок 5.5 - Продольный разрез исследуемой части крепления в нижнем бьефе после внесения предложений:

1 – существовавшая ранее часть крепления с диаметром камня ($d = 0,1...0,3$) м; 2 - предлагаемая часть крепления с диаметром камня $d_{ср\ доп} > 9$ см

Выводы по пятой главе

Оптимизация схемы гашения: сравнительный анализ показал, что выбор оптимальной схемы расстановки энергогасителей, направленной на гашение и рассеивание энергии, существенно снижает скорость потока в нижнем бьефе.

Влияние установки гасителей: исследования показали, что установка гасителей в нижнем бьефе шахно-башенного водосброса оказывает значительное влияние на распределение скоростей как по длине, так и по ширине и глубине потока. Анализ эпюр скоростей выявил снижение скорости в области поперечного створа IV - IV, что связано с улучшением гидравлических условий. Это может

способствовать более равномерному распределению потока по ширине и улучшению режима движения в водобойном колодце, снижению пульсационных нагрузок на поверхности укрепления и энергогасители.

Коэффициенты потерь энергии: Анализ коэффициента потерь избыточной энергии в энергогасящих и рассеивающих устройствах показал, что схема 4 придаёт наиболее стабильные условия работы как водобоя, рисбермы, так и всего граничного участка сопряжения русла реки, что свидетельствует о ее высокой эффективности в управлении избыточной энергией потока.

Сравнительный анализ эффективности: Данные, включающие коэффициенты гашения и местные скорости потока, позволяют сформулировать интегральную оценку эффективности исследуемых схем. Расчеты, основанные на законе сохранения энергии, подтверждают, что оптимальные параметры гасителей значительно снижают избыточную энергию потока, что имеет важное значение для проектирования гидросистем.

Существующие натурные наблюдения и проведённые аналитические и экспериментальные модельные исследования выходного участка за шахтно-башенным водосбросом гидроузла 16 Тишрин на реке Северный Кебир показали, что скорости, возникающие при максимальных эксплуатационных расходах, вызывают размыв дна нижнего бьефа за рисбермой, несмотря на наличие выполненного в соответствии с проектом ковша, что угрожает безопасности водосбросного сооружения и плотины в целом.

На основе выполненных лабораторных исследований предложен вариант решения проблемы повышения надёжности работы всего гидроузла удлинением крепления горизонтальной рисбермы после конечного участка в виде ковша на оптимальное расстояние с крупностью камня и толщиной крепления, обеспечивающих отсутствие размыва нижнего бьефа, что можно считать наиболее экономичным и достаточно практичным решением, а также из-за простоты возможности его реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной диссертационной работе проведён анализ научно-технической литературы и результатов модельных гидравлических исследований, посвящённых роли энергогасящих конструкций в гидротехнике. Исследования различных авторов способствовали выработке методов, направленных на минимизацию неблагоприятного воздействия кинетической энергии водных потоков. Установлено, что такие проблемы, касающиеся гашения энергии потока, продолжают оставаться актуальными в практике проектирования и строительства гидротехнических объектов.

2. Анализ причин деформаций нижнего бьефа за водосбросными сооружениями с расширяющимся водобоем и расчёты прогноза деформаций русла реки Северный Кебир (САР), показал необходимость изучения воздействия потока на устройства как деформируемого участка за сооружением, так и конструкций гасящих устройств на дне выходного оголовка. Высокая скорость потока воды, особенно на выходе из нерегулируемого шахтно-башенного водосброса, требует особого внимания к конструкции водобойного колодца, так как резкое увеличение размыва за креплением может снизить эффективность его воздействия на поток и привести к размывам и разрушениям в нижнем бьефе гидроузла. Рассмотренные в данной работе расчёты, носят предварительный, качественный характер, что связано со сложностью экзогенных процессов, вызывающих протекание размывов и соответствующих переформирований неукреплённых деформируемых русел водотоков. Тем не менее, полученные данные могут быть приняты в качестве первого приближения для разработки мероприятий, обеспечивающих сохранность ценных пойменных земель в нижнем течении реки Северный Кебир (САР), предотвращения деградации берегов, улучшения эксплуатационных характеристик водосброса, повышения надёжности работы всех водопропускных сооружений гидроузла и безопасности прилегающих к нему территорий.

3. Экспериментальные исследования модели фрагмента нижнего бьефа за водосбросом, применительно к условиям гидроузла 16 Тишрин на р. Северный Кебир, показали, что при расходе $600 \text{ м}^3/\text{с}$ зарегистрированные скорости после укрепленного участка нижнего бьефа (после створа IV – IV) превышают допустимые, что свидетельствует о потенциальной угрозе размыва даже при меньших значениях расхода по сравнению с максимальным ($900 \text{ м}^3/\text{с}$). При максимальном эксплуатационном расходе скорости в створе III - III также достигают значений, превышающих допустимые, что указывает на возможный риск возникновения деформаций в нижнем бьефе.

4. Анализ работы трех вариантов конструкций устройств нижнего бьефа при установке энергогасителей схем 2, 3 и 4 показал снижение максимальных скоростей в контрольных створах, что способствует снижению риска размыва русла. В частности, предложенные схемы гашения позволяют уменьшить значения скорости на $27,6\% \dots 38,2\%$, в зависимости от типа разработанной конструкции. Это указывает на то, что установка гасителей и растекателей потока действительно эффективна для обеспечения стабильности и безопасности гидротехнических сооружений разной степени ответственности.

В результате анализа работы предложенных конструктивных решений расширяющегося выходного участка за водосбросом с гасителями схем 2, 3 и 4 установлено, что схема 4 способствует стабилизации гидравлического режима потока, снижению расхода и более равномерному распределению кинематических характеристик потока по ширине отводящего участка, обеспечивая наилучшие условия для уменьшения скорости до минимально возможного значения и выравнивания удельных расходов на концевых участках рисбермы. Это может предотвратить эрозионные процессы на расстоянии не менее 28 метров (после створа III – III) и повысить долговечность конструкций. Тем не менее, значения скоростей в створе IV - IV наблюдаются выше допустимых, что сохраняет вероятность риска возникновения размывов русла.

5. В результате лабораторных исследований был разработан подход к повышению надежности функционирования гидроузла после реновации,

закрывающийся в удлинении крепления горизонтальной рисбермы за концевым участком в виде засыпанного ковша на оптимальное расстояние с учетом размера камня и толщины крепления. Данная мера направлена на предотвращение размыва нижнего бьефа и может рассматриваться как наиболее экономичное и практичное решение, учитывая низкие затраты по его устройству, а также простоту реализации данного подхода в процессе ремонтных работ.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития темы исследований

Дальнейшие исследования и разработки в данной области представляют собой необходимость изучения для оптимизации проектирования новых, реконструкции и повышения эффективности действующих, локальных гидротехнических сооружений, гидроузлов и гидросистем разного назначения. Исследования должны быть направлены на совершенствование конструкций энергогасящих устройств на расширяющихся участках крепления нижнего бьефа за нерегулируемыми водосбросами, методов расчёта и прогнозирования параметров размыва деформируемого русла и выбора оптимальной конструкции концевого устройства, обеспечивающих надёжность и безопасность работы как всего гидроузла в целом, так и прилегающих участков реки за ним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян, О.М. Основы гидравлики бурных потоков / О.М. Айвазян. – М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 266 с.
2. Алсадек, Е.С. Выбор параметров водоотводящей трубы шахтного водосброса-гидроузла Тишрин в Сирийской арабской Республике / Е.С. Алсадек // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения : Материалы XIV Национальной конференции с международным участием, Саратов, 25–26 апреля 2024 года.
3. Алсадек, Е.С. Крепление в нижнем бьефе шахтно-башенного водосброса гидроузла "16 Тишрин" / Е. С. Алсадек // Природообустройство. – 2024. – № 3. – С. 63-70.
4. Алсадек, Е.С. Некоторые закономерности строения русла реки Северный Кебир в САР / Е. С. Алсадек // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова : сборник статей, Москва, 06–08 июня 2022 года. Том 1. – Москва.
5. Алсадек, Е.С. Теоретическое обоснование методики прогноза формирования русла реки Северный Кебир (САР) с использованием морфометрических зависимостей и гидравлических закономерностей движения воды / Е.С. Алсадек, А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Гидротехническое строительство. 2022. № 10. С. 45-51.
6. Альтшуль, А.Д. Примеры расчетов по гидравлике / А.Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1982. – 255 с.
7. Беглярова, Э.С. Исследование гидравлического прыжка в плавно расширяющемся прямоугольном русле: диссертация кандидата технических наук / Э.С. Беглярова. – М., 1973. – 162 с.

8. Беляшевский, Н.Н. Расчеты нижнего бьефа за водосбросными сооружениями на нескальных основаниях / Н.Н. Беляшевский, Н.Г. Пивовар, И.И. Калантыренко. – Киев: Наукова думка, 1973. – 292 с.
9. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол // Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 408 с.
10. Бендат, Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа / Дж. Бендат, А. Пирсол // Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
11. Бойко, И.М. Определение оптимальных размеров водобойного колодца/ И.М. Бойко // Изв.вузов СССР. Строительство и архитектура. – 1977. – М 5. – С.94-97.
12. Вагабов, Р.М. Влияние изменения геометрических параметров водобойного колодца на кинематическую структуру потока / Р.М. Вагабов // Труды АЗНИИ водных проблем, вып. IX. – Баку: – 1980. – С. 152-158.
13. Векслер, А.Б. Гидравлические расчёты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / А.Б. Векслер.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.
14. Великанов, М.А. Руслевой процесс / М.А. Великанов. -М., Физматгиз, 1958.
15. Водопропускные гидротехнические сооружения (водосбросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования. Свод правил. СП 290. 1325800, п. 4.11. 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074911>
16. Волков, В.И. Лабораторные исследования открытых водосбросов / В.И. Волков, О.Н. Черных, В.И. Алтунин. – М.: Из-во ФГБОУ ВПО МГУП, – 2013. – 150 с.
17. Волков, В.И. Открытые береговые водосбросы / В.И. Волков, О.Н. Черных, И.С. Румянцев, и др. – М.: Из-во ФГБОУ ВПО МГУП, – 2012. – 243 с.
18. Волков, В.И. Лабораторные исследования открытых водосбросов / В.И. Волков, В.И. Алтунин, О.Н. Черных. М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 150 с.

19. Вызго, М.С. Об исследованиях длины совершенно незатопленного гидравлического прыжка / М.С. Вызго // Гидравлическое строительство, 1965. – С. 8. – С.69-72.
20. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений (справочное пособие) . – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с., ил.
21. Гунько, Ф.Г. Гасители энергии и маневрирование затворами как мероприятия по борьбе с местными размывами в нижнем бьефе гидроузлов / Ф.Г. Гунько // Тр. координ.совещ.по гидротехнике. – Л., 1965. – Вып.15. – С.69-82.
22. Гунько, Ф.Г. Классификация форм сопряжения бьефов в пространственных условиях для случаев плотин с уступом при гладком водобое и без уступа при наличии водобойной стенки / Ф.Г. Гунько // Изв.ВНИИГ им.Веденеева. – Л., 1958. – Т.58. – С.85-106.
23. Гунько, Ф.Г. О гидравлическом прыжке и сопряженных глубинах в пространственных условиях / Ф.Г. Гунько // Тр.Изв.ВНИИГ им.Веденеева. – Л., 1958. – Т.59. – С.100-119.
24. Гурьев, А.П. Влияние конструктивных параметров водобойного колодца на гашение энергии потока / А.П. Гурьев, Н.В. Ханов // Природообустройство. – 2015. – №4. – С. 48-51.
25. Гурьев, А.П. Модельные гидравлические исследования водосброса №2 Богучанской ГЭС с отбросом струи с длинными разделительными стенками / А.П. Гурьев, И.С. Румянцев, Д.В. Козлов, Н.В. Ханов и др. // Приволжский.
26. Ершов, К.С. Гидравлическое обоснование методов прогноза пропускной способности высокопороговых водосбросов с горизонтальной вставкой на гребне. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.23.07 / Ершов Константин Сергеевич. – Москва, 2011. – 161 с.
27. Железняков, Г. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика / Г. Железняков, Ю. Ибадзаде, П. Иванов, и др.; под ред. В.П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.

28. Защита от размыва русла и нижних бьефов водосбросов (рекомендации по проектированию). - М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1974.
29. Иванков, М.Т. Некоторые результаты исследования поля скоростей в нижнем бьефе / М.Т. Иванков // Изв.вузов СССР. Строительство и архитектура, 1970. – С.116-120.
30. Кавешников, Н.Т. Исследование кинематических характеристик потока в нижнем бьефе трубчатых сооружений: гидравлика дорожных водопропускных сооружений / Н.Т. Кавешников. – Гомель: БелИИЖТ, 1973. – С. 237 – 240.
31. Кавешников, Н.Т. Устройство нижнего бьефа водосбросов / Н.Т. Кавешников, Е.И. Китов, О.Н. Черных и др.; под ред. проф. Розанова Н.П. – М.:Колос, 1984. – 269 с.
32. Киселёв, П.Г. Справочник по гидравлическим расчётам / П.Г Киселёв. "Энергия". М., 1972.
33. Киселев, П.Г. Влияние поравномерностей распределения скоростей в поперечном сечении потока на величину сопряженных глубин / П.Г Киселев. Тр.МИСИ им. Куйбышева. – М., 1976. – Т.148. – С.18-24.
34. Коновалов, И.М. Построение долы скоростей на участке затопленного гидравлического прыжка / И.М. Коновалов, В.В. Баланин, В.М. Селезнев // Гидротехническое строительство, 1962. – № 7. – С.40-43.
35. Крупнов, Н.В. Гидродинамические воздействия потока на гасители энергии и борьба со сбйными течениями в нижнем бьефе плотин низкого и среднего напора: Дисс. ... канд.техн.наук / Н.В. Крупнов. – М., 1984. – 206 с.
36. Кумин, Д.И. О рассеивании энергии в нижнем бьефе и влияние на выбор длины крепления / Д.И. Кумин. Изв.ВНИИГ. – М. – Л., 1951. – П 46.
37. Кавешникови, Н.Т. Лабораторные работы по гидротехническим сооружениям: учебное пособие / Н.Т. Кавешникови др. под ред. Н. П. Розанова – М.: Агропромиздат, 1989. – 208 с.
38. Леви, И.И. Инженерная гидрология / И.И. Леви. - М.: Высшая школа, 1968.

39. Леви, И.И. Движение речных потоков в нижних бьефах гидротехнических сооружений / И. И. Леви. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1979. – 265с.
40. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений / И.И. Леви. – Л.: Энергия, 1957. – 252 с.
41. Лохтин, В.М. О механизме речного русла / В.М. Лохтин. Спб., 1897.
42. Лятхер, В.М. Турбулентность в гидросооружениях / В.М. Лятхер. – М.: Энергии, 1968, – 408.
43. Лятхер, В.М. Гидравлическое моделирование / В.М. Лятхер, А.М. Прудовский – М.: Энергоатомиздат, 1984. - 352 с.
44. Маккавеев, Н.И. Русло реки и эрозия в её бассейне / Н.И. Маккавеев. Изд. АН СССР. М., 1955.
45. Маккавеев, Н.И. Показатель устойчивости русла реки / Н.И. Маккавеев, С.Г. Шатаева, М.Н. Митякова. Метеорология и гидрология, №5. 1967.
46. Мвуйекуре, Ж.К. Экспериментальное обоснование параметров гасителей ударного действия трубчатых водовыпусков : дисс. ...канд. техн. наук: 05.23.07 / Мвуйекуре Жан Клод. - Москва, 2016. - 157 с.
47. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости / Ц.Е. Мирцхулава. М.: Колос, 1967.
48. Мосбах, А. Совершенствование конструкций и метод расчетов концевых частей трубчатых водопропускных сооружений с многосекционными гасителями ударного действия: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Мосбах Абдельхалим. – М., 1993. – 159 с.
49. Пашков, Н.Н. Расчет гасителей шашечного типа за трубчатыми водосбросами / Н.Н. Пашков // Тр.МИМИ. – М., 1958. – Вып. I , № 24. – С.65-90.
50. Петров, Е.Ф. Гаситель энергии ударного действия в концевых частях трубчатых водопропускных сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Евгений Федорович Петров. – М., 1990. – 242 с.
51. Пикалов, Ф.И. О форме сопряжения быстротока с нижним оьефом / Ф.И. Пикалов. Труды института "Гидротехники и мелиорации". - 1985. - XII.

52. Проектирование речных гидроузлов на не скальных основаниях / Под ред. М.М. Гришина и А.В. Михайлова. – М.: Энергия, 1967.
53. Рассказов, Л.Н. Гидротехническое строительство, Часть 1: учебник для вузов / Л.Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н.А. Анискин, В.В. Малаханов, А.С. Бестужева, М.П. Саинов, П.В. Солдатов, В.В. Толстиков. – Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 576 с.
54. Рассказов, Л.Н. Гидротехническое строительство, Часть 1: учебник для вузов / Л.Н. Рассказов и др. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 576 с.
55. Рекомендации по расчёту местных размывов русел, сложенных из не скальных грунтов, за креплениями средненапорных водосливных плотин. Л., 1981.
56. Рекомендации по учету кавитации при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений: П-38-75/ВНИИГ.1976.
57. Ржаницин, Н.А. Руслоформирующие процессы рек / Н.А Ржаницин. Гидрометеиздат. Л., 1985.
58. Розанов, Н.П. Гасящее устройство нижнего бьефа / Н.П Розанов А.Т Кавешников. Авторское свидетельство № 384966. - Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1973, № 7.
59. Розанов, Н.П. Применение суперкавитирующих элементов в водосбросных гидротехнических сооружениях / Н.П. Розанов, П.Е. Лысенко, В.Д. Бедев, А.Т. Кавешников. - Гидротехническое строительство, 1971, № 8.
60. Розанов, Н.П. Гидротехнические сооружения / Н.П. Розанов. – М.: Стройиздат, 1978. – 648 с.
61. Розанов, Н.П. Приближенные расчеты сопряжения бьефов за трубчатыми водопропускными сооружениями с учетом реакции устройств нижнего бьефа / Н.П. Розанов // Тр.МИСИ. – М., 1958. – Вып. I , № 24. – С.5-64.

62. Розанов, Н.П. Оценка работы глубокого водобойного колодца / Н.П. Розанов, О.Н. Черных, А.В. Литвинов // Труды МАДИ, вып. Расчёты элементов гидравлических систем машин и механизмов. – М.: МАДИ, – 1992. – С. 45-51.
63. Розанов, Н.П. Гидротехнические сооружения: Учебное пособие / Н.П. Розанов и др. – М.: Агропромиздат, 1985. – 432 с.
64. Розанова, Н.Н. Моделирование работы гидротехнических сооружений: учебное пособие / Н.Н. Розанова. – М.: Изд-во Рос.ун-та дружбы народов, 1998. – 108 с.
65. Румянцев, И.С. Гаситель энергии ударного действия в концевых устройствах трубчатых водопропускных сооружений / И.С. Румянцев, Е.Ф. Петров // Тез. докл. Всесоюзной конф. Молодых ученых «Пути повышения эффективности использования водных ресурсов в условиях их нарастающего дефицита». – 1988. – С. 49 – 50.
66. Румянцев, И.С. Совершенствование конструкций гасителей энергии ударного действия трубчатых водопропускных сооружений / И.С. Румянцев, Е.Ф. Петров // Исследование гидротехнических сооружений, их аварий и рекомендаций. – 1989. – С. 35 – 43.
67. Слисский, С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений / С. М. Слисский. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304с.
68. Справочник по гидравлическим расчётам / П.Г. Киселёв, А.Д. Альтшуль, Н.В. Данильченко и др. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 312 с.
69. Сухомел, Г.И. Исследования гидравлики открытых русел и сооружений / Г.И. Сухомел. Акад. Наук СССР. Ин-т гидромеханики. – Киев: Наукова думка, 1965. – 112 с.
70. Тункера, К. Совершенствованные конструкции и методов расчетного обоснования устройств нижнего бьефа мелкопролетных сооружений : Дисс. ... канд.тех.наук / К Тункера. – М., 1991. – 561 с.

71. ТЭО гидроузла «Северный Кебир в САР». М.: «Союзгипроводхоз». Арх. №13246-Г. 1977.
72. Устройств нижнего бьефа водосбросов / под ред. Н.П.Розанова. – М.: Колос, 1984. – 266 с.
73. Ухин, Б.В. Инженерная гидравлика: Учебное пособие / Б.В. Ухин, Ю.Ф. Мельников; под редакцией Б.В. Ухина. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 344 с.
74. Фрост, У. Турбулентность, принципы и применение / У. Фрост, Т Моулден. (пер.с англ.) . – М.: Мир, 1980. – Ч.1. – 527 с.
75. Ханов, Н.В. Обоснование методов гидравлических расчетов водосбросов с тангенциальными завихрителями: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.07, 05.23.16 / Ханов Нартмир Владимирович. – Москва, 1998. – 349 с.
76. Черных, О.Н. Гидравлические исследования водосброса Курского гидроузла на реке Тускари / О.Н. Черных . Отчет 1572, МГМИ, 1972.
77. Черных О.Н. Экспериментальные и аналитические исследования нагрузок на элементы крепления за водосбросами водных объектов АПК / О.Н. Черных, А.В. Бурлаченко, Я.Ю. Бурлаченко // Природообустройство. 2023. № 4. С. 12-20.
78. Черных, О.Н. Методика совершенствования учебного процесса в лабораторном комплексе кафедры гидротехнических сооружений / О.Н. Черных, Н.В. Ханов // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. – 2017. - №10. - С. 44–52.
79. Черных, О.Н. Оценка гидродинамических нагрузок на плиты крепления водобоя мелиоративных гидроузлов / О. Н. Черных, А. В. Бурлаченко, Я. Ю. Бурлаченко // Природообустройство. – 2024. – №.5 – С. 80- 87 DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5- 80-87
80. Черных, О.Н. Экспериментальные и имитационные методы исследования режимов сопряжения потока в нижнем бьефе природоохранных водосбросных и сопрягающих сооружений АПК / О.Н.Черных, А.В. Бурлаченко//

Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. – 2021. - №21. - С. 72– 80.

81. Чехонадских, В.С. Исследования применения гасителей энергии для борьбы со сбийными течениями за четырехпролетной низконапорной плотиной при маневрировании затворами / В.С. Чехонадских // Тр.МГМИ. – М., 1979. – Т.62. – С.40-48.

82. Шерепков, И.А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков / И.А. Шерепков. – М.: Энергия, 1978.

83. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: учебник / Д.В. Штеренлихт. –5-е изд. – СПб.: Лань, 2015. – 656 с.

84. Щапов, Н.М. Гидрометрия гидротехнических сооружений и гидромашин / Н.М. Щапов. – Ленинград.: «Госэнергоиздат», 1957. – 237 с.

85. Alsadek, E.S. Theoretical Substantiation of the Method for Predicting the Formation of the Northern Kebir River (Syrian Arab Republic) Using Morphometric Dependencies and Hydraulic Patterns of Water Movement / E.S. Alsadek, A.P. Guryev, N.V. Khanov // Power Technology and Engineering. – 2023. – Vol. 56, № 6. – P. 866-871. – DOI 10.1007/s10749-023-01602-z. – EDN UMQOLI.

86. Buckingham, E. Model experiments and the form of empirical equations / E. Buckingham // American Society Mechanical Engineers. – 1915. – Vol. 37. – P. 263 – 296.

87. Burlachenko, A.V. Operation evaluation of water discharge end sections in the conditions of narrow downthrow / A.V. Burlachenko, O.N. Chernykh, A. Brakeni // Larhyss Journal. –2023. – № 56. – Pp. 25–38.

88. Chernykh, O.N. Operation ensuring stability of plates of mounting water systems of hydraulic structures / O.N. Chernykh, A.V. Burlachenko, Y.Y. Burlachenko, A. Brakeni // Larhyss Journal, ISSN 1112–3680, № 58, June 2024, pp. 73–87.

89. Elevatorski, E.A. Hydraulic energy dissipators / E.A. Elevatorski. – New – York – Toronto – London, 1959. – 221 p.

90. Philip, L. Federal Highway Administration. Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culvers and Channel [Электронный ресурс] / L. Philip, Thompson, T.

Roger, Kilgore. – Denver: Kilgore Consulting and Management, 2006. – 287p. –

Режим доступа: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/06086/hecl14.pdf>

91. Fiala, J.R. Manifold Stilling Basins / J.R. Fiala, L.A. Maurice // Journal of A.S.C.E., Hydraulic Div. – 1961. – Vol. 87. – № 4. – P. 55–81.

92. Hartung, F. Design of Overflow Rockfill Dams / F. Hartung, H. Scheuerlein // Proc. 10th ICOLD Congress, Montreal, Canada. – 1970. – № 36. – P. 587–598.

93. Khanov, N.V. Brakeni A Experimental design justification of the short-span spillway's tail-water devices / N.V. Khanov, O.N. Chernykh, A.V. Burlachenko, Y.Y. Burlachenko // Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°59, Sept 2024, pp. 181-192 © 2024. All rights reserved, Legal Deposit 1266-2002

94. Obidov, B. Hydrodynamic loads on a water drain with cavitation quenchers / B. Obidov, O. Vokhidov, B. Shodiev, M. Sapaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 883. Pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899x/883/1/012011. <https://docs.cntd.ru/document/456074911>.

95. Schiestel, R. Modélisation et simulation des écoulements turbulents / R. Schiestel, Hermès. – Lavoisier: Wiley-ISTE, 2008. – 768 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
ФИРМА «БЕРЕГ»**

Почт. Адрес
360017 КБР, г. Нальчик, ул. Ватутина,
32а/20
E-mail 05bereg@rambler.ru

ИНН 0560028947 КПП 057301001
Р/сч. № 40702810110090000333
Филиал Центрального Банка ВТБ (ПАО) г. Москва

№21/24

17.12.2024г.

**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В ПРОЕКТНОЕ ДЕЛО РЕЗУЛЬТАТОВ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

В современной практике гидротехнического строительства для стабилизации нижнего бьефа и обеспечения безопасного и надежного отвода сбрасываемых потоков в каналы или русла рек применяются различные устройства, предназначенные для гашения энергии. Использование таких конструкций в мировой гидротехнике признается одним из наиболее эффективных методов борьбы с формированием локальных размывов грунта, возникающих за сооружениями.

В исследованиях, проведенных Алсадеком Елиасом Садеком, были проанализированы результаты установки энергогасителей в водобойном колодце и на рисберме, с акцентом на влияние распределения скоростей потока в нижнем бьефе. В ходе анализа работоспособности трёх конструктивных вариантов устройств нижнего бьефа с применением энергогасителей было зафиксировано снижение максимальных скоростей в контрольных створах, что, в свою очередь, способствует уменьшению риска эрозионных процессов в русле. В частности, предложенные схемы гашения позволяют снизить значения скорости на 27,6%...38,2%, в зависимости от типа предложенной конструкции. Эти результаты свидетельствуют о том, что установка энергогасителей и растекателей потока демонстрирует высокую эффективность в обеспечении стабильности и безопасности гидротехнических сооружений различной степени ответственности.

Предлагаемые Алсадек Елиас Садек результаты исследований приняты ООО Научно-производственной фирмой «Берег» для использования их в проектном деле.

Директор ООО НПФ «Берег»**С.О. Курбанов**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



ЭКОГИДРОПРОЕКТ®



ИННГЕОТЕХ



ПРОЕКТИСТАРТ



9001

125476, г. Москва, ул. Василия Петушкова, д. 20,
корп. 1, этаж 1, помещение II, комната № 15
Тел./факс: +7 (495) 648-85-94

www.ecohydroproject.ru/ / www.ecohp.ru/ / info@ecohp.ru

ИНН 7715883290 КПП 773301001 ОГРН 1117746730936 р/с 40702810738000047552
в ОАО «Сбербанк России» г. Москва к/с 30101810400000000225 БИК 044525225

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ В ПРОИЗВОДСТВО РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Высокий спрос на воду для гидроэнергетики, промышленности, сельского хозяйства и бытовых нужд, а также для защиты территорий от негативных воздействий паводков часто принуждают возведение гидроузлов, в состав которых входят плотины, водозаборные сооружения и водосбросы. При этом, водосбросные сооружения придают потоку высокую кинетическую энергию. Скорость потока может оказаться выше допустимой для материала грунтового основания нижнего бьефа, или же ограничена в соответствии с назначением объекта.

Решение задачи - гашение избыточной энергии потока на ГТС не только обеспечивает безопасную эксплуатацию самого сооружения и прилегающей к нему территории, но и поддерживает экологическое состояние водного объекта в допустимых пределах. Проведенные исследования Алсадек Елиас Садек рассматривали три конструктивных варианта устройств нижнего бьефа с использованием энергогасителей, было зафиксировано значительное снижение максимальных значений скоростей в контрольных створах, что, в свою очередь, способствует уменьшению риска возникновения эрозионных процессов в русле реки. В частности, предложенные схемы гашения показывают способность снижать значения скорости потока на 27,6%...38,2%, в зависимости от конкретного типа разработанной конструкции. Эти результаты подчеркивают высокую эффективность установки энергогасителей и растекателей потока в обеспечении устойчивости и безопасности гидротехнических сооружений, что становится крайне актуальным для объектов различной степени ответственности.

Генеральный директор

Генеральный директор
ООО «ЭКОГИДРОПРОЕКТ»



/Шагапов А.Т./