ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АРХИТЕКТУРЫ, ДИЗАЙНА И СТРОИТЕЛЬСТВА

Г.И. Логинов

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ МАЛЫХ ГОРНЫХ РЕК

2-е издание, переработанное и дополненное

Бишкек 2014

УДК 626-4/-9(043.3)
ББК 38.77
Л 69

Рецензенты:
О.В. Атаманова – д-р техн. наук, проф.
И.А. Абдурасулов – д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано к изданию Ученым советом ГОУВПО КРСУ

Логинов Г.И.
Л 69 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ МАЛЫХ ГОРНЫХ РЕК. 2-е изд., перераб. и доп. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2014. 196 с.

ISBN 978-9967-19-180-8

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований русловых и гидравлических процессов при водозаборе из малых горных рек низконапорными плотинными водозаборными сооружениями. Обосновано совершенствование существующих конструкций водозаборных сооружений и средств их гидравлической автоматизации с целью сокращения материальных затрат при их проектировании, строительстве и для повышения эксплуатационной надежности. Предложена классификация существующих конструкций водозаборных сооружений из малых горных рек, основанная на признаках преемственности. Дано технологическое, теоретическое и экспериментальное обоснование конструкций и параметров элементов усовершенствованных компоновочных схем сооружений. Изложены результаты комплексных гидравлических исследований, получены математические зависимости, сопрягающие конструктивные параметры сооружений с русловыми, гидравлическими процессами и гидроморфометрическими характеристиками горных рек. Приведены методики инженерного расчета, рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации.

Научный консультант работы – д-р техн. наук, профессор Н.П. Лавров, которому автор приносит свою искреннюю благодарность.

Монография может быть использована в качестве пособия для проектировщиков и научно-технических работников, занятых разработкой средств и методов управления процесса водозабора из малых горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы.

Л 3308010000-14

УДК 626-4/-9(043.3)
ББК 38.77

ISBN 978-9967-19-180-8

© ГОУВПО КРСУ, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ....6

1. ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ МАЛЫХ ГОРНЫХ РЕК В ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ИРРИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 9

1.1. Схемы существующих гидроэнергетических и ирригационных систем, основные показатели 9

1.2. Гидрологические, гидроэнергетические, морфометрические характеристики малых горных рек....14

1.2.1. Руслоформирующие расходы рек 20

1.2.2. Расходы рек расчетной обеспеченности 21

1.3. Русловые процессы на горно-предгорных участках рек 22

1.4. Состав, особенности, технологические характеристики элементов и устройств существующих конструкций водозаборных сооружений 25

1.5. Обоснование классификации низконапорных плотинных водозаборных сооружений 47

1.6. Регуляционные работы и сооружения на участках рек при водозаборе 51

1.7. Стабилизаторы расхода воды 57

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОДОЗАБОРА ИЗ ГОРНЫХ РЕК В ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ИРРИГАЦИННЫЕ СИСТЕМЫ 58

2.1. Технологический процесс водозабора из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы горно-предгорной зоны 58

2.2. Основные недостатки известных компоновочных схем организации водозабора из горных рек и пути совершенствования технических характеристик водозаборных сооружений 60

2.3. Теоретические основы описания гидравлических процессов, происходящих на низконапорных водозаборных сооружениях 62

2.3.1. Характеристики речных наносов, морфометрические характеристики рек, транспортирующая способность потоков воды 63

2.3.2. Движение двухфазного потока жидкости (вода – наносы) на криволинейных участках русел 70

2.3.3. Обоснование параметров наносозащитных порогов, устраиваемых перед водоприемными камерами водозаборных сооружений 78

2.3.4 Обоснование конструкции промывного тракта 94

2.4. Технологическое обоснование конструктивныхэлементов водозаборных сооружений на горных реках. Компоновочные схемы низконапорных плотинных водозаборных сооружений, конструкция стабилизатора расхода воды....98

2.4.1. Компоновки водозаборных сооружений на горных реках для гидроэнергетических и ирригационных систем....99

2.4.2. Обоснование конструкции стабилизатора расхода воды 104

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ ГОРНЫХ РЕК 111
3.1. Основы лабораторных исследований конструкций водозаборных сооружений для горных рек 112
3.2. Особенности физического моделирования русловых и гидравлических процессов при водозаборе из горно-предгорных участков рек 115
3.3. Моделирование наносного режима в бьефах водозаборных сооружений 117
3.3.1. Определение гидроморфометрических характеристик моделируемых двухфазных потоков (вода – наносы) 117
3.3.2. Определение минимального диаметра частиц наносов из условия автомодельности 118
3.4. Методика оценки русловых деформаций 119
3.5. Методика исследований зимнего режима эксплуатации водозаборных сооружений 121
3.6. Методика исследований характеристик ледошуговых образований на горных реках 123
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ ГОРНЫХ РЕК 126
4.1. Результаты исследований гидравлических характеристик наносозащитных элементов водозаборных сооружений 126
4.1.1. Исследования характеристики трехсекционных ломаных в плане порогов 126
4.1.2. Водопропускная способность ломаных в плане трехсекционных наносозащитных порогов 129
4.1.3. Гидравлические исследования повышения водопропускной способности трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога 133
4.1.4. Исследование конструкции промывного тракта водозаборных сооружений для деривационных ГЭС 135
4.1.5. Исследования гидравлических характеристик потока при истечении из-под горизонтального козырька затвора промывного тракта 137
4.1.6. Исследования четырехсекционных ломаных в плане наносозащитных порогов с уклонным гребнем 140
4.1.7. Результаты исследований водопропускной способности ломаных в плане четырехсекционных наносозащитных порогов 144
4.1.8. Изучение распределения продольных скоростей водного потока в зоне циркуляционного вальца перед четырехсекционным порогом 144
4.1.9. Обоснование конструкции четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога с горизонтальным гребнем 146
4.2. Исследования гидравлических характеристик стабилизатора расхода типа секционный параболический коробчатый затвор (СПКЗ) 147
4.3. Исследования гидравлических характеристик потока на сопрягающих участках зарегулированных русел низконапорных плотинных водозаборных сооружений 152
4.4. Регулирование русловых процессов в верхнем бьефе водозаборных сооружений при переводе сооружения на зимний режим эксплуатации 155

5. ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ..... 161
5.1. Результаты внедрения в производство конструкции автоматизированного водозаборного сооружения для деривационной ГЭС 161
5.2. Рекомендации по проектированию элементов водозаборных сооружений для горных рек 163
5.3. Рекомендации по эксплуатации низконапорных водозаборных сооружений 165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 169
ЛИТЕРАТУРА 170

ПРИЛОЖЕНИЯ
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Гидрологические характеристики типовых рек Кыргызстана, пригодных для энергетического использования 180
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Структурные схемы типов водозаборных сооружений из горных рек с указанием отличительных признаков и признаков преемственности 182
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Организация операции рыбопропуска на низконапорных плотинных водозаборных сооружениях 185
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Анализ недостатков и их причин при проведении технологических операций водозабора существующими конструкциями водозаборных сооружений ..... 186ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Формулы для определения удельного расхода наносов 188
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Формулы для определения величины максимального поперечного уклона поверхности потока на криволинейном участке русла 190
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Состав элементов низконапорного водозаборного сооружения из горных рек для гидроэнергетических и ирригационных систем, определенный относительно способов осуществления действий при выполнении основных операций 191

ВВЕДЕНИЕ

Освоение горно-предгорных территорий Кыргызской Республики во второй половине прошлого века вызвало активное использование гидроэнергетических и водных ресурсов малых горных рек. В современных условиях гидроэнергетические и ирригационные системы являются основными компонентами водохозяйственного комплекса страны, обеспечивающими рост народнохозяйственного производства [3, 195].

Параметры гидроэнергетических и ирригационных систем определяются возможностями водопользователей и естественноисторическими факторами (климат, топография, геология, местности и т. д.), и в своем преимуществе зависят от величины объема стока используемых рек. При создании, реконструкции и реабилитации этих систем основная доля затрат приходится на гидротехнические сооружения, которые обеспечивают подачу необходимого количества воды с заданным качеством при условии сохранения экологической безопасности водотока и недопущении вредных воздействий водных потоков.

В качестве источников технического водоснабжения рассматриваются горно-предгорные участки рек, имеющие различные гидрологические, морфометрические и гидроэнергетические характеристики. Это предопределяет применение различного состава элементов и устройств при проведении водозабора и водоподачи. Как показывает практика эксплуатации водохозяйственных систем республики, размещаемые на реках головные водозаборные сооружения являются их наиболее ответственным элементом. Так как технические параметры и технологические характеристики водозаборных сооружений определяют работоспособность всех нижележащих сооружений и устройств.

На основании результатов анализа опыта эксплуатации малых деривационных ГЭС и ирригационных систем нами были определены следующие основные причины аварийных ситуаций, возникающие при водозаборе из рек на горно-предгорных участках:

- сток горных рек насыщен значительным количеством наносов, которые выпадая на предгорных и долинных участках, образуют неустойчивые отмостки русел. Речные русла на этих участках, подверженных интенсивному меандрированию, отходят от водоприемных створов сооружений. При некачественной системе защиты речные наносы становятся причиной заиления магистральных участков деривационных и ирригационных каналов;
- значительные амплитуды колебания глубины рек (для рек Средней Азии годовые колебания глубин достигают 2÷10 м, а суточные – 1÷2 м и более);
- повышенная степень хозяйственного использования источника, выраженная процентом водозабора, близким к 100 % в критические периоды (летняя и зимняя межень), когда водозабор сопровождается интенсивным движением наносов или осложняется ледошуговыми явлениями;
- низкие величины расходов водозабора, определяемых на основании водохозяйственных расчетов (расходы расчетной обеспеченности $Q_{75\%}$–$Q_{90\%}$), относительно расходов, проходящих в паводковый период, когда процент водозабора мал и появляется необходимость сброса больших транзитных расходов через сооружения;
- недоучет антропогенного влияния при организации водозабора на гидродинамический и морфометрический баланс речных русел (переформирование береговой линии, дна русел с образованием значительных размывов и участков заиления);

- при проектировании известных конструкций водозаборных сооружений недостаточное внимание уделяется созданию необходимых русловых и гидравлических процессов на участках подпорных створов, водоприемных элементов и на сопрягающих участках устройств в различные эксплуатационные режимы;
- невозможность адаптации устройств гидравлической автоматизации к различным условиям эксплуатации водозаборных сооружений из малых горных рек.

Проведение процесса водозабора в гидроэнергетические и ирригационные системы на качественно новом уровне возможно при разработке и детальном расчетном обосновании параметров и характеристик элементов водозаборных сооружений, способных задать необходимые характеристики русловым и гидравлическим процессам при известных эксплуатационных режимах. Это определяет необходимость проведения детального научного анализа физических процессов, происходящих в верхнем и нижнем бьефах существующих и вновь разрабатываемых компоновок водозаборных сооружений.

Разработка и обоснование усовершенствованных конструкций водозаборных сооружений и их устройств, способных регулировать русловые процессы и гидравлические структуры потока на участках водоотбора, позволили разработать рекомендации по проектированию головных элементов гидроэнергетических и ирригационных систем.

Изложенное выше обосновывает актуальность проблемы совершенствования теории, методов исследований и расчетного обоснования необходимых характеристик русловых и гидравлических процессов при водозаборе из горных рек, позволяющих сократить привлекаемые материальные ресурсы при проектировании, строительстве и эксплуатации низконапорных плотинных водозаборных сооружений.

Для этого были решены следующиеосновные задачи:

- проведен анализ русловых и гидравлических процессов при водозаборе из горных рек известными конструкциями водозаборных сооружений с разработкой их классификации по признакам конструктивной преемственности;
- обосновано совершенствование структурной модели процесса водозабора из гонных рек с помощью низконапорных плотинных водозаборных сооружений с определением состава способов и приемов выполнения действий при организации сброса необходимых объемов воды как отдельной технологической операции;
- проведен анализ эксплуатационных характеристик и результатов лабораторных исследований компоновок существующих водозаборных сооружений и определены недостатки в организации процесса водозабора, их причины и последствия; даны рекомендации по совершенствованию технических характеристик водозаборных сооружений;
- выполнен обзор и анализ методов описания гидравлических и русловых процессов при водозаборе из горных рек с теоретическим обоснованием параметров элементов водозаборных сооружений;
- разработаны компоновки усовершенствованных конструкций водозаборных сооружений;
- теоретически обоснована усовершенствованная конструкция стабилизатора расхода воды для водоприемных оголовков водозаборных сооружений из горных рек;
- усовершенствована методика лабораторных исследований конструкций низконапорных плотинных водозаборных сооружений из горных рек;
- проведены экспериментальные исследования конструкций низконапорных плотинных водозаборных сооружений из горных рек с определением рациональных параметров регуляционных сооружений, наносозащитных элементов, пропускной способности ломаных в плане порогов, гидравлических характеристик усовершенствованного стабилизатора расхода воды и необходимых условий эксплуатации в зимнем режиме;

- оценена эффективность разработанных конструкций водозаборных сооружений и их использование при водозаборе из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы;
- разработаны рекомендации по выбору способов организации процесса водозабора в зависимости от гидрологических особенностей источника, методам расчетного обоснования, проектирования и эксплуатации водозаборных сооружений.

1. ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ МАЛЫХ ГОРНЫХ РЕК В ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ИРРИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

1.1. Схемы существующих гидроэнергетических и ирригационных систем, основные показатели

Гидросистемой называют комплекс гидротехнических сооружений (ГТС), объединенных территориально и служащих общим водохозяйственным целям [8, 9]. В Кыргызской Республике основными гидротехническими комплексами являются гидроэнергетические и ирригационные системы, которые сформированы из ГТС инженерного типа, служащих для забора необходимых объемов воды из источников, подачи их на гидроэлектростанции и орошаемые территории, а также для их перераспределения согласно оперативным планам водопользования.

Наиболее совершенными считают гидротехнические комплексы с регулируемыми параметрами русловых и гидравлических процессов на элементах ГТС, которые оснащены средствами автоматизации. По значимости для народного хозяйства постоянные гидротехнические сооружения гидроэнергетических и ирригационных систем согласно СНиП II-И.33-01–2003 «Гидротехнические сооружения» разделяют на четыре класса капитальности (I–IV).

Классификация гидротехнических сооружений, устраиваемых на ирригационных системах, разработанная на основании исследований Н.Н. Кременецкого, Н.П. Розанова, И.С. Румянцева, Ц.Е. Мирцхулавы, Д.В. Штеренлихта и др. [23, 116] представлена на рисунке 1.1.

По роли в гидроэнергетических системах различают регулирующие и не регулирующие гидроузлы ГЭС [7, 112]. Регулирующие гидроузлы ГЭС осуществляют регулирование подаваемых объемов воды на гидроагрегаты путем создания водохранилищ для покрытия пиковой или полупиковой части графика нагрузки. Не регулирующие работают по стоку водотока и, как правило, покрывают базисную часть графика нагрузки.

Гидроэнергетические системы МГЭС Кыргызстана относятся к не регулирующим и являются деривационными. Это определяется водностью рек, экономическими и техническими факторами [135].

ГТС деривационных ГЭС разделяют на три основные группы: головного гидроузла, деривации и станционного напорного узла, которые можно классифицировать по функциональному назначению (рисунок 1.2).

В состав водозаборных сооружений вводят устройства, осуществляющие защиту сооружений и в целом систем от излишних объемов воды и твердых включений.

В практике строительства гидроэнергетических систем применяется схема двухсторонней водоподачи от водозаборного сооружения. При этом на одном берегу размещается энергетическая система, а на другом ирригационная.

Примером является комплексный гидроузел Кеминской МГЭС на р. Чу, линейная схема которого представлена на рисунке 1.3.

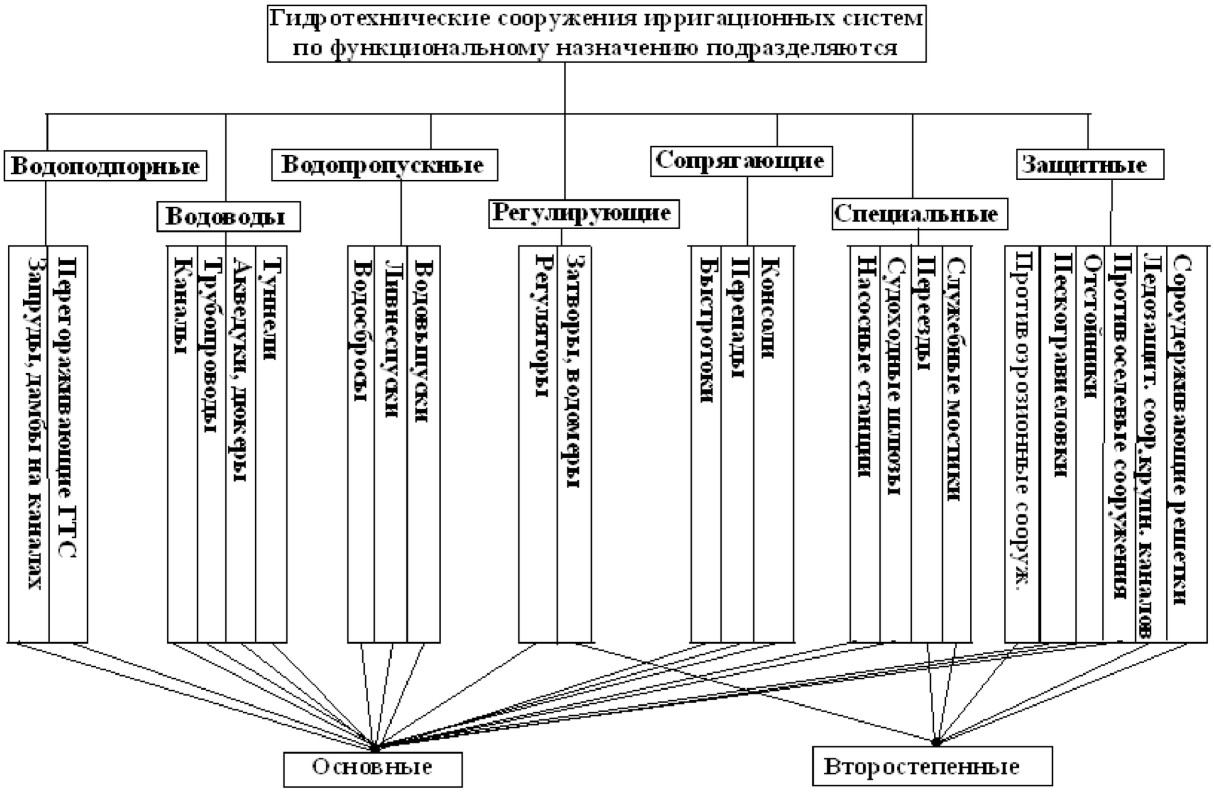


Рисунок 1.1 – Классификация ГТС ирригационных систем

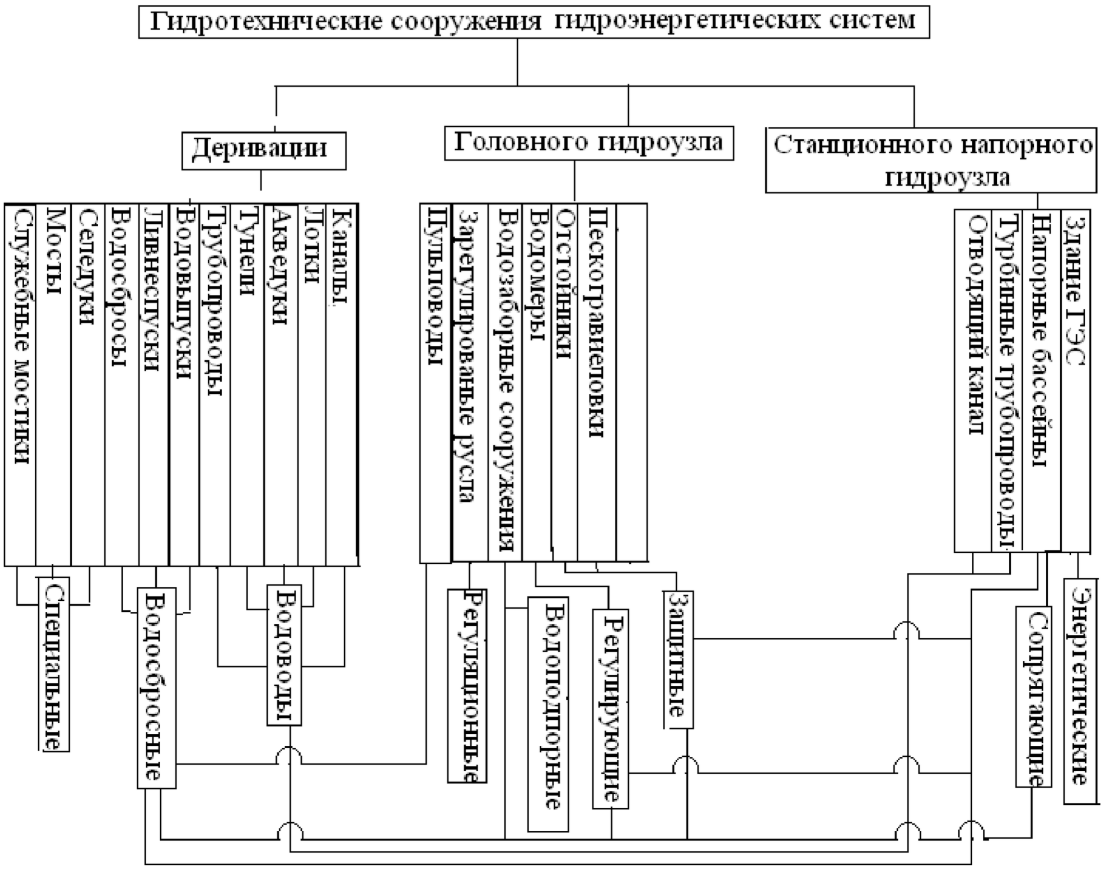


Рисунок 1.2 – Классификация ГТС гидроэнергетических систем

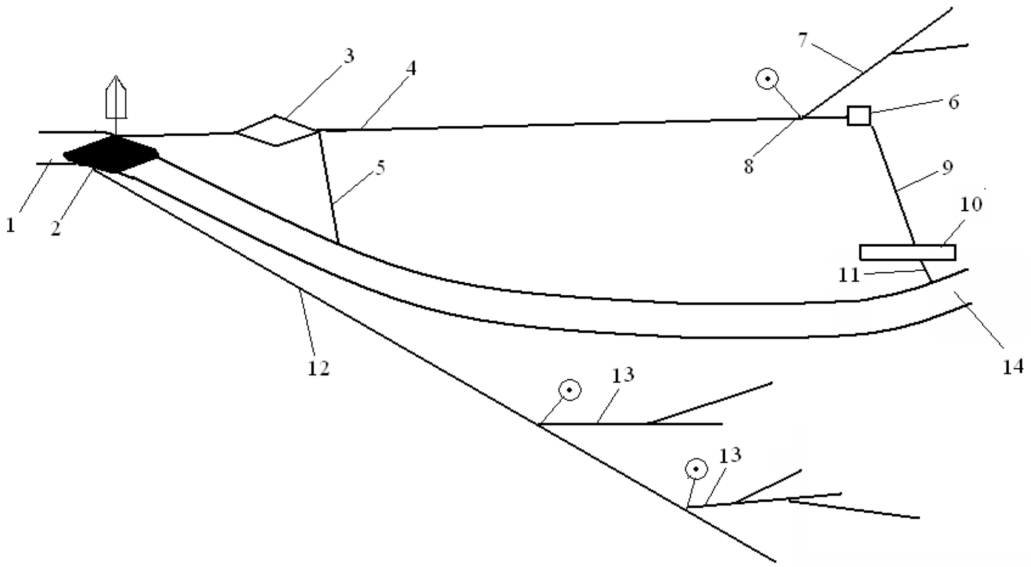


Рисунок 1.3 – Линейная схема энерго-ирригационной системы Кеминской МГЭС: 1 – река; 2 – водозаборное сооружение; 3 – отстойник; 4 – деривационный канал; 5 – сбросной канал; 6 – напорный бассейн; 7 – отводящий канал; 8 – водовыпуск; 9 – турбинные водоводы; 10 – здание ГЭС; 11 – отводящий канал; 12 – магистральный канал; 13 – распределительный канал; 14 – отводящее русло реки

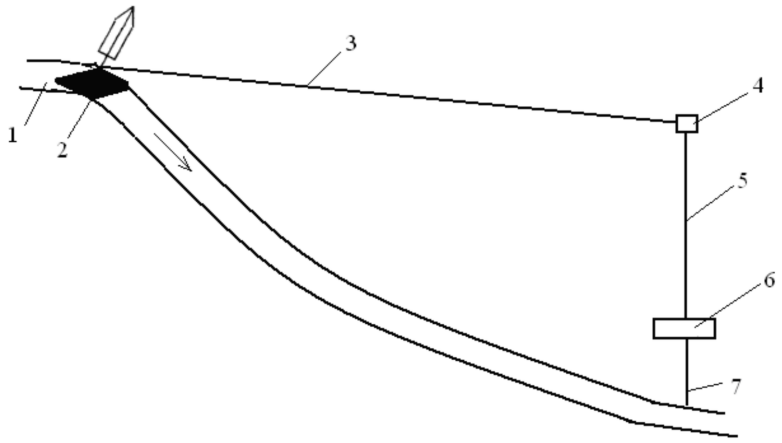


Рисунок 1.4 – Типичная линейная схема деривационных МГЭС Кыргызстана: 1 – река; 2 – водозаборный гидроузел; 3 – открытый деривационный канал; 4 – напорный бассейн; 5 – турбинный водовод; 6 – здание МГЭС; 7 – отводящий канал

При устройстве деривационных МГЭС на предгорных участках горных рек Кыргызской Республики преимущественно используется классическая схема создания напора, приведенная на рисунке 1.4.

По длине деривации могут устраиваться водовыпуски для систем обводнения пастбищ, сенокосов, дачных и приусадебных участков, размещающихся ниже трассы канала. Линейная схема подачи воды для целей обводнения земель приведена на рисунке 1.5 (деривационные Иссык-Атинская МГЭС и Сокулукской ГЭС-2).

По особенностям массивов орошения Кыргызстана с водоподачей из малых горных рек, ирригационные системы в основном относятся к системам предгорного типа. Ирригационные системы, располагающиеся на горных конусах выноса, характеризуются незначительной протяженностью магистральных каналов, большим количеством веерообразных распределительных каналов двухстороннего командования и значительными фильтрационными потерями. В зависимости от видов водоподачи и водораспределения на массивах орошения, ирригационные системы Кыргызстана можно разделить на несколько типов линейных схем, приведенных на рисунках 1.6 и 1.7.

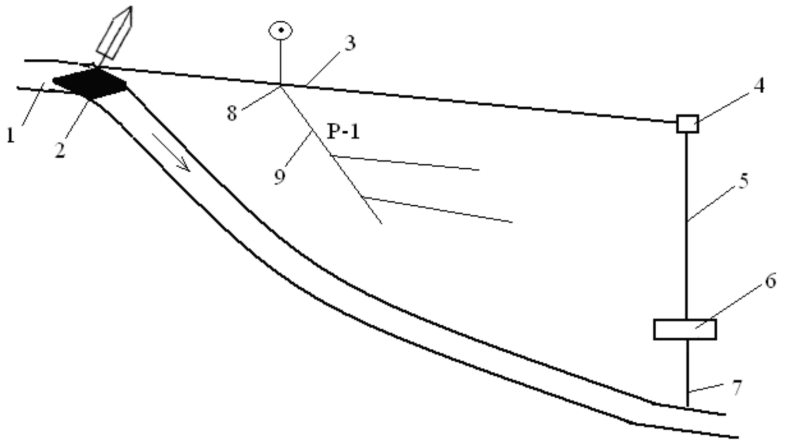


Рисунок 1.5 – Линейная схема деривационной МГЭС с водовыпуском на канале: 1 – река; 2 – водозаборное сооружение; 3 – деривационный канал; 4 – напорный бассейн; 5 – турбинный водовод; 6 – здание МГЭС; 7 – отводящий канал; 8 – выдовыпуск; 9 – распределительный канал

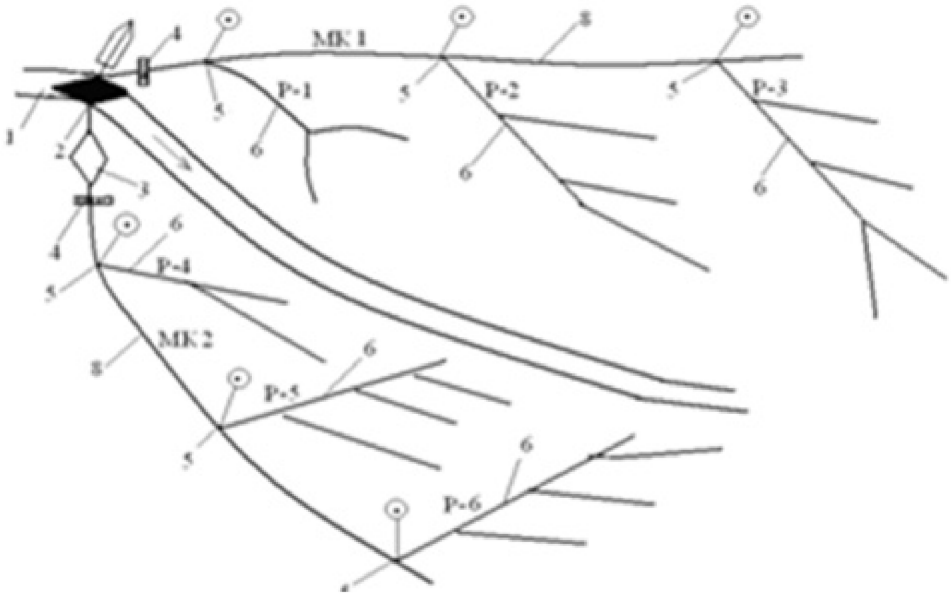


Рисунок 1.6 – Линейная схема ирригационной системы с двухсторонним командованием: 1 – река; 2 – водозаборное сооружение; 3 – отстойник; 4 – гидропосты; 5 – водовыпуски; 6 – распределительные каналы; 7 – дюкер; 8 – магистральный канал

Технические характеристики гидроэнергетических и ирригационных систем определяются следующими основными расчетными показателями:

Располагаемая мощность деривационной малой ГЭС $N_{р,}$ при лимитированном водозаборе, определяется по зависимости [112]:

$$N_р = 9{,}81\ \eta_а \cdot Q_{ГЭС} \cdot H_{ГЭС};\qquad (1.1)$$

где $\eta_а$ – к.п.д. агрегатов МГЭС; $Q_{ГЭС}$ – расход реки 75–90 % обеспеченности по стоку [7]; $Н_{ГЭС}$ – напор (нетто) над гидроагрегатами МГЭС.

Коэффициент полезного действия агрегата$\eta_а$ учитывает потери энергии в турбинах $\eta_т$; генераторах $\eta_г$ и определяется по зависимости [112]:

$$\eta_а = \eta_т \cdot \eta_г .\qquad (1.2)$$

Величина вырабатываемой электроэнергии, кВт·ч, согласно графику энергоснабжения рассчитывается по зависимости [112, 168]:

$$Э = \sum N_i T_i ,\qquad (1.3)$$

где T_i – продолжительность периода подачи электрической энергии выраженного в часах.

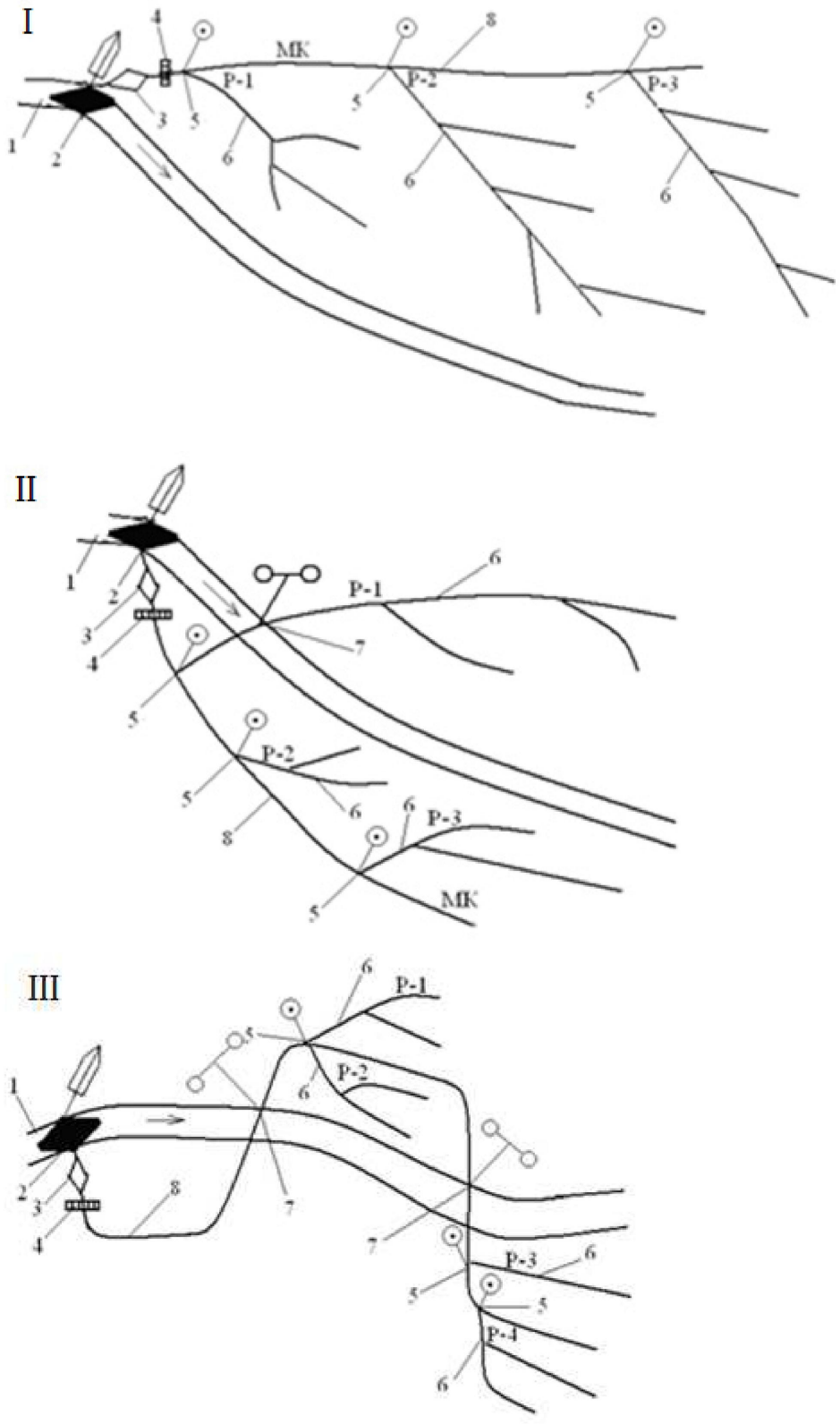


Рисунок 1.7 – Линейные схемы ирригационных систем: I – схема с односторонним командованием; II – схема с односторонней водоподачей и двухсторонним распределением; III – схема с односторонней водоподачей и двухсторонним перераспределением (ирригационная сеть системы реки Кара-Кече): 1 – река; 2 – водозаборное сооружение; 3 – отстойник; 4 – гидропосты; 5 – водовыпуски; 6 – распределительные каналы; 7 – дюкер; 8 – магистральный канал

Годовой объем водозабора $V_{год}$ для гидроэнергетических систем определяется по формуле:

$$V_{год} = V_{зим} + V_{лет}, \quad (1.4)$$

где $V_{год}$ – объем воды, подаваемой на ГЭС в зимний и летний периоды, определяется по формулам [112, 168]:

$$V_{зим} = \frac{Э_{зим}}{9{,}81 \cdot H_{ГЭС} \cdot \eta_a}, \quad (1.5)$$

$$V_{лет} = \frac{Э_{лет}}{9{,}81 \cdot H_{ГЭС} \cdot \eta_a}, \quad (1.6)$$

где $Э_{зим}$, $Э_{лет}$ – количество вырабатываемой электроэнергии в зимний и летний периоды, кВт.ч; $Н_{ГЭС}$ – напор воды над турбинами, м.

Для ирригационных систем годовой объем водозабора $V_{вег}$ равен объему воды, необходимому сельскохозяйственным культурам за вегетационный период [97]:

$$V_{вег} = M_{бр} \cdot A_{бр}. \quad (1.7)$$

Оросительная способность источника орошения – площадь, которую можно оросить из реки $А_{нетто}$ при лимитированном водозаборе, определяется из формулы [97, 120]:

$$A_{нетто} = \frac{Q_{ир} \cdot \eta_c}{q_p}, \quad (1.8)$$

где $Q_{ир}$ – расход реки в створе водозаборного сооружения, для ирригационных систем IV класса капитальности это расход 75 %-ной обеспеченности, м^3/с [115]; $q_р$ – расчетная ордината гидромодуля, устанавливается на основании режима орошения сельскохозяйственных культур, л/с·га; $\eta_с$ – к.п.д. системы.

Как видно из приведенных вышезависимостей, количественные параметры гидроэнергетических и ирригационных систем при лимитированном водозаборе, без перераспределения объемов воды во времени определяются гидрологическими характеристиками источников, топографией местности, характеристиками водопотребителей и эффективностью выбранных схем водозабора, водоподачи и водораспределения.

1.2. Гидрологические, гидроэнергетические, морфометрические характеристики малых горных рек

По определению А.И. Воейкова [86] реки являются продуктом климата. Если иметь в виду широкую постановку вопроса, включая геоморфологические, флювиальные процессы (деятельность постоянных и временных водных потоков на суше), следует считать, что реки являются продуктом не только климата, но и всего комплекса физико-географических условий района земной поверхности, где размещен водосборный бассейн.

Водообеспечение гидроэнергетических и ирригационных систем Кыргызстана рассматривается с учетом стока малых горных реки, которые являются важным источниками водных и энергетических ресурсов. В республике насчитывается около 3000 естественных водотоков, относящихся к четырем основным водным бассейнам. Это бассейны рек Чу, Талас, Кара-Дарья и озера Иссык-Куль [139, 174]. Большинство рек относится к бассейну реки Сыр-Дарья, одним из притоков которой является крупнейшая река республики Нарын с водосборной площадью 53 тыс. км^2. К этому же бассейну относятся многочисленные реки, стекающие с Ферганского, Алайского и Чаткальского горных хребтов (рисунок 1.8).

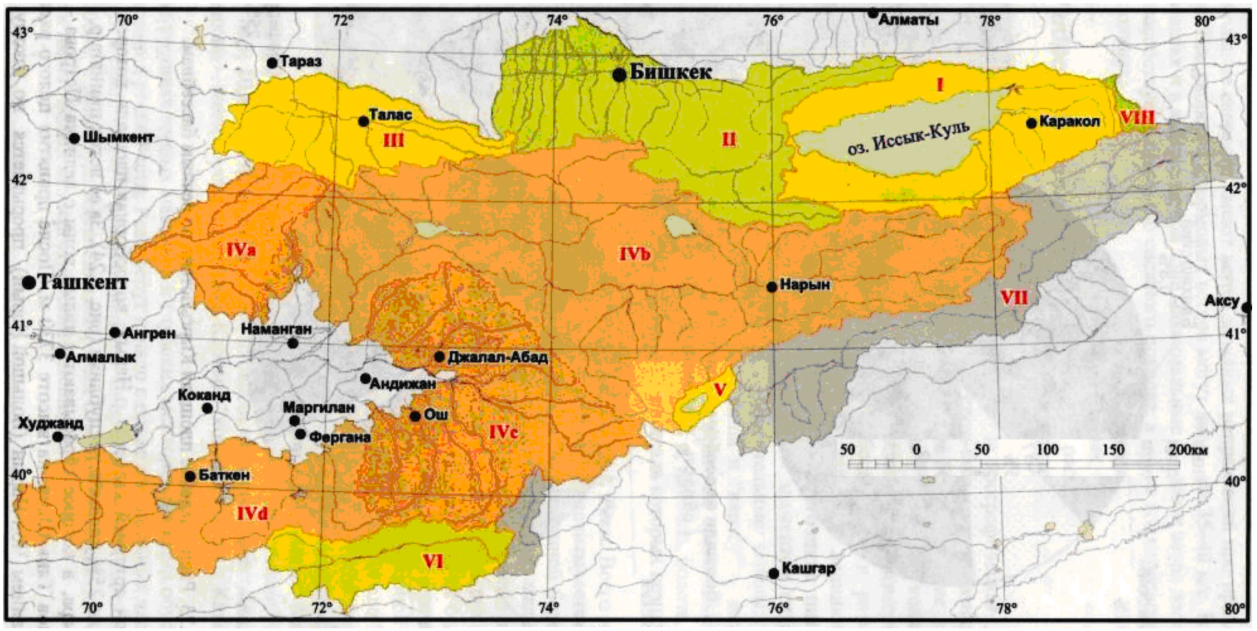


Рисунок 1.8 – Основные гидрологические бассейны Кыргызской республики: I – оз.Иссык-Куль; II – р. Чу; III – р. Талас; IV – р. Нарын; V – оз. Чатыр-Куль; VI – р. Амударья; VII – р. Тарим; VIII – оз. Балхаш.IVa – северное обрамление Ферганской долины; IVb – р. Нарын; IVc – р. Карадарья; IVd – южное обрамление Ферганской долины

В Кыргызстане лишь несколько десятков водотоков являются более или менее крупными, но и они по существующей классификации [172] могут быть отнесены лишь к малым рекам.

Эта классификация рек по группам в зависимости от величин среднелетних расходов, доработанная А.В. Филончиковым с учетом расходов рек 1 %-ной обеспеченности, приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация горных рек по группам

Характерные расходы рек, м^3/с	Группы и подгруппы рек					
	Малые				Средние	Большие
	I		II	III		
	Iа	Iб				
Среднелетние	0,5 ÷ 2,0	2,0 ÷ 4,0	4 ÷ 10	10 ÷ 30	30 ÷ 100	≥ 100
Максимальные	10 ÷ 30	30 ÷ 70	70 ÷ 150	150 ÷ 400	400 ÷ 1000	≥ 1000

Большая часть горных водотоков представляет собой мелкие речки, источники которых расположены на высоте 3000–4000 м над уровнем моря. Поэтому верхние участки рек не используются в народно хозяйственном производстве. Из общего числа водотоков для целей ирригации используется сток 870 рек, более 700 из которых имеют величины среднелетних расходов меньше расходов малых рек группы Iа [166]. Подразделение рек Кыргызстана по группам в зависимости от среднелетних расходов и речных бассейнов приведено в таблице 1.2 [139, 166].

В целом гидроэнергетический потенциал республики составляет 18,5 млн кВт по мощности и 162,5 млрд кВт/ч в год по энергии. По малым рекам эти параметры соответственно равны 8,1 млн кВт и 70 млрд кВт/ч [168], что составляет около половины гидроэнергетического потенциала.

Большинство горных рек Кыргызстана имеют незначительные среднезимние расходы воды, которые составляют менее 0,25 м^3/с, поэтому строительство стационарных ГЭС на них без регулирования стока является нерациональным.

Таблица 1.2 – Подразделение рек Кыргызстана по величине среднелетних расходов воды

Группы и подгруппы рек	Всего по республике		Число рек по основным речным бассейнам			
	Число рек	% к итогу	Чуйский	Таласский	Иссык-Кульский	Сары-Дарьинский
Мелкие, $Q_{ср.лет} \leq 0,5$	706	81,0	125	45	57	478
Ia	71	8,0	10	6	27	28
Iб	32	3,5	5	4	12	11
II	21	2,3	8	4	4	5
III	24	3,4	3	2	2	17
Средние	16	1,8	1	1	-	14
Большие	-	-	-	-	-	-
Итого	870	100	152	61	102	555

Выполненные исследования свидетельствуют [35, 139], что на современном этапе для круглогодичного использования для целей гидроэнергетики в Кыргызстане могут быть использованы без регулирования стока всего 186 рек. Отметим, что сюда не входят крупные водные артерии: реки Чу, Талас, Нарын и Кара-Дарья.

По морфологическим признакам и по характеру хозяйственного использования каждую из горных рек Кыргызстан условно разделяют на три участка [10]:

1. Верхний или горный – от истоков до выхода реки из ущелий.

2. Средний или предгорный – от начала конуса отложений речных наносов до зоны выклинивания подрусловых вод.

3. Нижний или долинный – от зоны выклинивания до впадения в основную водную артерию.

При этом понятие «условно» подразумевает то, что в пределах горных или предгорных участков встречаются межгорные долины, где потоки рек проходят в условиях, типичных для долинных участков.

Продольный уклон горных участков для различных рек изменяется в пределах 0,02–0,2 [168, 139]. Из-за изменений уклонов эту часть водотоков разделяют на четыре части: исток, верхнюю, среднюю и нижнюю, которые в энергетическом отношении и по размещению потребителей существенно отличаются друг от друга. Эти признаки меняются по длине реки в зависимости от высоты над уровнем моря (рисунок 1.9).

В зоне альпийских лугов,которые широко используются в качестве пастбищ для животноводства в летний период времени,находится исток и верхний участок рек. Потребность в орошении на этих отметках отсутствует, а потребности в энергии могут быть удовлетворены с помощью переносных микро ГЭС. Средний горный участок имеет в среднем уклон, равный $i = 0,06$ и протяженность 10–25 км. Долины рек имеют форму ущелья. Расходы воды увеличиваются вниз по течению при впадении многочисленных притоков.

Нижние горные участки имеют уклон дна не более 0,05. Пойменный рельеф нижних и средних горных участков рек определяет возможность создания гидротехнических комплексов гидроэнергетического и ирригационного назначения. Проходящие расходы воды и разность отметок позволяют устраивать МГЭС мощностью в несколько МВт, достаточную для снабжения электричеством отдельных населенных пунктов, кошар, установок машинного водоподъема и горнорудных разработок [91, 168].

Далее, ниже по течению рек, нижние горные участки переходят в предгорные с уклонами дна 0,01–0,04, которые на всем их протяжении изменяется незначительно. По сравнению

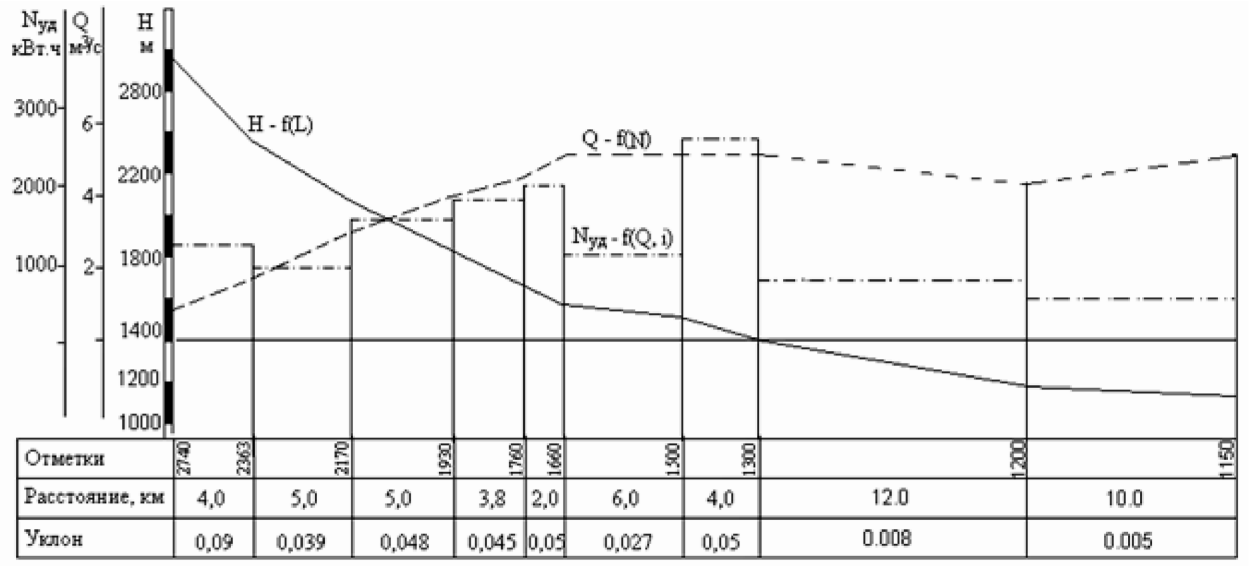


Рисунок 1.9 – Характерный продольный профиль малых горных рек Кыргызстана

с горными, предгорные участки рек находится в менее труднодоступных для строительства условиях, и поэтому в большинстве случаев используется для размещения головных объектов питания ирригационных систем. Причем при незначительной реконструкции они могут быть использованы и в энергетических целях.

На концевых участках ущелий гор боковые склоны выполаживаются, в этом месте поток из ущелья выходит в долину, т.е. проходит по предгорному участку по собственному конусу выноса. Здесь реки имеют относительно большую ширину и часто разбиваются на ряд рукавов. Вода в вегетационный период полностью или частично разбирается в ирригационные системы. Небольшие остатки ниже водозаборных сооружений, просачиваясь в толщу галечно-песчаных отложений, теряются. Поэтому долинные участки горных рек зачастую безводны, если не считать выклинивания подземных вод, сброса паводковых объемов воды и сброса расходов зимней межени [97].

Использование долинных участков рек с уклонами дна русел рек, равных 0,005–0,01, в гидроэнергетике также является возможным, однако создание необходимых энергетических параметров потока здесь лимитируется водностью и топографическими условиями. Водоподача в ирригационные системы на этих участках ведется с использованием водохранилищ.

Таким образом, нижние горные и предгорные участки водотоков Кыргызстана являются наиболее доступными местными энергетическими ресурсами, которые на всем своем протяжении могут быть использованы для электроснабжения рассредоточенных потребителей [91, 168].

По расположению участки русел горных рек подразделяются на текущие вдоль, и поперек горных хребтов [166]. Ранее А.В. Филончиковым [172, 173] была предложена классификация русловых участков горных рек, которая учитывает особенности их уклонов и относительное положение.

Горные реки в зависимости от направления течения имеют ряд особенностей жидкого и твердого стока, которые необходимо учитывать при проектировании гидроузлов. Этому вопросу посвящены работы многих ученых, занимающихся гидроморфометрией рек, проблемами водозабора, проектирования дорог и мостов, защитой территорий от затоплений [14, 64, 86, 132, 133, 139, 166, 172] и др. В общем случае можно отметить следующие особенности рек в зависимости от их расположения [172]:

1. Малые и средние реки, текущие поперек хребтов, имеют:

- высокую интенсивность нарастания уровней (до 20 см/мин) и расходов (до 185 м^3/мин), особенно в период паводков;
- малое количество наносов в межень и большое их количество в паводок;
- ярко выраженную зависимость величины содержания наносов от колебания расходов воды, чередования годов с различной водностью;
- высокую плановую устойчивость русла в паводок и неустойчивость в межень;
- высокую вертикальную устойчивость русла в межень и неустойчивость в паводок.

2. Средние и большие реки, текущие вдоль хребтов, кроме перечисленных особенностей, отличаются транспортом значительного количества наносов в межень (до 1 кг/м^3) [166]. Прогноз русловых деформаций здесь затруднен, а в ряде случаев практически невозможен.

3. Крупность наносов, проходящих в паводок в реках, протекающих поперек хребтов (более 500 мм), больше, чем у рек, протекающих вдоль хребтов (до 150 мм) [139].

Формирование жидкого стока рек Кыргызстана происходит в основном в горной зоне за счет талых вод снегов и ледников. Поскольку в комплексе факторов, формирующих сток, главным является климат, тесно связанный со сложным орографическим строением территории [86], водные источники республики значительно отличаются друг от друга. Это отличие по типу питания, по характеру многолетнего, внутригодового и внутрисуточного распределения стока. Реки, берущие начало на высоких ярусах гор, питаются преимущественно высокогорными снегами и ледниками (реки снегово-ледникового питания), характеризуются затяжными паводками во второй половине лета (рисунок 1.10). Реки с более низкими абсолютными отметками поверхностей бассейнов водосборов питаются, в основном за счет таяния сезонных снегов (реки снегового питания), и характеризуются более ранними паводками [86, 90].

Встречаются реки, берущие начало в нижних ярусах гор, их питание происходит за счет жидких осадков. Водотоки этого типа имеют небольшие водосборные площади и отличаются кратковременными паводками, с большим содержанием наносов. Межень отличается малой водностью.

Гидрографы рек всех типов питания в летний период характеризуются наличием большого количества местных пиков, создаваемых выпадающими дождями. Теплые ливневые дожди значительно ускоряют процессы таяния снегов и ледников, это является причиной образования селевых паводков, пики которых могут значительно превышать пики обычных

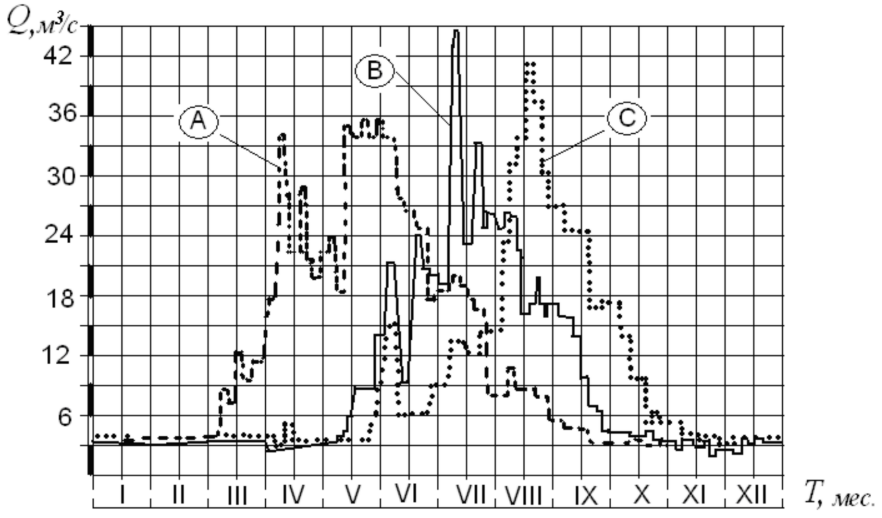


Рисунок 1.10 – Гидрографы характерных по типу питания горных рек Кыргызской Республики.
А – реки снегового питания; Б – реки снегово-ледникового питания;
В – реки ледниково-снегового питания

паводков. Селевые паводки могут возникать на всех реках горной зоны, и приходятся на периоды времени до наступления закономерного паводкового периода.

Питание рек в период межени происходит в основном за счет подземных вод, поэтому гидрографы зимнего периода носят сравнительно спокойный характер [90, 97, 139].

Детальная классификация рек Кыргызской Республики по типу питания и характеру внутригодового распределения стока в нашей зоне осуществляется методом В.А. Шульца по отношению расходов за период июль – сентябрь к расходам за период март–июль. Такая классификация рек выполнена для водотоков Кыргызстана и приведена в Приложении 3, которая составлена с учетом разработок М.Н. Большакова [139, 172].

Для всех горных рек характерно колебание расходов воды в течение суток. Эти колебания наиболее резко проявляются в вегетационный период, при этом нарастание и спад уровней воды достигает 20–30 см/мин и более. Максимальные расходы воды зависят от типа питания, приходятся на теплое время года (май–август) в период интенсивного таяния снегов и ледников, резкого повышения температур окружающей среды, выпадения осадков ливневого характера. Ледниковые паводковые расходы воды проходят в течение 3–20 суток и составляют до 50 % годового стока [120, 121, 166].

Для водотоков с преобладанием снегового питания суточные колебания расходов воды незначительны [168]. В верховьях таких рек имеются многочисленные мореные озера, при прорыве которых паводковые расходы увеличиваются в 2–3 раза по сравнению с расчетными [97].

Естественной формой русел рек в плане является система плавно изменяющихся кривых с образованием размывов у вогнутого берега и наносных отложений на выпуклом берегу в виде камней и обломочных пород разной крупности, гравелисто-галечниковой массы с песчаными прослойками [160, 142].

Продольные и поперечные профили русел подвергаются деформациям, особенно при прохождении паводковых (руслоформирующих) расходов воды, с образованием перепадов из камней и валунов диаметром 0,5–1,0 м и более.

При прохождении расходов 60–75 %-ной обеспеченности, глубина воды на горных и в начале предгорных участков рек очень мала, и поток не закрывает крупных наносных отложений в русле. При этом вода протекает не сплошным потоком, а разбивается на мелкие рукава, проходящие между отдельными камнями и валунами. Очень часто донные нагромождения наносов в виде гряд при переливе через них воды вызывают истечение, подобные истечению через уступ. Ниспадающие струи, ударяясь о нижележащие валуны и камни, образуют систему чередующихся, сильно аэрированных гидравлических прыжков.

В этих условиях обычные понятия о гидравлических элементах потока теряют определенность, так как неизвестно, что можно считать шириной потока, какие выступы камней включать в поперечный профиль русла. Только при прохождении паводковых расходов, когда валуны и пороги перекрываются водой, обычные понятия о гидравлических элементах русла приобретают физический смысл [97].

Водный поток горных и предгорных участков рек в основном носит бурный характер течения (число Фруда изменяется от 0,5 до 2,0 и более) и обладает большим запасом гидравлической энергии. Это приводит к выносу большого количества наносов, основная масса которых транспортируется до долинного участка реки.

Наносный режим рек зависит от топографических, рельефных, морфометрических, почвенно-геологических условий местности [166]. Фракционный состав наносов варьируется в широком диапазоне от мельчайших частиц до крупных камней и валунов в диаметре 500–600 мм и более. Средняя многолетняя мутность потока рек изменяется от 0,05 кг/м^3 до 0,4 кг/м^3 [14].

В составе влекомых наносов и русловых отложений на горных участках рек, кроме валунов, булыжников и крупной гальки, содержится значительное количество мелкого песка. Транспортирующая способность потока зависит от уклона дна реки и расходов воды и изменяется в значительных пределах. Эта закономерность выражена на переходном участке горных водотоков из горных участков в предгорные. На предгорных участках, как правило, с уменьшением скорости течения и продольных уклонов по дну реки перемещаются наносы более мелкого состава, которые имеют вид песчано-галечниковой массы.

Основную часть транспортируемых потоком наносов составляют взвешенные, которые в общем балансе твердого стока составляют от 40 до 100 % [166, 172]. Количество и фракционный состав взвешенных наносов меняются не только для различных рек и различных по водоносности лет, но и для различных участков одной и той же реки [97, 162].

Большая часть стока взвешенных наносов, как и донных, приходится на период больших расходов, особенно на период дождевых пиков, когда склоновая эрозия достигает наибольших размеров. Однако тесной связи между мутностью и расходами воды не обнаруживается – при одном и том же расходе воды в реке в начале пика паводка насыщенность потока наносами заметно выше, чем при спаде [6].

При прохождении паводковых расходов воды, наряду со значительным транспортом наносов, поток несет большое количество плавника и органического мусора, смытые деревья и кустарник, солому, бревна, столбы, доски, бочки и другие хозяйственно-бытовые предметы [97].

Зимний режим горных рек, имеющих большие уклоны русла, характеризуется прохождением незначительных расходов воды. При этом уровень воды не перекрывает порогов и крупных валунов, что обусловливает повышенную аэрацию воды переохлажденным воздухом. Это приводит к общему переохлаждению речного потока [139, 141].

При турбулентном течении воды со скоростями, превышающими 0,3 м/с, процесс образования поверхностного льда ослабляется, а кристаллы льда образуются внутри водной массы [139]. Этот внутриводный лед динамического типа называется шугой. Шуга образуется во всей толще переохлажденной турбулизированной аэрированной массы воды. На начальной стадии ледообразования шуга состоит из тонких дискообразных пластинок диаметром несколько миллиметров. Они находятся во взвешенном состоянии, и их движение представляет собой своего рода «подводную метель» [46].

На ледовый режим реки, кроме метеорологических факторов в значительной степени оказывают влияние теплые воды родников и глубинных горячих источников с температурой, достигающей плюс 40 ºС. Благодаря этому на реках, имеющих мощную подпитку из подземных источников, шуголедовые и ледовые явления проявляются слабо или вовсе отсутствуют [97].

Характеристики некоторых рек Кыргызской Республики, пригодных для комплексного (ирригационного и энергетического) использования с учетом их гидротехнической классификации и особенностей гидрологического режима, приведены в Приложении 1 [97, 161, 162]. На основании анализа этих данных с учетом рекомендаций [139] в качестве репрезентативных для исследований нами были приняты реки: Сокулук в Чуйской области, Джууку в Иссык-Кульской области, Кугарт в Джалабадской области, сток которых с середины XX в. используется для ирригации, и гидроэнергетики.

1.2.1. Руслоформирующие расходы рек

Руслоформирующим расходом воды считается такой расход воды, при котором величина воздействия на русло эквивалентна воздействию всего гидрографа.

Анализируя русловые процессы на участках рек любого типа, можно прийти к выводу, что каждый расход является руслоформирующим. Потому что как увеличение, так

и уменьшение расхода вызывает определенные деформации дна, устойчивые на определенный момент времени. Но при быстром изменении проходящих расходов воды в реке русловые формы отстают в своем развитии, они часто не соответствуют кратковременно действующим условиям. Однако все эти изменения происходят в определенном диапазоне, значения которого меньше экстремальных величин. Поэтому и русловые формы изменяются в ограниченных пределах, и имеют определенные характеристики, отличающие один водоток от другого [86].

По мнению В.Г. Глушкова, высота бровки пойменных образований зависит от высоты уровней в половодье и длительности их стояния, а также от фракционного состава наносов и мутности потока. Уровни воды в реке могут быть выше или ниже бровки, но она занимает вполне определенное положение [37, 86].

Известно, что чем больше расходы, тем больше руслоформирующая деятельность протока, но фактор времени играет не менее важную роль. Поэтому при очень больших, но кратковременных расходах воды русловые формы не успевают измениться до параметров, характерных для этого потока. Многие исследователи считают уровень воды вровень с бровками пойменных образований достаточно характерным, а расход, соответствующий ему, – руслоформирующим, хотя его определение на практике затруднительно. И.А. Кузьмин доказал, что общий ход руслового процесса не зависит от формы гидрографа [86]. В свою очередь, определение такого расхода имеет большое практическое значение, так как его величина может быть использована для определения основных характеристик русла: уклона свободной поверхности потока, средних глубины и ширины потока. Они могут быть использованы для определения других характеристик потока и русла, необходимых для проектирования водозаборных узлов.

С.Т. Алтуниным в качестве руслоформирующегобыл рекомендован максимальный расход воды, повторяющийся раз в пять – десять лет, расходы 20–10 %-ной обеспеченности. А.Н Арыкова в качестве руслоформирующего расхода рекомендует расход воды 1 %-ной обеспеченности [7, 8, 986].

В Кыргызстане при проектировании, строительстве и эксплуатации головных водозаборных гидроузлов предгорных ирригационных систем используются рекомендации А.В. Филончикова, по которым в качестве руслоформирующего принимается расход 10 %-ной обеспеченности и более [172].

В определенных случаях при определении параметров водопропускных сооружений гидроузлов ирригационных систем расчетную вероятность (в процентах) превышения наибольших расходов воды для постоянных и временных сооружений принимают с учетом рекомендаций СНиП II-И.33-01–2003.

1.2.2. Расходы рек расчетной обеспеченности

Вероятность превышения заданной величины расхода реки над всеми значениями этого параметра, наблюдавшимися в течение какого-то периода времени, называют обеспеченностью. Обеспеченность в гидрометрии выражают в относительных величинах или в процентах, а графически в виде кривой обеспеченности [86].

Обеспеченность, по которой для ГЭС определяется гарантированная мощность (минимально допустимая), среднесуточная мощность или годовая выработка электрической энергии, а для ирригационных систем – объем водоподачи и оросительная площадь.

Экономическое обоснование расчетной обеспеченности – задача чрезвычайно сложная. Вопросу выбора расчетной обеспеченности посвящены работы многих видных ученых и инженеров – А.Л. Великанова, И.П. Дружинина, Е.А. Алохина, С.Н. Крицкого, Б.Г. Коваленко, М.Ф. Менкеля, М.П. Фельдмана и др. [10, 135].

Получить достаточно точные данные для экономически обоснованной величины расхода расчетной обеспеченности зачастую бывает довольно трудно. Поэтому при проектировании гидроэнергетических систем минимальный расход воды рек расчетной обеспеченности определяется по СН 346–96. Эти данные приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Расходы минимальной расчетной обеспеченности

Объекты или отрасли водного хозяйства	$Q_{p\%}$
Крупные гидроэлектростанции	85–90
ГЭС сравнительно небольшой мощности и при небольшом их удельном весе в энергосистеме, для которых допускается кратковременное уменьшение подачи воды	75–80
Орошение сельскохозяйственных земель	85

Кроме расчетной обеспеченности, устанавливают величину сокращенной отдачи воды в особо маловодные годы [136].

При проектировании сооружений III и IV класса капитальности, к которым относятся рассматриваемые типы ГТС Кыргызстана, из имеющегося ряда гидрометрических наблюдений выбирают расчетный маловодный год, внутригодовое распределение стока которого определяется методом компоновки. По этому методу сток за расчетный год и лимитирующий сезон принимаются с одинаковой обеспеченностью, равной заданной (по условиям проектирования) обеспеченности гарантированной водоподачи.

1.3. Русловые процессы на горно-предгорных участках рек

Основными характеристиками русел рек являются: продольный и поперечный профили, плановые очертания и перераспределение глубин потока. Речное русло в каждый момент времени подвержено изменениям или деформациям. Непрерывные изменения морфологического строения речного русла и поймы, происходящие под действием текущей воды, называются русловым процессом [33]. Русловой процесс проявляется в виде эрозии – размыва дна русла и поймы, переноса и аккумуляции наносов. Направленность процесса деформации русла определяется соотношением между расходом наносов и транспортирующей способностью потока и, таким образом, связана с комплексом природных условий не только данного участка реки, но и водосбора в целом [35]. Потоки, проходящие в речных руслах, вызывают изменения в его очертаниях, распределении глубин и характере продольного профиля реки. Со своей стороны форма русла оказывает воздействие на распределение течений и их скоростей. Таким образом, поток и русло находятся в постоянном взаимодействии, и русловые деформации являются выражением этого взаимодействия [86].

Определение закономерностей взаимодействия между водным потоком и ложем русла позволяет путем возведения искусственных выправительных сооружений (канализированных участков) управлять двухфазным потоком (вода – наносы) и этим способствовать созданию необходимых гидравлических характеристик для хозяйственного использования проходящих объемов воды.

Основы учения о русловых процессах как вида взаимодействия между потоком и руслом, были заложены в конце XIX – начале XX столетия, которые отражены в трудах В.М. Лохтина, М. Фарга в основном направленных на разработку мероприятий по улучшению судоходных условий участков рек, а в последующем нашли достойное продолжение в трудах Н.Е. Кондратьева, М.А. Великанова, К.В.Гришанина, И.И. Леви, С.Т. Алтунина, К.Ф. Артамонова, Л.Т. Гвелесиани, Г.Н. Замбахидзе, А.Н. Крошкина, В.Ф. Талмазы, В.Н. Гончарова и др. [43, 53, 54, 64, 66].

Детализируя факторы, определяющие деформации русел рек, В.Н. Гончаров [57] рассматривал взаимодействие трех потоков:

- собственно основной поток, движущийся вдоль русла;
- второй поток той же жидкости, наложенный на первый, но дискретный, состоящий из основных турбулизирующих возмущений, порожденных руслом;
- третий дискретный поток, состоящий из движущихся твердых частиц различной плотности и размеров, который обладает особыми механическими и физическими свойствами, обусловливающими его собственные специфические закономерности и влияние на режим транспортирования их основным потоком.

В условиях рек горно-предгорной зоны (валунные гряды, быстротоки и пр.) А.Н. Крошкин и В.Ф. Талмаза [35, 166] выделили еще четвертый дискретный поток, состоящий из пузырьков воздуха различной крупности, образование которого обусловлено вальцами гидравлических прыжков, обтеканием преград, косыми струями движения потока, падением на ступенях, быстротоках и т. д., движение которых диктуется первыми двумя потоками и их специфичностью. Выделяются следующие факторы, принимающие участие в русловых процессах на участках реках горно-предгорной зоны:

- основной поток воды, движущийся вдоль русла;
- дискретный поток, состоящий из основных турбулизирующих возмущений;
- дискретный поток из твердых включений (наносы, ледошуговая масса) и воздушных пузырьков;
- грунт, слагающий русло и ограниченные им поперечные, плановые и продольные профили дна и берегов русла.

В результате взаимодействия между аллювиальным ложем реки, жидким и твердым потоками образуются различные русловые формы, с различными гидроморфометрическими характеристиками.

М.А. Великанов в реке равнинного типа выделил шесть основных русловых образований [33, 35]:

1. Изгиб русла с устойчивой поперечной циркуляцией (ось по течению) и упорядоченным распределением струй.

2. Перегиб русла с неустойчивыми циркуляциями разных направлений с беспорядочным «веерообразным» распределением струй.

3. Пойма реки, спрямляющая в высокие воды основное течение реки, иногда влияющая на формирование меженного русла.

4. Раздвоение динамической оси с образованием осередков, а в дальнейшем (иногда) и островов с протоками.

5. Слияние притоков (с главной рекой и между собою) с образованием непосредственно ниже слияния отложений разных типов, зависящих от угла слияния, концентрации и крупности наносов, а также от последовательности фаз паводков сливающихся рек.

6. Впадение реки в водоем с нулевыми скоростями воды (постоянного или переменного уровня) с формированием сложных морфологических типов накопления наносов – дельт и большей частью с растеканием потока по нескольким рукавам.

Эти русловые формы также характерны и для горных рек, на которых дополнительно выделяют следующие руслообразования [35]:

1. Валунные гряды, ступени, быстротоки, образовавшиеся при пересечении рекой коренных пород, отдельных селевых, мореных отложений, создающие бурные течения и аэрированные потоки.

2. Полосы селевых отложений, разъединяющие горный поток на протоки, вызывающие беспорядочное перемещение струй, отличающиеся значительной шероховатостью и аэрацией потока.

3. Участки подпора и отложения наносов перед естественными завалами, конусами выноса селевых логов, каменными осыпями, выходами скальных пород, создающие неустойчивые течения, блуждание, наличие рукавов.

4. Участки спада за естественными завалами, селевыми конусами выноса, характеризующиеся укрупненной отмосткой русла.

5. Ледошуговые скопления, донный лед, сбивающие поток в новых направлениях, повышающие горизонты, а иногда и расходы воды, перемещающие наносы в приморожденном ко льду состоянии, деформирующие русло.

В число этих русловых форм не входит прямолинейное русло, так как оно считается исходным, принимающим участие в русловом процессе в совокупности с другими факторами руслообразования.

Плановые очертания русел рек характеризуются значительным разнообразием и вместе с тем для них закономерна отчетливо выраженная извилистость (меандрирование). В процессе формирования извилистого русла большую роль играют поперечные течения, которые возникают как при искривлении динамической оси потока, так и особенно в условиях уже возникшей извилистости русла. Распределение глубин в руслах рек зависит от распределения в них эрозионно-аккумулятивных образований в виде различных русловых форм (гряд, перекатов, пойм и др.) [35].

И.В. Поповым [86] выделены три типа русловых процессов: ленточно-грядовый, побочневый и осередковый.

При ленточно-грядовом типе плановые деформации русел практически не происходят. При побочневом типе происходит сползание в паводковый период по руслу крупных песчаных гряд, перекошенных в плане. Осередковый тип руслового процесса развивается там, где река переносит большое количество влекомых наносов и образует широкое и распластанное русло, по которому беспорядочно сползает ряд крупных разобщенных гряд. Эти гряды в межень при понижении уровня образуют разбросанные по всей ширине русла осередки, а при уменьшении глубин – острова.

Разновидностью осередкового типа русловых процессов являются блуждающие русла. Они возникают при очень большой подвижности влекомых наносов и больших скоростях течений воды. Горные реки, протекая в широких долинах, способны в короткие сроки перемещать обширные галечниковые скопления, изменять плановые очертания русла и размещение глубин в них. Примером могут служить реки Прииссыкулья – Джергалан и Тюп, Ферганской долины – Кара-Дарья и ее правые притоки Кугарт (рисунок 2.4), Тентек-Сай и др., а также р. Чу на всем протяжении при выходе из Боомского ущелья в долину [35].

Следует отметить, что при любом типе руслового процесса соотношения между явлениями аккумуляции и эрозии тесно связаны с транспортирующей способностью потока и содержанием наносов. Там, где поток насыщен наносами в большей мере, чем он может переносить их, происходит аккумуляция наносов. На участках, где транспортирующая способность потока превосходит содержание наносов, происходит размыв русла. Размыв же русла вызывает увеличение площади его живого сечения, и уменьшение скоростей, вследствие чего размыв может прекратиться. Кроме того, на участках размыва происходит явление самоотмостки. Более мелкие фракции наносов выносятся с участков размыва, и дно при этом оказывается покрытым крупными частицами. Шероховатость дна увеличивается, скорости уменьшаются, и размыв замедляется [126]. Аккумуляция наносов вызывает уменьшение живого сечения потока, увеличение скорости, и в конечном итоге она может смениться размывом. То есть формирование русла является саморегулирующимся процессом.

1.4. Состав, особенности, технологические характеристики элементов и устройств существующих конструкций водозаборных сооружений

Для забора воды из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы используются водозаборные сооружения, которые представляют собой комплекс сооружений и устройств, служащих для выполнения следующих технических требований и технологических операций [35]:

1) сопряжения подводящего речного русла с отводящими каналами гидросистем;

2) забора требуемого количества воды в отводящий канал по заданной программе (графику водоподачи) с поддержанием дискретного предельного уровня воды в верхнем бьефе сооружения и постоянного расхода (с точностью 5 %), в том числе при зимних меженных расходах воды в горных реках;

3) проведения эффективной борьбы с наносами, предотвращающей поступление речных наносов (песка, гравия, гальки), а также плавника и ледошуговых образований в отвод при всех гидрологических режимах, в том числе при водоотборе, близком к 90 % от расхода воды в реке;

4) сброс необходимых объемов воды в нижний бьеф гидроузла для поддержания в верхнем бьефе рациональных гидравлических структур воды, транспортирующих на сброс твердые включения (наносы, плавающий мусор, ледошуговые образования);

5) обеспечения беспрепятственного сброса в нижний бьеф паводковых расходов и излишков воды, а также наносов, льда, шуги и плавника;

6) гашения энергии водного потока в пределах гидроузла до величин, достаточных для транспорта наносов в отводящем речном русле без сбойных течений;

7) обеспечения устойчивости флютбета и нижнего бьефа сооружения к местным размывам, а также организация мероприятий по предупреждению завала наносами отводящего зарегулированного русла гидроузла;

8) учета и контроля за величиной подаваемых и сбрасываемых расходов и объемов воды;

9) рыбозащиту и рыбопровод с целью недопущения в отводящие каналы особей рыб определенных видов и возрастов без снижения их жизнеспособности, и сохранением путей их естественных миграций;

10) надежность, простоту, удобство в эксплуатации при всех режимах работы гидроузла.

Проблемами надежного обеспечения водой как гидроэнергетических так и ирригационных систем занимались такие известные ученые, как С.Т. Алтунин [10], К.Ф. Артамонов [15], Н.Ф. Данелия [44, 45], И.С. Румянцев [150], И.И. Леви [87], К.В. Попов [132], Семенов С.В. [158], Я.В. Бочкарев [24], Б.И. Мельников [120], А.С. Офицеров [131], А.И. Рохман [147], И.К. Рудаков [151], Г.В. Соболин [162], А.В. Филончиков [172] и др.

Водозаборные сооружения гидроэнергетических систем Кыргызстана, как и головные сооружения ирригационных систем по большей части устраиваются на предгорных участках основных русел рек. При этом в зависимости от места расположения потребителей энергии и требуемой мощности они могут располагаться на притоках первого, второго порядка или по длине основных русел.

Энергообеспечивающая способность горных водотоков различна по всей их длине, поэтому возможная или гарантированная мощность МГЭС зависит от места расположения створа, а также от типа применяемого энергетического оборудования.

При проектировании водозаборных сооружений гидроэнергетических и ирригационных систем выполняется расчет водного и гидроэнергетического кадастра реки (внутригодовое распределение стока) для последующего составления или уточнения графика водоподачи. Определяющим критерием при этом является максимальное значение коэффициента водозабора, который является отношением среднедекадного расхода водозабора к среднедекадному расходу реки расчетной обеспеченности [172], и рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{Q_{сис}}{Q_{P\%}}, \qquad (1.9)$$

где $Q_{сис}$ и $Q_{р\%}$ – соответственно расчетный расход гидросистемы и расход притока реки расчетной обеспеченности.

Проведенный анализ динамики водозабора на некоторых водозаборных гидроузлах Кыргызстана показывает, что в большинстве случаев критический период с максимальным коэффициентом водозабора приходится на весну, осень и зиму. Сток наносов в эти периоды незначительный, но достаточно большая их продолжительность определяет формирование призм наносов в верхнем бьефе водозаборных створов. Этот фактор в совокупности с суточными колебаниями расходов в реках вызывает значительную насыщенность наносами потока, забираемого в канал [172]. В период зимней межени водоотбор осложняется шуголедовыми явлениями, что вместе с высокими значениями коэффициента водозабора представляет определенную опасность для гидротурбин.

Следует отметить, что гидрологический режим большинства горных рек является более благоприятным для ирригации, чем для энергетики, т. к. повышению потребности в воде на орошение соответствует летний максимум расходов воды в этих источниках.

При значениях коэффициента водозабора $\alpha_{max} \le 0,25$ обычно принимается бесплотинная схема водозабора, при коэффициенте $0,95 \ge \alpha \ge 0,25$ принимаются компоновки низконапорных плотинных водозаборных гидроузлов с полным перекрытием створа. В случае превышения в определенные периоды времени значений расходов водозабора над расходом притока реки в створе водозабора сооружается плотина, способная образовывать аккумулирующую емкость (водохранилище). Это может послужить причиной устройства гидроэнергетических систем с плотинной или комбинированной схемой концентрации напора. Создание водохранилищ позволяет применять МГЭС для частичного покрытия пиковых участков графика электрической нагрузки энергосистем [112], и облегчить условия защиты водоприемников гидросистем от наносов, плавника и ледошуговых образований.

Окончательно тип и конструкции сооружений водозаборного сооружения принимают в зависимости от морфометрических, гидрологических, топографических условий местности и на основе технико-экономического сопоставления различных вариантов. Этот фактор предопределяет большое разнообразие конструктивных решений при строительстве головных гидроузлов гидроэнергетического и ирригационного назначения на горных реках, разработка которых продолжается до последнего времени с целью получения более рациональных решений.

В зависимости от создаваемого напора (разности уровней воды в верхнем и нижнем бьефе) водозаборные гидроузлы плотинного типа бывают:

- низконапорными (Н ≤ 10 м);
- средненапорными (10 м < Н ≤ 50 м);
- высоконапорными (Н >50 м).

Сравнительные характеристики водозаборных гидроузлов, определенные в зависимости от назначения, области применения, состава элементов приведены в соответствии с имеющейся классификацией [116].

Применение средне и высоконапорных плотинных водозаборных гидроузлов на малых горных реках для малой гидроэнергетики и ирригации требует отдельного технико-

экономического обоснования, так как устройство водохранилищ с относительно малыми регулирующими емкостями в то же время нуждается в создании значительных мертвых объемов для аккумуляции речных наносов различного фракционного состава.

Как показывают сопоставления гидроморфометрических характеристик горных рек и технических характеристик высоконапорных плотин, относящихся к IV классу капитальности, они не будут удовлетворять положению СНиП 33-01–2003 по срокам службы ГТС (ежегодные издержки по пункту эксплуатационных расходов на очистку мертвого объема будут превышать допустимую долю ежегодной прибыли от реализации продукции) [35].

Основное внимание при выполнении научных исследований нами было уделено разработке и усовершенствованию конструкций низконапорных плотинных водозаборных сооружений из горных рек без устройства водохранилищ [35].

Устройство низконапорного плотинного водозабора подразумевает регулирование уровней и расходов воды без регулирования объемов [35]. Такие схемы устраивают в случаях, когда бытовые уровни не достаточны для обеспечения командования и выполнения самотечной подачи расчетного расхода воды в отводящий канал. Кроме того, применение вихревых структур потока при небольших капвложениях, способно обеспечить отведение наносов от водоприемника. Такие структуры можно сформировать в потоке с определенным запасом кинетической энергии при помощи наносозащитных порогов.

В случае применения водозабора с использованием низконапорных плотинных сооружений появляются возможности: сокращения холостой части магистрального канала, поддержания необходимого качества очистки забираемой воды, уменьшения влияния процесса водоотбора на режим реки даже при высоких коэффициентах водозабора. Указанные преимущества определяли целесообразность устройства различных конструкций низконапорных плотинных водозаборных гидроузлов на горных и предгорных участках малых рек Кыргызстана [120]. В основном эти реки относятся к естественным водотокам, протекающим поперек хребтов.

В настоящее время на основании теоретических, экспериментальных разработок и натурных исследований для организации водозабора из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы предложено более ста различных конструкций водозаборных сооружений, которые нашли применение на горно-предгорных участках рек Кыргызстана.

Созданные ранее конструкции низконапорных плотинных водозаборных сооружений классифицируются авторами по различным признакам [17, 35]. Как правило, эти классификации основываются на разделении сооружений гидроузла по конструктивным, гидравлическим признакам, по способам борьбы с наносами, по периодичности их удаления, величине напора воды в верхнем бьефе [172] и т. д.

Конструктивные признаки учитывают наличие или особенности того или иного элемента гидроузла, взаиморасположение устройств друг относительно друга или берегов русла реки.

При гидравлической классификации водозаборных сооружений используются признаки подобия гидравлических структур потока. При этом сооружения, создающие в потоке подобные гидравлические структуры, группируются в одну систему.

Классификация по способу борьбы с наносами дает понятие о том, как именно осуществляется защита отводящих каналов от наносов на данном сооружении.

Периодичность удаления наносов характеризует не только способы транспорта и сброса наносов, но и особенности эксплуатации сооружений. Как правило, на головных гидроузлах предусматриваются устройства для проведения как постоянного, так и периодического удаления наносов.

По мнению А.В. Филончикова, рассмотрение конструкций известных низконапорных плотинных водозаборных гидроузлов, устроенных на малых горных реках Кыргызской Республики, позволяет сделать следующие выводы:

- в одном сооружении сочетаются признаки всех приведенных выше классификаций, поэтому название их содержит несколько признаков, характерных именно для данного сооружения;
- в случаях, когда определяющих признаков много и название получается громоздким, прибегают к именам собственным или географическим названиям, называя сооружения по месту их первого применения (Ферганский, Киргизский и т. д.) [172].

До 60-х годов прошлого века большинство специалистов Советского Союза в области гидротехники подразделяли низконапорные гидроузлы, размещаемые на горных реках, на следующие типы [10]: Индийский; Ферганский; Европейский; Грузинский; Решетчатый (Тирольский); Комбинированный.

Анализируя историю разработки, проектирования и строительства водозаборных сооружений на горных реках, в первую очередь необходимо упомянуть Верхнезеравшанское водозаборное сооружение, построенное в 1930 г. на реке Зеравшан (рисунок 1.11). Данная компоновка водозабора относится к индийскому типу водозабора, которая основывается на лобовом заборе воды в специальный промывной карман. Из кармана вода в отводящие каналы подается через боковые водоприемники. При этом регулирование расходов воды в водоприемниках осуществляется щитовыми затворами и шандорами, которые одновременно используются для наносозащиты.

Излишки объемов воды сбрасываются вместе с наносами при открытии затвора промывного кармана через гребень водосливной плотины.

Затворы промывных карманов и водосливная плотина были расположены по нормали относительно струй воды в подводящем русле. Прототипом Верхнезеравшанского водозаборного гидроузла был построенный на р. Инд в 1928 г. Суккурский барраж [10].

Опыт эксплуатации Верхнезеравшанского гидроузла не дал удовлетворительных результатов, поскольку данная компоновка не обеспечила необходимых характеристик регулирования наносного режима в бьефах сооружения, поэтому на реках Средней Азии их больше не строили [10].

Те же результаты были получены Эльсденом (Elsden) [88, 188] при исследовании данного типа водозабора на горных реках Индии. В последующем он предложил усовершенст-

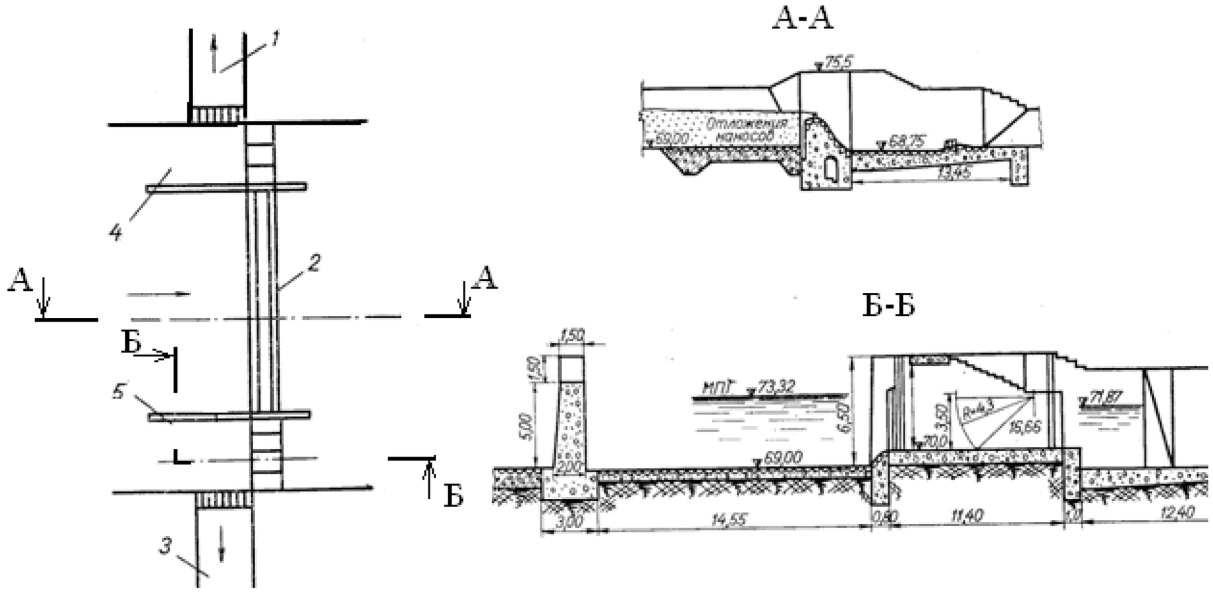


Рисунок 1.11 – Верхнезеровшанское водозаборное сооружение на р. Зеравшан:
1 – левобережный отводящий канал; 2 – водосливная плотина; 3 – правобережный отводящий канал;
4 – левобережный карман; 5 – правобережный карман

вованный тип водозабора, который в странах бывшего Советского Союза считают Европейским или Эльсденовским.

На основании ряда поисковых исследований Эльсден предложил использовать для горных рек Южной Африки усовершенствованный Индийский тип водозабора, приведенный на рисунке 1.12 а. В то же время Кантек (Kanthack) (профессор ирригации в Южной Африке), основываясь на разработках Эльсдена, при строительстве сооружения на горной европейской реке Изар предложил использовать улучшенную конструкцию этого типа (рисунок 1.12 б).

На р. Изар водоприемник относительно подходящих струй потока разместили под углом 45° [188, 191].

Известным представителем европейского типа (Эльдсена) водозаборного сооружения является Чумышская плотина, построенная в 1934 г. на пограничной р. Чу по проекту В.А. Васильева для двухсторонней подачи воды в ирригационные каналы Казахстана и Киргизии, которая показана на рисунке 1.12 в [10].

Этот тип фронтального водозабора основан на расслоении потока с забором воды в отводящие каналы из верхних слоев потока, которому перед водоприемником задается необходимое состояние.

В отличие от бокового водозабора Индийского типа, при фронтальном размещении водоприемников завихрения потока перед ними имели меньшую интенсивность, что уменьшило захват наносов в водоприемник [87].

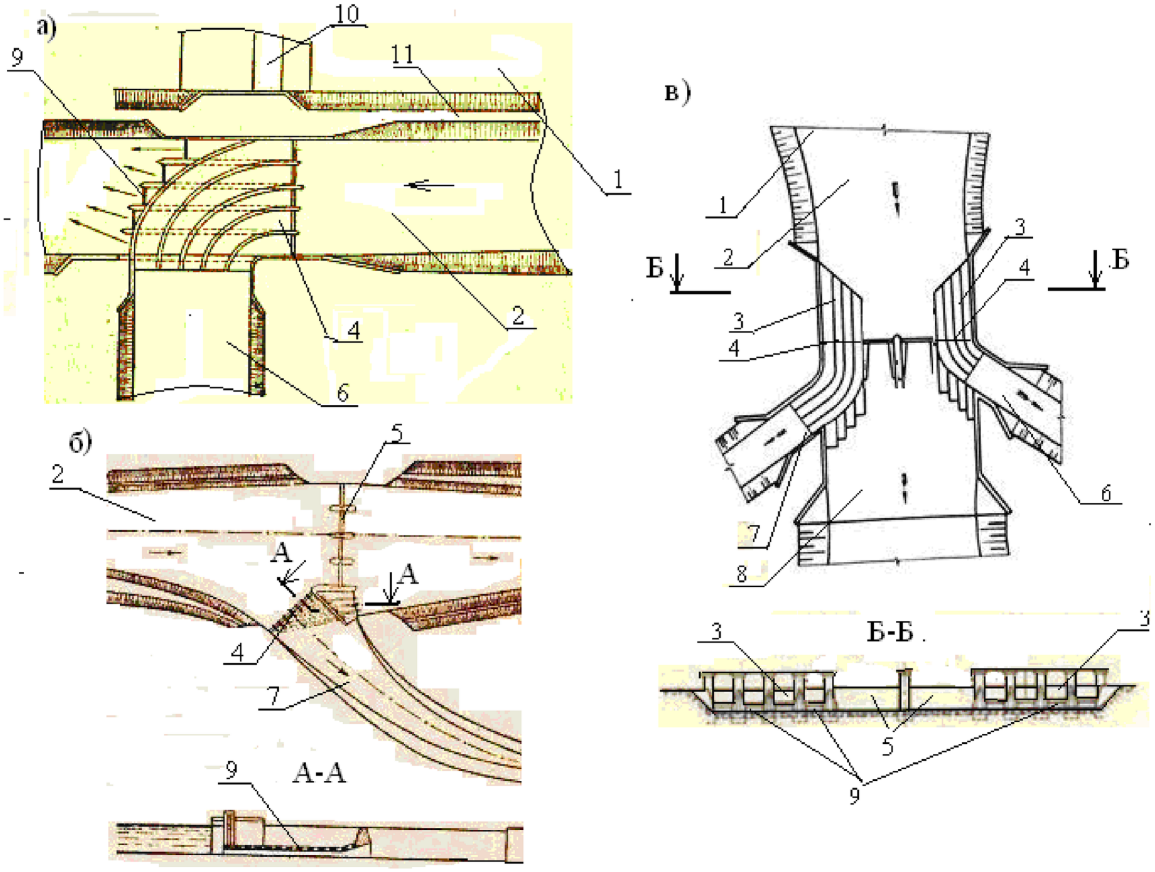


Рисунок 1.12 – Европейский тип водозабора: а – водозабор, предложенный Эльдсеном; б – ярусный водозабор, предложенный Кантеком; в – ярусный двухсторонний водозабор, предложенный Васильевым; 1 – русловой отстойник; 2 – подводящее русло; 3 – отстойные камеры; 4 – водоприемники; 5 – речные пролеты перекрываемые затворами; 6 – левобережный канал; 7 – правобережный канал; 8 – отводящее русло); 9 – донные промывные галереи, 10 – плотина; 11 – разделительная дамба

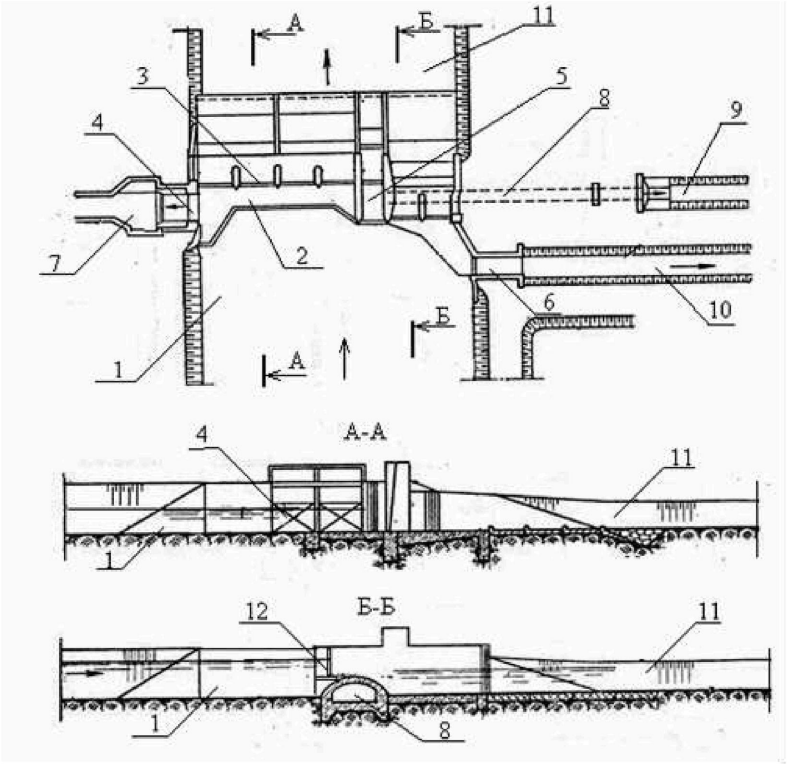


Рисунок 1.13 – Компоновочная схема сооружения европейского типа с боковыми водоприемниками: 1 – подводящее русло; 2 – понур; 3 – речные пролеты плотины, перекрытые затворами; 4 – боковой водоприемник левобережного канала; 5 – бычковый водоприемник правобережного канала; 6 – боковой водоприемник деривационного канала межколхозной ГЭС; 7 – левобережный канал; 8 – гусек; 9 – правобережный канал; 10 – деривационный канал; 11 – отводящее русло; 12 – водосливная стенка

По проекту В.А. Васильева перед двухсторонними фронтальным водоприемником на нижнем ярусе были устроены отстойные камеры. Отстойными камерами потоку в меженный режим перед водоприемником задавался спокойный режим движения ($Fr < 1$), что способствовало выпадению частиц наносов заданной крупности в придонные слои. Для осаждения наносов перед порогом водоприемника здесь, как и в конструкции Эльдсена, размещали донные галереи, отводящие наносы в нижний бьеф плотины [10]. Другое название водозаборных сооружений европейского типа – ярусный водозабор.

Кроме водозаборных сооружений европейского типа с фронтальными водоприемниками, представленными выше, Н.П. Алтунин предложил выделить водозаборы Европейского типа с боковым размещением водоприемников за русловым отстойником. Сооружения этой серии были построены и использовались для целей гидроэнергетики и ирригации на реках Чу (Кеминская ГЭС) и Кугарт (для ирригации и для деривационной МГЭС), их компоновочная схемы приведена на рисунке 1.13.

При первоначальном исполнении водозаборных сооружений европейского типа в подводящем русле устраивались русловые отстойники, которые в последующем заносились наносами и на поверхностях отложений перед плотинами формировались неустойчивые многорукавные потоки. Это негативно отражалось на наносозащитных характеристиках гидроузлов. В последующем в верхних бьефах водозаборов этого типа были проведены реконструкционные мероприятия с устройством регуляционных устройств, формирующих сконцентрированные потоки.

Изменениям также подверглись сбросные элементы подпорных створов, а также элементы наносозащиты с установкой дополнительных галерей и наносозащитных полков.

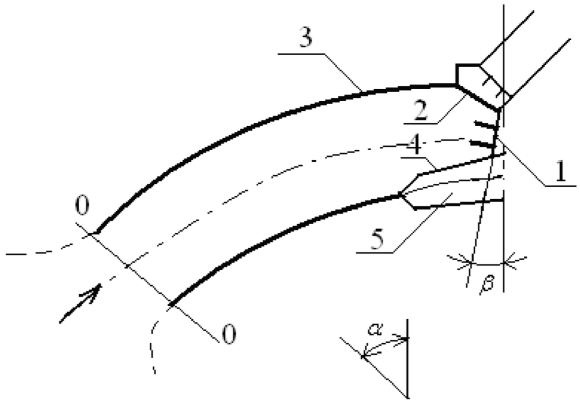


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема водозабора ферганского типа: 1 – плотина; 2 – водоприемный порог; 3 – урез воды при расчетном расходе; 4 – катастрофический водослив; 5 – траншейный сброс; α – угол поворота подводящего русла; β – угол щитового сброса

Следующий, Ферганский тип водозаборных сооружений, разработанный рядом авторов, основан на создании в потоке на подходе к водоприемнику такой структуры течения, при которой донные и придонные слои водного потока направляют влекомые наносы в сбросные отверстия, а в водоприемник поступают поверхностные слои, которые не содержат крупных фракций наносов [10, 34].

Для создания этих условий подводящему руслу и донному наносозащитному порогу, устраиваемому перед водоприемником, придают криволинейную форму, которая обеспечивает образование в потоке горизонтального вихревого движения воды. Это должно обеспечивать поступление в водоприемник отводящего канала восходящих струй воды, свободных от крупных фракций наносов. Водоприемник устраивается на концевом участке вогнутого берега криволинейного участка русла. По конструктивным особенностям различают три вида гидроузлов Ферганского типа: классический, улучшенный [97] и с боковым водоприемником [172].

Принципиальная классическая схема водозаборного сооружения Ферганского типа впервые была предложена в 1936 г. В.В. Пославским для Кампыр-Раватского водозаборного гидроузла на р. Карадарья (рисунок 1.14).

В последующем классическая схема была усовершенствована И.А Якштасом и А.Т. Просоловым [10]. Они заменили донный порог промывными галереями и обосновали схему размещения струенаправляющих дамб, которая до последнего времени широко используется при устройстве регуляционных сооружений низконапорных плотинных водозаборных гидроузлов (рисунок 1.15).

Затем В.Ф. Поярковым была предложена схема сооружения ферганского типа, основанная на принципе лобового водозабора и бокового сброса (рисунок 1.16). Конструкция этого сооружения построена на р. Ангрен для водоснабжения ТЭЦ.

Грузинский тип водозабора также основан на принципе создания в подводящем русле водозаборного сооружения циркуляционного движения в виде горизонтальных завихрений струй потока, только донные наносы отводятся на сброс через специальные напорные наносоперехватывающие галереи. Наносоперехватывающие галереи, подобно схеме, приведенной на рисунке 1.12 б, размещаются под порогом водоприемника и перехватывают донные струи воды вместе с наносами, сбрасывая их в нижний бьеф.

Грузинский тип водозабора был рекомендован Н.Ф. Данелия (рисунок 1.17) [44, 45] для одностороннего и двухстороннего водозабора, он нашел широкое применение на горных участках рек Кавказского хребта. На реках республик Центральной Азии данный тип водозабора большого распространения не получил [172]. При высоких коэффициентах во-

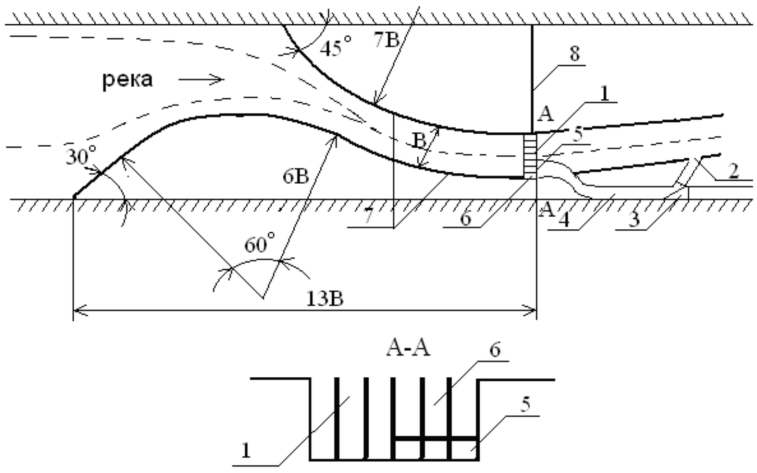


Рисунок 1.15 – Схема водозаборного сооружения улучшенного ферганского типа: 1 – плотина; 2 – сброс; 3 – вододелитель; 4 – канал; 5 – галереи; 6 – водоприемник; 7 – струенаправляющие дамбы; 8 – перегораживающая дамба

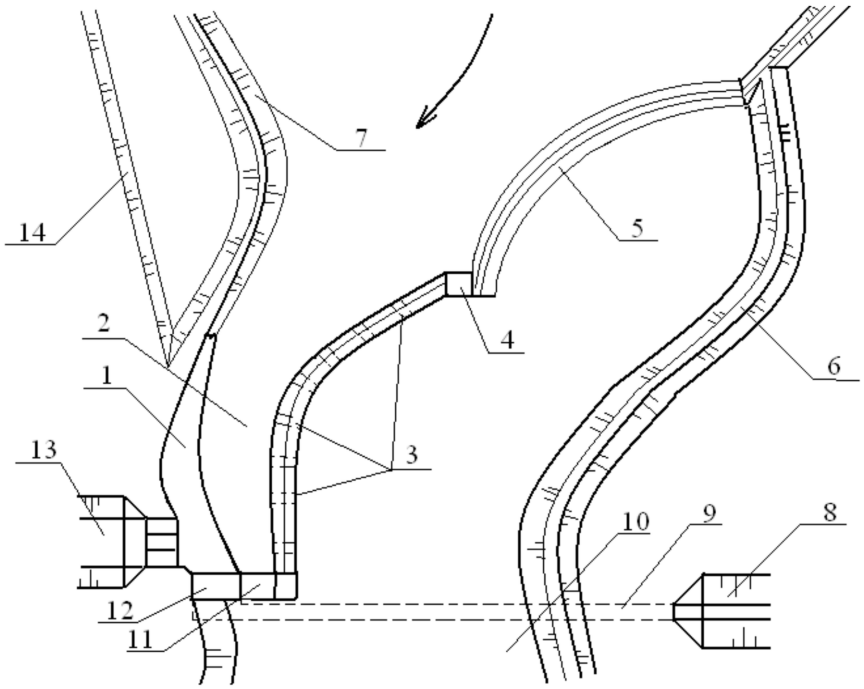


Рисунок 1.16 – Ферганский тип водозаборного гидроузла с криволинейным карманом: 1 – криволинейный Г-образный наносозащитный порог; 3 – донные трубы; 4 – шлюз; 5 – водослив; 6 – левобережная дамба; 7 – правобережная дамба; 8 – левобережный канал; 9 – дюкер; 10 – отводящее русло; 11 – промывник; 12 – водозабор дюкера; 13 – водозабор правобережного канала; 14 – коренной берег

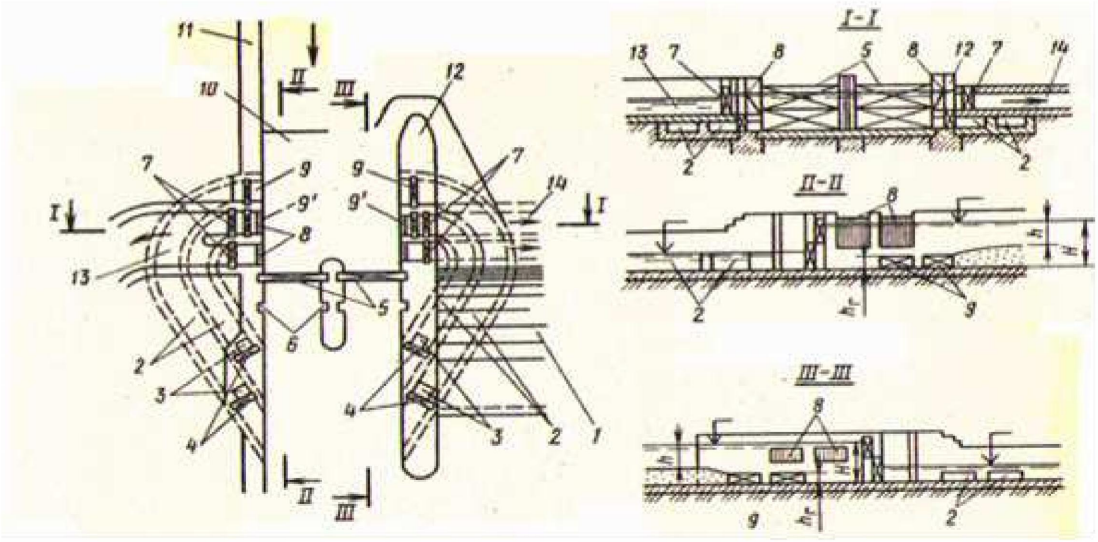


Рисунок 1.17 – Схема размещения наносоперехватывающих галерей на водозаборном сооружении Грузинского типа: 1 – водосливная плотина; 2 – наносоперехватывающие галереи (НПГ); 3 – смотровые колодцы НПГ; 4 – щиты на выходе НПГ; 5 – сдвоенные щиты промывных отверстий кармана; 6 – пазы для шандор; 7 – плоские затворы водоприемников; 8 – съемные решетки; 9 – щиты входных отверстий НПГ; 10 – бетонный понур кармана; 11 – струенаправляющая стенка; 12 – стенка кармана; 13 – водоприемник открытого типа; 14 – водоприемник закрытого типа

дозабора сбросные затворы промывных отверстий карманов закрыты. Количество и размеры промывных галерей определяются в зависимости от расхода водоприемника, высоты порога, крупности и количества влекомых наносов. В меженный период рекомендуются кратковременные промывки верхнего бьефа [10].

Необходимо отметить, что при разработке компоновок водозаборных гидроузлов Ферганского, Грузинского и Европейского типов авторы придерживались концепции создания водоприемных карманов, конструкции которых подобны компоновкам карманов индийского водозабора. Только в отличие от прототипа, последующее схемы водозабора имели регуляционные сооружения подводящего русла, способные создавать стабильные условия подхода потока к одному водоприемному карману. В области кармана формировался двухсторонний, или односторонний водоотбор.

Учитывая недостатки водозабора европейского типа (в виде захвата недопустимого количества наносов в отводящие каналы) и некоторые преимущества ферганского типа водозабора, в начале 1950-х годов Н.В. Лаптуревым с учетом рекомендаций С.В. Семенова [158] был разработан комбинированный тип сооружения, нашедшего применение на реках Куршаб и Кара-Унгур-Сай Кыргызской Республики [10, 69]. Компоновочная схема водозаборного сооружения комбинированного типа приведена на рисунке 1.18.

Комбинированный тип водозабора основан на совместном применении технологий очистки воды от твердых включений с использованием поперечной циркуляции потока в подводящем русле и расслоения потока по глубине. Размещение водоприемного оголовка, расположенного над донными промывными галереями и на вогнутом берегу русла, должно было позволить проводить надежную защиту водоприемника от наносов. Также расслоение потока на три яруса обеспечивало гарантированный сброс в нижний бьеф плавающего мусора и шуголедовых образований.

По оценке эксплуатационной службы и результатов лабораторных исследований эта конструкции при высокой относительной сложности и стоимости показала низкие значения коэффициента водозабора α без захвата наносов, не превышающих коэффициенты водозаборных гидроузлов ферганского типа. В основном это связано с тем фактом, что в про-

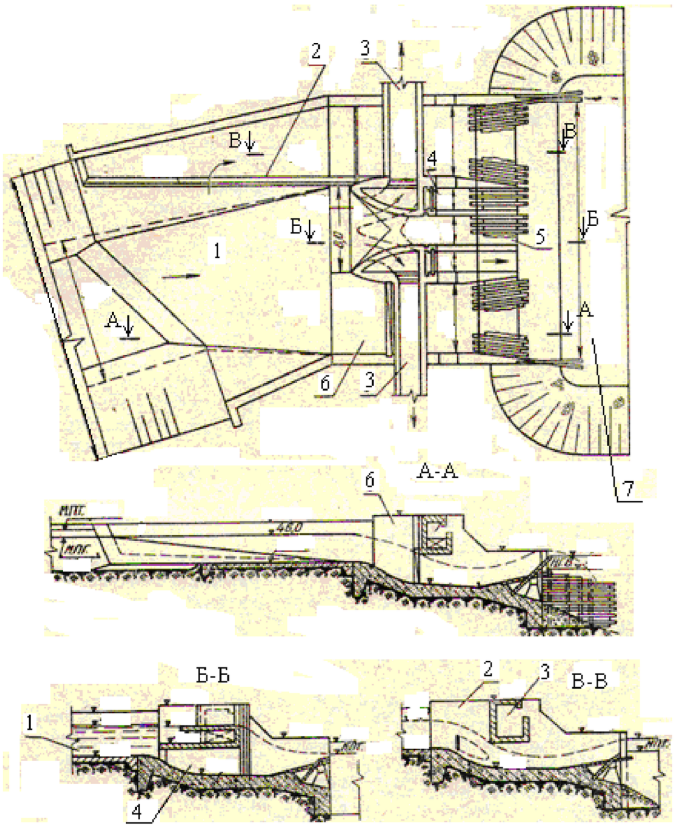


Рисунок 1.18 – Водозаборное сооружение комбинированного типа: 1 – подводящее зарегулированное русло; 2 – катастрофический водослив; 3 – лотки акведуки каналов; 4 – донные промывные галереи; 5 – шугосброс; 6 – щитовой водосброс (речной пролет); 7 – отводящее зарегулированное русло

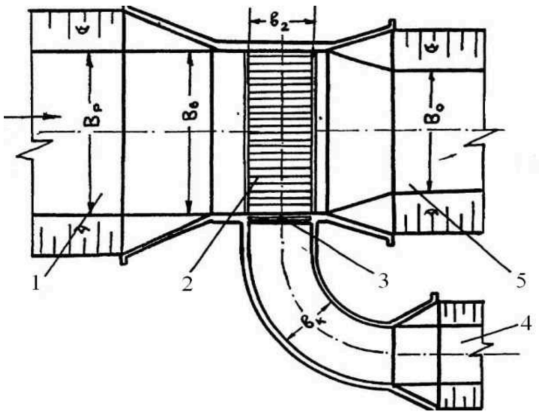


Рисунок 1.19 – Компоновка водозаборного сооружения с донно-решетчатым водоприемником: 1 – подводящее русло; 2– водозаборная галерея с донной решеткой; 3 – затвор регулятора; 4 – отводящий канал; 5 – отводящее русло

мывных галереях для создания сдвигающих скоростей воды должен производиться сброс значительных расходов [97].

Основным средством защиты водоприемников комбинированного типа от наносов при коэффициентах водозабора более 0,7 являются периодические промывки верхнего бьефа гидроузлов [69]. В результате низкой эффективности наносозащиты канала Отуз-Адыр (системы р. Куршаб) с головным водозабором этого типа, до реконструкции водозаборного узла на очистке канала в течение всего вегетационного периода работало три экскаватора.

Достаточно широкое распространение на горных участках малых рек получил Решетчатый тип водозабора, где также используется поперечная циркуляция и расслоение потока [10]. Первым и наиболее известным гидроузлом этого типа является Тирольский водозабор (рисунок 1.19) [162].

Основной целью решетчатого водозабора является недопущение крупных наносов и плавающего мусора в горизонтальный донный водоприемник. При этом защита производится горизонтальными или наклонными решетками, уложенными на водосливе.

Задержанные крупные фракции наносов вместе с мусором сбрасываются в нижний бьеф, а песок и мелкий гравий, несмотря на повышенную отметку верха водозаборной галереи, вместе с водой подаются в отводящий канал.

Таким образом, эти сооружения, разработанные для гидроморфометрических условий европейских горных рек с незначительными наносными и мягкими зимними режимами, не оправдали своего предназначения в горных условиях Кавказа и Средней Азии. Опыт эксплуатации показал следующие недостатки решетчатого водозабора [10, 97]:

- большие потери напора в пределах узла (до 1,5 м);
- захват значительной части наносов с размерами фракций, меньшими, чем просвет решетки, в отводящий канал;
- сильная засоряемость решетки наносами и плавником, приводящая к значительным дополнительным эксплуатационным затратам по ее очистке;
- затруднения, возникающие при зимней эксплуатации сооружения (решетка обмерзает, забивается шугой и льдом).

Исследователи Германии, где Тирольский тип водозабора нашел наибольшее применение, также отмечают его недостатки в эксплуатации. В частности, К. Сесен [188] указывает, что за водозаборными сооружениями этого типа необходимо дополнительно устраивать песколовки и отстойники для осаждения наносов, которые требуют значительных сбросных расходов. По мере того, как сооружения это типа строились, они подвергались реконструкции и совершенствованию.

Исследования по совершенствованию решетчатого типа водозабора продолжались до начала 80-х годов прошлого века. Прежде всего, ученых в конструкциях решетчатого водозабора привлекала относительно низкая материалоемкость.

Известны многочисленные конструкции водозаборных сооружений решетчатого типа, которые были предложены Н.Ф. Данелия, Е.А. Замариным, С.Г. Мелик-Кубаровым, Л.А. Горбачевым, Р.Ж. Жулаевым, Ф.С. Салаховым и др. [10, 44, 156, 162]. Наиболее известные компоновки гидроузлов решетчатого типа приведены на рисунках 1.20, 1.21 и 1.22.

Анализ многочисленных конструкций усовершенствованных схем решетчатого водозабора [36] показывает, что в качестве основного мероприятия, повышающего наносозащитные характеристики, все авторы определяют необходимость поднятия водоприемной галереи над отметками среднего дна русла реки.

Затруднение вызывает необходимость устройства щитовых отверстий, способных промывать образуемую емкость верхнего бьефа. Уровень воды в нижнем бьефе находился значительно ниже уровней воды в водоприемных галереях, гравиеловках и наносозащитных лотках и других элементах сооружения.

Из-за сложности конструкции и низкой надежности большинство предложенных компоновочных схем решетчатого водозабора не нашли широкого практического применения или после постройки были реконструированы.

На наш взгляд, наиболее совершенной из современных разработок в странах Европы в области совершенствования водозаборных сооружений решетчатого типа является разновидность водозабора тирольского типа – Флотационная решетка (CoandaScreen) (рисунок 1.23) [187, 188].

Сооружение относится к решетчатым, особенностью конструкции которых является месторасположение и ориентация стержней самой решетки. Решетка размещается на низовой грани водосливной плотины практического профиля. Плотина располагается в русле по нормали или вдоль динамической оси потока в подводящем русле.

К недостаткам водозаборного сооружения, выполненного по типу Флотационная решетка, относятся: сложность конструкции, необходимость устройства громоздкой водосливной плотины с закрытой полостью, невозможность проведения активной наносозащиты, необходимость создания больших глубин в верхнем бьефе.

По результатам лабораторных исследований различных схем решетчатого водозабора (см. рисунок 1.22) авторами были сделаны следующие выводы [10, 66]:

1) захват наносов в водоприемную галерею решетчатого водозабора в схемах III и IV обеспечивается только при совместной работе щитовых отверстий и пескогравиеловки;

2) возбуждение поперечных течений и направление донных наносов в сброс осуществляется путем регулирования перераспределения удельных расходов элементами

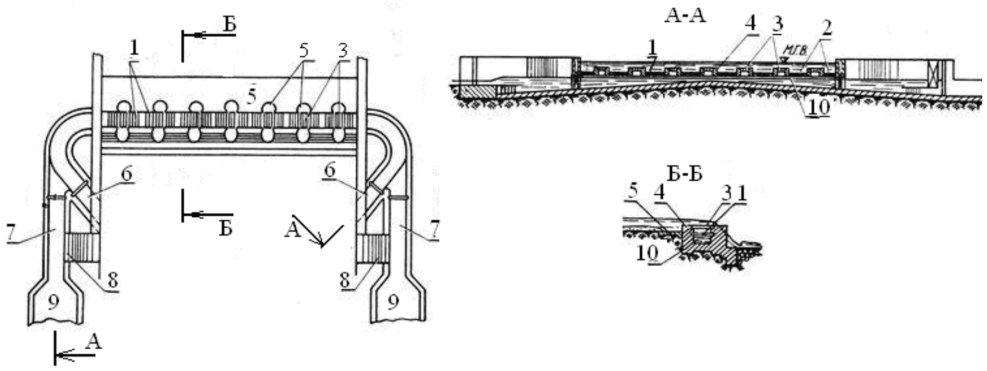


Рисунок 1.20 – Схема решетчатого сооружения, предложенная Н.Ф. Данелия: 1 – решетки нижнего яруса; 2 – сплошное перекрытие; 3 – решетки верхнего яруса; 4 – бычки; 5 – бетонный понур; 6 – сбросной канал; 7 – деривационный канал; 8 – водослив; 9 – отстойник; 10 – водозаборная галерея

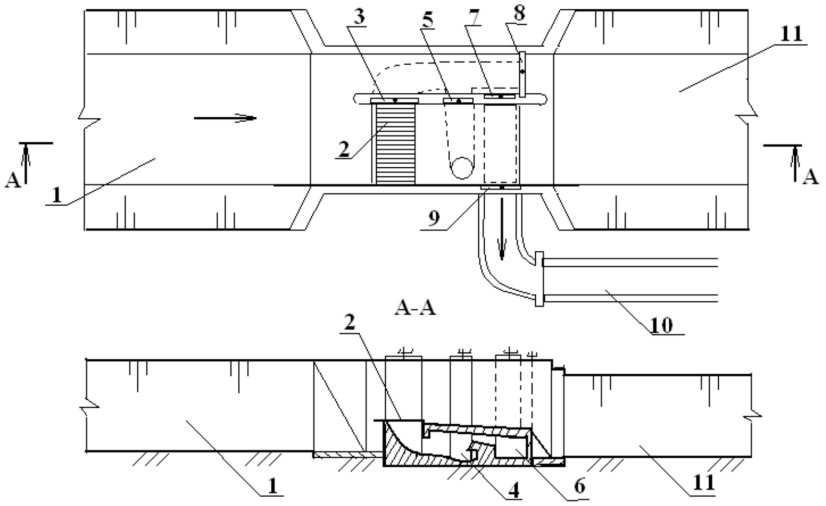


Рисунок 1.21 – Схема решетчатого сооружения (Ф.С. Салахова): 1 – подводящее русло; 2 – водоприемная решетка; 3 – сбросный затвор водоприемной галереи; 4 – гидравлический сепаратор; 5 – промывной затвор; 6 – водозаборная галерея; 7 – сбросной затвор галереи; 8 – щитовое отверстие; 9 – затвор водоприемника; 10 – отводящий канал; 11 – отводящее русло

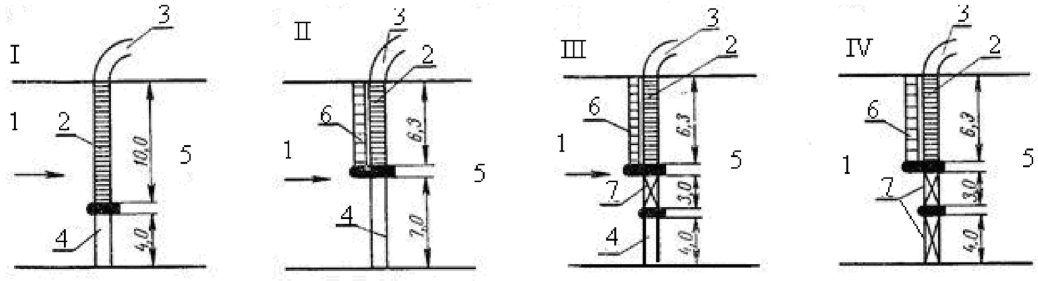


Рисунок 1.22 – Схемы решетчатого водозабора (Р.Ж. Жулаева и Г.В. Соболина, И.К. Рудакова): 1 – подводящее русло; 2 – водоприемная галерея, перекрываемая решеткой; 3 – канал; 4 – водосливная часть; 5 – отводящее русло; 6 – траншейная гравиеловка; 7 – щитовая часть

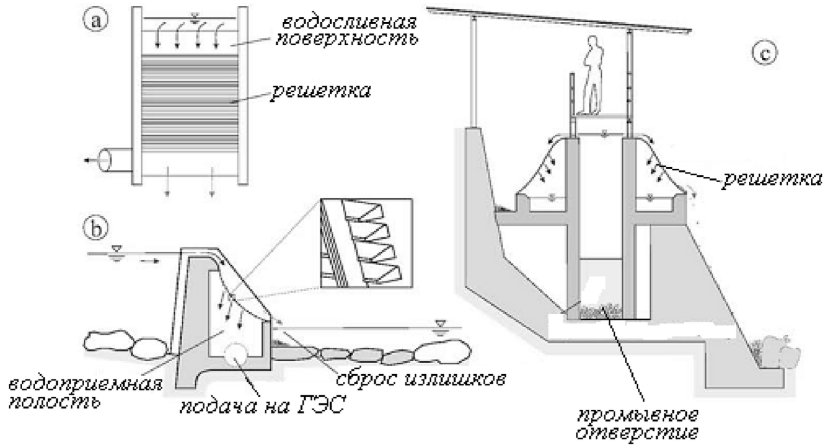


Рисунок 1.23 – Водозаборное сооружение тирольского типа – Флотационная решетка

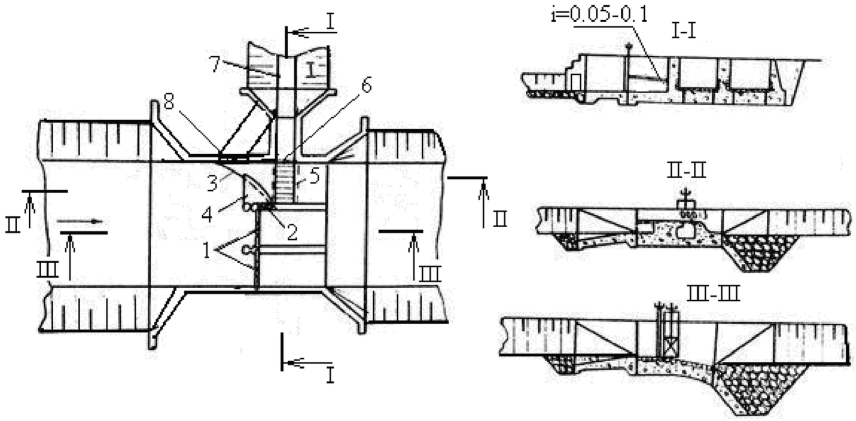


Рисунок 1.24 – Усовершенствованное водозаборное сооружение решетчатого типа: 1 – щитовой сброс; 2 – промывник; 3 – криволинейный порог; 4 – съемная железобетонная полка; 5 – водоприемная галерея, перекрываемая решеткой; 6 – водоприемник; 7 – деривационный канал; 8 – отверстие зимнего водоотбора

сооружений (перед водоприемником погонные расходы воды должны быть в 1,5 раза меньше, чем перед сбросом, в этом случае донные наносы уходят в сбросное отверстие);

3) водозаборные гидроузлы, устраиваемые на горных реках с быстро нарастающими паводками, должны быть оборудованы быстродействующими затворами с автоматическим подъемом (средствами электрической или гидравлической автоматизации).

Эти рекомендации стали определяющим в дальнейшем совершенствовании конструкций водозаборных гидроузлов для горных рек. На основе этих выводов авторы предложили ряд компоновочных схем водозабора, которые широко использовались проектными организациями Кыргызстана при устройстве гидроэнергетических систем деривационных МГЭС. По схеме IV на рисунке 1.22 было построено сооружение на реках Сокулук для ГЭС №2, водозаборное сооружение на р. Ак-Су (Иссык-Кульской обл.) и др. По более совершенной компоновочной схеме были созданы водозаборные сооружения гидроэнергетического назначения на реках Карабалта и Иссык-Ата, которое эксплуатировалось до 80-х годов, а затем были разрушены паводком (рисунок 1.24).

Усовершенствованная схема решетчатого водозаборного сооружения была предложена Р.Ж. Жулаевым для горных рек [39] (рисунок 1.25).

А.В. Филончиков на основании проведенного анализа сделал вывод, что на территории бывшего СССР существовала выраженная зональность распространения различных типов водозаборов, которая ограничивалась территориями союзных республик [172]. В качестве основного фактора, определяющего многообразие типов водозабора, было представ-

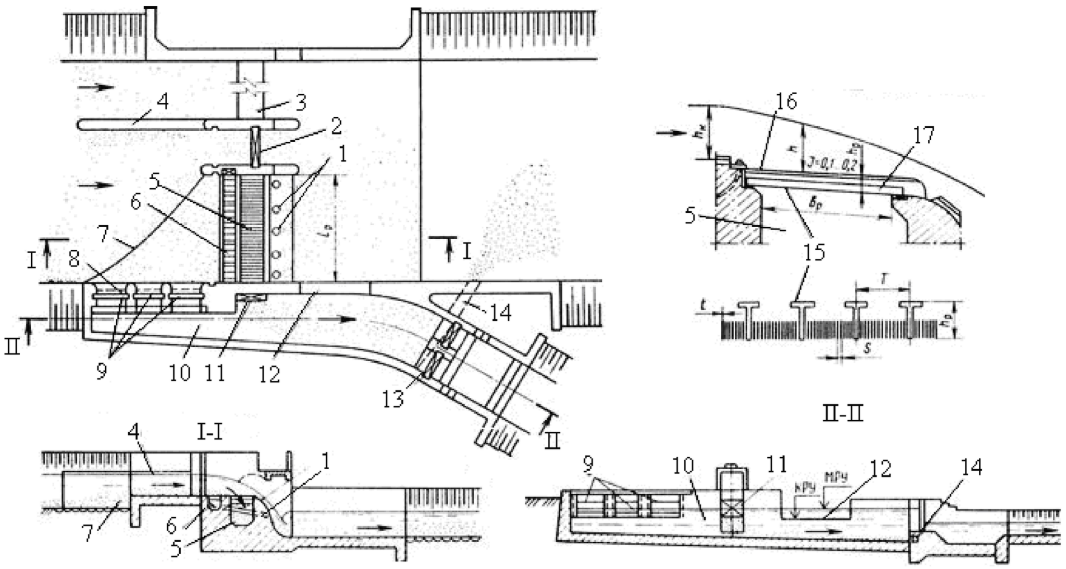


Рисунок 1.25 – Водозаборное сооружение решетчатого типа: 1 – пульповоды, 2 – щитовое отверстие; 3 – паводочная плотина; 4 – раздельная стенка; 5 – водозаборная галерея; 6 – наносоперехватывающая траншея; 7 – криволинейный порог; 8 – сороудерживающие решетки; 9 – шандоры зимних водоприемников; 10 – аванкамера; 11 – отверстие водозаборной галереи; 12 – автоводослив; 13 – затворы головного регулятора; 14 – промывная галерея; 15 – решетка водозаборной галереи; 16 – верхняя решетка; 17 – мелкая решетка

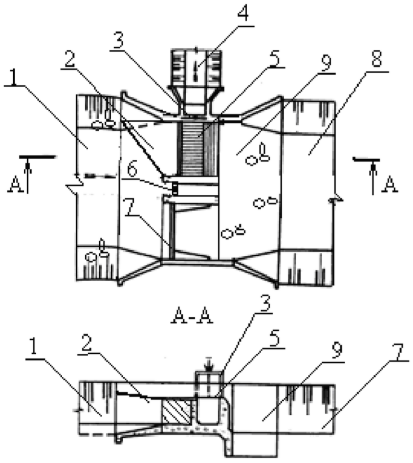


Рисунок 1.26 – Водозаборное сооружение Киргизского типа: 1 – подводящее русло; 2 – донный порог; 3 – регулятор расхода; 4 – отводящий канал; 5 – решетка, перекрывающая водоприемную галерею; 6 – промывник открытого типа; 7 – речной пролет; 8 – отводящее русло; 9 – водобойный колодец

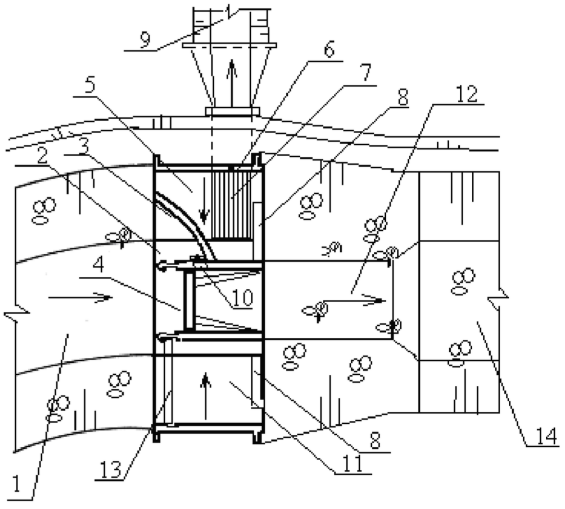


Рисунок 1.27 – Водозаборное сооружение Тяньшаньского типа: 1 – подводящее русло; 2 – понур; 3 – косонаправленный порог; 4 – речной пролет; 5 – водоприемная камера; 6 – водоприемник; 7 – сороудерживающая решетка; 8 – автоводосливы; 9 – отводящий канал; 10 – промывное отверстие; 11 – аванкамера; 12 – колодец; 13 – ремонтный затвор; 14 – отводящее русло

лено различие форм речных наносов (пластинчатые для рек Кавказа и шарово-кубичные для рек Средней Азии).

Несмотря на свою несложную конструкцию, водозаборные сооружения, разработанные Р.Ж. Жулаевым и др. (см. рисунок 1.27) имели коэффициент водозабора до 0,7 в режиме без наносов [97]. По нашему мнению это можно объяснить следующими причинами:

- поверхность водоприемной галереи была поднята на относительно большую высоту (более 1 м);
- гребень передней и задней стенок, формирующих водоприемную галерею, выполнялись с уклоном в сторону промывника;
- отверстие промывника расположено вблизи зоны защиты от наносов.

Эти особенности в совокупности с переменной по длине шириной порога определили возникновение вдоль передней стенки галереи поперечной циркуляции водного потока, которая отталкивала влекомые наносы от водоприемной галереи и транспортировала их к промывнику. В последующем для увеличения интенсивности циркуляции воды перед водоприемником устраивали наносозащитные пороги различной конфигурации.

Водозабор в зимний период эксплуатации гидроузла проводится через открытие затвора зимнего водоотбора из придонных горизонтов потока. Сброс шуголедовых образований реки ведется поверх решетки водоприемника. При этом сверху решетки устраивается деревянный лоток, а на гребне передней стенки водоприемной галереи устраиваются шандоры, частично стесняющие сбрасываемый поток к разделительному бычку промывника. Шандоры позволяют вести концентрированный сброс шуги через суженное сечение с привлечением минимально возможного объема воды.

Лабораторные и натурные исследования улучшенных конструкций решетчатого водозабора, проведенные с целью определения факторов, задающих интенсивность поперечной циркуляции потока перед водоприемником, позволили создать новую схему, приведенную на рисунке 1.26 – Киргизский тип водозаборного сооружения [172]. Сооружение Киргизского типа отличается устройством перед водоприемной галереей водослива с широким порогом, который имеет косо направленную переднюю поверхность и двойной уклон гребня в сторону водоприемника и промывного тракта. По данным лабораторных исследований такая конструкция порога, с устройством фронтального промывного тракта, обеспечивает безнаносный водозабор при $\alpha \leq 0{,}75$.

Более совершенным водозабором стал Тяньшаньский тип, оборудованный боковыми аванкамерами и донным косонаправленным циркуляционным наносозащитным порогом (рисунок 1.27) [172].

При этом наносозащитный порог выполнялся в виде водослива с тонкой стенкой и уклоном гребня в сторону промывника. Сравнивая процессы на сооружениях Тяньшаньского типа водозабора и решетчатого типа (см. рисунок 1.24), можно сделать вывод, что одна схема является логическим продолжением второй.

При создании Тяньшаньского типа авторами были сделаны следующие преобразования в схеме усовершенствованного решетчатого типа:

- передняя стенка водоприемной галереи размещена под углом к струям водного потока в подводящем русле;
- нижняя стенка водоприемной галереи решетчатого типа была преобразована в автоводослив аванкамеры для создания в ней необходимого напора для подачи воды в водоприемный оголовок;
- поверхностная решетка водоприемной галереи была преобразована в сороудерживающую решетку, устраиваемую перед береговым водоприемником;

- боковая аванкамера, расположенная на противоположном берегу от водоприемника, была оборудована автоводосливом для увеличения пропускной способности гидроузла (по аналогии со схемой IIIна рисунке 1.25).

Оценивая экономическую эффективность по методу средней бетоноемкости водозаборных гидроузлов, А.В. Филончиков определил, что водозаборные сооружения Тяньшаньского типа отличаются относительно низкими капиталовложениями [172]. В качестве их недостатков можно отметить низкую пропускную способность элементов, конструкция имеет закрытую водоприемную камеру, что усложняет ее очистку при водоотборе, боковое промывное отверстие задает низкую транспортирующую способность сбрасываемым объемам воды на подходном участке.

Первоначально как Киргизский, так и Тяньшаньский типы водозабора разрабатывались для целей гидроэнергетики. Но в последующем в связи прекращением строительства малых ГЭС в Кыргызстане, они начали широко применяться при водозаборе в ирригационные системы. Однако практически все последующие конструкции различных авторов в качестве базовой,на наш взгляд, имеют схему Тяньшаньского типа водозабора. При этом состав элементов гидроузла существенных изменений не претерпел, изменялись их форма и место относительно расположения. Это улучшило технические и технологические характеристики [89].

В качестве примеров можно представить компоновочные схемы Г.В. Соболина, И.К. Рудакова, Б.И. Мельникова и А.И. Рохмана, М.С. Рамазана и С.С. Сатаркулова, А.В. Филончикова и наших разработок, выполненных на кафедре ГТС и ВР КРСУ, которые приведены на рисунке 1.28 [35, 87, 120, 140 172]. Каждая из представленных компоновочных схем, как и гидроузлы Киргизского и Тяньшаньского типов, ведущие односторонний водозабор, имеет криволинейное подводящее русло, подобное руслу сооружений Ферганского типа, представленного на рисунке 1.15. Это определяет размещение водоприемника на вогнутом берегу. Отличительной чертой усовершенствованных конструкций гидроузлов тирольского типа, приведенных на рисунке 1.31, является возможность создания перед водоприемным оголовком поперечной циркуляции потока с помощью специальных придонных порогов.

Анализ научной литературы [10, 35, 97, 172], посвященной вопросу водозабора из горных рек, выделяет значительное многообразие компоновочных схем водозаборных сооружений, оборудованных наносозащитными порогами, не только с односторонним, но и с двухсторонним водозабором. Некоторые из них приведены на рисунке 1.29.

Для регулирования русловых процессов при двухстороннем водозаборе рекомендуются прямолинейные подводящие зарегулированные русла [172]. При этом как показывают натурные наблюдения, проведенные на гидроузле, построенном на реке Ак-Суу (см. рисунок 1.29 г), количество воды, забираемое в водоприемники, должно быть одинаковым. На данном гидроузле размеры наносозащитных порогов, являющимися водоприемными элементами первого порядка, равны [161]. В случаях, если расходы воды, забираемые в береговые водоприемники, не равны между собой, водоприемные аванкамеры приходится соединять дюкером для переброски части забранной воды с одного берега на другой. Данный гидроузел на р. Ак-Суу, эксплуатируется с 1972 г. и по заключению службы эксплуатации имеет достаточно высокие наносозащитные характеристики. Анализ условий водозабора на данном гидроузле показал, что это объясняется несколькими причинами:

- местоположением створа сооружения на концевом участке конуса выноса реки;
- строительством выше по течению реки двух новых сооружений в 80-х и 90-х года прошлого века;
- высокой специализацией эксплуатационного персонала.

Первые две причины определяют незначительное количество крупных фракций наносов, приносимых рекой к водозаборному створу гидроузла. Это дает возможность пред-

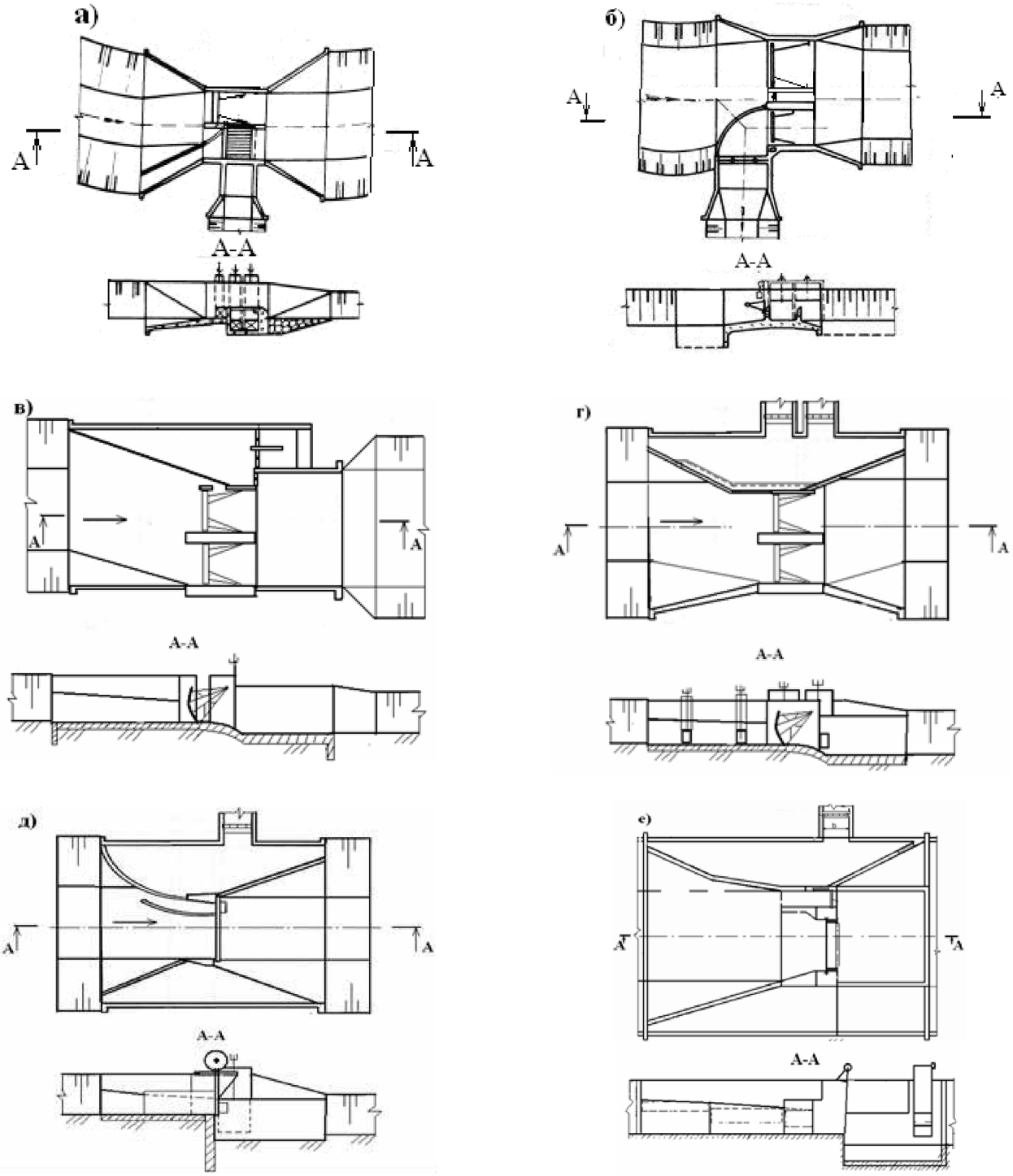


Рисунок 1.28 – Водозаборные сооружения, создаваемые при усовершенствовании гидроузлов Тяньшанского типа: а – конструкция Г.В. Соболина; б – конструкция И.К. Рудакова; в – конструкция М.С. Рамазана и С.С. Сатаркулова; г – конструкция, предложенная А.В. Филончиковым; д – конструкция, разработанная под руководством Я.В. Бочкарева; е – конструкция КРСУ

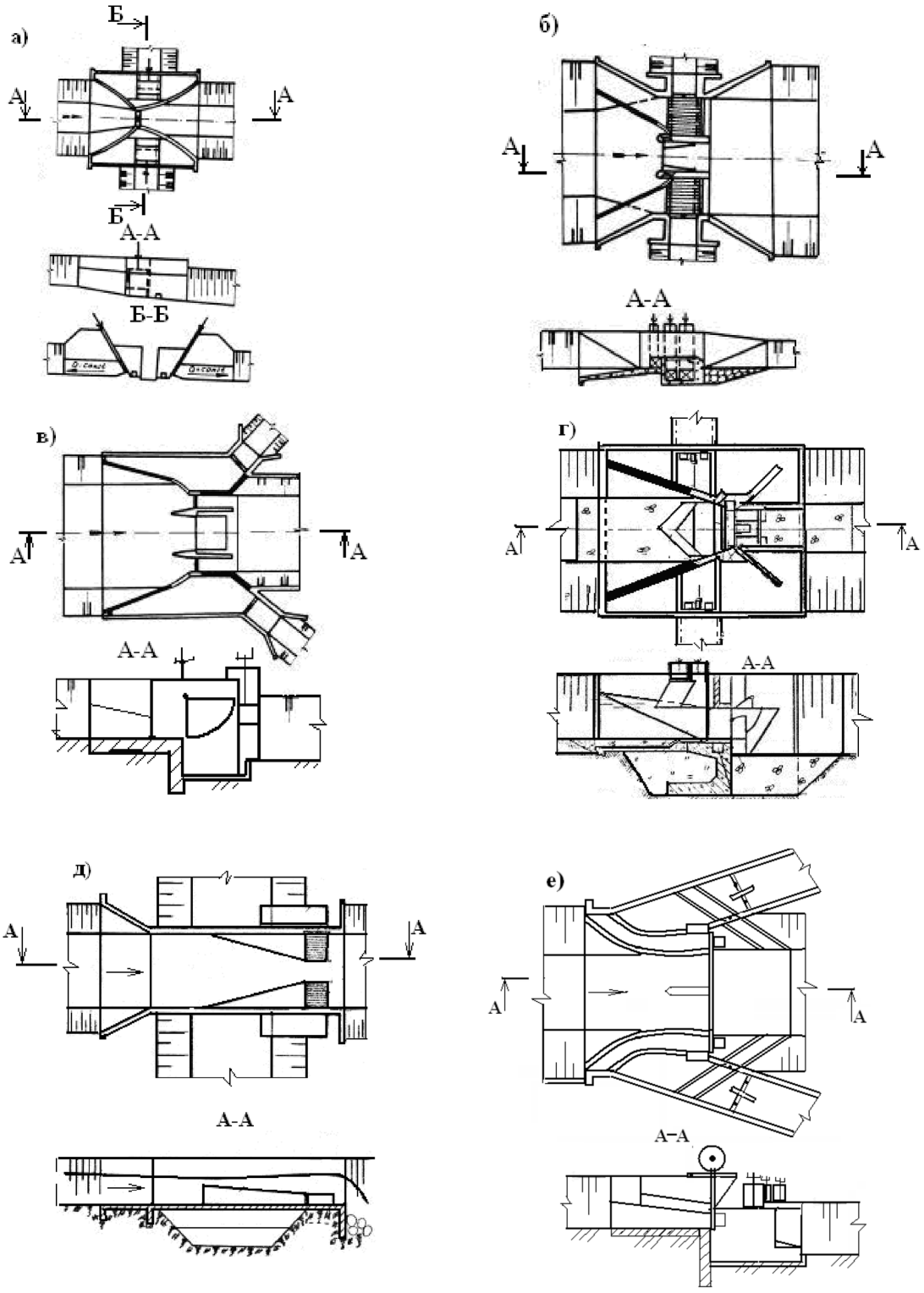


Рисунок 1.29 – Компоновочные схемы водозаборных гидроузлов с двухсторонним водоотбором: а – водозабор Я.В. Бочкарева и А.С. Лугового, б, в – водозаборы по схеме Г.В. Соболина; г – схема водозабора, предложенная Г.В. Соболиным и А.И. Рохманом, д – схема водозабора К.Ф. Артамонова и С.С. Сатаркулова; е – водозабор Б.И. Мельникова с двойным наносозащитным порогом

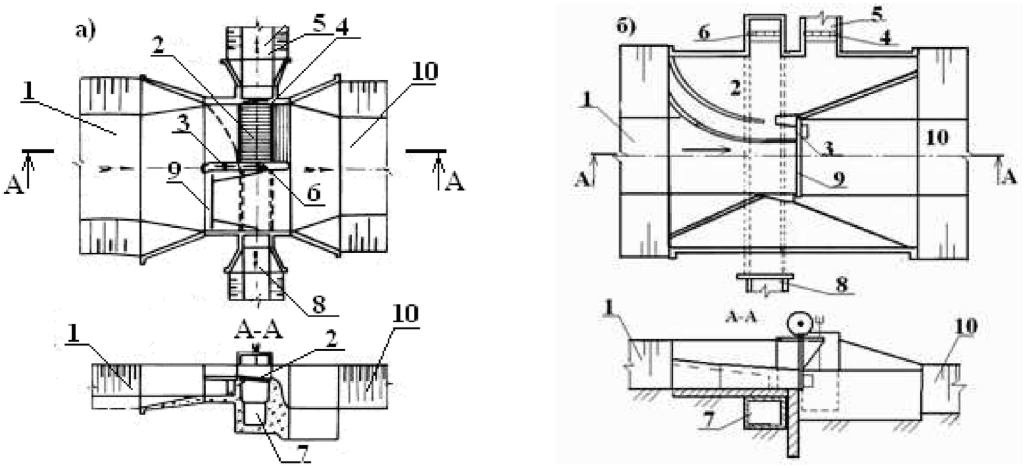


Рисунок 1.30 – Водозаборные сооружения с односторонним водоотбором и двухсторонней подачей: а – решетчатый водозабор; б – водозабор с наносозащитным порогом; 1 – подводящее русло; 2 – водоприемная галерея; 3 – промывное отверстие; 4 – водоприемник левобережного канала; 5 – левобережный канал; 6 – водоприемник правобережного канала; 7 – дюкер; 8 – правобережный канал; 9 – речной пролет; 10 – отводящее русло

положить, что применение головных гидроузлов с двухсторонним водозабором предпочтительно на предгорных участках горных рек и ниже русловых отстойников.

На горных участках рек водозаборные сооружения с двухсторонним водозабором, оборудованные донными наносозащитными порогами, не нашли широкого распространения.

Для обеспечения двухстороннего отвода воды от водозаборных сооружений используются гидроузлы с криволинейным подводящим руслом и односторонним водоотбором на вогнутом берегу русла, в которых водоподача на противоположный выпуклый берег осуществляется с помощью дюкеров по схеме, приведенной на рисунке 1.30.

Анализ приведенных на рисунке 1.28 компоновочных схем водозаборных сооружений с наносозащитными порогами позволил определить их объединяющие и отличительные признаки, которые приведены в таблице 1.4.

Анализ составляющих элементов исследуемых компоновочных схем водозаборов с донными порогами позволил сделать вывод, что определяющими отличительными признаками являются четыре первых признака. Последующие отличия являются не принципиальными. В данной главе компоновочные схемы гидроузлов представлены в том виде, в котором их рекомендовали авторы.

Рассматривая два первых отличительных признака можно сделать вывод, что донные наносозащитные пороги могут иметь три вида плановой и четыре – высотной конфигураций.

При разделении порогов по типам плановой конфигурации в качестве определяющего признака принимают положение внешней поверхности порога относительно струй водного потока в подводящем русле. При этом критерием для сравнения служит прямолинейный косонаправленный наносозащитный порог (рисунок 1.28 а), который по наикратчайшему расстоянию соединяет урез воды на берегу водоприемника и стенку, ограничивающую промывное отверстие или промывной тракт.

Таблица 1.4 – Объединяющие и отличительные признаки водозаборных сооружений, оборудованных наносозащитными порогами

№ п/п	Объединяющие признаки	Отличительные признаки
1	Устройство криволинейного подводящего русла	Различные конфигурации наносозащитного порога
2	Подпорный створ состоит из затворов речных пролетов, промывников, водосливов, бычков	Размещение водоприемника (боковое, фронтальное, донное решетчатое)
3	Устройство одного или двух речных пролетов в подпорном створе	Различное расположение промывного отверстия
4	Устройство перед водоприемным оголовком водоприемной камеры	Наличие и размещение зимнего водоприемника;
5	Водоприемная камера отделена от верхнего бьефа порогом	Наличие и размещение шугосбросов
6	Водоприемная камера отделена от нижнего бьефа автоводосливом	Наличие или отсутствие автоводослива верхнего бьефа;
7	Наличие наносозащитного порога, который является водоприемником	Различные устройства для очистки водоприемных камер
8	Оборудование на концевых участках порогов промывных отверстий;	Наличие или отсутствие средств гидравлической автоматизации;
9	Размещение перед водоприемниками сороудерживающих решеток	Степень автоматизации процесса водозабора
10	Размещение в нижнем бьефе устройств для гашения энергии водного потока русла	Вид сопряжения бьефов сооружения с регуляционными устройствами гидроузла

В случае искривления внешней поверхности порога в сторону водоприемной камеры его относят к вогнутым, а при искривлении в противоположном направлении – к выпуклым в плане порогам.

На рисунках 1.28 и 1.29 видно, что при устройстве косонаправленных и вогнутых в плане наносозащитных порогов на концевом их участке в основном устраиваются продольные или косонаправленные промывные отверстия, а в конце выпуклых порогов – фронтальные.

Исследованиями Г.В. Соболина и И.К. Рудакова было обосновано преимущество косонаправленных донных порогов над вогнутыми в плане порогами [162]. В результате конструкции вогнутых в плане порогов не получили широкого распространения.

Компоновочные схемы приведенных выше водозаборных сооружений представлены нами в хронологическом порядке их появления в научной литературе. Это позволило показать, что водозаборные сооружения, выполненные по компоновочным схемам, представленным на рисунке 1.28 (а, б, в) при производственном внедрении имели максимальное значение коэффициента водозабора не более 0,8...0,85. Для повышения коэффициента водозабора $\alpha_в$ до больших величин А.В. Филончиковым в 1990 г. было рекомендовано применять промывник галерейного типа, приведенный на рисунке 1.29 г. Основным недостатком этой компоновки являются опорные рамы затворов отверстий промывных галерей, которые возвышаются над гребнем наносозащитного порога. При ликвидации приведенного недостатка, на наш взгляд, такойспособ наносозащиты является перспективным.

Для повышения коэффициента безнаносного водозабора до 0,9 при устройстве выпуклого наносозащитного порога Б.И. Мельниковым и А.И. Рохманом в ходе лабораторных исследований было найдено решение в виде устройства промывного тракта с фронтальным размещением промывного отверстия. Промывной тракт образуется концевым участком порога, промежуточным бычком ограниченной длины и затвором в концевом сечении, перекрывающим промывное отверстие [120].

Рассматривая различную высотную конфигурацию наносозащитных порогов, времени, можно выделить четыреее основных вида:

- пороги с горизонтальным гребнем;
- пороги с постоянным уклоном по гребню, с понижением высоты порога от начала к концевому участку;
- пороги, состоящие из повышенного и нижнего участков, при этом повышенный участок порога имеет уклон гребня, а нижний участок порога выполняется с горизонтальным гребнем;
- пороги с переменным уклоном гребня.

Первый вид выпуклых в плане порогов с горизонтальным гребнем был предложен И.К. Рудаковым при обосновании компоновочной схемы водозабора, приведенного на рисунке 1.28 б [151]. Это конструктивное решение получило производственное применение на р. Аламедин в 1964 г. для ирригационных каналов «Чон-Алыш», «Караго» и на р. Кегеты в 1970 г. для водопадачи в каналы «Калмак» и «Ден». Однако впоследствии автор рекомендовал выполнять выпуклый в плане порог с переменой высотой, то есть с уклоном гребня i = 0,03 в сторону промывника [149]. С учетом этих изменений пороги данной конструкции в последующем были построены в составе водозаборных сооружений на реках Шамси и Нооруз.

Компоновочные схемы гидроузлов, оборудованные усовершенствованными криволинейными порогами конструкции Б.И. Мельникова и А.И. Рохмана, с гребнем, выполненным с уклоном i = 0,06…0,08, приведены на рисунках 1.28 д, 1.29 е, 1.30 б.

Наносозащитные пороги с переменным уклоном гребня впервые были применены нами при разработке рекомендаций по реконструкции водозаборного гидроузла на р. Куршаб (рисунок 1.31) [69].

Исследования реконструируемого сооружения Комбинированного типа, показанного на рисунке 1.31, позволили обосновать необходимость устройства в катастрофическом водосливе дополнительного водозабора в виде водослива, имеющего переменный уклон гребня [69, 70].

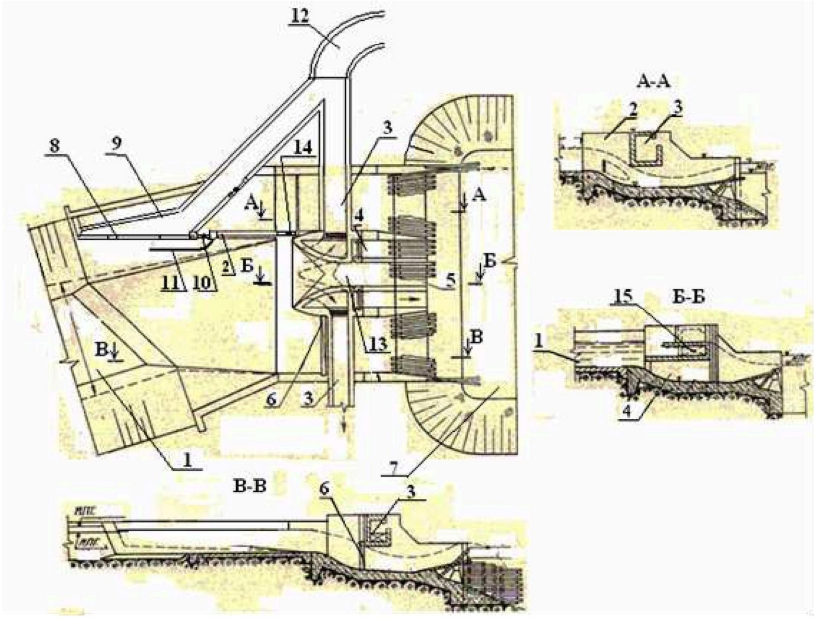


Рисунок 1.31 – Водозаборное сооружение на р. Куршаб: 1 – подводящее русло; 2 – автоводослив; 3 – акведуки; 4 – промывные галереи; 5, 13 – шугосбросы; 6 – водосброс; 7 – отводящее русло; 8 – наносозащитный порог; 9 – аванкамера; 10 – промывное отверстие; 11 – струенаправляющая шпора; 12 – канал Отуз-Адыр; 14 – промывное отверстие; 15 – регулятор канала

В 2002 г. этот вариант реконструкции был принят для внедрения на сооружении. При реконструкции на концевом участке водослива был оборудован промывной тракт, оснащенный сбросным отверстием и струе направляющей шпорой.

В результате через основной регулятор левобережного канала Отуз-Адыр забирался меньший расход воды, и образовывалось меньшее количество наносов.

Исследования процессов водозабора из горных рек определили явное преимущество донных наносозащитных порогов, создающих динамическое воздействие на влекомые наносы над послойным водозабором, используемым для защиты от наносов только гравитационную составляющую.

В последующем донный порог с переменным уклоном гребня нами был рекомендован при устройстве ломаных наносозащитных порогов на водозаборных сооружениях для деривационных ГЭС. (ВСДГ) (Патент КР № 607), компоновочная схема которого приведена на рисунке 1.28 е [122]. Результаты исследований элементов этой компоновочной схемы будут приведены в последующих главах.

Последним из разработанных для целей гидроэнергетики водозаборов из горных рек на начало XXI в. являлись водозаборы Киргизского типа с низким значением коэффициента водозабора без захвата наносов. Поэтому нами в качестве прототипа своих разработок была использована положительно зарекомендовавшая себя на ирригационных системах компоновочная схема Б.И. Мельникова и А.И. Рохмана (см. рисунок 1.28 д).

В классической литературе [31, 36] низконапорные плотинные водозаборные сооружения группируются по условиям борьбы с донными наносами на боковые, фронтальные и донно-решетчатые в зависимости от относительного размещения водоприемного оголовка. Устройство водоприемных камер на гидроузлах с наносозащитными порогами обеспечило независимость этого типа водозабора от положения водоприемника в створе гидроузла. Поскольку донный порог независимо от его конфигурации является многофункциональным устройством, обеспечивающим как наносозащиту, так и водоотбор из реки. Устройство водоприемных камер перед водоприемным оголовком определило независимость попадания наносов в отводящий канал от относительного размещения водоприемника (бокового или фронтального).

В исключительных случаях при вытянутой конфигурации водоприемной камеры на таком сооружении может быть применена вторая ступень борьбы с наносами в виде промывной галереи (гравиеловкой) (см. рисунок 1.28 е). При этом водоприемник размещается фронтально. Такой тип водозабора достаточно подробно описан К.В. Поповым [132] и Б.И. Мельниковым [120].

С целью защиты водоприемника от попадания плавающего мусора (плавника) его, как показывает практика внедрения водозаборов описываемого типа, размещают в береговых устоях или на дне водоприемной камеры (см. рисунки 1.28, 1.29 и 1.31).

Изучая состав элементов и компоновки приведенных типов водозаборных сооружений, разработанных для горных рек, можно сделать вывод, что в случае оборудования верхнего бьефа автоводосливом, он должен размещаться на выпуклом берегу подводящего зарегулированного русла со стороны затворов речных пролетов. Осуществляя функцию сброса излишков воды при превышении нормального подпертого уровня низконапорной плотины, автоводослив таким образом способствует уменьшению уровней воды перед речным пролетом. Это ускоряет размыв призмы наносов, откладывающейся в верхнем бьефе в период переформирования донных отложений. Особенно важную роль это влияние имеет в период нарастания паводков. При этом увеличивается отвод основных расходов воды, поступающих по реке, от вогнутого берега к выпуклому. Это способствует перенесу части донных отложений с поверхности призмы наносов, образованных в меженный период перед водоприемником, в сторону сбросного (речного) пролета.

В качестве элементов, служащих для опорожнения водоприемной камеры от воды и наносных отложений, используются водосбросные отверстия, перекрываемые затворами. Как показывает анализ известных типов водозабора, эти водосбросы могут выполняться в виде открытых или донных диафрагменных отверстий, а также в виде напорных патрубков, размещаемых в автоводосливе водоприемной камеры.

Многими авторами [97] была обоснована комплексная автоматизация процесса водозабора из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы. Автоматизация процесса существующих гидроузлов, как правило, осуществляется по верхнему бьефу [120] посредством оснащения речных пролетов затворами-автоматами уровня верхнего бьефа, промывных трактов устройствами автоматизации промывки наносов, водоприемных оголовков стабилизаторами или регуляторами расхода воды. За счет этого обеспечивается надежная автономная подача потребителю заданного, постоянного во времени расхода воды.

Сопряжение бьефов изучаемых типов горных водозаборных сооружений производится с использованием водобойных колодцев, стенок, водобоев с креплением рваным камнем, креплением отводящего русла бутобетоном и гребенчатых расщепителей. В некоторых случаях эти устройства используются самостоятельно или комбинируются.

Для сопряжения регуляционных сооружений с береговыми устоями водозаборных сооружений, как видно из приведенных компоновочных схем (рисунки 1.28–1.31), применяются обратные стенки, раструбы с обратными стенками, ныряющие и продольные стенки, косые плоскости.

1.5. Обоснование классификации низконапорных плотинных водозаборных сооружений

Поскольку классификация подразумевает группировку объектов исследований и наблюдений в соответствии с их общими признаками, для проведения подразделения известных типов сооружений на группы по общим признакам, зададимся условием, что прошлое рациональное решение, используемое в последующем, определяет преемственность признаков.

Для определения связей между известными компоновками водозаборных гидроузлов был продлен перечень типов водозаборных сооружений, представленный Н.П. Алтуниным [10] с учетом более поздних разработок, описанных выше:

1. Индийский тип;
2. Европейский тип;
3. Грузинский тип;
4. Ферганский тип;
5. Комбинированный тип;
6. Решетчатый (Тирольский) тип;
7. Усовершенствованный решетчатый тип;
8. Киргизский тип;
9. Тяньшаньский тип;
10. Тип водозабора с косонаправленными циркуляционными порогами (КЦП);
11. Тип водозаборных сооружений с выпуклыми в плане порогами;
12. Гидроэнергетический тип водозаборного сооружения (КРСУ).

Для определения приоритета в принятии конструктивных и технологических решений для систематизации перечня отличительных признаков известных конструкций низконапорных плотинных водозаборных сооружений, был выполнен анализ, приведенный в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Отличительные признаки компоновок водозаборных сооружений

№ п/п	Тип водозаборного сооружения	Отличительные признаки
1	2	3
1	Индийский	1.1 Двухсторонний водозабор и водоподача
		1.2 Устройство промывных карманов с боковым водозабором
		1.3 Устройство водосливной плотины, для сброса излишков воды при превышении расчетных уровней
		1.4 Размещение регулятора расхода воды в начале водоприемного оголовка по урезу берегового устоя;
		1.5 Применение регуляционных сооружений в верхнем и нижнем бьефах гидроузла
		1.6 Устройство шандорного порога перед водоприемником
		1.7 Необходимость кратковременных промывок водоприемных карманов
		1.8 Зимний водозабор ведется из придонных горизонтов потока
		1.9 Отведение шуги от водоприемника с помощью деревянной L-образной запани;
		1.10 Сброс шуги через вырез в затворе сбросного отверстия кармана
		1.11 Обогрев затворов подпорного створа;
2	Европейский	2.1 Устройство в верхнем бьефе руслового отстойника
		2.2 Деление промывного кармана на отстойные камеры
		2.3 Устройство донных прямолинейных промывных галерей
		2.4 Устройства фронтальных или боковых водоприемников
		2.5 Устройство косонаправленной верховой забральной стенки перед водоприемником
		2.6 Размещение водоприемников над донными промывными галереями
		2.7 Организация подпора в верхнем бьефе с помощью щитовых отверстий
		2.8 Использование одного кармана для двухстороннего водозабора
		2.9 Организация двухсторонней водоподачи с помощью водопроводящей галереи (гуська)
3	Грузинский	3.1 Используются боковые водоприемники, размещенные выше входных отверстий промывных галереи
		3.2 Нанососбросные галереи имеют криволинейные очертания
		3.3 Симметричное устройство выходных отверстий криволинейных нанососбросных галерей при двухстороннем водозаборе
4	Ферганский	4.1 Устройство криволинейного подводящего русла с помощью регуляционных сооружений
		4.2 Проведение водозабора на вогнутом берегу
		Устройство криволинейного кармана (для создания циркуляции перед водоприемником)
		4.3 Размещение подпорного створа под углом относительно динамической оси потока
		4.4 Размещение автоводослива верхнего бьефа на выпуклом берегу подводящего русла
		4.5 Устройство порога перед водоприемником (прямолинейного или криволинейного очертания с Г-образным полком)
		4.6 Организация двухсторонней водоподачи с помощью дюкеров
		4.7 Преимущественное осуществление фронтального водозабора
		4.8 Устройство пульповодов в автоводосливе
		4.9 Размещение водосбросов за водоприемником;
		4. 10 Устройство щитового сброса на выпуклом берегу подводящего русла
		4.11 Ведение водоотбора на вогнутом берегу

5	Комбинированный тип	5.1 Устройством трехъярусного водоприемника
		5.2 Организацией бычкового водозабора
		5.3 Проведением двухстороннего водозабора из середины подпорного створа
		5.4 Устройством акведуков для подачи воды на оба берега
		5.5 Размещением придонных промывных галерей между водозаборными бычками
		5.6 Устройство шугосброса над водоприемником;
		5.7 Размещением автоводослива верхнего бьефа на вогнутом берегу русла
		5.8 Использованием гребенчатых расщепителей для гашения энергии воды
6	Тирольский тип	6.1 Проведение водозабора только из придонной области потока
		6.2 Устройство водоприемника на средневзвешенных отметках дна русла
		6.3 Устройством решетки над донным водоприемником для защиты от наносов
		6.4 Устройство водоприемной галереи
		6.5 Сброс крупных фракций наносов через створ водоприемника
		6.6 Допущение попадания в водоприемник мелких фракций наносов
		6.7 Обязательное устройство на отводящем канале пескогравиеловок или отстойников
7	Усовершенствованный тип решетчатого водозаборного сооружения	7.1 Размещение водоприемной галереи над средневзвешенным дном подводящего русла
		7.2 Устройство решетки над поверхностным водоприемным оголовком галереи
		7.3 Размещение перед водоприемной галереей траншейной гравиеловки
		7.4 Устройство двухъярусных решеток
		7.5 Размещение гидравлических сепараторов для защиты от наносов
		7.6 Размещение перед водоприемной галереей виражных наносозащитных порогов
		7.7 Устройство продольного промывника в разделительной стенке щитового отверстия речного пролета
		7.8 Устройство задней сбросной стенки водоприемной галереи в виде водослива практического профиля
		7.9 Выполнение с уклоном гребней передней и задней стенки водоприемной галереи
		7.10 Устройство отдельного зимнего водозабора перед водоприемной галереей
		7.11 Организация концентрированного сброса шуги через водоприемную галерею с устройством на ее гребне деревянных шандоров и лотка
		7.12 Устройство водобоя с креплением камнем или бутобетоном
8	Киргизский тип	8.1 Массивный наносозащитный порог в виде водослива с широким порогом, устраиваемый перед водоприемной галереей
		8.2 Выполнение внешней поверхности наносозащитного порога в виде косонаправленной стенки
		8.3 Устройство фронтального промывника
9	Тяньшаньский тип	9.1 Устройство аванкамеры у береговых устоев сооружения с переходом водоприемную камеру
		9.2 Выполнение наносозащитного порога в виде водослива с тонкой стенкой
		9.3 Размещение сороудерживающих решеток в боковом водоприемном оголовке регулятором
		9.4 Размещение промывника в конце наносозащитного порога
		9.5 Устройство фронтального автоводослива верхнего бьефа
		9.6 Устройство в низовой части водоприемной камеры фронтального автоводослива

10	Сооружения с косонаправленными циркуляционными порогами (КЦП)	10.1 Устройство перед водоприемными камерами косонаправленных наносозащитных порогов для создания циркуляционного вальца, отталкивающего и транспортирующего наносы
		10.2 Устройство наносозащитного порога, состоящего из повышенного и нижнего участков (повышенный участок имеет уклонный гребень, а нижний участок выполняется с горизонтальным гребнем)
		10.3 Оборудование в концевой части порога продольно размещенного промывника
		10.4 Устройство в речных пролетах затвора авторегулятора уровня верхнего бьефа
		10.5 Устройство зимнего водоприемника перекрываемого затвором в средней части наносозащитного порога
		10.6 Устройство в низовой части водоприемной камеры косонаправленного автоводослива;
		10.7 Возможность проведения наносозащиты при подтопленном истечении через наносозащитный порог
11	Сооружения с выпуклыми в плане наносозащитными порогами	11.1 Устройство перед водоприемной камерой выпуклого в плане криволинейного порога
		11.2 Одинаковый уклон гребня порога
		11.3 Использование двойного криволинейного выпуклого в плане наносозащитного порога
		11.4 Устройство промывного тракта в конце наносозащитного порога
		11.5 Устройство промывных отверстий в теле наносозащитного порога
		11.6 Полигональная форма автоводослива водоприемной камеры
		11.7 Устройство промывной галереи в водоприемной камере
		11.8 Комплекснаяавтоматизация водозабора
		11.9 Размещение стабилизатора расхода воды в водоприемнике
		11.10 Использование в промывнике затвора-автомата промыва наносов
		11.11 Использование водобойных стенок и закрепленных бутобетоном отводящих русел
12	Гидроэнергетический тип водозаборного сооружения (КРСУ)	12.1 Устройство прямолинейного промывного тракта с фронтальным промывным отверстием
		12.2 Установка сдвоенного затвора в конце промывного тракта
		12.3 Размещение придонного отверстия зимнего водозабора в промывном тракте
		12.4 Заглубление передней части промежуточного бычка промывного тракта
		12.5 Ступенчатая водоприемная камера
		12.6В автоводосливе водоприемной камеры устроен промывник со сдвоенным затвором
		12.7 Удаление регулятора отводящего канала от водоприемного оголовка в береговом устое
		12.8 Устройство сопрягающего водобойного сооружения в нижнем бьефе
		12.9 Устройством шандор на гребне ломаного в плане наносозащитного порога (зимой)
		12.10 Устройством Г-образного рыбозащитного козырька на гребне наносозащитного порога
		12.11 Использование локальной схемы автоматизации процесса водозабора
		12.12 Устройство ломаных в плане наносозащитных порогов с переменным уклоном гребня

Для определения общих признаков приведенных типов водозабора нами было определено, какие признаки имеет каждый из них с учетом заимствованных. С этой целью были составлены структурные схемы признаков, определяющих соответствие преемственности принятых решений, которые приведены в Приложении 2.

Составление структурных схем, определяющих признаки различных типов водозабора, позволило подтвердить сделанный ранее вывод о доминирующей роли усовершенствованного типа Решетчатого водозабора, который в совокупности Ферганским типом предопределил общее направление совершенствования компоновочных схем водозаборных гидроузлов для гидроэнергетических и ирригационных систем Кыргызстана.

Анализ представленных выше компоновок водозабора из горных рек и определяющих их признаков позволил предложить схему классификации типов компоновочных схем водозаборных сооружений из горных рек, которая приведена на рисунке 1.32.

Эта классификация определяет связь известных компоновочных схем путем заимствования рациональных предшествующих решений для разработки последующих более совершенных компоновок головных сооружений гидроэнергетических и ирригационных систем, и может быть использована для систематизации материалов по существующим низконапорным водозаборным сооружениям и для совершенствования отдельных элементов и устройств.

1.6. Регуляционные работы и сооружения на участках рек при водозаборе

Для обеспечения нормальной работы низконапорных плотинных водозаборных сооружений на участках рек горно-предгорной зоны должно быть создано и поддерживаться устойчивое состояние водного потока при устройстве регуляционных сооружений и проведение регуляционных работ. Это, прежде всего, необходимо для направления нужных объемов воды к водоприемным элементам отводящих каналов. Должна быть организована защита берегов подводящих и отводящих русел головных водозаборных гидроузлов от переформирования, и регулирование режимов движения речных наносов, плавающего мусора и шуголедовых образований в области проведения процесса водозабора.

Проведение этих операций можно выполнить с помощью комплекса мероприятий, охватывающих понятие «регулирование русел рек». Оно предусматривает меры интенсивного воздействия на речной поток с целью его упорядочения и достижения форм и характера течений, отвечающих требованиям отбора из реки необходимого количества воды заданного качества [133].

Инженерные средства воздействия, которыми задаются необходимые структуры речным потокам, относятся к регуляционным сооружениям или регуляционным работам.

Практика показывает, что регуляционные сооружения и работы являются связующим звеном между искусственно создаваемыми условиями водозабора и проявлениями естественных условий речных русел.

Регуляционные сооружения и работы могут быть подразделены на следующие виды [35]:

1) выправительные сооружения и работы, целью которых является придание необходимых форм речному руслу, упорядочение основного течения и побочных рукавов реки для обеспечения постоянного водозабора в отводящий канал, борьба с наносами, плавающим мусором и шугой, исключение блужданий речных потоков и т. п.;

2) защитные сооружения и работы, предпринимаемые для защиты от разрушения гидротехнических сооружений водозаборного устройства, затопления и подмыва каналов и культурных земель, прилегающих к головному участку;

3) ремонтные работы по восстановлению разрушенных и поврежденных частей выправительных и защитных сооружений;

4) аварийные работы, предпринимаемые для предупреждения обнаруживаемых повреждений и для восстановления разрушаемых частей выправительных и защитных сооружений в процессе их действия (во время паводка и т. п.).

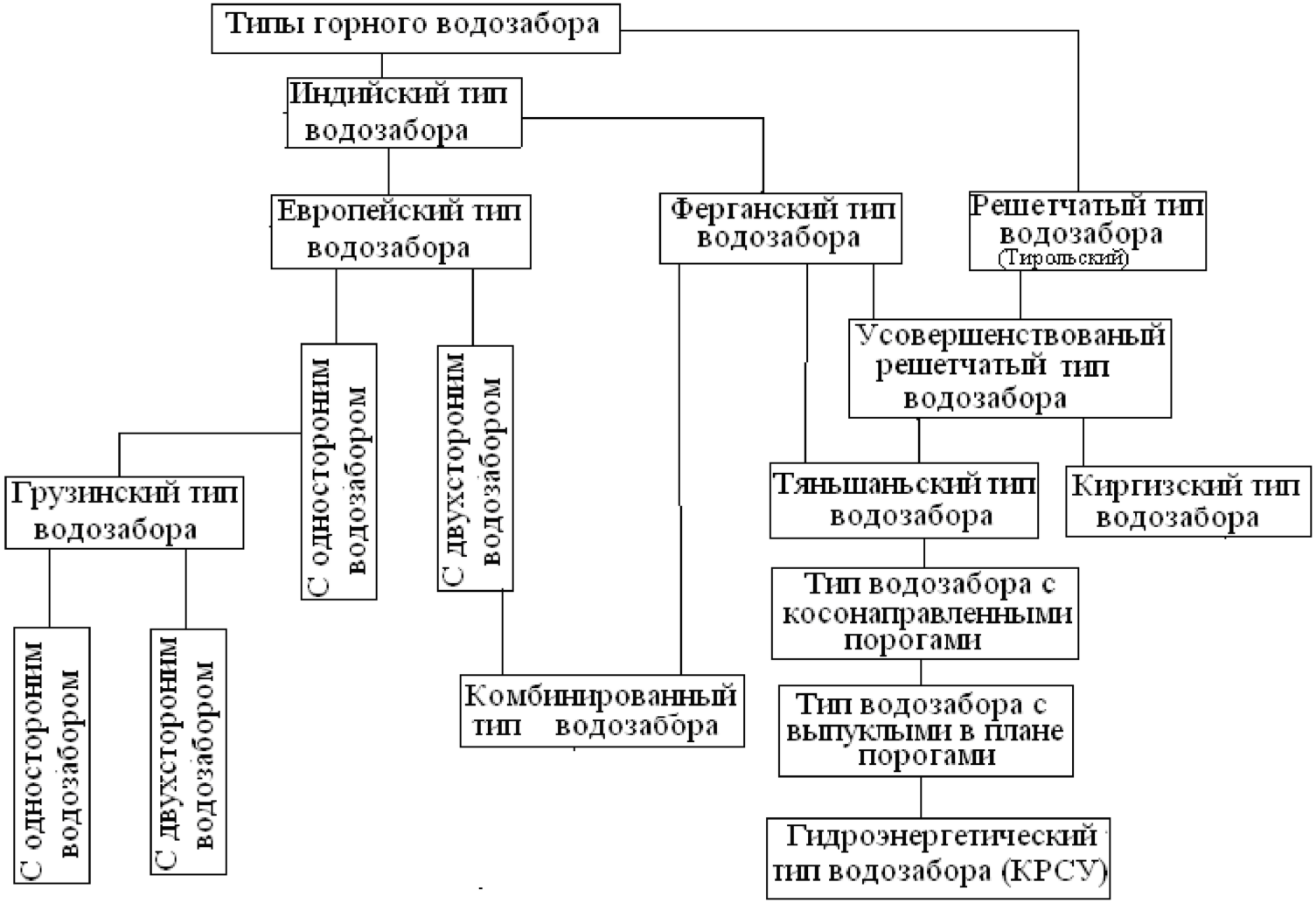


Рисунок 1.32 – Классификация типов низконапорных плотинных водозаборных сооружений на горных реках

В свою очередь регуляционные сооружения подразделяют [35, 133]:

а) по условиям расположения сооружений в отношении речного потока – на продольные, поперечные (дамбы, шпоры, буны);

б) по конструктивным особенностям – на сплошные (массивные), сквозные, специальные и комбинированные;

в) по применяемым материалам – на сооружения из местных грунтов, булыжные, габионные, сипайные, каменнонабросные, а также комбинированные;

г) по срокам действия – на постоянные и временные.

Обычно для создания и поддержания необходимого состояния руслового потока в области водозабора, в состав головного гидроузла вводят зарегулированный (канализированный) участок реки протяженностью, обеспечивающей предупреждение процессов переформирования речных русел. При этом различают подводящие и отводящие зарегулированные русла.

Отводящие зарегулированные отводящие русла размещаются ниже водоприемника отводящего канала, предназначаются для предупреждения завала гидроузла транзитными речными наносами со стороны нижнего бьефа и для защиты от подмыва речным потоком головной части отводящего канала.

Регуляционные сооружения, устраиваемые на водозаборных гидроузлах, подчинены главным образом требованиям пропуска максимальных расходов (руслоформирующих), регулирования сброса лишних объемов воды и поддержания условий командования отметок уровней воды перед водоприемником над отводящими каналами.

На предгорных участках рек в зависимости от ширины поймы, устойчивости или блуждания русла, величины и процента водозабора применяемые схемы регуляционных сооружений могут быть двух видов:

- простейшие схемы (регуляционные сооружения и работы, ограничивающиеся только пределами входа и головной частью канала);
- комплексные схемы (регуляционные сооружения и работы в русле реки и на головной части канала).

Простейшие схемы руслового регулирования применимы при бесплотинных водозаборах на относительно устойчивых участках рек малой пойменности, когда максимальный коэффициент водозабора $\alpha_в$ не превышает 0,2. Регуляционные работы производятся на входе в водоприемник канала или сброса, или одновременно в обоих створах. В зависимости от наличия или отсутствия постоянных (инженерных) водозаборных сооружений, регуляционные устройства имеют различный характер и объемы – в первом случае они являются необходимым дополнением к построенным сооружениям (защита от размыва дна и берегов при входе в канал, гидравлический смыв отложений наносов и т. п.), а во втором – заменяют отсутствующие сооружения, к ним относятся воротники, пороги, перемычки, сбросы и т. п. На предгорных участках рек, где проявляется блуждание русел, деформация берегов, отмирание рукавов и свалы потока в новых направлениях, применение простейших схем регуляционных сооружений является исключением.

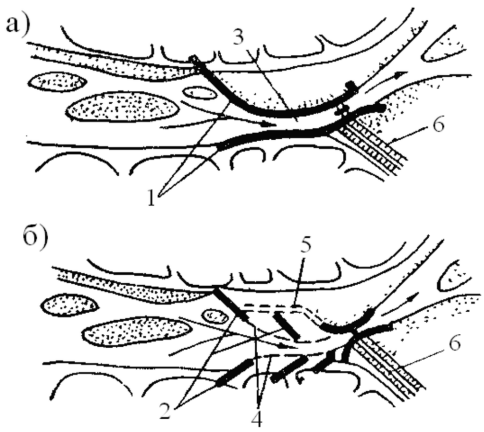
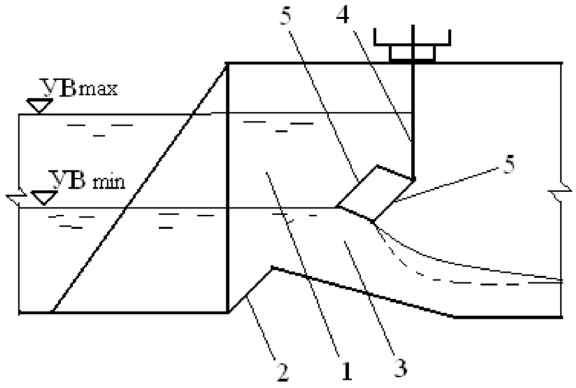
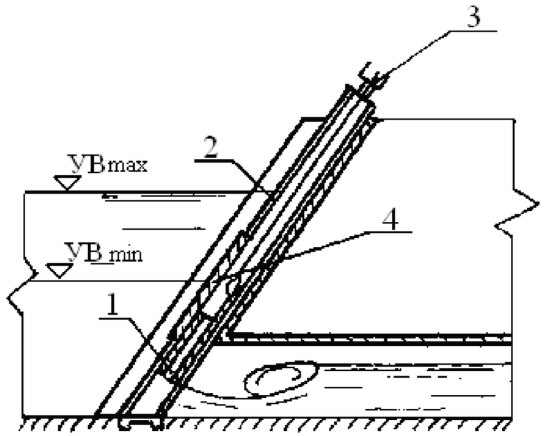
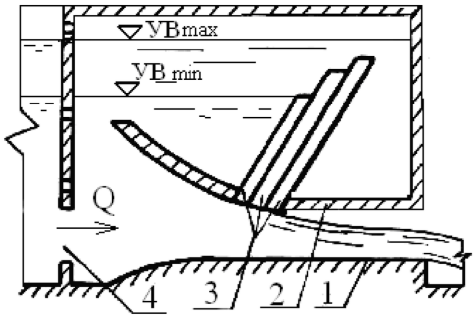
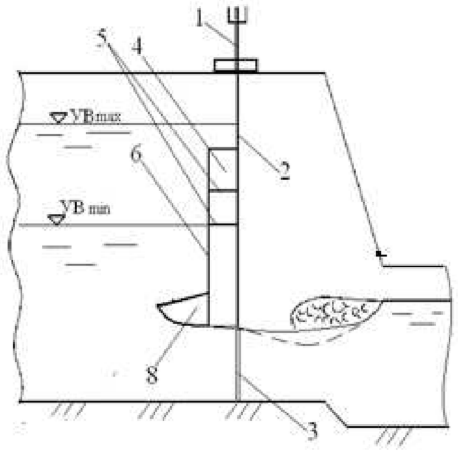


Рисунок 1.33 – Схемы подводящих русел, выполненных (а) сплошными продольными дамбами и (б) поперечными шпорами:1 – продольные дамбы; 2 – поперечные дамбы, 3 – подводящее русло; 4 – трасса выправленного русла; 5 – обвалование; 6 – канал

Комплексные схемы (рисунок 1.33) создаются в результате усложнения простейших схем русловыми сооружениями при увеличении объемов водопотребления. Они применимы как при бесплотинных, так и при плотинных водозаборах, когда обеспече-

Таблица 1.9 – Рекомендованные конструкции стабилизаторов расхода воды для устройства в водоприемных оголовках низконапорных плотинных водозаборных сооружений

№ п/п	Название конструкции, принцип действия	Схема устройства	Описание конструкции	Принцип действия
1	Стабилизатор расхода с двойными наклонными стенками конструкции «Средазгипроводхлопок»		1 – водоприемный оголовок; 2 – донный порог; 3 – водоприемное отверстие; 4 – плоский затвор; 5 – наклонные стенки	Основан на увеличении гидравлических сопротивлений на донном пороге
2	Стабилизатор расхода воды конструкции Я.В. Бочкарева, А.С.Лугового		1 – коробчатый щит; 2 – наклонная рама; 3 – ручной привод; 4 – плоский затвор	Основан на изменении сопротивления при истечении из-под щита обратно пропорционально корню квадратному действующего напора

3	Модульный водовыпуск Канна		1 – водослив; 2 – забральная стенка; 3 – наклонные трубки; 4 – водоподводящее отверстие	Основан на изменении сопротивления трубок обратно пропорционально корню квадратному из действующего напора
4	Конструкция стабилизатора расхода воды типа ступенчатый секционный коробчатый щит (ССКЩ)		1 – винтовой подъемник; 2 – плоский затвор; 3 – закладные элементы; 4 – проточные короба; 5 – разделительные ребра; 6 – передняя ступенчатая стенка; 7 – криволинейный козырек	Основан на постоянном изменении коэффициента вертикального сжатия по ширине пролета при поочередном включении секций затвора в работу (с увеличением напора воды в верхнем бьефе)

ние *канала* водой требует производства регуляционных работ в русле реки и в пределах головной части *канала.*

Последнее имеет место на неустойчивых реках большой пойменности при коэффициенте водозабора $\alpha_в = 0{,}8$ и более.

Анализ примеров практики водозабора из горных рек Кыргызстана [18, 21] позволяет сделать вывод, что наиболее распространенными элементами защитно-регуляционных сооружений, имеющими широкую область применения, являются сплошные (массивные) дамбы, которые составляют около 40–60 % от общего объема выполняемых регуляционных работ при водозаборе.

С помощью массивных дамб решаются следующие задачи регулирования [35, 172]:

1) изменение (отклонение) динамической оси потока в основном русле и побочных рукавах;

2) закрытие протоков и сосредоточение течения в основном русле;

3) рассредоточение потока и отвод паводковых вод от водозаборных сооружений и мест, подверженных подмывам,

4) сжатие русла реки и придание ему необходимой формы с целью углубления, эффективной борьбы с наносами и улучшения условий водозабора (образование зарегулированных подводящих русел);

5) устройство и объединение неинженерных водозаборных сооружений;

6) регулирование расходов воды и наносов в подводящем русле, в голове канала и на сбросных устройствах, а также по длине *канала* и в нижнем бьефе сооружений;

7) захват воды в период маловодья (межени) и зимой;

8) борьба с отложением наносов в зарегулированом подводящем русле и в голове *канала*;

9) защита и укрепление берегов реки в верхнем и нижнем бьефах водозаборного сооружения и т. п.

При комплексных схемах регулирования русел, задача обеспечения надежного водозабора решается с помощью устройства массивных продольных и поперечных дамб или комбинированием этих двух видов сооружений.

В условиях предгорных участков рек действие на поток продольных дамб, выполненных из различных материалов (местный грунт, булыжник, габионы, каменная наброска и др.), мало чем отличается от поставленных под углом к направлению течения. В то же время поперечные дамбы обладают явным преимуществом в конструктивном, и экономическом отношениях перед продольными, так как их можно возводить поочередно. При применении поперечных дамб относительно просто исправляются ошибки, допущенные при назначении трассы выправленного русла (удлинение или сокращение). Рассчитываются эти дамбы на сосредоточенное действие потока на коротком участке головной части сооружения, в то время как продольные дамбы при неустойчивом (блуждающем) течении реки должны выдерживать действие свала течения на всем протяжении от корня до головной части.

Следует отметить, что на устойчивых участках рек или при двухстороннем сжатии русла действие свалов потока на сооружения значительно ослабляется, поэтому требования к компоновке последних и их прочности несколько снижаются (расстояния между шпорами увеличиваются, заглубление основания крепления дамб уменьшается и т. д.).

В настоящее время развивается направление конструирования регуляционных сооружений, сводящееся к использованию сквозных (тетраэдры, свайные дамбы и шпоры, плавучие сетки, блочные сборные сооружения И.И. Херхеулидзе) и специальных конструкций (щиты М.В. Потапова, используемые в виде струенаправляющих шпор и заилителей, древесные насаждения), применяемых при решении задач водозабора, защите берегов и при осуществлении выправительных мероприятий на реках [35].

1.7. Стабилизаторы расхода воды

Современные условия эксплуатации гидроэнергетических и ирригационных систем определяют выполнение элементами водозаборных сооружений ряда задач, требующих оперативности и точности головного водораспределения, учета забираемых объемов воды, которые производятся с помощью стабилизаторов расхода воды [170]. Исходя из технических условий и требований, предъявляемых к регуляторам расхода водоприемных низконапорных плотинных водозаборных сооружений из малых горных рек, разработаны различные конструкции стабилизаторов расхода воды [147, 148], конструкции которых приведены в таблице 1.9.

Анализ технических характеристик представленных конструкций стабилизаторов расходов воды, позволил выявить следующие их недостатки [79, 95, 97]:

- точность стабилизации расхода воды в расчетном диапазоне изменения уровней в верхнем бьефе не более чем ±5 %, что недостаточно для условия выполнения им функций водомерного устройства требующего точности измерений расхода при водоподаче в систему ±3 %;
- проточные короба стабилизаторов часто забиваются плавающим мусором и илистыми частицами. Короба состоят из неподвижно размещенных относительно друг друга элементов. Это усложняет их очистку, а иногда требует прекращения процесса водозабора;
- повышенная металлоемкость и сложность изготовления;
- неприспособленность конструкций стабилизаторов к зимнему режиму эксплуатации.

Для устранения описанных выше факторов при водозаборе из горных рек нами была разработана конструкция усовершенствованного стабилизатора расхода воды для устройства на низконапорных плотинных водозаборных сооружений из горных рек. Технические характеристики предлагаемой конструкции приведены ниже.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОДОЗАБОРА ИЗ ГОРНЫХ РЕК В ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ИРРИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

2.1. Технологический процесс водозабора из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы горно-предгорной зоны

По определению А.В. Филончикова [172] под термином «водозабор» понимается технологический процесс, который состоит из совокупности технологических операций, характеризующих определенную часть этого процесса.

Целью водозабора из горных рек является подача пользователям или потребителям требуемого количества воды заданного качества. Процесс водозабора первоначально был основан на выполнении следующих технологических операций [172]:

- необходимостью организации упорядоченного гидротранспорта твердых составляющих речного потока по заданному алгоритму действий с возможностью применения комбинаций различных способов сброса – трансфузии (сброс излишков воды при переливе через гребень автоводослива) и адаптации (сброс излишков воды путем маневрирования затворами водосбросных устройств);
- потребностью увеличения сбрасываемых объемов воды для проведения эффективных промывок бьефов и транзита твердых составляющих, при условии снижения объемов водоподачи или прекращения водоотбора.

Сброс необходимых объемов воды, как действие, проявляется при всех перечисленных технологических операциях.

При этом основным результатом сброса необходимых объемов воды в нижний бьеф водозаборного сооружения, как операции процесса водозабора, является создание рациональных гидравлических структур водного потока для поддержания расчетных величин напоров в верхнем бьефе и гидротранспорта твердых составляющих в обход водоприемных оголовков. При этом гидротранспорт в равной степени необходимо обеспечивать как в бьефах сооружения, так и в подводящих и отводящих зарегулированных руслах.

Проведенный анализ литературных источников [33, 34, 141] показал, что операция рыбозащиты при водозаборе не гарантирует миграции проходных и полупроходных видов рыб по реке при рассмотрении плотинных сооружений. Поскольку по своему определению рыбозащитные сооружения служат только для предотвращения попадания рыб в водоприемники, опасные зоны электростанций и водосбросов. Элементы рыбозащиты также могут быть устроены в нижних бьефах речных узлов для повышения эффективности рыбопропускных сооружений [34].

В свою очередь, устройство рыбопропускных сооружений обеспечивает транспорт или пропуск особей рыб по реке в период их нереста и ската. Это предполагает уменьшение влияния антропогенного воздействия на экологическую обстановку в районе водозабора, что подтверждает необходимость введения в процесс водозабора из горных рек отдельной технологической операции в виде рыбопропуска.

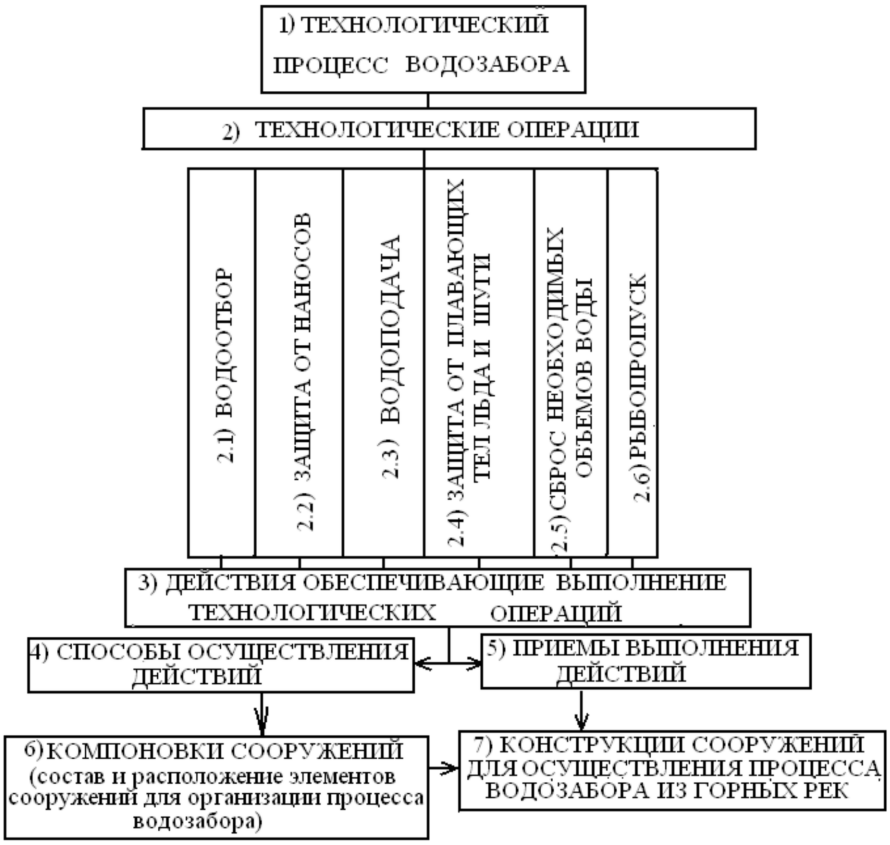


Рисунок 2.1 – Структурная модель процесса водозабора из горных рек с помощью низконапорных плотинных водозаборных сооружений

Приведенное обоснование определяет необходимость дополнения известной структурной модели процесса водозабора [172]. Предлагаемая структурная модель, с учетом изменений, представлена на рисунке 2.1.

Данная модель может рассматриваться как аналитический аппарат, определяющий иерархию и связь между элементами системы. В последующем она будет использовано при разработке усовершенствованных конструкций водозаборных сооружений.

Сброс необходимых объемов воды – одна из основных операций, определяющая работоспособность плотинного водозабора из горных рек. Для ее осуществления необходимо последовательное выполнение следующих действий:

- сосредоточение и структурирование необходимых объемов воды в верхнем бьефе сооружения;
- транспорт необходимых объемов через элементы подпорного створа в нижний бьеф сооружения;
- сопряжение бьефов сооружения;
- отвод необходимых объемов воды за пределы гидроузла.

Выполнение каждого из этих действий требует привлечения определенных способов. С целью систематизации рассматриваемого материала нами был определен состав способов и приемов выполнения действий при организации сброса необходимых объемов воды как отдельной технологической операции, который приведен в таблице 2.1.

Технологическая операция рыбопропуска может быть разделена на две фазы, которые проявляются при поднятии рыб в верховья рек на нерест и при их скате после нереста в долинные участки рек, озера и водохранилища. При этом в каждой из фаз необходимо использование определенного состава действий.

Организация технологической операции рыбопропуска представлена в Приложении 3.

Дополнения известной структуры организации процесса водозабора позволят производить выбор необходимых приемов для рационального осуществления определенного состава технологических операций с учетом особенностей местных условий. Это позволит более точно сформулировать рекомендации по эксплуатации проектируемого водозаборного сооружения и максимально реализовать их на практике с целью создания рациональных гидравлических структур потока в верхнем и нижнем бьефах.

2.2. Основные недостатки известных компоновочных схем организации водозабора из горных рек и пути совершенствования технических характеристик водозаборных сооружений

Подводя итог анализа рациональности приемов организации процесса водозабора из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы существующими конструкциями низконапорных водозаборных сооружений, выполненных по результатам их эксплуатации и лабораторным исследованиям компоновок [39, 54, 134, 170], нами были определены их недостатки, причины их возникновения и последствия, которые приведены в Приложении 4.

Отмеченные недостатки в организации процесса водозабора, на наш взгляд, в основном являются следствием несовершенства компоновочных схем элементов водозаборных сооружений, методик их расчета и конструирования, а также недостаточной изученности рассматриваемых проблем.

Для устранения причин, приводящих к нарушению основных технологических операций водозабора и совершенствования их эксплуатационных характеристик, были выполнены следующие работы:

- проведен анализ существующих действий по организации технологических операций процесса водозабора из горных рек с изучением существующих методик по определению параметров и приемов их проведения;
- проведено исследование русловых процессов в зоне подводящего зарегулированного русла гидроузлов, в том числе на участках их сопряжения с бытовым руслом рек для определения рациональных схем размещения регуляционных сооружений при водозаборе;
- изучены характеристики гидравлических процессов на водозаборных сооружениях и определены функциональные возможности гидроузлов с учетом взаимовлияния исследуемых процессов;
- изучены возможности оптимизации процессов отделения влекомых наносов, плавника и ледошуговых образований от объемов водного потока, забираемых в отводы;
- разработаны усовершенствованные компоновочные схемы водозаборных сооружений для горных рек с учетом отмеченных выше недостатков усуществующих;
- исследована пропускная способность элементов сооружения и их водомерных свойств в различные периоды эксплуатации гидроузла;
- проведен анализ и усовершенствована технология маневрирования подвижными элементами сооружения для обеспечения надежного водозабора при всех гидрологических режимах водотока с учетом возможных режимов водоподачи в гидроэнергетические и ирригационные системы;
- усовершенствованы устройства гидравлической автоматизации процесса водозабора из горных рек для целей гидроэнергетики и ирригации;
- изучены гидравлические и русловые процессы в нижнем бьефе низконапорных водозаборных сооружений с целью совершенствования компоновок сопрягающих и регуляционных сооружений отводящего русла;

Таблица 2.1 – Организация технологической операции сброса необходимых объемов воды при водозаборе из горных рек

Операция	Действие	Основные способы осуществления действия	Приемы выполнения действий	
			Наименование и содержание приема	Вид приема
Сброс необходимых объемов воды	Концентрация и структурирование объемов воды в верхнем бьефе сооружения	Регулирование русловых процессов	Устройство регуляционных сооружений	Конструктивный
			Проведение регуляционных работ	Эксплуатационный
		Регулирование гидравлических структур потока	Устройство поверхностей элементов водозаборного сооружения с рациональной конфигурацией	Конструктивный
			Регулирование величин перераспределения удельных расходов воды в верхнем бьефе водозаборного сооружения путем маневрирования затворами	Эксплуатационный
	Перевод необходимых объемов через элементы подпорного створа сооружения	Способадаптации	Маневрирование затворами водосбросных элементов	Эксплуатационный
		Способ трансфузии	Устройство водосливных и других переливных сооружений	Конструктивный
	Сопряжение бьефов сооружения	Гашение энергии воды в начале отводящего русла	Искусственное увеличение шероховатости поверхностей	Конструктивный
			Устройство специальных гасителей энергии	Конструктивный
	Отвод необходимых объемов воды за пределы сооружения	Регулирование русловых процессов	Устройство регуляционных сооружений	Конструктивный
			Проведение регуляционных работ	Эксплуатационный

- проведены лабораторные и натурные исследования усовершенствованных конструкций элементов водозаборных сооружений и разработаны рекомендации по их проектированию, строительству и эксплуатации.

Исследования по совершенствованию технических характеристик процесса водозабора из горных рек проводились с учетом условий и предпосылок [35], которые коррелировали с ранее известными результатами исследований и рекомендациями [120,172]:

1. Создание поперечной циркуляции воды в подводящем зарегулированном криволинейном русле водозаборного сооружения для рационального перераспределения удельных расходов двухфазного потока жидкости (вода – наносы) перед водоприемными и водосбросными элементами.
2. Усиление поперечной циркуляции воды путем создания локального циркуляционного винта вдоль внешней поверхности наносозащитных порогов специальной конструкции.
3. Осуществление водоотбора в теплый период года из поверхностных горизонтов потока и донный отвод наносов через открытие затвора речного пролета и придонное отверстие промывного тракта, устраиваемого в конце наносозащитного порога.
4. Отбор воды в водоприемную камеру в зимний период года из придонных горизонтов водного потока через отверстие затвора зимнего водоотбора при поверхностном отводе и сбросе ледовошуговых образований через гребни шугосбросов.
5. Обеспечение плавного подхода потока к элементам водозаборного сооружения, сопряжение с подводящим зарегулированным руслом посредством наносозащитных порогов, автоводосливов с устройством ныряющих откосов, раструбов с обратными стенками.
6. Рациональный отвод потока воды обеспечивается сопряжением водозаборного сооружения с отводящим зарегулированным руслом с помощью косых плоскостей с обратными стенками.
7. Местоположение створа и параметры речного пролета определяются с учетом создания активной зоны движения наносов в подводящем зарегулированном русле гидроузла.
8. Поддержание расчетных напоров в верхнем бьефе сооружения с помощью устройств гидроавтоматики для обеспечения командования уровней воды перед водоприемником над уровнем отводящего канала при различных режимах водотоков.
9. Создание глубин водного потока, необходимых для возникновения устойчивых гидравлических структур перед элементами водозаборного сооружения, предназначенными для защиты водоприемников от твердых составляющих;
10. Обеспечение в условиях паводка одновременного сброса излишков воды, плавника по всему фронту сооружения, а влекомых наносов через отверстия речного пролета.
11. Стабилизация расходов воды, подаваемых в отводящие каналы, производится с помощью средств гидравлической автоматики.
12. Выполнение перечисленных условий исследований позволило провести согласование принципов компоновки усовершенствованных конструкций разрабатываемых водозаборных сооружений с существующими методиками проектирования устройств водозабора из горных рек.

2.3. Теоретические основы описания гидравлических процессов, происходящих на низконапорных водозаборных сооружениях

Применение низконапорных водозаборных сооружений для водоподачи в гидроэнергетические и ирригационные системы предполагает организацию сложных гидравлических и русловых процессов.

Расчет и проектирование низконапорных горных водозаборных сооружений предполагает рассмотрение следующих явлений и процессов:

- характеристики движения наносов на участках зарегулированных русел;
- движения двухфазного потока жидкости (вода – наносы) на криволинейных участках русел;
- механизмов русловых процессов в бьефах водозаборных сооружений;
- регулирование наносного режима при водозаборе из рек горно-предгорной зоны;
- определение параметров наносозащитных порогов и других устройств для борьбы с наносами, преимущественно исходя из описания винтового движения потока перед этими элементами;
- физического или математического моделирования гидравлических явлений.

Ниже проведен анализ некоторых гидравлических явлений с целью совершенствования их теоретических основ.

2.3.1. Характеристики речных наносов, морфометрические характеристики рек, транспортирующая способность потоков воды

Объемы очистки деривационных и ирригационных каналов Кыргызской Республики от наносов по данным исследований [5, 55, 120], ежегодно составляют около 9 млн м^3. При этом в основном рассматриваются приемы очистки с помощью гидравлических промывок пескогравиеловок, отстойников и механической очистки отстойников и головных участков отводящих каналов, что сокращает объемы подаваемой воды в гидроэнергетические и ирригационные системы и требует значительных капиталовложений. Это определяет необходимость изучения характеристик речных наносов и транспортирующей способности потоков на элементах водозаборных сооружений, устраиваемых на горно-предгорных участках рек. Здесь наносный режим особенно сложный из-за нестабильности русловых процессов, сопровождающихся периодическими перемещениями больших объемов отложений наносов вниз по реке в виде гряд.

Наносы – это твердые частицы грунта, транспортируемые движущимися объемами воды, которые условно делятся на влекомые, перемещающиеся по дну (донные), и взвешенные наносы, перемещающиеся в толще потока. Условность их деления определяется величинами проходящих по реке расходов воды и их энергетическими характеристиками.

Транспорт наносов представляют как проявление глобального флювиального геоморфологического процесса [105]. Количественное и качественное содержание наносов в реках определяется несколькими основными факторами:

- количеством и характером осадков, выпадающих в водосборном бассейне;
- видом и количеством растительности;
- температурным режимом;
- свойствами почвогрунтов и горных пород, слагающими водосборную поверхность;
- энергетическими характеристиками отдельных районов бассейна (уклоны и формы склонов);
- антропогенным воздействием.

Плотность материала наносов изменяется в небольших пределах от 2,55 до 2,8 г/см^3. Наиболее распространенными являются наносы с плотностью 2,65 г/см^3. При этом наносы в зависимости от геометрических размеров отдельных частиц подразделяются на глиноземы размером более 0,001 мм, начиная с 0,01 – кремнеземы и гравелисто-галечниковые седименты [86].

В задачах о перемещении наносов в потоках жидкости основными характеристиками являются диаметр частиц и их гидравлическая крупность. Уравнение равномерного падения частиц наносов записывается в виде [43]:

$$C_d \frac{\rho\omega_0^2}{2} k_1 d^2 = g(\rho_H - \rho) k_2 d^3 , \qquad (2.1)$$

где C_d – коэффициент гидродинамического сопротивления; $\rho_н$ и ρ – плотность частиц наносов и воды; k_1 и k_1 – коэффициенты формы частиц (для шара $k_1 = \frac{\pi}{4}$, $k_2 = \frac{\pi}{6}$); ω_0 – гидравлическая крупность).

Решая уравнение (2.1) относительно гидравлической крупности, было получено выражение [43]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_d}} \sqrt{2 \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{\rho_H - \rho}{\rho} \right) gd} . \qquad (2.2)$$

Коэффициент гидродинамического сопротивления C_d есть функция числа Рейнольдса для частиц $\mathrm{Re}_d = \omega_0 d / \upsilon$ и коэффициентов формы k_1 и k_1.

В странах бывшего Советского Союза пользуются шкалой гидравлической крупности В.Н. Гончарова, которая до сих пор дорабатывается и совершенствуется. Гидравлическая крупность некоторых частиц может быть определена по следующим зависимостям [86]:

1) для наносов с диаметром частиц менее 0,20 мм (ламинарная область обтекания при $Re_d \leq 1$) $w = 0{,}66\ d^2$, м/с (d, мм);

2) для наносов с крупностью частиц от 0,2 до 1,5 мм (переходная область обтекания при $1 < Re_d \leq 300$) $w = 0{,}11 d^{1{,}04}$ м/с (d,мм);

3) для наносов крупнее 1,5 мм (турбулентный режим обтекания при $Re_d > 300$) $w = 0{,}134\ d^{0{,}5}$ м/с (d мм).

Наносы с геометрической крупностью менее 0,2 мм устойчиво удерживаются в толще потока, и большая их часть проходит путь от истока до устья реки за один год [86]. Под влиянием различных факторов и количества времени отложения, состоящие из таких частиц, способны уплотнятся и развивать значительные силы сцепления, делаясь трудно размываемыми.

Наносы, состоящие из песчаных фракций, не имеют сил сцепления и удерживаются на дне водотоков только за счет силы тяжести. Наиболее легко размываемыми отложениями наносов в природе являются песчаные частицы крупностью от 0,2 до 0,4 мм [86, 172].

Частицы песчаных наносов до 2 мм представляют собой отдельные части горной породы или кристаллы минералов. Принято считать, что частицы с диаметром меньше указанного размера не меняют форму по пути следования от момента образования в пределах водосборного бассейна до отложения в устьях рек [86].

Скальные частицы крупностью от 2 до 5 мм в составе речных наносов встречаются крайне редко, что как считается, обусловлено процессами их образования и выветривания скальных пород.

Более крупные частицы относят к гравелисто-галечниковым наносам, которые представляют собой окатанные зерна, форма которых близка к трехосному эллипсоиду. Наряду с гидравлической крупностью эти частицы могут быть охарактеризованы объемом отдельных зерен, наибольшей площадью поверхности и средним диаметром. Для определения некоторых физических характеристик частиц наносов в литературе рекомендованы эмпирические зависимости, представленные в [86].

Как показали результаты многочисленных исследований, окатанная форма крупных камней, частиц гравия и галечника получается в результате обтекания их водой при их остановке или более медленном перемещении. После достижения определенной конфигурации окатка отдельностей замедляется, или прекращается. При этом исследования показали, что

отдельные частицы наносов не подвергаются истиранию по ходу перемещения по реке, а поддаются процессу сортировки, который активно проявляется при прохождении руслоформирующих расходов воды [86, 105].

Считается, что на участках рек, находящихся в одинаковых природных условиях, относительное соотношение отдельных фракций наносов с различной крупностью остается достаточно постоянным и может быть выражено в количественной форме. В работе [166] В.Ф. Талмаза и А.Н. Крошкин привели номограмму, изображенную на рисунке 2.2, для определения осредненного фракционного состава влекомых наносов на участках горных рек Кыргызстана с уклонами от 0,02 до 0,08 и расходами 10–100 м^3/с.

Для работы по номограмме средний диаметр русловых отложений определяется по формуле [86, 172]:

$$d_{ср} = Ki^{0,9}\left(\frac{Q_p}{\sqrt{g}}\right)^{0,4}, \qquad (2.3)$$

где К – коэффициент, равный: 3,0 – при рассмотрении русловых отложений или наносов, транспортируемых руслоформирующим расходом; 1,6 – при расчете среднего диаметра наносов, транспортируемых расходами воды с величинами меньше руслоформирующих; i – уклон дна реки.

Транспорт наносов в речном русле в основном зависит от их фракционного состава, величин средних скоростей воды, значений сдвигающих скоростей потока относительно параметров частиц наносов, глубин, уклонов дна и уклонов свободной поверхности. Влекущую способность потока оценивают в зависимости от величины превышения средней скоростью потока значений критических скоростей сдвига влекомых наносов, имеющих средний диаметр.

Влекомые наносы формируют шероховатое дно речного русла, в большей или меньшей степени образуют многочисленные выступы. Поток, соприкасаясь с этими выступами, образует завихрения, срывая отдельные частички с верхнего слоя, перемещает их, затрачивая на это часть энергии, что уменьшает его скорость. Транспорт частиц наносов зависит от характера их сопротивления силовому воздействию воды. Основными критериями устойчивости частиц в естественном речном русле на горно-предгорных участках являются [86, 167]:

- неразмывающая скорость воды;
- размывающая скорость воды.

Неразмывающая v_d скорость – это любая величина скорости, которая меньше размывающей. Но, как правило, под ней понимают предельное значение средней скорости, при которой исключается развитие размыва и при которой происходит остановка наносов [86,

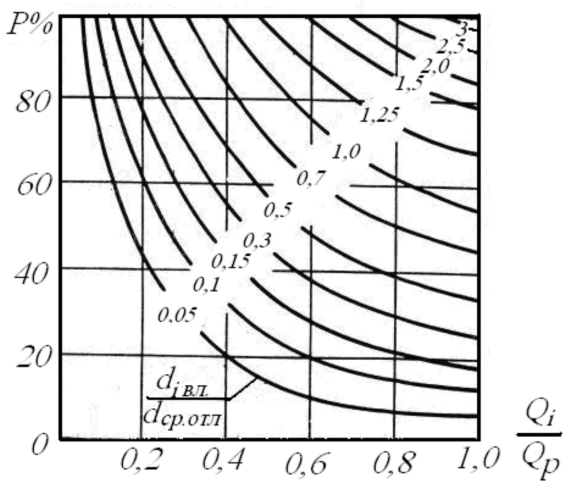


Рисунок 2.2 – Номограмма для определения фракционного состава влекомых наносов в зависимости от отношений рассматриваемых речных расходов Q_i к руслоформирующим расходам Q_p и расчетных фракции наносов $d_{i\text{вв}}$ к средневзвешенному диаметру русловых отложений $d_{\text{ср.ор.}}$

172]. В инженерной практике неразмывающую скорость определяют по значению размываемой скорости введением коэффициента запаса (СНиП 2.06.03–85).

В гидродинамике величину неразмывающей скорости связывают с критическими значениями касательных напряжений, при которых начинается движение частиц наносов. Величина этих касательных напряжения создает опрокидывающие моменты, при которых лежащая на дне частица, упирающаяся на последующую частицу вниз по течению, начинают двигаться или перекатываться, или сочетают подъем с вращением.

В расчетах, вместо касательных напряжений $\tau_{0c} = \rho v_{*c}^2$, ($v_{*c}$ – скорость движения воды в придонном подслое) пользуются критическими значениями средних скоростей водного потока в рассматриваемых сечениях [61]:

$$U_c = \frac{C}{\sqrt{g}} v_{*c}. \qquad (2.4)$$

Проведя обработку результатов многочисленных экспериментальных исследований по определению скоростей начала движения наносов, с различными степенями неоднородности несвязных грунтов В.С. Кнорозом [108] для квадратичной области обтекания частиц с $d > 1$ мм, была предложена зависимость вида:

$$U_c = 1,3\sqrt{gd}\,\lg\frac{12R}{\Delta}. \qquad (2.5)$$

Для исключения из расчета высоты выступов шероховатости Δ В.С. Кнорозом рекомендовано соотношение $\Delta = 1,6d_{50}$, при сильно неоднородных смесях по предложению И.И. Леви можно использовать равенство $\Delta = d_{90}$, при этом в правую часть уравнения (2.5) вводится множитель (d_{50} / d_{95}) [43, 61].

При увеличении значений касательных напряжений водного потока на дне влекомые частицы перекатываются, с большим увеличением придонных скоростей перекатывание сменяется скачками. Перемещение посредством последовательных скачков представляет основной вид развитого движения твердых частиц [61]. Виды движения частиц в основном изучаются двумя способами: 1) путем фиксации движения на кино- или фотокадрах и 2) путем наблюдения за перемещением окрашенных или активизированных частиц. Результаты исследований, выполненных с помощью первого способа Ц.Е. Мирцхулавы, Н.А. Михайловой, К.И. Россинского, К.С. Любимовой, И. Френсиса свидетельствуют, что подъемная сила, приложенная к перемещающейся частице, имеет максимальное значение в момент начала скачка. Так как восходящие ветви траектории перемещения наносов круче нисходящих ветвей [146, 190]. Как следствие этих наблюдений К.В. Гришаниным [43] был сделан вывод, что подъемная сила, приложенная к частице наносов, лежащей на дне, образуется в результате разностей величин давлений в заторможенных объемах воды под частицей и давлением в ускоряющейся жидкости над частицей. В турбулентном потоке эта разность колеблется вместе с пульсирующей продольной скоростью. Подпрыгивание частиц происходит в момент максимума продольных скоростей движения. При поднятии над дном влияние разности давления на частицу резко сокращается, но подъемная сила при этом не исчезает, а поскольку при ее возникновении принимало участие вращательное движение, выпадая на дно, частица перемещается вниз по течению, перекатываясь. То есть энергия, полученная частицей в начале своего движения, при возникновении момента относительно ее упора о соседнюю частицу, может расходоваться ею еще достаточно долго.

По наблюдениям К.И. Россинского и К.С. Любимовой [146] при скорости течения воды у дна $U = 1$ м/с частица, диаметром 16 мм, делая скачок, вращалась со скоростью 6–10 оборотов в секунду. Рассматривая шарообразную частицу из однородного материала можно определить, что окружная скорость поверхности частиц составляла 0,3–0,5 м/с, что относительно скорости воды составляет (0,3–0,5)U. Значение гидравлической крупно-

сти частиц диаметром 16 мм по данным В.Н. Гончарова [60, 83] составляет 548 мм/с или 0,548 м/с. Это свидетельствует, что для организации отрыва и движения отдельной частицы наносов над ее поверхностью необходимо создание скоростей воды не менее чем в два раза превышающих их гидравлическую крупность. Такие же выводы были сделаны П.А. Войновичем и М.А. Дементьевым [43], которые экспериментально установили, что продольные скорости частиц почти сразу после начала движения достигают значений (0.4÷0,5)U. После начала движения скорости движения наносов продолжают расти, и стремятся сблизиться со скоростью U [143, 190].

В практике производства расчетов многие авторы пользуются значениями скоростей, при которых происходит непрерывный срыв отдельных частиц наносов и их вынос за пределы участка размыва. Эти скорости называют размывающими – v_p [86].

По мнению многих исследователей [13, 166, 172] величины размывающих скоростей в основном зависят от глубины потока и устойчивости отдельных зерен к перемещению. В.С. Лапшенковым [86] на основании результатов натурных исследований была предложена структура формулы для определения величины размывающей скорости потока для грунтов с $d > 1$ мм:

$$v_p = k\left(\frac{d}{h}\right)^{\beta}\sqrt{h} = kd^{\beta}h^{0,5-\beta}, \tag{2.6}$$

где k – коэффициент, значение которого уточняется по результатам лабораторных исследований; β – значение степени.

Приведенной структуре соответствуют многие зависимости известных авторов Г.И. Шамова, А.М. Латышенкова, и многих других [106, 107, 108].

Анализируя известные методики расчета процессов регулирования наносного режима, их отложения на гидротехнических сооружениях эксплуатируемых в подпорном режиме, в литературе различается скорость остановки наносов $v_{о.н.}$. В.Ф. Талмазой и А.Н. Крошкиным на основе анализа ряда зависимостей предложенных И.В. Егизаровым, Б.А. Фидманом, В.Н. Гончаровым, В.С. Кнорозом, И.И. Леви, Ц.Е. Мирцхулавы и др., был предложен вид формулы для определения скорости остановки наносов [32, 38, 152, 164]:

$$v_{о.н} = a_1 f\left(\frac{h}{d_{от}}\right)\sqrt{\frac{\gamma_H - \gamma}{\gamma} g d_{i.ср}}, \tag{2.7}$$

где a_1 – коэффициент, зависящий от величины знаменателя степени показательного закона распределения скоростей водного потока по вертикали; $f\left(\frac{h}{d}\right)$ – функция, получаемая из того же закона распределения скоростей на вертикали; γ и $\gamma_Н$ – плотность воды и материала наносов, принимается равной 1000 и 2650 кг/м^3 соответственно; h – средняя глубина воды на прямолинейном участке:

$$h = \left(\frac{Q_i}{5Bi^{0,2}}\right)^{\frac{1}{1,7\sqrt[4]{i}+1,5}}, \tag{2.8}$$

$d_{от}$ – средний диаметр отмостки:

$$d_{от} = 4,5i^{0,9}, \tag{2.9}$$

$d_{i.ср}$ – средний диаметр транспортируемых наносов; при рассмотрении руслоформирующих расходах $Q_{рф}$ применяется равенство $d_{i.ср} = d_{от}$; в случае расчетов для расходов меньше руслоформирующих Q_i [64]:

$$d_{i.ср} = d_{от}\left(\frac{Q_i}{Q_{рф}}\right)^{1,1}, \tag{2.10}$$

После преобразования уравнения (2.7) В.Ф. Талмазой и А.Н. Крошкиным была предложена зависимость, основанная на силовом взаимодействии потока жидкости с частицами наносов [13], которая рекомендуется при расчетах относительно гравийно-галечного грунта [164]:

$$v_{o.н} = 2\frac{m-1,5}{m+1}\left(\frac{h}{d_{от}}\right)^{\frac{1}{m}}\sqrt{\frac{\gamma_H-\gamma}{\gamma}gd_{i.ср}}\,, \tag{2.11}$$

где m – знаменатель показателя степени при степенном законе распределения скорости по вертикали $v_y = v_{м.в}\eta^{\frac{1}{m}}$ (где $v_{м.в}$ – максимальная скорость по вертикали (на поверхности потока воды), а $\eta = y/h$ – относительная глубина), для горно-предгорных участков рек [160]:

$$m = 1,5 + 0.314C/\sqrt{g}\,. \tag{2.12}$$

Одной из основных задач исследований закономерностей движения наносов в речных потоках является расчет расхода речных наносов в зависимости от параметров потоков воды. В расчетной практике принято использование трех видов формул для определения расхода наносов, это детерминистические, вероятностные и уравнения, основанные на методе анализа размерностей [43, 60, 61]. В настоящее время различными авторами предложено более 200 формул для расчета расхода наносов, которые по предложению З.Д. Капалиани разделяются на девять групп [114, 115]. В основном проведенное деление относится к детерминистическим формулам, которое приведено в Приложении 5 [19, 43, 62, 86, 110, 166, 167]. Эти формулы используются для определения удельного расхода наносов q_H (кг/с,м).

Расход влекомых наносов на участке реки определяется по формуле:

$$G_H = q_H B_H\,, \tag{2.13}$$

где q_H – удельный расход влекомых наносов, кг/с, м; $B_Н$ – ширина рассматриваемого участка русла с активным движением наносов, ее рекомендуется определять по формуле [120]:

$$B_H = B\sqrt{\frac{m}{m+1}}\,, \tag{2.14}$$

где B – ширина водного потока в речном русле, при отношении В/h > *10* приводимая к прямоугольному поперечному сечению, для горно-предгорных участков рек определяется по формуле [120, 172]:

$$B = \frac{2,6}{i^{0,2}}\left(\frac{Q_i}{\sqrt{g}}\right)^{0,4}\times K\,, \tag{2.15}$$

K – коэффициент, учитывающий величину рассматриваемого расхода; при руслоформирующем расходе равен (1,0); для расходов меньше руслоформирующих, определяется по формуле [120]:

$$K = \left(\frac{Q_i}{Q_{рф}}\right)^{\frac{0,4(1,06-i^{0,06})}{i^{0,06}}}\,. \tag{2.16}$$

Анализируя особенности изменения расхода влекомых наносов на горных реках и определяя их влияние на регулирование пропуска наносов при водозаборе В.Ф. Талмаза [167] обосновал необходимость корректирования предложенной ими ранее зависимости:

$$q_H = 0,07\frac{v^4}{\sqrt{h}}(v - v_{o.н})\,, \tag{2.17}$$

Поскольку по результатам проведенных полевых исследований на горных водотоках Кыргызской Республики им было установлено, что в зависимости от периода наблюдений в первую паводковую волну (в ранневесенний период), или при прохождении второго паводка (в летний период) в гидравлических характеристиках речных потоков наблюдались значительные различия (рисунок 2.3).

С учетом это В.Ф. Талмазой были рекомендованы следующие преобразованные зависимости для определения расхода наносов на горных реках [167]:

- для первой паводковой волны:

$$q_H = 0{,}14\frac{(v)^4}{\sqrt{h}}(1{,}2v - 0{,}12v_{o.н}), \tag{2.18}$$

- для второй паводковой волны:

$$q_H = 0{,}035\frac{(v)^4}{\sqrt{h}}(0{,}8v - 0{,}67v_{o.н}). \tag{2.19}$$

Приведенные формулы свидетельствуют, что расход влекомых наносов при одних и тех же глубинах и скоростях на рассматриваемых участках русел рек может изменяться в четыре раза, а наиболее крупных фракций влекомых наносов – в десятки раз. Это определяет необходимость уточнения зависимостей для расчета расхода наносов с учетом рассматриваемого гидрологического периода.

Как показал анализ зависимостей, использующих в качестве аргумента скорость воды, основой их вида является формула И.И. Леви (см. Приложение 9), которая изначально базировалась на предложениях М. Дюбуа и А. Шильдса. В ней разность касательных напряжений заменена разностью между средней скоростью на вертикали и скоростью остановки наносов. По заключению К.В. Гришанина такая замена предопределила появление величины учитывающей относительную шероховатость – *d/h*. В формулах этого вида разность $v - v_{он}$ характеризует скорость движения частиц наносов, а величина $(v/\sqrt{gd})^3$ определяет число частиц [43, 166]. Так как формулы такого типа основаны на разности скоростей с достаточной достоверностью, то они могут быть использованы для расчета расхода наносов на участках рек горно-предгорной зоны.

Выполненный анализ теоретических основ, описывающих гидравлические характеристики влекомых наносов горных рек, будут учитываться нами при создании рациональных схем регулирования наносного режима в бьефах низконапорных водозаборных сооружений и анализе русловых процессов в зоне водозабора. Так как они определяют величины расчетных значений гидроморфометрических характеристик водотоков, от которых зависит выбор конструкции элементов сооружений (относительного размещения, параметров средств защиты от наносов, устройств аккумуляции и транспорта влекомых наносов), которые находятся в пределах устройств, обеспечивающих водозабор.

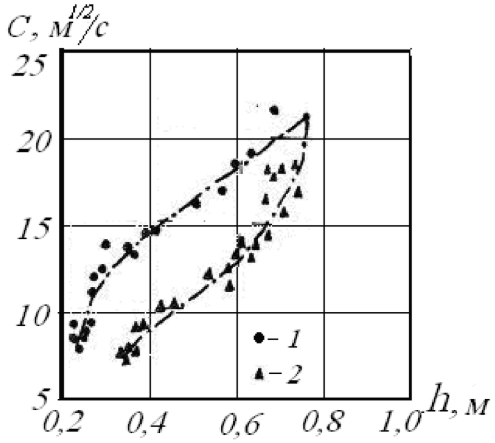


Рисунок 2.3 – Изменение коэффициента Шези реки Ала-Арча: 1 – значения на подъеме первой паводковой волны; 2 – значение на спаде первой паводковой волны и при прохождении второй волы паводка

2.3.2. Движение двухфазного потока жидкости (вода – наносы) на криволинейных участках русел

Как отмечалось выше, первый опыт применения криволинейных зарегулированных русел на горных реках Средней Азии в качестве наносозащитного элемента, был применен при разработке водозаборных гидроузлов ферганского типа в 30-х годах XX века. Эксплуатация этих сооружений показала, что криволинейное подводящее русло водозаборного гидроузла является эффективной ступенью борьбы с наносами при одностороннем водозаборе в период прохождения паводков [170]. При этом параметры кривизны подводящих зарегулированных русел увязывались с величинами руслоформирующих расходов рек [166, 172].

Несмотря на многочисленность проведенных исследований, вопрос относительного размещения элементов водозабора и регуляционных сооружений до последнего дня остается все еще до конца нерешенным. Это предопределило появление в гидротехническом строительствецелого направления, целью которого является не только обоснование параметров криволинейных участков русел, но и прогнозирование гидравлических процессов в бьефах гидроузла в условиях изменения гидрологических режимов горных рек.

Изучению движения потока воды, содержащей наносы, на криволинейных участках русел посвятили работы многие ученые Европы: Дюбуа, Сен-Венан, Нави, Буссинеск, Прус-Часинский [193, 194]; России и бывшего Советского Союза: Н.Е Жуковский, Н.С. Лелявский, А.Я. Милович, И.Л. Розовский, А.М. Дементьев, М.В. Потапов А.В. Караушев, В.Н. Гончаров, Н.Ф. Данелия, Г.И. Замбахидзе, В.Ф. Талмаза, Н.А. Крошкин [53, 54, 125, 126].

При движении на криволинейных участках русел рек к основному продольному движению добавляется еще поперечное циркуляционное течение, вызванное перераспределением удельных расходов воды. Сложность происходящих явлений до последнего времени не позволила решить поставленную проблему в целом и разработать теоретически обоснованную, практически проверенную методику расчета движения двухфазного потока жидкости (вода – наносы) на излучинах рек [35]. Этому способствует и тот факт, что на сегодняшний день нет однозначного качественного представления о закономерностях движения, тем более ставятся под сомнение многочисленные локальные количественные решения.

Существуют три авторитетных мнения о причинах возникновения поперечной циркуляции на криволинейных участках русел рек [53]:

1) по мнению Н.Е. Жуковского, М.А. Великанова в образовании восходящих и нисходящих вторичных течений на криволинейных участках участвуют вихревые силы;

2) М.А. Дементьев, А.К. Ананян, И.Л. Розовский, М.В. Потапов, Н.Ф. Данелия, М.П. Кожевников причинами образования радиальных вторичных течений считают инерционную силу – центробежную, образующую радиальные вторичные течения;

3) А.Я. Милович в качестве причины поперечных течений определил разность давления в поперечных сечениях на криволинейных участках.

На наш взгляд, совместное рассмотрение второй и третей причин определяет предпосылки для качественного и количественного решения задачи. Современные средства проведения математического моделирования гидравлических процессов позволяют применять численные методы в решении задач такого характера [169]. Об этом наглядно свидетельствуют результаты исследований европейских ученых, которые для рассмотрения закономерностей при меандрировании на равнинных реках используют сложный математический аппарат [195, 197, 198].

По данным лабораторных исследований жесткого прямоугольного русла (с неразрываемым дном), проведенных В.Ф. Талмазой, А.Н. Крошкиным [166], Г.Н. Замбахидзе [54], А.Б. Магая [106] при течении воды на прямолинейном участке перед поворотом возникает кривая подпора, распространяющаяся вверх по течению вдоль вогнутого берега. У выпу-

клого берега кривизны происходит резкое понижение уровней воды. Продольный уклон поверхности потока у выпуклого берега может увеличиваться более чем втрое, а у вогнутого берега уменьшается до отрицательных значений. Появление поперечного уклона свободной поверхности начинает проявляться на расстоянии (0,5÷1)B выше начала поворота. Далее после начала поворота поперечный уклон потока резко увеличивается и достигает максимальной величины на коротком участке кривизны русла. При этом угол α от начала поворота до створа с максимальным уклоном рекомендуется определять по формуле [106, 166]:

$$\alpha = arccoos\frac{2\frac{R_{кр}}{B}+1}{2(\frac{R_{кр}}{B}+1)} - 2\arcsin\frac{1}{4(\frac{R_{кр}}{B}+1)}. \qquad (2.20)$$

Ниже этого сечения значение поперечного уклона потока уменьшается и остается постоянным вплоть до выхода потока из поворота.

В.Ф. Талмаза и А.Н. Крошкин проанализировав ряд известных формул [134, 166] для определения максимального поперечного уклона водной поверхности на повороте русла, приведенных в Приложении 6, представили следующий упрощенный вид своей зависимости [166]:

$$J_{П} = 0,85\frac{v\sqrt{h}}{R_{кр}}. \qquad (2.21)$$

Результаты исследований криволинейного участка русла с размываемым дном [54, 166] свидетельствуют о кардинальном их отличии от результатов, полученных на участке жесткого русла. Длина кривой подпора перед поворотом увеличивается, а сечение с максимальным уклоном смещается вниз по течению и размещается над воронкой максимального размыва дна (рисунок 2.4) [166].

Трансформация значений поперечного уклона потока по длине криволинейного участка происходит по функции с первоначальным увеличением значений и постепенным его уменьшением к углу закругления от 110 до 120 градусов. Затем вновь происходит рост значений поперечных уклонов вплоть до максимальных значений.

Ценность исследований участков поворота русел на 180 градусов заключается в возможности проведения анализа динамики происходящих в натурных условиях процессов, как на подходных участках, так и на выходе из излучины. По своему характеру эти процессы просты, но определяют закономерность, отличающую характеристики движения двухфазных потоков жидкости (вода – наносы) при меандрировании рек на горно-предгорных участках и долинных участков.

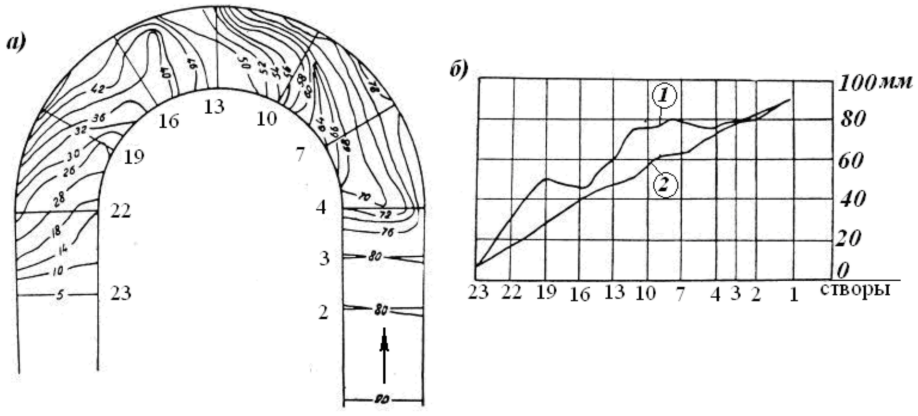


Рисунок 2.4 – Рельеф и продольные профили свободной поверхности потока на криволинейном участке (*Fr* = 0,99): а – план; б – продольные профили (1 – вогнутого берега, 2 – у выпуклого берега)

Если рассматривать угол поворота русла до 90 градусов, сравнение результатов будет удовлетворительным, и предлагаемая математическая модель может рекомендоваться для прогнозирования русловых процессов в зарегулированных криволинейных руслах водозаборных сооружений, что неприемлемо, так как не учитывается отток основных объемов воды от вогнутого берега, возникающий за первой воронкой размыва. Эта направленность воды используется в водозаборных сооружениях с криволинейными руслами для транспорта наносов к речному пролету, размещаемому на выпуклом берегу.

Как свидетельствуют результаты исследований (рисунок 2.5) [54, 166], для определения значений максимального уклона на участке криволинейного русла с размываемым дном, может быть использована зависимость (2.21).

Анализ плана изменения глубин и эпюр перераспределения скоростей потока, приведённых на рисунке 2.6 [13], позволяет сделать выводы о направленности отдельных струй воды на участке криволинейного русла [17, 46]:

- под действием разности давлений (уровней воды) у вогнутого и выпуклого берегов и увеличения глубин возникает движущая объемная сила потока, под действием которой образуются придонные токи, которые направлены в зону пониженного давления, в направлении транспорта влекомых наносов;
- при увеличении величин поперечного уклона потока до максимальных значений движущая объемная сила возрастает до критической величины, при которой основная масса воды отходит от вогнутого берега в сторону геометрической оси русла, что вызывает уменьшение поперечного уклона поверхности потока;
- следуя ниже угла 90 градусов, поток под действием силы тяжести и силы инерции от движения в поводящем русле набегает на вогнутый берег, формируя максимальный поперечный уклон потока и воронку размыва;
- возникновение второй воронки размыва вторично вызывает повышение движущей объемной силы потока, которая создает донные токи, направленные к центру кривизны.

Возникновение донных токов уменьшает интенсивность размыва дна и снижает значение поперечного уклона потока на нижележащих участках. При этом, движущая объемная сила потока вновь определяет смещение основных объемов воды в сторону геометрической оси русла.

Сопоставление графических зависимостей изменения поперечного уклона потока на криволинейных участках русла с размываемым и не размываемым дном (см. рисунок 2.5) позволяет заключить, что основным отличием является образование зон размыва и относительное выравнивание уровня воды в поперечном сечении на центральном участке кривизны. Это на наш взгляд, связано с увеличением глубин, которые увеличивают объемную силу потока, действующую в поперечном сечении.

В продолжение анализа нами была определена центростремительная сила (движущей силы потока, возникающей при возникновении поперечного уклона), уравновешивающая центробежную силу ($F_{тяж} = F_{ц.б}$).

Рассматривая движения объемов жидкости в открытых руслах (рисунок 2.7) [43] можно сделать вывод, что, находясь над наклонным дном водотока, компоненты, которые определяют движущую силу потока, могут быть записаны в виде:

$$\left.\begin{aligned} G_x &= \rho dxdydzgi; \\ G_z &= \rho dxdydz\left(-g\sqrt{1-i^2}\right); \end{aligned}\right\}, \qquad (2.22)$$

где ρ – плотность жидкости; dx, dy, dz – стороны параллелепипеда рассматриваемого объема воды; i – уклон дна русла.

При условии движения водного потока параллельно плоскости координат x, z, значение проекции действующей силы составит $G_y = 0$.

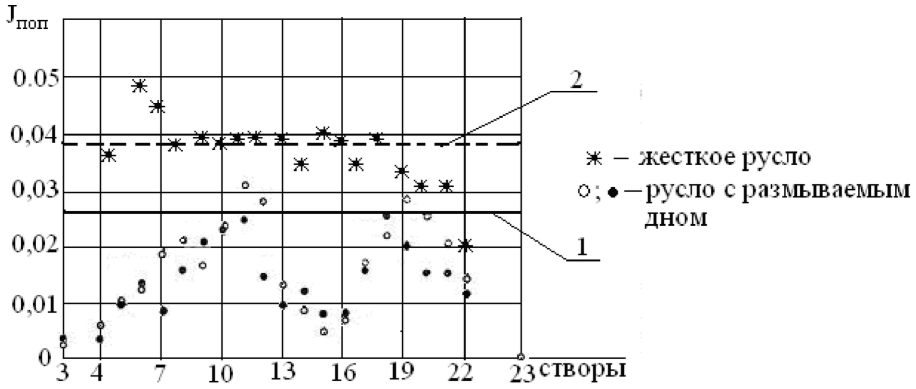


Рисунок 2.5 – Значения поперечного уклона поверхности воды на криволинейном участке физической модели и расчетные значения по формуле (2.21): 1 – поперечный уклон, для размываемого дна при скорости воды v = 0,68 м/с и Fr = 0,99; 2 – поперечный уклон для условий жесткого русла при средней скорости воды v = 0,84 м/с и Fr = 1,06

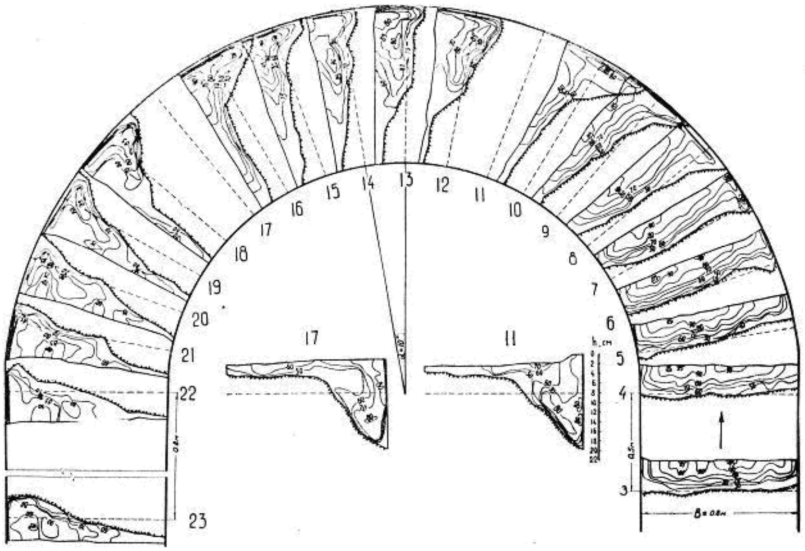


Рисунок 2.6 – Распределение продольных составляющих скоростей на повороте русла с размываемым дном

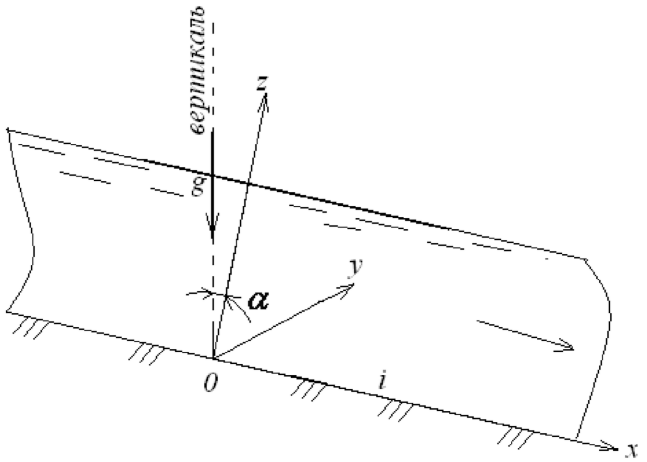


Рисунок 2.7 – Система координат руслового потока:
α – угол наклона координатных плоскостей к горизонту sinα = i

Из системы (2.22) следует, что проекция массовой силы на ось *x* определяет объемную движущую силу жидкости, которая для потока жидкости может быть определена в виде формулы [104]:

$$F'_{тяж} = \rho Q dtgi\,, \tag{2.23}$$

где Q – расход потока, проходящего по рассматриваемому участку русла за время dt.

Проекция массовой силы объемов воды на ось *z* проявляется в виде напряжений на ограничивающих поверхностях потока, которые будут равны:

$$F_{нап} = \rho Q dt\left(-g\sqrt{1-i^2}\right). \tag{2.24}$$

Учитывая, что основная движущая сила жидкости возникает от уклона поверхностности потока, уравнение объемной движущей силы воды, действующей в радиальном направлении на криволинейном участке, может быть записано в виде:

$$F'_{тяж} = \rho Q dtgJ_{поп}\,. \tag{2.25}$$

При этом определяется равенство сил:

$$\rho g Q dt J_{поп} = \rho Q dt\frac{v^2}{R_{кр}}. \tag{2.26}$$

Отсюда следует:

$$gJ_{поп} = \frac{v^2}{R_{кр}} \rightarrow J_{поп} = \frac{v^2}{gR_{кр}}. \tag{2.27}$$

Но факт возникновения донных токов на криволинейном участке нарушает представленное равенство сил и вызывает необходимость рассмотрения более сложной расчетной схемы с применением более широкого спектра расчетных составляющих.

Параметры регуляционных сооружений криволинейных зарегулированных русел водозаборных гидроузлов из горных рек зависят от глубины воронки размыва и ее относительного размещения. Как свидетельствуют результаты исследований многих авторов [7, 11, 54, 166, 172], наибольшие глубины у вогнутого берега располагаются за сбойными зонами потока, где поперечные донные скорости достигают наибольших значений. Это обеспечивает защиту от наносов отводящих каналов, которые рекомендуется размещать на вогнутом берегу в зоне максимального размыва дна.

И.Л. Розовский [145, 172] проведя многочисленные исследования криволинейных участков русел, предложил зависимость для определения угла поворота, при котором развитие поперечной циркуляции заканчивается:

$$\phi_{пр} = \frac{1,5C}{\sqrt{\mathrm{g}}} \times \frac{h}{R_{геом}}, \tag{2.28}$$

где $R_{геом}$ – радиус кривизны геометрической оси криволинейного русла.

В результате лабораторных и натурных исследований водозаборных гидроузлов ферганского типа А.П. Ушаков, В.Н. Шолохов, И.Я. Якштас [170] пришли к выводу, что наибольшая глубина воронки размыва, совпадающая с рациональным расположением водоприемного оголовка, размещается от входного сечения криволинейного участка на расстоянии [166]:

$$L_{кр} = \frac{5,6}{i^{0,35}}\left(\frac{Q}{\sqrt{g}}\right)^{0.4}. \tag{2.29}$$

При этом рациональный радиус закругления оси русла определяется по зависимости [172]:

$$R_{кр} = \frac{3}{i^{0,5}}\left(\frac{Q}{\sqrt{g}}\right)^{0,4}. \tag{2.30}$$

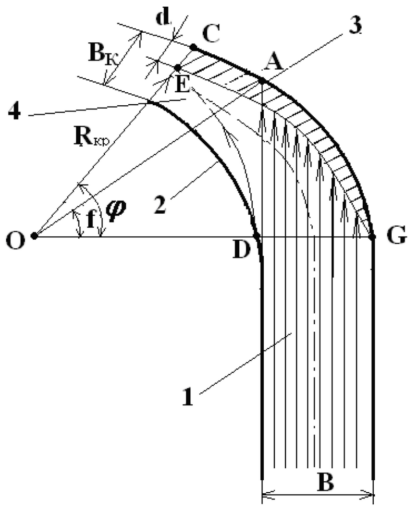


Рисунок 2.8 – Расчетная схема криволинейного участка русла водозаборного гидроузла. 1 – прямолинейный участок русла, 2 – выпуклый берег, 3 – вогнутый берег, 4 – зона отложений наносов

Учитывая зависимости (2.34 и 2.35) с учетом уравнения окружности, может быть определена зависимость для расчета угла размещения водоприемного оголовка водозаборного сооружения от входного сечения криволинейного участка [99]:

$$\phi = \frac{360 L_{кр}}{2\pi R_{кр}} = 107 i^{0.15} . \qquad (2.31)$$

Эта зависимость может быть использована, как и формулы, определяющие ее вид, при уклонах дна подводящего русла i, изменяющихся в диапазоне 0,005 до 0,05. В результате вычислений по зависимости (2.31), было установлено, что значение угла φ изменяется для указанного диапазона уклонов в пределах от 48 до 68 градусов. Это согласуется с известными рекомендациями [159, 160, 172], в которых угол кривизны зарегулированных подводящих русел водозаборных сооружений на реках рекомендуется принимать равными от 45 до 70 градусов.

Рассмотрим плановые размеры криволинейного подводящего русла водозаборного гидроузла с размещением элементов водного потока на примере расчетной схемы, приведенной на рисунке 2.8. При этом условно используем начальный участок криволинейного русла, приведенный на рисунке 2.6 до створа возникновения первой воронки размыва.

Как показывает анализ предлагаемых различными авторами [172, 179] зависимостей, при создании зарегулированных русел водозаборных сооружений их параметры согласуются с гидроморфометрическими характеристиками естественных водотоков.

С.Т. Алтуниным [8] при уклонах дна русел рек i = (0,02÷0,002) для определения рациональных параметров криволинейного русла была предложена зависимость:

$$\frac{R_{кр}}{B} = 3,5 \div 8 , \qquad (2.32)$$

где В – ширина водного потока по урезу воды на прямолинейном участке русла.

Проведя анализ уравнения плоского равномерного турбулентного потока с постоянным продольным уклоном i, В.Ф. Талмаза и А.Н Крошкин предложили более точную зависимость для определения параметров кривизны [166]:

$$\frac{R}{B} = \frac{1,04}{i^{0,33}} . \qquad (2.33)$$

Эта формула определяет отношение основных параметров криволинейного русла при изменении уклона дна реки.

Учитывая первый закон Ньютона, предположим, что линии токов отдельных струй воды подходящие по прямолинейному участку русла к криволинейному руслу сохраняют свою прямолинейную траекторию вплоть до соприкосновения с вогнутым берегом (см.

рисунок 2.8). Здесь, накладываясь друг на друга, струи двигаются вниз по течению вдоль вогнутого берега до точки (А), в которой они полностью суммируются. Эта точка соответствует пересечению вогнутого берега с прямой линией, проведенной в продолжение прямолинейной береговой линии, переходящей в выпуклый берег. Как показали натурные наблюдения, и предварительные модельные исследования криволинейных русел с размываемым дном, при сложении линий токов образуется горизонтальный валец круглого сечения, расширяющийся от начала кривизны до точки с максимальными глубинами, предположительно находящихся в точке (А). Это позволяет заключить, что в точке (А) произойдет сложение всех линий токов, то есть здесь будет начинаться участок с максимальными глубинами размыва у вогнутого берега.

Из треугольника AOD (см. рисунок 2.8) с учетом известных значений R и B можно вывести зависимость для расчета угла f [25, 127]:

$$f = \arccos\frac{2R - B}{2R + B}. \tag{2.34}$$

Анализ рельефа дна и распределения продольных составляющих скоростей потока (см. рисунок 2.7) показал, что максимальные глубины и поперечные скорости размещаются у вогнутого берега в точке (С) ниже от точки (А).

Рассчитав значения углов от начала кривизны до сечения с наибольшей воронкой размыва по формулам (2.31 и 2.34), полученных нами с помощью программы MicrosoftExcel, мы получили зависимость для определения разности углов размещения точек (А) и (С) при уклонах дна i от 0,005 до 0,05:

$$\phi - f = 58,3\frac{B}{R} + 29,36i + 9,9. \tag{2.35}$$

По нашему мнению, расхождение значений углов φ и f определяется смещением токов воды, подходящих к вогнутому берегу от точки (А) к точке (С). По данным наблюдений были сделаны следующие выводы о причинах смещений вновь подходящих токов относительно вогнутого берега [98, 104]:

- существует взаимодействие с расходами, уже движущимися вдоль вогнутого берега в сторону нижележащих участков русла;
- происходит соприкосновение с донными токами, направленными от вогнутого берега в зону отложения наносов у выпуклого берега (из зоны повышенного давления в зону пониженного) (см. рисунок 2.8).

Можно предположить, что при постепенном сложении линий токов вдоль вогнутого берега они образуют поток, форма которого – круглая в поперечнике, обусловлена стремлением жидкости двигаться с наименьшими сопротивлениями (рисунок 2.9).

Расширение конусообразного потока совместно с развитием поперечных течений приводит к его заглублению в размываемое дно русла. Увеличение сечения происходит за счет пополнения со стороны прямолинейного подводящего русла до сечения с наибольшей воронкой размыва. При этом в неустановившемся режиме движения придонные токи, направленные в зону пониженного давления у вогнутого берега, после формирования рельефа дна выходя из вальца, направляются вдоль оси русла.

На наш взгляд, возникновению придонных токов на криволинейном участке русла с размываемым дном способствует динамика происходящего процесса. Поток, движущийся вдоль вогнутого берега, подвержен центробежной силе, которая уравновешивается движущей объемной силой воды, являющейся в этом случае центростремительной. Но поступающий со стороны прямолинейного участка поток, набегая на вогнутый берег, до вступления во взаимодействие с конусообразным вальцом, не подвержен центробежной силе и не имеет уравновешивающей составляющей. Таким образом, вновь подходящие потоки создают

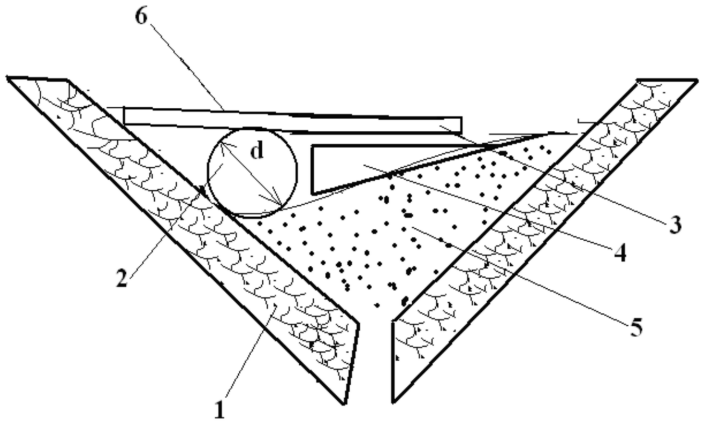


Рисунок 2.9 – Схема поперечного сечения криволинейного участка русла с размещением отдельных водных потоков: 1 – струенаправляющая дамба; 2 – сечение конусообразного потока; 3 – сечение потока, движущегося к вогнутому берегу от прямолинейного участка русла; 4 – поперечное сечение потока, формирующегося от притока со стороны донных струй поперечного течения; 5 – отмостка русла; 6 – поверхность потока с уклоном; d –диаметр конусообразного потока

дополнительное превышение уровней воды у вогнутого берега над уровнями у выпуклого берега, что и определяет возникновение донных токов, как элемента, уравновешивающего силу инерции поступательного движения воды от подводящего русла.

Взаимодействие движущихся, соединяющихся на поверхности и отделяющихся в придонной области объемов воды, вызывает поперечную циркуляцию описанного конусообразного потока вдоль вогнутого берега. То есть вновь подходящие струи воды вступают во взаимодействие с конусообразным потоком, сдвигают его поверхность к вогнутому берегу, а разность уровней воды вызывает отток из его придонных струй. Этот процесс сопровождается размывом дна при неустановившемся режиме и транспортом вновь подходящих влекомых наносов вдоль геометрической оси потока вниз по течению.В целом, описанные здесь перемещения объемов воды в гидротехнике называются продольно-поперечной циркуляцией, а конусообразный поток – циркуляционным вальцом.

С целью перехода от качественного описания к количественным характеристикам приведем модель, в первом приближении описывающую происходящие гидравлические процессы на участке криволинейного русла с размываемым дном:

$$\left.\begin{aligned} Q_{bi} &= Q_{в(i\text{-}1)} + Q_P\theta_i - Q_{донi} \\ \theta_i &= \frac{\cos\phi_{i-1} - \cos\phi_i}{1-\cos\phi} \\ Q_{донi} &= Q_{дон(i\text{-}1)} + \int_0^{L_{кpi}} \omega_i C_i \sqrt{R_i \Delta J} \times dl \\ \omega_i &= k_i dl \\ d_i &= \sqrt{\frac{4\times Q_{bi}}{\pi \times v}} \end{aligned}\right\}, \qquad (2.36)$$

где Q_{bi} – расход воды в конусообразном вальце; Q_p – расход воды в русле реки; φ_i – угол между входным сечением криволинейного участка и рассматриваемым i-м поперечным сечением; $Q_{донi}$ – расход донных токов воды, отделяющихся от конусообразного потока от его начала до рассматриваемого сечения; Θ_i – коэффициент, учитывающий долю проекции рассматриваемого участка в общей проекции вогнутого берега, на плоскость, размещенную во входном поперечном сечении криволинейного участка; ω_i – площадь поперечного сечения придонного потока, отделяющегося от конусообразного вальца; k_i – вертикальный

размер донного потока в рассматриваемых сечениях (на основании анализа результатов лабораторных исследований Г.Н. Замбахидзе [54] и В.Ф. Талмазы, А.Н. Крошкина [166] нами было установлено, что его величина составляет 30 % глубины водного потока у вогнутого берега); R_i – расчетная величина гидравлического радиуса в рассматриваемом сечении; d_i – диаметр конусообразного вальца в рассматриваемом сечении с учетом расчетной схемы (см. рисунок 2.8) v – средняя скорость водного потока в конусообразном вальце; C_i – коэффициент Шези для движения придонных токов; ΔJ – приращение поперечного уклона свободной поверхности водного потока в результате действия силы инерции при набегании потока на вогнутый берег со стороны прямолинейного участка русла.

Сравнение результатов расчета с помощью графоаналитического метода расчета параметров водного потока на криволинейном подводящем русле с результатами исследований, приводятся в последующих разделах нашей работы.

2.3.3. Обоснование параметров наносозащитных порогов, устраиваемых перед водоприемными камерами водозаборных сооружений

Основными элементами водозаборных сооружений, определяющими основные технические характеристики, являются речное русло и водоприемник. Рассматривая простейшую расчетную схему водозаборного гидроузла (рисунок 2.10) при условиях лимитированного водозабора и движения воды без примесей, можно прийти к выводу, что водоприемнику могут быть заданы параметры, обеспечивающие коэффициент водозабора $\alpha \leq 1$ при прохождении по реке расхода расчетной обеспеченности $Q_{p\%}$ (если выполнить водоприемник шириной большей, чем ширина речного русла).

Минимальное значение ширины водоприемника B_c при полностью поднятом затворе водоприемника определяется по общеизвестной формуле водослива с широким порогом [87]:

$$B_c = \frac{Q_к}{\sigma_n m\sqrt{2g}H_0^{1,5}}, \tag{2.37}$$

где $Q_к$ – значение расхода воды, забираемого в водоприемник; σ_n – коэффициент, учитывающий подтопление; m – коэффициент расхода водослива с широким порогом; H_0 – расчетный напор воды в русле реки над дном водоприемника с учетом скоростного напора.

Также может быть использована зависимость:

$$B_c = \frac{Q_k}{\phi h_2\sqrt{2gz_0}}, \tag{2.38}$$

где φ – скоростной коэффициент, учитывающий потери напора; z_0 – перепад уровней воды в речном русле и в голове отводящего канала.

В приведенной компоновочной схеме простейшего водозаборного сооружения глубина воды перед водоприемником будет определяться шириной подводящего русла и величиной проходящего расхода.

Исследованиями водозабора по приведенной схеме занимались многие ученые [43]. Результаты этих исследований свидетельствуют, что при движении по подводящему руслу реки двухфазного потока (вода – наносы) в водоприемник завлекаются крупные фракции влекомых наносов, если коэффициент водозабора α превышает значения 0,2…0,25 и водоприемник не расположен на вогнутом берегу речной излучены или зарегулированного подводящего русла. Это наблюдается при любом угле размещения отвода водоприемника Θ (от 30 до 150°).

При проведении анализа закономерностей движения наносов с целью организации наносозащиты при водозаборе,весьма ценны исследования А.И. Лосиевского, который обна-

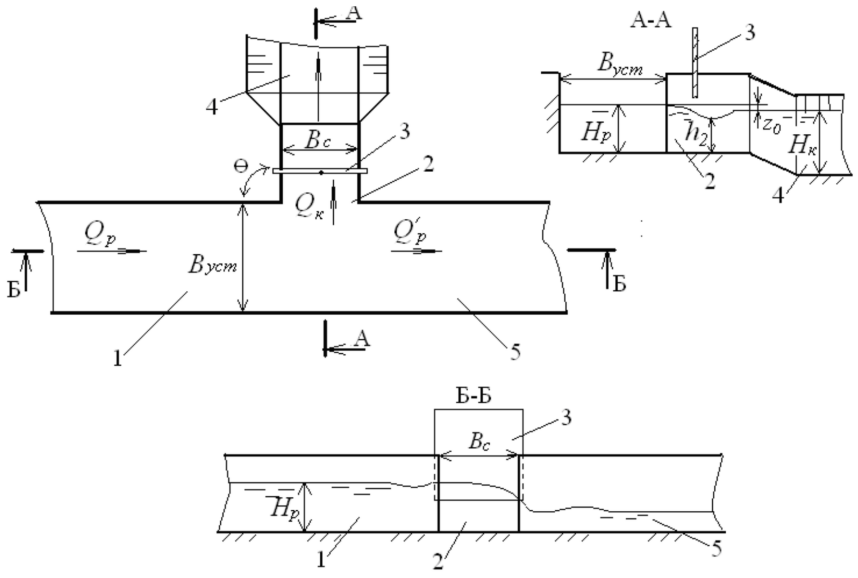


Рисунок 2.10 – Расчетная схема водозаборного сооружения с боковым (береговым) водоприемником: 1 – подводящее русло реки; 2 – боковой водоприемник; 3 – регулятор водоприемника; 4 – отводящий канал; 5 – отводящее русло реки; $B_{УСТ}$ – ширина русла реки; B_c – ширина водоприемного оголовка; $H_р$ – глубина воды в реке; $H_к$ – глубина воды в водоприемнике; h_2 – глубина на пороге водоприемника (при истечении из под полотнища затвора – глубина в сжатом сечении); z_0 – разность горизонтов верхнего и нижнего бьефов водоприемника с учетом скоростного напора в канале; Θ – угол размещения отвода водоприемника относительно русла реки

ружил, что при делении расхода водного потока пополам независимо от фронтального или бокового размещения водоприемника, 87 до 97 % расходов поступающих наносов попадает в отвод с большими скоростями движения воды. Это может быть следствием различия сопротивлений или уклонов дна в отводах. В результате разности скоростей перед отводами наблюдается изгиб линий токов и как результат этого изгиба – расслоение русловых течений: донные линии токов поворачивают в отвод с большими скоростями потока, а поверхностные линии токов направляются в отвод с меньшими скоростями движения воды [131].

По данным исследований [131] отбор части объема потока создает в месте деления сложную деформацию свободной поверхности. Для продольного профиля свободной поверхности потока воды, проходящего в речном русле, существует зона с пониженной потенциальной энергией, которая размещается выше верхового ребра отвода. После этого минимума в области водоприемника идет поднятие уровней воды, которое обусловлено расширением потока и частичным переходом кинетической энергии в потенциальную. Подъем уровней воды заканчивается несколько ниже низового ребра отвода с появлением стоячих поперечных волн.

Особое проявление зоны пониженных уровней воды перед боковым отводом наблюдается у его берегового устоя. То есть происходит образование поперечного уклона потока, подобный процесс депрессии образуется в начале криволинейного участка русла у выпуклого берега. По данным А.С. Офицерова [131], наибольший поперечный уклон в подводящем русле в сторону отвода наблюдается вблизи створа верхового ребра, перекос свободной поверхности в этой зоне может достигать $4U^2/2g$, где U – скорость движения воды в подводящем русле.

По данным В.А. Шаумяна, донные струи в подводящем русле начинают отклоняться в сторону водоприемника на некотором расстоянии от его верхового ребра. Расстояние, на котором происходит отклонение донных струй в сторону водоприемника относительно расчетной схемы, приведенной на рисунке 2.11, может быть определено по формуле [43]:

$$X(\Delta) = 0,55Y(\Delta)\,, \tag{2.39}$$

где $Y(\Delta)$ – зона захвата (часть ширины подводящего русла) донных струй с наносами в сторону водоприемника определяется при рассмотрении прямолинейных каналов с прямоугольным сечением по формуле:

$$Y(\Delta) = 1,55\left(\frac{q_к}{q_p} + 0,2\right)B_c\,, \tag{2.40}$$

где $q_к$ и $q_р$ – величины удельных расходов в водоприемнике и реке соответственно.

Отсутствие зависимости этого явления от угла размещения отвода может быть продемонстрировано результатами исследований А.Я. Миловича, приведенными на рисунке 2.12 [43].

Основным отличием при этом является фактор направленности донных токов. При малых значениях угла Θ донные токи рассредоточиваются по ширине водоприемника с незначительным смещением к верховому ребру водоприемника, а при больших значениях Θ все донные токи проходят вдоль верхового ребра.

Деление потоков сопровождается явлениями отжима струй и образованием водоворотных зон. Первая из этих зон образуется в отводе непосредственно ниже верхового ребра, где вошедший поток испытывает боковое сжатие. При этом на противоположном берегу реки, немного ниже по течению может формироваться вторая водоворотная зона (см. рисунок 2.11).

По данным Ши Вей Ло и А.Дж. Ренольдса увеличение коэффициента водозабора сокращает размеры водоворотной зоны в боковом отводе, но ведет к развитию водоворота в русле реки [43, 131].

Ранее с целью понижения величин процентного захвата наносов, при повышенных коэффициентах расхода, многие авторы рекомендовали устройство более широких отверстий водоприемников и размещения на их входных оголовках шандорных стенок или сдвоенных затворов с возможностью истечения через верх [11, 28] (при устройстве сооружений по ин-

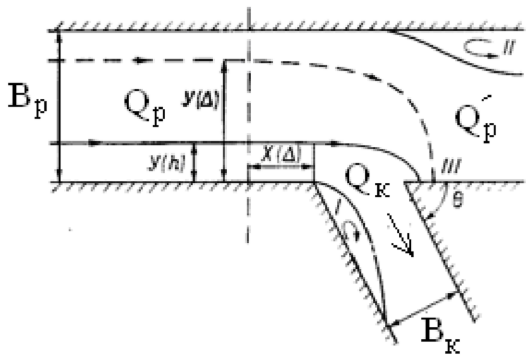


Рисунок 2.11 – Расчетная схема смещения донных струй
и образования водоворотных зон при боковом водозаборе

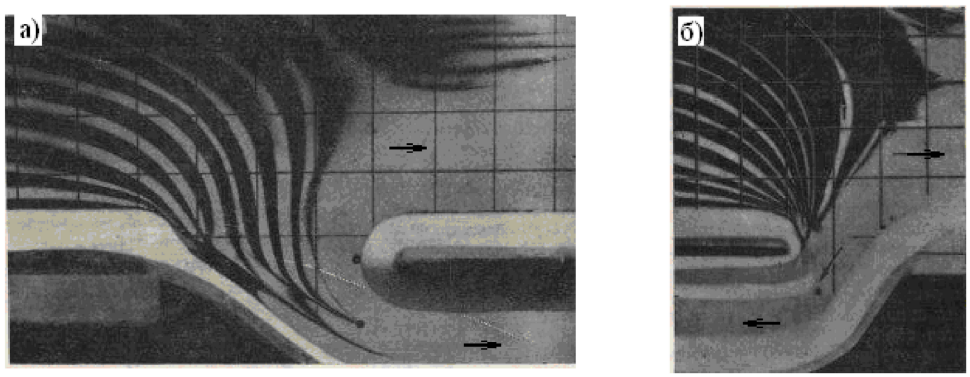


Рисунок 2.12 – Спектры донных течений в опытах А.Я. Миловича:
а – опыт при Θ=30°; б – опыт при Θ=123°

дийскому типу). Эти мероприятия гарантировано обеспечивали малые скорости движения воды в водоприемнике и препятствовали захвату наносов. Но большая ширина водоприемника для устройства в нем регуляторов требовала размещения промежуточных быков с закладными частями, которые являлись сопротивлениями и определяли сбойность течений с образованием пониженных зон и завихрений потока, что приводило к захвату наносов.

Следующим шагом в области повышения коэффициента водозабора без захвата наносов в водоприемники явилось устройство перед ними наносозащитных порогов. Выполнение наносозащитных порогов в виде удлиненных водосливов обеспечило широкий водоприемный фронт с относительно малыми скоростями над его гребнем. При этом боковой водоприемник стал выполнять функцию регулятора отводящего канала, а наносозащитные пороги заняли место водоприемника первого порядка. Габариты донных порогов определяются величинами расходов водозабора и функциональными особенностями, обеспечивающими надежную наносозащиту. Основной расчетной формулой для определения длины порога является уравнение водослива с тонкой стенкой [17]:

$$Q_в = mL_{н.п}\sqrt{2g}H_{н.п}^{1,5}, \qquad (2.41)$$

где m – коэффициент расхода донного порога, который зависит от его плановой и высотной конфигурации; $L_{н.п}$ – длина порога или ширина водосливного фронта потока, проходящего через порог; $Н_{н.п}$ – напор над гребнем порога с учетом скоростного напора.

Вначале наносозащитные пороги устраивали в расширенном береговом водоприемном оголовке, который сужался к регулятору канала. Затем, появилась возможность управления внешней поверхностью донных порогов струями двухфазного потока жидкости (вода – наносы) – их переместили в проточную часть подводящего русла. При размещении наносозащитных порогов в конце подводящего русла, их внешнюю поверхность располагают под некоторым углом относительно направленности струй воды в верхнем бьефе. Это усиливает русловую циркуляцию воды, которая теряет свою интенсивность в маловодные гидрологические периоды при высоких коэффициентах водозабора [120, 149, 150, 172].

Конструктивные особенности наносозащитных порогов определяют параметры и относительное местоположение (компоновку) водоприемных, водосбросных и промывных элементов водозаборных сооружений, устраиваемых на горных реках [170].

До последнего времени ни теоретически, ни экспериментально окончательно не определено, какая из известных конструкций наносозащитных порогов является наиболее эффективной и рациональной для устройства на водозаборных сооружениях гидроэнергетических и ирригационных систем. При изучении теоретических основ, рекомендованных различными авторами для определения параметров наносозащитных порогов, нами был сделан вывод, что неоднозначность решений рассматриваемого вопроса является следствием сложности гидравлических и русловых процессов, происходящих в верхнем бьефе сооружений, а также недостаточной обоснованности принятых закономерностей, описывающих взаимодействие двухфазного потока с поверхностями порогов.

Единственным средством решения задачи выбора рациональной конструкции наносозащитного порога, до сих пор являются поисковые лабораторные исследования, проводимые для конкретных гидрологических и морфометрических условий.

На более чем 80-ти низконапорных плотинных водозаборных сооружениях Кыргызстана устроен косонаправленный циркуляционный порог (КЦП) конструкции Г.В. Соболина [160, 161, 162]. Теоретические основы функционирования данной конструкции порога были разработаны профессором Р.Ж. Жулаевым, принцип его действия основан на возбуждении в русле поперечного течения потока, сопровождаемого возникновением поперечной циркуляции. Эта теория базируется на рассмотрении расчетной схемы, приведенной на рисунке 2.13.

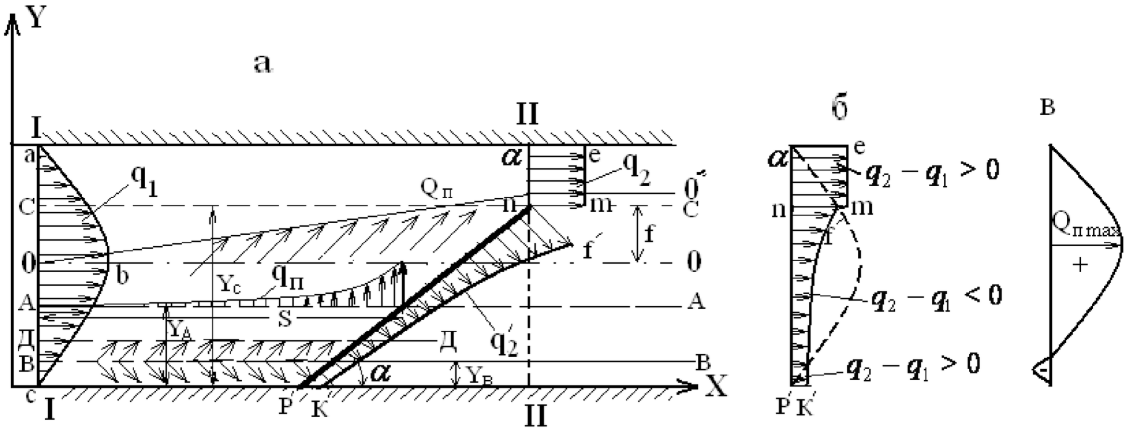


Рисунок 2.13 – Расчетная схема косонаправленного порога (КЦП)

С помощью наложения эпюр удельных расходов оценивается смещение объемов воды в поперечном сечении, где устраивается наносозащитный порог. При этом расход поперечных струй, перемещающихся по оси ординат, определяет из уравнения [160]:

$$Q_{n.y} = \int_{y0}^{y} (q_2 - q_1)\, dy\,. \tag{2.42}$$

В результате Р.Ж. Жулаевым было сделано заключение, что благодаря перераспределению расходов, центр массы тока воды в створе II-II смещается от первоначального положения 0-0 на величину *f*. Это приводит к искривлению динамической оси потока. При этом величина смещения центра масс зависит от степени перераспределения расхода по ширине русла.

То есть чем больше значение перемещающихся расходов, тем больше отклоняется динамическая ось потока и наоборот. Регулирование величины перераспределения расходов возможно изменением пропускной способности участков порога по его длине. Гребень порога было предложено выполнять с уклоном в сторону необходимого смещения масс объемов воды. Начальную часть порога для ликвидации отрицательного значения разности удельных расходов на этом участке рекомендуется устраивать с отметками гребня, равными отметкам уровней воды в подводящем русле.

Интенсивность поперечного течения потока, обусловленная перераспределением расходов, может быть оценена относительной величиной смещения центра масс потока к общей ширине русла, определяемой по формуле:

$$\lambda = \frac{f}{B} = \frac{\int_{y0}^{y0+B} (q_2 - q_1) Y dy}{B \times Q}\,. \tag{2.43}$$

Г.В. Соболиным было установлено, что относительная величина смещения центра тяжести эпюр движения наносов при устройстве КЦП находится в тесной взаимосвязи с величиной смещения центра масс воды, которую можно определить по формуле:

$$\lambda_H = K\lambda^n\,. \tag{2.44}$$

На основании обработки результатов лабораторных исследований КЦП числовые параметры коэффициента *K* и значение показателя степени *n* составили: $K = 0{,}52$ и $n = 0{,}25$.

Основными недостатками методики определения параметров КЦП, предложенной Г.В. Соболиным, на наш взгляд, являются следующие факторы:

- при рассмотрении величин перераспределения удельных расходов в верхнем бьефе водозаборного сооружения не учитывалось действительное отношение ширины подводящего русла к отношению ширины, перекрываемой наносозащитным порогом. В расчет-

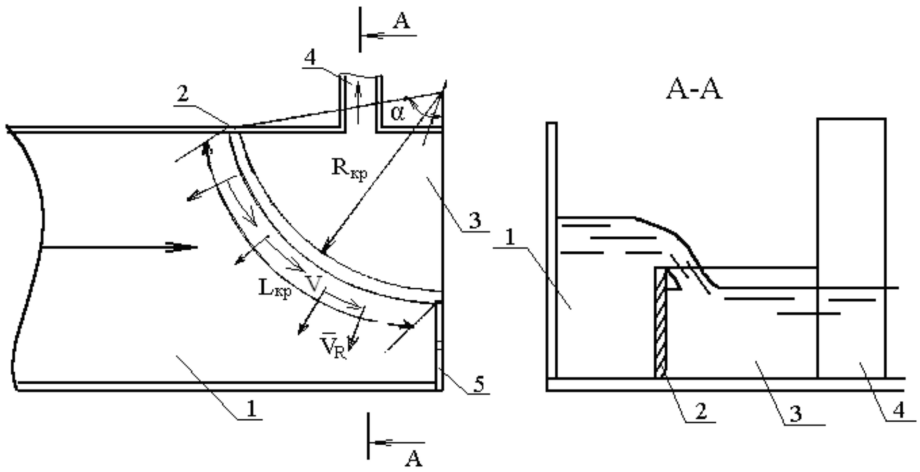


Рисунок 2.14 – Расчетная схема криволинейного порога:
1 – подводящее русло; 2 – порог; 3 – водоприемная камера; 4 – отводящийканал; 5 – промывник

ной схеме нет участка устройства речного пролета, обязательного элемента низконапорного водозаборного сооружения из горных рек;

- лабораторные исследования по определению рациональных параметров КЦП проводились в условиях прямолинейного подводящего русла для условий устройства КЦП в канале.

Как показывают наблюдения направленности струй воды в верхних бьефах водозаборных сооружений из горных рек при высоких коэффициентах водозабора, потоки движутся по криволинейной траектории [35]. Наши исследования [123] по определению рациональных размеров наносозащитных порогов опровергают приведенное выше утверждение о необходимости устройства гребня порога в его начале на отметках уровней воды.

И.К. Рудаков [149] в результате многочисленных натурных и лабораторных исследований предложил конструкцию наносозащитного порога с выпуклостью в сторону подводящего русла, который имеет постоянную отметку гребня (рисунок 2.14). В основу этой конструкции был заложен принцип, предполагающий, что при набегании струй водного потока со стороны подводящего русла на внешнюю поверхность криволинейного порога происходит их отражение под определенным углом.

В результате струи приобретают косую направленность и двигаются со скоростью V_o, которая относительно тела порога раскладывается на две составляющие: поперечную V_R, и продольную V. Поток, отражаясь от порога в придонной части, приобретает радиальную направленность и движется со скоростью V_R, перемещая частицы призмы наносов в противоположную сторону от водоприемной камеры [149].

Основным параметром криволинейного наносозащитного порога с выпуклостью в сторону подводящего русла являются: радиус кривизны $R_{кр}$ и центральный угол кривизны порога α, величины которых определяются на основании результатов лабораторных, и натурных исследований [150].

Криволинейные наносозащитные пороги конструкции И.К. Рудакова были внедрены на водозаборных гидроузлах ирригационных систем рек Шамси, Кегеты, Норус, Аламедин в Чуйской области Кыргызстана.

Отличительной особенностью наносозащитного порога конструкции И.К. Рудакова явилось образование интенсивного циркуляционного вальца, развивающегося вдоль внешней его поверхности, что особенно проявлялось в начальной части порога. Но в зоне концевого участка порога при высоких коэффициентах водозабора $\alpha \geq 0{,}8$ циркуляционный винт, по данным [6], нарушается, что вызывает необходимость осуществления периодических промывок верхнего бьефа гидроузла.

Для улучшения наносозащитных характеристик автоматизированных водозаборных сооружений ирригационного назначения Б.И. Мельниковым [121] была предложена конструкция двойного порога (рисунок 2.15).

В качестве прототипа двойного порога была использована конструкция криволинейного порога И.К. Рудакова. Создание двойных криволинейных порогов было продиктовано необходимостью увеличения скоростей в циркуляционном вальце, возникающем перед внешней поверхностью порога для увеличения транспорта наносов к промывному отверстию при высоких коэффициентах водозабора. Гребни элементов двойного криволинейного порога имеют постоянные уклоны промывного отверстия.

Как и для конструкции КЦП Г.В. Соболина, теоретические основы гидравлики криволинейного в плане наносозащитного порога, по мнению Б.И. Мельникова, должно базироваться на рассмотрении уравнения перераспределения удельных расходов по ширине русла [120]. Для анализа им была использована расчетная схема, приведенная на рисунке 2.16, и уравнение

$$Q_{П} = \int_0^y \left(\mathrm{q}_1 - \frac{q_2^1}{\sin\alpha} \right) dy \,. \tag{2.45}$$

На основании математического анализа расчетной схемы (см. рисунок 2.13) Б.И. Мельниковым была определена необходимость устройства внешней поверхности порога относительно струй потока в верхнем бьефе гидроузла под определенным углом. Это возможно при устройстве криволинейной в плане конструкции, как наиболее рациональной. Обосновывается необходимая величина смещения динамической оси потока и соответственно, центра масс между сечениями I-I и II-II:

$$f = \frac{B - B_{пр}(\alpha_{пр} - 2\alpha_{кр}) - 2\alpha_{кр}B_{кр}}{2}, \tag{2.46}$$

где B – ширина потока по урезу воды; $\alpha_{кр}$ – коэффициент водоотбора через криволинейный порог; $\alpha_{пр}$ – коэффициент сброса промывника:

$$\alpha_{пр} = 1 - \alpha_{кр}; \tag{2.47}$$

$B_{пр}$ – ширина подводящего русла, перекрываемая промывным отверстием; $B_{кр}$ – ширина подводящего русла, перекрываемая криволинейным порогом.

Однако рассмотренная методика не позволяет установить влияние параметров порога на качество противонаносной защиты водоприемников, т. к. это требует постановки специальных комплексных исследований [120].

Автоматизированные водозаборные сооружения с двойными криволинейными наносозащитными порогами построены на реках Сокулук и Ак-Суу Чуйской области Кыргызстана. Выполненный анализ наносозащитных характеристик этих сооружений свидетельствует о большом проценте захвата влекомых наносов в отводящие каналы [35].

Анализ рабочих характеристик приведенных конструкций порогов, выполненный по результатам лабораторных и натурных исследований [120, 150] показал, что криволинейные, выпуклые в сторону подводящего русла пороги имеют лучшие наносозащитные характеристики по сравнению с КЦП. Этот эффект достигается выполнением начального участка порога с более крутым углом размещения относительно динамической оси потока. При этом происходит наложение поперечной составляющей скорости руслового потока в криволинейном русле на поперечные составляющие скорости циркуляционного вальца, возникающего при взаимодействии потока с порогом. Но в концевой части порога транспортирующая способность циркуляционного вальца имеет неустойчивый режим, что вызывает на этом участке захват наносов в отводящий канал. Это требует дополнительных промывок верхних бьефов, необходимость которых игнорируется эксплуатационными службами в периоды дефицита воды.

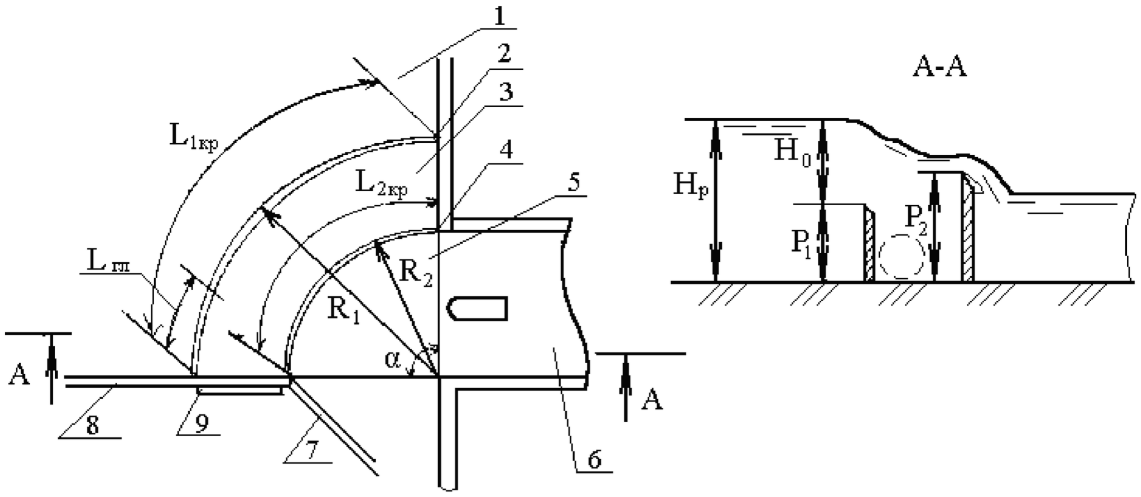


Рисунок 2.15 – Расчетная схема двойного порога: 1 – подводящее русло; 2 – входной порог; 3 – промывная галерея; 4 – наносоотбойная стенка; 5 – водоприемник; 6 – отводящий канал; 7 – автоводослив; 8 – авторегулятор; 9 – промывник

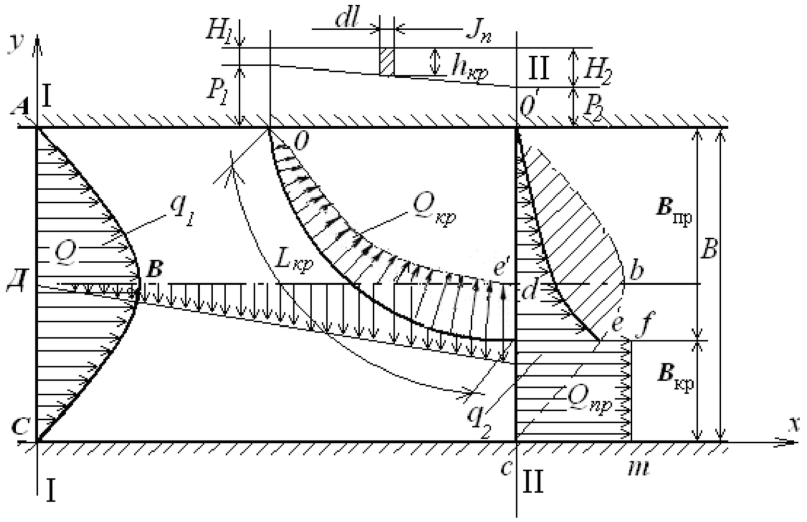


Рисунок 2.16 – Расчетная схема двойного криволинейного порога

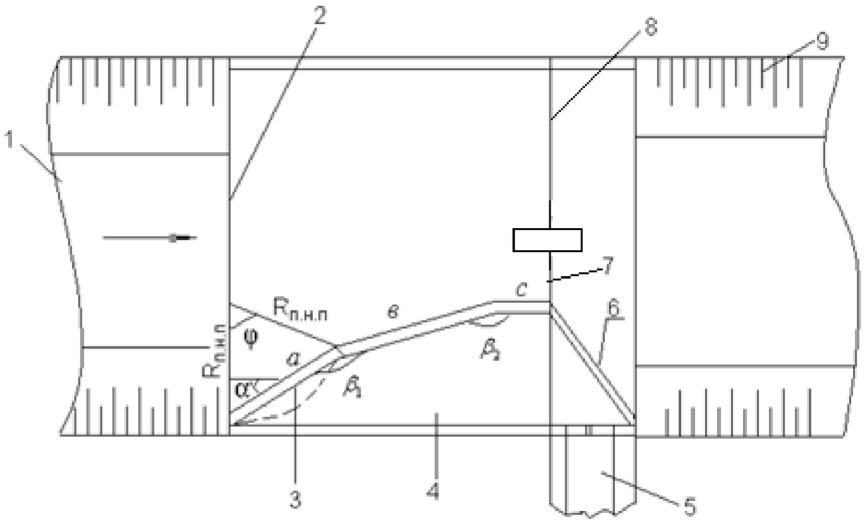


Рисунок 2.17 – Расчетная схема ломаного в плане наносозащитного порога: 1 – подводящее русло; 2 – входной створ; 3 – порог; 4 – водоприемная камера; 5 – отводящий канал; 6 – автоводослив; 7 – затвор промывника; 8 – затвор речного пролета; 9 – отводящее русло; а, в, с – секции порога; α – угол между секцией *а* и динамической осью потока; β_1 и β_2 – углы между отдельными секциями

Сложность строительства криволинейных в плане наносозащитных порогов, недоучет в рекомендациях по определению их параметров действительной направленности струй водного потока в верхнем бьефе гидроузла и гидроморфометрических характеристик источников, приводит к необходимости разработки новых технических решений.

Поисковые исследования, проведенные нами в лабораторных условиях, позволили разработать конструкцию ломаного в плане наносозащитного порога (рисунок 2.17) [92].

Работа водозаборных сооружений при высоких процентах водоотбора сопровождается распространением подпора вверх по течению реки. При высоких коэффициентах водозабора $\alpha \geq 0{,}8$ поступление наносов в зону подпора сопровождается изменением скорости потока до величин, достаточных для движения призмы наносов к подпорному створу [35].

Криволинейное зарегулированное русло, параметры которого рассчитаны на пропуск руслоформирующего расхода, в этом эксплуатационном режиме оказывает незначительное влияние на структуру роста призмы наносов.

Для предотвращения попадания наносов из приближающейся призмы в водоприемную камеру, у внешней стенки наносозащитного порога, так же, как и в предыдущих конструкциях порогов, формируется циркуляционное движение потока. Циркуляция воды создается при расположении внешней поверхности порога под углом относительно направления струй воды в подводящем русле.

Для согласования параметров и функций наносозащитного порога с морфометрическими характеристиками речного русла с целью создания необходимой интенсивности циркуляции воды вдоль его внешней поверхности, была рассмотрена возможность создания циркуляции по схеме, подобной движению потока на криволинейном участке русла.

Радиус, описывающий контур начальной секции (а) ломаного в плане наносозащитного порога, определяется по предложенной зависимости [92, 99]:

$$R_{п..н..п} = dR_{б}\,, \tag{2.48}$$

где $R_{б}$ – радиус кривизны криволинейного участка русла в бытовых условиях при прохождении расходов расчетной обеспеченности $Q_{р\%}$. В первом приближении определим его по формуле [92, 166]:

$$R_{б} = \frac{3}{i^{0,5}}\left(\frac{Q_{P\%}}{\sqrt{g}}\right)^{0,4}, \tag{2.49}$$

где d – коэффициент, равный отношению удельных расходов в зарегулированном русле $q_{зар}$ в режиме подпора, и бытовом русле реки $q_{быт}$ при прохождении расхода расчетной обеспеченности $Q_{р\%}$:

$$d = \frac{q_{зар}}{q_{быт}}. \tag{2.50}$$

Угол дуги, формирующий первую секцию (а) наносозащитного порога φ, принимается в тех же пределах, как и угол кривизны зарегулированного русла водозаборного сооружения. Прямолинейная секция (а) может быть получена как хорда в результате соединения прямой концов полученной дуги.

На основании обработки графического материала (см. рисунок 2.14) были определены тригонометрические зависимости для определения угла α между начальной секцией и динамической осью потока в подводящем русле, а также зависимость для определения длины начальной секции порога а [99]:

$$\alpha = 90^{\circ} - \arccos\left(\sin\frac{\phi}{2}\right), \tag{2.51}$$

и

$$a = \sin\phi R_{п.н.п}\,. \qquad (2.52)$$

С целью увеличения перераспределения удельных расходов перед наносозащитным порогом и создания большей интенсивности циркуляции воды, порог выполняется переменой высоты с понижением гребня к концевому участку. Так как начальная секция порога (а) имеет незначительную пропускную способность, основная часть расхода воды попадает в водоприемную камеру через последующие пониженные участки порога. Учитывая, что общая длина порога рассчитывается по формуле истечения через водослив с тонкой стенкой [120], длина второй секции в определится по формуле:

$$в = \frac{Q_{в.к}}{m_{н.п} \cdot \sqrt{2g} \cdot H_{н.п}^{3/2}} - (a + c)\,, \qquad (2.53)$$

где $Q_{в.к}$ – расчетный расход воды водоприемной камеры, равный расходу отводящего водовода; $m_{н.п}$ – коэффициент расхода наносозащитного порога;

$Н_{н.п}$ – напор воды над наносозащитным порогом, равный [97]:

$$H_{н.п.} = H_р - P_{ср}, \qquad (2.54)$$

здесь $Н_р$ – расчетный напор над порогом речного пролета (глубина в верхнем бьефе гидроузла); $Р_{ср}$ – средняя высота наносозащитного порога; с – длина концевой секции, которая выполняется параллельной динамической оси потока в подводящем русле сооружения, в первом приближении принималась равной длине экрана, возникающего при набегании потока на подпорные устройства. Определяется по эмпирической зависимости [120]:

$$c = (1{,}0 \div 1{,}2)H_р. \qquad (2.55)$$

Для упрощения дальнейших исследований углы между секциями порога β_1 и β_2 принимались равными друг другу, что позволило определить их значение по формуле:

$$\beta_1 = \beta_2 = 180 - \frac{\alpha}{n-1}, \qquad (2.56)$$

где n – число секций порога.

Используя приведенную здесь методику определения параметров ломаного в плане наносозащитного порога, нами с учетом лабораторных исследований, были разработаны рекомендации для проектирования и строительства водозаборных сооружений на горных реках [77, 82].

С целью теоретического обоснования конфигурации потока была использована теория динамического взаимодействия тел и жидкости А.Я. Миловича [127]. В рамках этой работы было доказано, что при набегании потока жидкости на преграду происходит переход поступательного движения частиц потока к вращательному движению без изменения количества движения. При рассмотрении косого обтекания плоской пластинки было обосновано, что плоскости возникающих вихревых поверхностей параллельны и развиваются с постоянной скоростью Сπ, которая равна по значению и противоположна по направлению вектору скорости набегания жидкости v_0 на пластинку (рисунок 2.18) [127].

Рассматривая приведенную схему применительно к внешней поверхности наносозащитного порога, устраиваемого перед водоприемным оголовком (рисунок 2.19), можно записать, что продольная составляющая вальца равна

$$V_{пр} = v_0 \cos\phi = C\pi \cos\phi\,. \qquad (2.57)$$

Поперечная составляющая при этом скорости вихревой поверхности, направленная по нормали к пластинке, определяется по формуле [100]:

$$V_{пп} = v_0 \sin\phi = C\pi \sin\phi\,. \qquad (2.58)$$

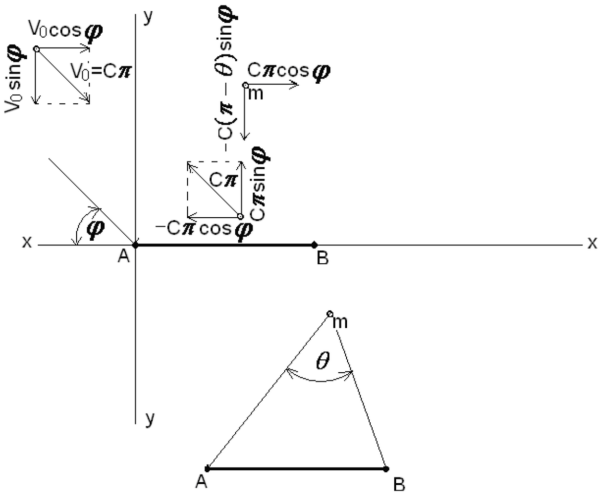


Рисунок 2.18 – Расчетная схема А.Я. Миловича к определению величин и направлений векторов скоростей жидкости в вихревых поверхностях, проявляющихся при косом набегании потока на плоскую пластинку. АВ – плоская пластинка; φ – угол набегания потока; V_0 – скорость набегания жидкости; Cπ – скорость распространения вихревых поверхностей; m – точка рассмотрения пластинки АВ; θ – угол, под которым рассматривается пластинка

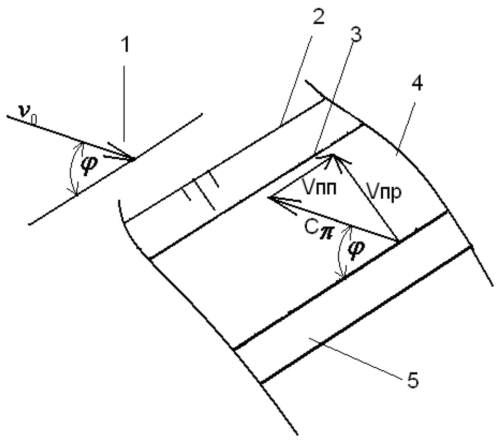


Рисунок 2.19 – Расчетная схема направленности струй циркуляционного вальца у внешней поверхности порога: 1 – направление струй воды в верхнем бьефе; 2 – верхняя грань призмы наносов по переднему краю; 3 – донная грань призмы наносов по переднему краю; 4 – зона влияния циркуляционного вальца; 5 – гребень секции порога; φ – угол набегания струй водного потока на преграду

Преобразовывая уравнения (2.57) и (2.58) можно получить выражение для определения необходимого значения угла размещения пластинки к струям подходящего потока φ [100, 128]:

$$\frac{V_{nn}}{\sin\phi} = \frac{V_{np}}{\cos\phi} \rightarrow \phi = arctg\frac{V_{nn}}{V_{np}} + \pi n\,. \qquad (2.59)$$

Анализируя расчетную схему для определения величин и направлений векторов скоростей жидкости (см. рисунок 2.19) можно сделать вывод, что угол отражения струй водного потока от поверхности плоской водонепроницаемой пластины равен углу их набегания, что согласуется с ударной теорией Ньютона [43].

Исследованиями было установлено, что лучший эффект наносозащиты – ломаные в плане пороги – проявляют при длине порога, примерно равной ширине подводящего речного потока, т. е. L_n/B = (0,9÷1,05), здесь L_n – длина наносозащитного порога, а В – устойчивая ширина водного потока по урезу воды в подводящем зарегулированном русле [140]. Выполнение этого условия позволяет получить равномерное распределение струй водного потока, подходящего со стороны подводящего русла, по длине наносозащитного порога [128].

Исследования различных конструкций криволинейных и ломаных в плане порогов позволили сделать следующие выводы:

1) направленность струй воды (векторов результирующей скорости $V_{абс}$) в циркуляционном водном вальце распространяется из придонной области начального участка к поверхностным горизонтам воды, которые проходят в водоприемную камеру над последующими участками наносозащитного порога;

2) при промытом верхнем бьефе водозаборного гидроузла (без призмы наносов) интенсивность циркуляционного вальца минимальна из-за рассеивания его энергии в объемах воды подпорного створа, а также из-за малых скоростей воды в верхнем бьефе;

3) циркуляционный валец вдоль внешней поверхности наносозащитного порога проявляется при некотором удалении переднего края призмы наносов;

4) циркуляционный валец изменяет свои характеристики на всем протяжении периода формирования призмы наносов в верхнем бьефе водозаборного гидроузла, вплоть до момента равенства объемов наносов, подходящих к сооружению по подводящему руслу, суммарному объему наносов, попадающих в водоприемную камеру и сбрасываемых в нижний бьеф;

5) направленность и интенсивность струй воды в циркуляционном вальце зависит от относительных плановых и вертикальных размеров наносозащитного порога.

Рассмотрим взаимосвязь структуры циркуляционного вальца со структурами водного потока, проходящего в верхнем бьефе водозаборного гидроузла и над гребнем ломаного в плане порога. Для определения вида уравнения, устанавливающего эту связь, условимся что:

- продольная составляющая $V_{пр}$ вектора результирующей скорости $V_{абс}$ движения воды в циркуляционном вальце направлена параллельно внешней поверхности порога, а поперечная составляющая $V_{пп}$ направлена по нормали к поверхности порога и в противоположную сторону от направления развития призмы наносов согласно приведенной схеме (см. рисунок 2.19);
- направленная по нормали относительно внешней поверхности порога поперечная составляющая $V_{пп}$ при достижении переднего края призмы наносов изменяет горизонтальную направленность на вертикальную;
- продольная составляющая $V_{пр}$ должна быть больше скорости остановки транспортирующихся фракций влекомых наносов $v_{он}$.

В ходе исследований различных конструкций ломаных в плане и криволинейных наносозащитных порогов [35], устроенных на водозаборных сооружениях малых горных рек с изменяемой мутностью потока $\rho = (0{,}5 \div 0{,}8)$ г/л, при коэффициентах водозабора $\alpha = 0{,}9$, достаточный транспорт наносов в циркуляционном вальце наблюдался при следующем распределении по длине продольных скоростей воды $V_{пр}$ (рисунок 2.20).

С использованием методов статистической обработки [4] результатов исследований продольных скоростей (см. рисунок 2.20 а и б), были получены зависимости для расчета распределений продольных скоростей водного потока по внешней поверхности порога:

- для абсолютных значений продольных составляющих скоростей циркуляционного вальца (см. рисунок 2.20 а) функция аппроксимирована в виде полиномиальной зависимости при тесноте связи $r = 0{,}98$:

$$V_{пр} = -6{,}21\left(\frac{L_i}{L}\right)^2 + 5{,}44\frac{L_i}{L} + 2{,}33\,, \tag{2.60}$$

- для относительных величин продольных составляющих скоростей воды в циркуляционном вальце функция аппроксимирована в виде полиномиальной зависимости при тесноте связи $r = 0{,}99$:

$$\frac{V_{пр.i}}{V_{пр.\max}} = -1{,}9643\left(\frac{L_i}{L}\right)^2 + 1{,}7943\left(\frac{L_i}{L}\right) + 0{,}6014\,, \tag{2.61}$$

где L_i – длина рассматриваемого участка порога от его начала; L – полная длина ломаного в плане наносозащитного порога.

Анализ результатов исследований кинематики циркуляционного вальца показывает, что на концевом участке порогов в зоне уменьшения его продольных скоростей при высоких коэффициентах водозабора происходит сбойность течений, которая сопровождается захватом наносов в водоприемную камеру. Это вызывает необходимость устройства промежуточного бычка [35, 99] для продления зоны действия течений промывного тракта водозаборного гидроузла, которая увеличивает транспортирующую способность потока на концевом участке порога. Но промежуточный бычок, вызывающий понижение давления перед промывным отверстием, являясь дополнительным гидравлическим сопротивлением, влияет на пропускную способность наносозащитных порогов и водозаборного сооружения в целом.

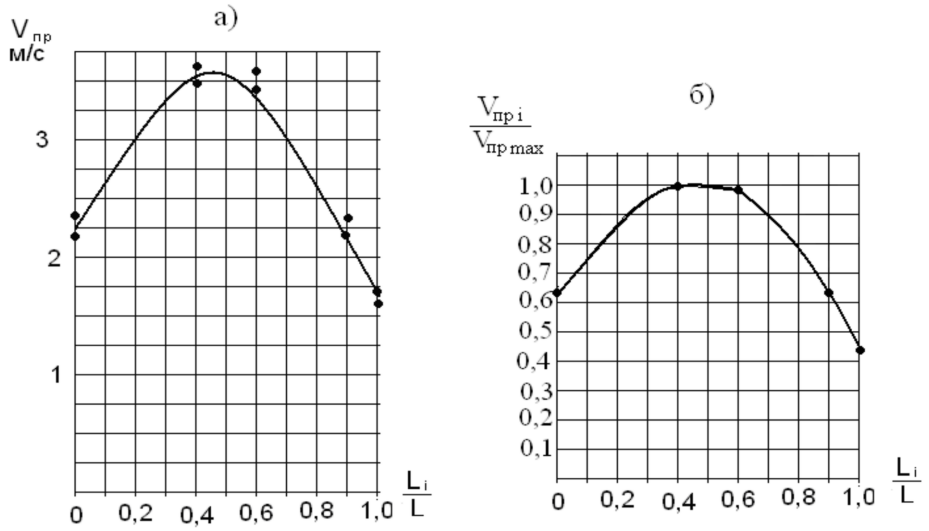


Рисунок 2.20 – Графические зависимости изменения продольных составляющих результирующих скоростей водного потока по длине наносозащитных порогов: а – зависимость абсолютных скоростей $V_{пр} – f(L_i/L)$; б – зависимость относительных скоростей $V_{пр.i}/V_{пр.max}$-$f(L_i/L)$

На наш взгляд приемом, который обеспечит устойчивую циркуляцию вальца на всем протяжении нанносозащитного порога, является перераспределение продольных составляющих скорости воды $V_{пр}$ по длине. Это возможно за счет изменения конфигураций внешней поверхности порога, о чем свидетельствуют результаты ранее проведенных исследований [35] измененных конструкций ломаных в плане порогов.

Результаты исследований [123] позволили сделать вывод, что для улучшения наносозащитных характеристик порогов необходимо, чтобы:

- продольные скорости $V_{пр}$ на концевом участке циркуляционного вальца для увеличения транспортирующей способности должны иметь большие значения, чем величины, представленные на графических зависимостях рисунка 2.20;
- величина поперечной составляющей $V_{пп}$ должна оставаться постоянной, так как ее увеличение ведет к взмучиванию переднего края призмы наносов.

При этом регулирование величин составляющих скоростей потока возможно за счет изменения конфигурации поверхности порога относительно направления водных струй, подходящих со стороны верхнего бьефа.

Исследования различных конструкций наносозащитных порогов подтвердили описанныйранее факт [99], что при высоких коэффициентах водозабора $\alpha \geq 0{,}9$ смещение от динамической оси подводящего русла струй потока в сторону наносозащитного порога происходит по кривой с изменяющимся радиусом кривизны $R_{д.о.i}$.

Анализ существующих компоновочных схем водозаборных сооружений оборудованных наносозащитными порогами различных конструкций, позволил выделить четыре зоны (рисунок 2.21), которые разделяют сооружения на части, и служат для выполнения определенных технологических операций:

- зона I – область транспорта объемов водного потока с твердыми включениями к водоприемным и водосбросным элементам сооружения;
- зона II – область устройства наносозащитных порогов;
- зона III – область, в которой размещаются водоприемные элементы водозаборного сооружения (водоприемные камеры, галереи, оголовки), обычно расположены между наносозащитным порогом и береговым устоем, оборудованным водоприемным оголовком;
- зона IV – область сброса и отведения излишков объемов воды с твердыми включениями потоков.

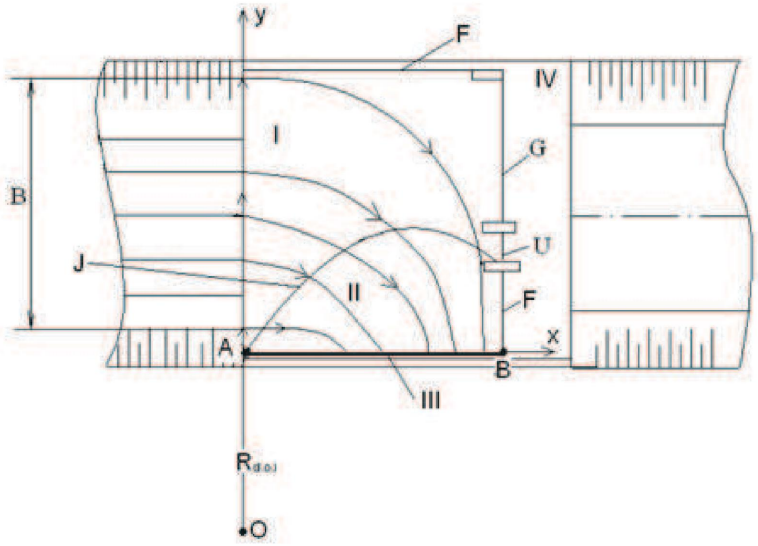


Рисунок 2.21 – Расчетная схема смещения струй водного потока от динамической оси подводящего русла к створу расположения наносозащитного порога при $\alpha_в = 0{,}9$: $R_{d.o.i}$ – переменная величина радиуса кривизны струй водного потока перед порогом; О – центр кривизны струй потока

При этом кривая J ограничивает зону II, имеет выпуклую форму в сторону верхнего бьефа, учитывает возможное размещение ломаных в плане и криволинейных порогов. Линии F, G, U определяют размещение створов для расположения автоводосливов сооружений, речных пролетов и промывных трактов.

Результаты наблюдений [6, 140] свидетельствуют, что искривление струй водного потока при высоких значениях коэффициентов водозабора в зависимости от их величины и конструктивных особенностей водозаборных сооружений начинается в конце подводящего русла или в области входного створа водозаборного сооружения и продолжается до створа устройства наносозащитного порога. Максимальному искривлению подвергаются струи, проходящие вдоль противоположного берега от водоприемного оголовка, так как они практически по нормали подходят к концевому участку наносозащитного порога, а струи воды, проходящие вдоль берега со сторону наносозащитного порога, на подходном участке движутся практически прямолинейно, параллельно береговой линии русла (см. рисунок 2.21).

Для проведения дальнейшего анализа с учетом приведенных вышефактов, допустим, что переменная величина радиуса $R_{д.о.i}$ в зависимости от рассматриваемых участков искривления перед криволинейной линией (J) будет изменяться от значения величины ширины водного потока по урезу воды в подводящем русле (В) до бесконечности (∞), для участка прямолинейного движения струй.

Далее при рассмотрении расчетной схемы (см. рисунок 2.21) будем считать, что в первом приближении линия АВ соответствует створу устройства наносозащитного порога, параллельна динамической оси потока в подводящем русле, и проведена по линии уреза воды в верхнем бьефе водозаборного сооружения при расчетном уровне.

Представим проекцию наносозащитного порога на береговой устой сооружения в виде линии АВ с размещением ее в зоне II. При этом примем точку А в качестве начала координат осей *x* и *y*. Ось *x* будет проходить по линии АВ, а ось *y* по входному створу водозаборного сооружения.

Приведенная схема искривления струй водного потока при изменении $R_{d.o.i}$ от (В) до (∞), является достаточно сложной для описания в виде математических зависимостей, так как имеет не только переменную величину радиуса, но и изменяющиеся координаты центра кривизны (О). Поэтому предварительно зададимся условием, что искривление линий токов воды в зоне I на всех участках будет происходить по одной траектории с одним центром

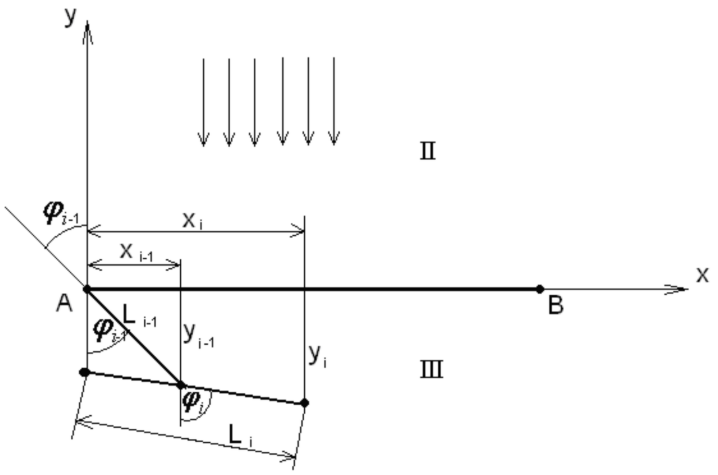


Рисунок 2.22 – Расчетная схема для определения координат внешней поверхности порога при рациональном размещении относительно струй потока в зоне II

кривизны, совпадающим с точкой А. Радиус кривизны струй воды $R_{d.o.i}$, при этом будет изменяться от 0 до В. При таком условии линия АВ, и входной створ сооружения являются радиальными составляющими траекторий движения объемов воды в верхнем бьефе водозаборного сооружения.

Сделанные допущения позволяют получить предварительные функциональные зависимости для определения приращения координат внешней поверхности наносозащитного порога при относительном рациональном ее размещении, на заданном расстоянии от точки А на рисунке 2.22 с учетом условий уравнений (2.57)–(2.58):

$$\left.\begin{aligned} y_{\text{i}} &= L_i \cos\phi_i; \\ x_i &= L_i \sin\phi_i \end{aligned}\right\}. \tag{2.62}$$

Определяя возможность расчета величин приращения координат *dx* и *dy* в зависимости от рассматриваемого участка порога, уравнение (2.57) запишем в виде:

$$\left.\begin{aligned} dx &= dL\cos\phi_i \\ dy &= dL\sin\phi_i \end{aligned}\right\}. \tag{2.63}$$

Тогда рациональные координаты внешней поверхности наносозащитного порога для рассматриваемого случая (см. рисунки 2.21 и 2.22) для участка *dL* могут быть определены в результате интегрирования системы (2.63):

$$\left.\begin{aligned} y_i &= \int_{L_{i-1}}^{L_i} \cos\phi_i dL = \cos\phi_i (L_i - L_{i-1}) + c; \\ x_i &= \int_{L_{i-1}}^{L_i} \sin\phi_i dL = \sin\phi_i (L_i - L_{i-1}) + c \end{aligned}\right\}. \tag{2.64}$$

При интегрировании задавалось условие, что значение углов φ_i будет известным, что учитывается ниже при составлении расчетных рекомендаций.

Представляя постоянные св виде координаты предыдущей расчетной точки, входящей в состав внешней поверхности наносозащитного порога, было получены уравнения вида:

$$\left.\begin{aligned} y_i &= -(y_{i-1} + (L_i - L_{i-1})\cos\phi_i); \\ x_i &= x_{i-1} + (L_i - L_{i-1})\sin\phi_i \end{aligned}\right\}. \tag{2.65}$$

Знак (–) координаты у соответствует случаю движения двухфазного потока жидкости в циркуляционном вальце от точки А до точки В. Это является выводом из правила гидродинамики обхода замкнутых контуров при использовании системы декартовых координат.

Анализируя расчетную схему (рисунок 2.22) можно сделать вывод, что наносозащитные пороги, построенные по координатам, определенным по формулам (2.65) будут иметь вогнутую форму.

Учитывая, что действительное значение радиуса искривления струй водного потока $R_{d.o.i}$ изменяется от В до ∞, при этом угол перед криволинейной линией J изменяется от 0 вначале, до $\frac{\pi}{2}$ у концевого участка порога. С учетом этого введем в систему (2.65) поправочную величину в виде изменяющегося угла ϕ_{ui}. Эта величина должна корректировать ранее заданное условие о подходе струй водного потока по нормали к линии АБ, которая является базисной для построения контура поверхности порога [100]:

$$\phi_{ui} = 90^{\circ} - 90^{\circ} z_i , \tag{2.66}$$

где z_i – относительная длина рассматриваемого участка порога:

$$z_i = \frac{L_i}{L} . \tag{2.67}$$

Тогда с учетом зависимости (2.61) уравнения (2.62) примут вид:

$$\left.\begin{aligned} y_i &= y_{i-1} - (L_i - L_{i-1})\cos(\phi_i + \phi_{ui}); \\ x_i &= x_{i-1} + (L_i - L_{i-1})\sin(\phi_i + \phi_{ui}) \end{aligned}\right\} . \tag{2.68}$$

Расчетное построение с использованием уравнений, (2.61)–(2.63) позволило получить контур внешней поверхности порога, представленный на рисунке 2.23.

Построения проводились с подбором необходимого значения поперечной составляющей $V_{пп}$ циркуляционного вальца при сопоставлении расчетных контуров порога с контуром ломаного в плане наносозащитного порога, исследованного ранее для получения зависимости (2.51). Как видно на рисунке 2.23, при совмещении контуров их максимальное совпадение отмечается на начальном участке порога. Контур 2 был получен в результате расчетного приближения при постоянном значении поперечной составляющей $V_{пп}$ = const, которая была равна $V_{п\text{p.max}}$ = 3,51 м/с. Эта величина соответствует максимальному значению продольной составляющей, определеннойс помощью рисунка 2.20 а.

Анализ результатов построения расчетного и исследуемого контуров (см. рисунок 2.23) с учетом выполненного обоснования позволил сделать следующие выводы:

- расхождение в направлении расчетного и исследуемого контуров порогов в области второй *(в)* и третьей *(с)* секции ломаного в плане порога указывает на увеличение поперечных составляющих циркуляционного вальца. Причем это происходит в начале второй секции одновременно с увеличением продольных скоростей, а на ее концевом участке

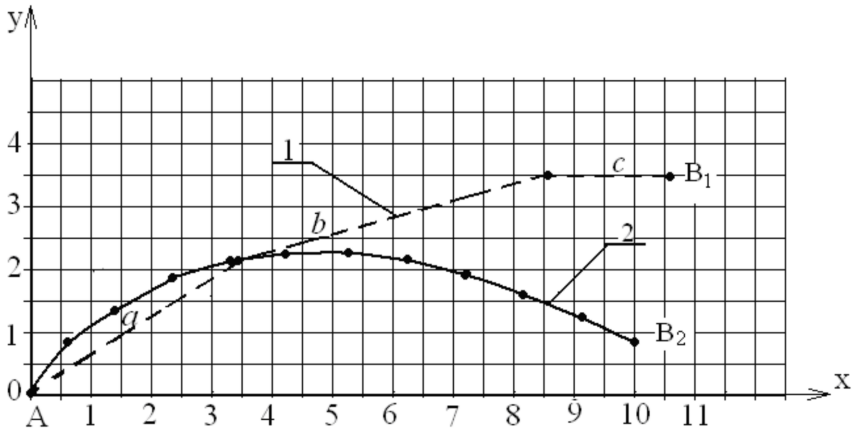


Рисунок 2.23 – Контуры внешних поверхностей наносозащитных порогов: 1 – исследуемый трехсекционный ломаный в плане наносозащитный порог; 2 – контур наносозащитного порога, построенный с использованием уравнений (2.68)

и на участке третьей секции с уменьшением значений этих скоростей $V_{пр}$. Это сопровождается возникновением в этой зоне вертикальных вихревых потоков с обильным захватом наносов в водоприемную камеру;

- совпадение расчетного и исследуемого контуров порогов на начальном участке свидетельствует о рациональности методики определения параметров начальной секции ломаного в плане наносозащитного порога, которая приведена выше;
- в искомой конструкции порога необходимо устройство концевого участка с противоположной направленностью от направления поверхности на начальном и среднем участках. Это позволит увеличить значения продольных скоростей на концевом участке циркуляционного вальца.

При компоновке водозаборного сооружения с конфигурацией наносозащитного порога, полученной по теоретическим расчетам, возникли некоторые сложности, из-за смещения точки B_1 в точку B_2 (см. рисунок 2.23). В результате промывной тракт также был смещен на заданное расстояние, что вызвало необоснованное расширение элементов подпорного створа. При смещении водосбросных устройств возникла ситуация, требующая изменения условий сопряжения водозаборного сооружения с подводящим руслом, что нарушало гидравлические процессы при пропуске паводковых расходов.

При дальнейшем рассмотрении возможных вариантов определения рациональных кинематических характеристик циркуляционного вальца, были определены следующие условия:

- необходимость уменьшения значений продольной составляющей скорости циркуляционного вальца на начальном участке порога с целью увеличения значений координаты *y* в этой области. Это позволит увеличить количество вариантов при проведении исследований для обеспечения рациональных условий сопряжения порогов с устройствами подпорного створа;
- в продольном направлении циркуляционный валец должен иметь большие значения скоростей потока, чем у исследуемых ранее трехсекционных ломаных в плане и криволинейных порогов (см. рисунок 2.20).

Ниже будут приведены результаты исследования для определения плановой конфигурации ломаных в плане порогов.

2.3.4. Обоснование конструкции промывного тракта

Рациональное устройство промывного тракта на низконапорных водозаборных сооружениях, эксплуатируемых при высоких процентах водозабора (при коэффициентах водозабора $\alpha \geq 0{,}6$), является важным условием осуществления активной защиты водоприемных элементов от наносов [35]. Промывные тракты, как правило, устраиваются в пределах концевого участка наносозащитных порогов, где наносы транспортируются на сброс в нижний бьеф водозаборного сооружения. Затворы, перекрывающие сбросное отверстие промывных трактов (промывников), входят в состав подпорных створов гидроузлов.

Ранее Б.И. Мельниковым [120] была обоснована необходимость понижения давления в придонной части промывного тракта для повышения эффективности сброса наносов. При этом возможность понижения давления определялась увеличением скорости водного потока за счет местного уменьшения глубины относительно расчетных глубин в верхнем бьефе сооружения. С целью увеличения разности глубин было предложено устройство промежуточных стенок, которые с целью понижения давления выдвигались в сторону верхнего бьефа для создания дополнительных сопротивлений.

Для определения длины промежуточных стенок рекомендовалась зависимость [120]:

$$l_{п.с} = (1{,}0 \div 1{,}2) H_P, \tag{2.69}$$

где H_p – расчетная глубина в верхнем бьефе водозаборного сооружения.

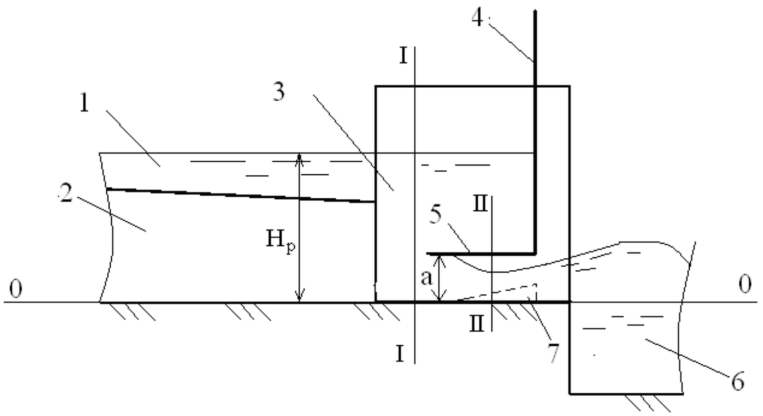


Рисунок 2.24 – Расчетная схема горизонтального козырька, устроенного на нижней кромке плоского затвора промывного тракта: 1 – верхний бьеф сооружения; 2 – наносозащитный порог; 3 – промывной тракт; 4 – плоский затвор промывного отверстия; 5 – горизонтальный козырек; 6 – отводящее русло; 7 – донная вставка с обратным уклоном поверхности

Исследования конструкций промывных трактов [35, 99] позволили установить, что такой способ повышения транспортирующей способности водного потока снижает пропускную способность речного пролета гидроузла и наносозащитного порога, что требует увеличения ширины водосливного фронта.

С учетом этогообстоятельства были рассмотрены различные способы повышения транспортирующей способности потока воды на участке промывного тракта, без понижения пропускной способности элементов сооружения. В частности, путем устройства дополнительных стенок и быков меньших размеров [99], а также с применением усовершенствованных конструкций затворов [35].

В качестве одного из вариантов было предложено устройство горизонтального козырька на нижней кромке затвора промывного тракта. Это позволило создать понижение давления в придонном слое двухфазного потока с ускорением объемов воды под горизонтальным козырьком [69, 70]. Рассмотрим расчетную схему свободного истечения жидкости из-под горизонтального козырька, размещенного на нижней кромке затвора промывного тракта, которая приведена на рисунке 2.24.

Составим уравнение Бернулли для сечений I-I и II-II относительно оси сравнения 0-0.

$$H_P + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \varepsilon a + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_\omega , \qquad (2.70)$$

где H_p – глубина воды в верхнем бьефе сооружения (перед подпорным створом); p_1 и p_2 – давление на свободной поверхности жидкости; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; α_1 и α_2 – коэффициенты, учитывающие неравномерное распределение скоростей потока в сечениях I-I и II-II; a – величина открытия затвора промывного тракта; ε – коэффициент сжатия струи потока при истечении жидкости из-под горизонтального козырька; h_ω – потери энергии.

При этом уравнение скорости воды может быть представлено в виде:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1}} \sqrt{\left(2g\left(H_P - \varepsilon a - h_\omega\right) + \alpha_1 V_1^2\right)} . \qquad (2.71)$$

Уравнение (2.71) позволяет предварительно определить параметры горизонтального козырька с учетом продольных скоростей движения потока в циркуляционном вальце, транспортирующем наносы вдоль наносозащитного порога. Учитывая рекомендации [181], максимальная длина горизонтального козырька на предварительных этапах исследований

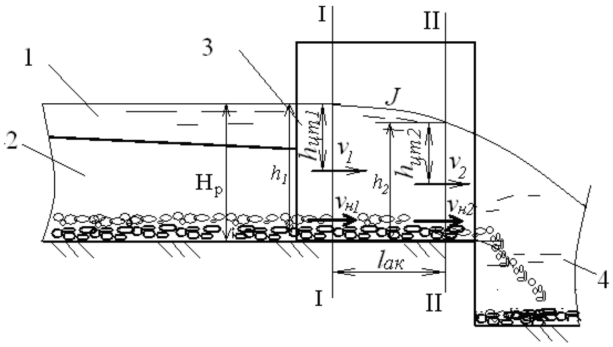


Рисунок 2.25 – Расчетная схема промывного тракта: 1 – верхний бьеф; 2 – наносозащитный порог; 3 – промывной тракт; 4 – отводящее русло

была принята равной (3÷4)*a* из необходимости создания условий истечения через цилиндрический насадок.

Аналогично нами было обосновано применение нового конструктивного элемента на дне промывника под горизонтальным козырьком в виде донной вставки с обратным уклоном поверхности. Такая донная вставка 7 (см. рисунок 2.24) обеспечивает большее искривление струй, истекающих из-под козырька. При соприкосновении струй с нижней поверхностью козырька увеличивается эффект цилиндрического насадка. Понижение давления способствует повышению транзитных скоростей потока и увеличению транспорта наносов через промывной тракт. Для горизонтального козырька с донной вставкой уравнение (2.70) можно записать в следующем виде:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1}}\sqrt{2g(H_P - \varepsilon a - h_\omega) - \alpha_1 V_1^2 + \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}\,. \qquad (2.72)$$

Результаты лабораторных исследований устройства горизонтального козырька на затворе в промывном тракте подтвердили повышение транспортирующей способности объемов воды, сбрасываемых в нижний бьеф сооружения [70].

С целью определения факторов, определяющих транспортирующую способность потока, нами было рассмотрено уравнение приращения количества движения для массы двухфазного потока жидкости (вода – влекомые наносы). При этом была использована расчетная схема, приведенная на рисунке 2.25.

Применим к отсеку движущегося потока двухфазной жидкости, ограниченному сечениями I-I и II-II, теорему об изменении количества движения [181].

При этом количество движения двухфазного потока жидкости, протекающий через живое сечение площадью (ω + $\omega_н$), где ω – площадь соответствующая движению основного потока воды; $\omega_н$ – площадь сечения соответствующая движению наносов, будет равно:

$$\int_{\omega} \rho\left(ud\omega\right)u + \int_{\omega_н}\left(\rho_н - \rho\right)\left(u_н d\omega_н\right)u_н = \rho\alpha' v^2\omega_1 + \left(\rho_н - \rho\right)\alpha'' v_н^2\omega_н\,, \qquad (2.73)$$

где ρ и $\rho_н$ – плотность воды и влекомых наносов; α› и α›› – коэффициенты количества движения [166, 181]; *v* и $v_н$ – скорости движения воды и влекомых наносов.

Выражение приращения количества движения массы потока, сбрасываемого через промывной тракт, заключенного между сечениями I-I и II-II в единицу времени *dt*, относительно направлению движения, совпадающего в первом приближении с горизонтальным дном промывного тракта, примет вид:

$$\Delta K_d = \rho\alpha_2' v_2^2\omega_2 + \left(\rho_н - \rho\right)\alpha_2'' v_{н2}^2\omega_{н2} - \rho\alpha_1' v_1^2\omega_1 - \left(\rho_н - \rho\right)\alpha_1'' v_{н1}^2\omega_{н1}\,. \qquad (2.74)$$

Проводя дальнейшие преобразования, получим уравнение:

$$\Delta K_d = \rho\alpha_2' Q v_2 + \rho\alpha_1' Q v_1 - \left(\rho_н - \rho\right)\alpha_2'' v_{н2}^2\omega_{н2} - \left(\rho_н - \rho\right)\alpha_1'' v_{н1}^2\omega_{н1}\,. \qquad (2.75)$$

Учитывая допущения [181], уравнение (2.70) приведем к виду:

$$\Delta K_d = \rho\alpha' Q(v_2 - v_1) + (\rho_н - \rho)\alpha'' G(v_{н2} - v_{н1}), \quad (2.76)$$

где G – расход наносов в промывном тракте.

Далее, принимая равенство $\rho\alpha' Q(v_2 - v_1) = P_1 - P_2$, уравнение (2.76) представим в виде:

$$\Delta K_d = \rho g h_{цт1}\omega_1 - \rho g h_{цт2}\omega_2 + (\rho_н - \rho)\alpha'' G(v_{н2} - v_{н1}). \quad (2.77)$$

Разделив правую и левую часть уравнения (2.77) на произведение ρg, получим:

$$\frac{\Delta K_d}{\rho g} = h_{цт1}\omega_1 - h_{цт2}\omega_2 + \frac{(\rho_н - \rho)}{\rho}\alpha_2'' G\frac{(v_{н2} - v_{н1})}{g}. \quad (2.78)$$

Согласно расчетной схемы (см. рисунок 2.25) $h_{цт1} = \frac{h_1}{2} = \frac{h_2 + J \times l_{ак}}{2}$, $h_{цт2} = \frac{h_2}{2}$, а $\omega_1 = h_1 b_{пр}$ и $\omega_2 = h_2 b_{пр}$ ($b_{пр}$ – ширина промывного тракта, согласно выполненного анализа существующих конструкций водозаборных сооружений, принимается постоянной по всей длине, т.е. призматической формы), с учетом этого уравнение (2.78) примет вид [103]:

$$\frac{\Delta K_d}{\rho g} = \frac{(h_2 + J \times l_{ак})^2}{2} b_{пр} - \frac{h_2^2}{2} b_{пр} + \frac{(\rho_н - \rho)}{\rho}\alpha_2'' G\frac{(v_{н2} - v_{н1})}{g}. \quad (2.79)$$

После преобразования получим:

$$\frac{\Delta K_d}{\rho g} = \frac{2h_2 J \times l_{ак} + (J \times l_{ак})^2}{2} b_{пр} + \frac{(\rho_н - \rho)}{\rho}\alpha_2'' G\frac{(v_{н2} - v_{н1})}{g}. \quad (2.80)$$

Из уравнения (2.79) получим уравнение расхода наносов:

$$G = \frac{\frac{\Delta K_d}{\rho g} - b_{пр}\frac{(2h_2 J \times l_{ак} + J^2 l_{ак}^2)}{2}}{\alpha''\frac{(\rho_н - \rho)}{\rho}\frac{(v_{н2} - v_{н1})}{g}} = \frac{2\Delta K_d - \rho g b_{пр}(2h_2 J \times l_{ак} + J^2 l_{ак}^2)}{2\alpha''(\rho_н - \rho)(v_{н2} - v_{н1})}. \quad (2.81)$$

Уравнение (2.81) позволяет сделать вывод, что транспортирующая способность водного потока увеличивается при росте значений изменения количества движения, и уменьшается вследствие роста значений:

- ширины и глубины потока в промывном тракте,
- длины промывного тракта,
- плотности частиц наносов, сбрасываемых через промывной тракт;
- разности скоростей движения влекомых наносов по длине промывного тракта.

Учитывая приведенные выше факторы, определяющие транспортирующую способность потока, было предложено устройство на дне промывного тракта донной вставки с обратным уклоном поверхности, приведенной на рисунке 2.26.

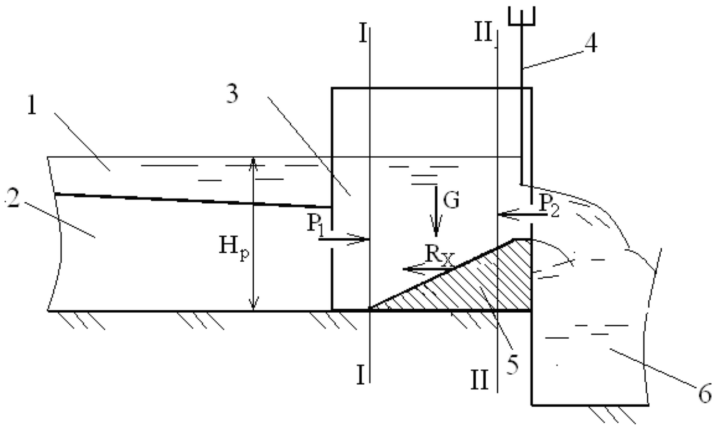


Рисунок 2.26 – Схема размещения донной вставки в промывном тракте: 1 – верхний бьеф; 2 – наносозащитный порог; 3 – промывной тракт; 4 – затвор промывного тракта; 5 – донная вставка; 6 – отводящее русло

Выражая уравнение изменения количества движения относительно только водного потока, создающего движение наносных масс, с учетом действия реакции R_X, запишем $\rho\alpha' Q(v_2 - v_1) = P_1 - P_2 - R_X$. При этом уравнение (2.81) примет вид [103]:

$$G = \frac{\frac{\Delta K_d}{\rho g} - b_{пр}\frac{(2h_2 J \times l_{ак} + J^2 l_{ак}^2)}{2} + \frac{R_X}{\rho g}}{\alpha''\frac{(\rho_н - \rho)}{\rho}\frac{(v_{н2} - v_{н1})}{g}} = \frac{\Delta K_d - 0{,}5 b_{пр} J \times l_{ак}\rho g(2h_2 + J \times l_{ак}) + R_X}{\alpha''(\rho_н - \rho)(v_{н2} - v_{н1})}. \quad (2.82)$$

Знак (+) перед выражением реакции R_X свидетельствует о положительном влиянии донной вставки на увеличение транспортирующей способности потока в промывном тракте, которая при ускорении водного потока вызовет относительное уменьшение ускорения частиц влекомых наносов. В свою очередь ускорение объемов воды, увеличивающее изменение количества движения ΔK_d в промывном тракте при устройстве донной вставки, предопределено уравнением неразрывности водного потока.

2.4. Технологическое обоснование конструктивных элементов водозаборных сооружений на горных реках. Компоновочные схемы низконапорных плотинных водозаборных сооружений, конструкция стабилизатора расхода воды

Анализ эксплуатационных характеристик существующих конструкций низконапорных водозаборных сооружений гидроэнергетических и ирригационных систем с учетом современных технических требований, определил необходимость совершенствования компоновочных схем и конструкций составляющих элементов.

Учитывая недостатки существующих конструкций сооружений в обеспечении основных технологических операций водозабора и на основании анализа теоретических основ гидравлических и русловых процессов, произведено усовершенствование компоновок водозаборных сооружений. При этом улучшались конструкции водосбросных элементов, водоприемников, устройств наносозащиты и защиты от ледошуговых образований, а также средств гидравлической автоматизации процесса водозабора. В ходе совершенствования рассматривались современные разработки и предложения по рациональному использованию водно-энергетических ресурсов рек горно-предгорной зоны. Это определило возможность обеспечения бесперебойной подачи в гидроэнергетические и ирригационные системы необходимых объемов воды с допустимым содержанием твердых включений речного потока.

Разработки согласовывались с принципами компоновки водозаборных гидроузлов на горных реках, сформулированными А.В. Филончиковым [172]:

- принцип оптимальности технологии;
- принцип этапности вступления в работу приемов выполнения технологических операций;
- принцип совместимости технологических приемов;
- принцип экономичности.

С учетом известных рекомендаций [8, 15, 35, 120, 123, 172], нами был намечены рациональные способы осуществления действий основных технологических операций, представленных на рисунке 2.1, с определением состава и относительного расположения сооружений и устройств водозаборных сооружений. Состав элементов низконапорных во-

дозаборных сооружений из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы и условия их относительного размещения приведены в Приложении 7.

Определяя в качестве основной отличительной особенности в конструкциях водозаборных сооружений для гидроэнергетических систем по сравнению с ирригационными, элементы зимнего водоотбора и устройства для борьбы с ледошуговыми образованиями, был предложен ряд усовершенствованных компоновочных схем.

2.4.1. Компоновки водозаборных сооружений на горных реках для гидроэнергетических и ирригационных систем

Анализ недостатков существующих схем обеспечения процесса водозабора из горных рек с учетом теоретических предпосылок позволил разработать усовершенствованную компоновку водозаборного сооружения для деривационных ГЭС (ВСДГ-1) (рисунок 2.27).

На приведенную конструкцию получен патент Кыргызской Республики № 607 в 2003 г. [72]. Сооружение было рекомендовано для использования в составе гидроэнергетических узлов деривационных ГЭС, при водозаборе из горных рек, транспортирующих наносы и имеющих ледовые явления. При некоторой модификации оно может быть использовано в качестве головного сооружения ирригационных систем предгорных зон.

В качестве аналога было принято известное водозаборное сооружение горного типа ирригационного назначения [27, 120]. Недостаток аналога – захват наносов потоком, поступающим в водоприемный оголовок при пропуске паводковых расходов через сооружение. Это обусловлено зарождением вертикальных винтовых потоков на криволинейных плоскостях наносозащитного порога водоприемной камеры и разделительной стенки [72].

Разработанная нами компоновка ВСДГ, в отличие от прототипа, оборудована следующими элементами [35]:

- водоприемная камера имеет поперечный уступ, разделяющий ее на повышенную и пониженную части;
- между промывным трактом и речным пролетом установлен промежуточный бычок, верх которого заглублен под расчетный уровень воды в верхнем бьефе;
- наносозащитный порог выполнен в виде ломаного в плане порога с закладными частями для временного (на зимний период) закрепления телескопических шандоров;
- концевой участок ломаного в плане порога устраивается параллельно динамической оси потока в подводящем русле;
- в разделительный бычок, водоприемной камеры и промывного тракта встроен придонный плоский затвор для зимнего забора воды;
- в концевой части промывного тракта и катастрофического водослива устраивается щитовое отверстие, армированное сдвоенным затвором, обеспечивающим истечение воды из-под полотнища, при промыве наносов, или через его верхнюю грань, при сбросе ледошуговой массы;
- стабилизатор расхода отводящего канала отдален от входного отверстия водоприемного оголовка на расстояние (1,5…2,0)b, где b – ширина водоприемного оголовка.

Предложенные конструктивные изменения позволяют уменьшить захват наносов, ледошуговых образований и плавника в отводящий деривационный канал при эксплуатации сооружения.

Проведя сопоставление расчетных параметров компоновочной схемы ВСДГ (см. рисунок 2.27) с гидрологическими характеристиками некоторых горных рек Кыргызстана, была обоснована необходимость усовершенствования этой компоновочной схемы с целью увеличения пропускной способности [35].

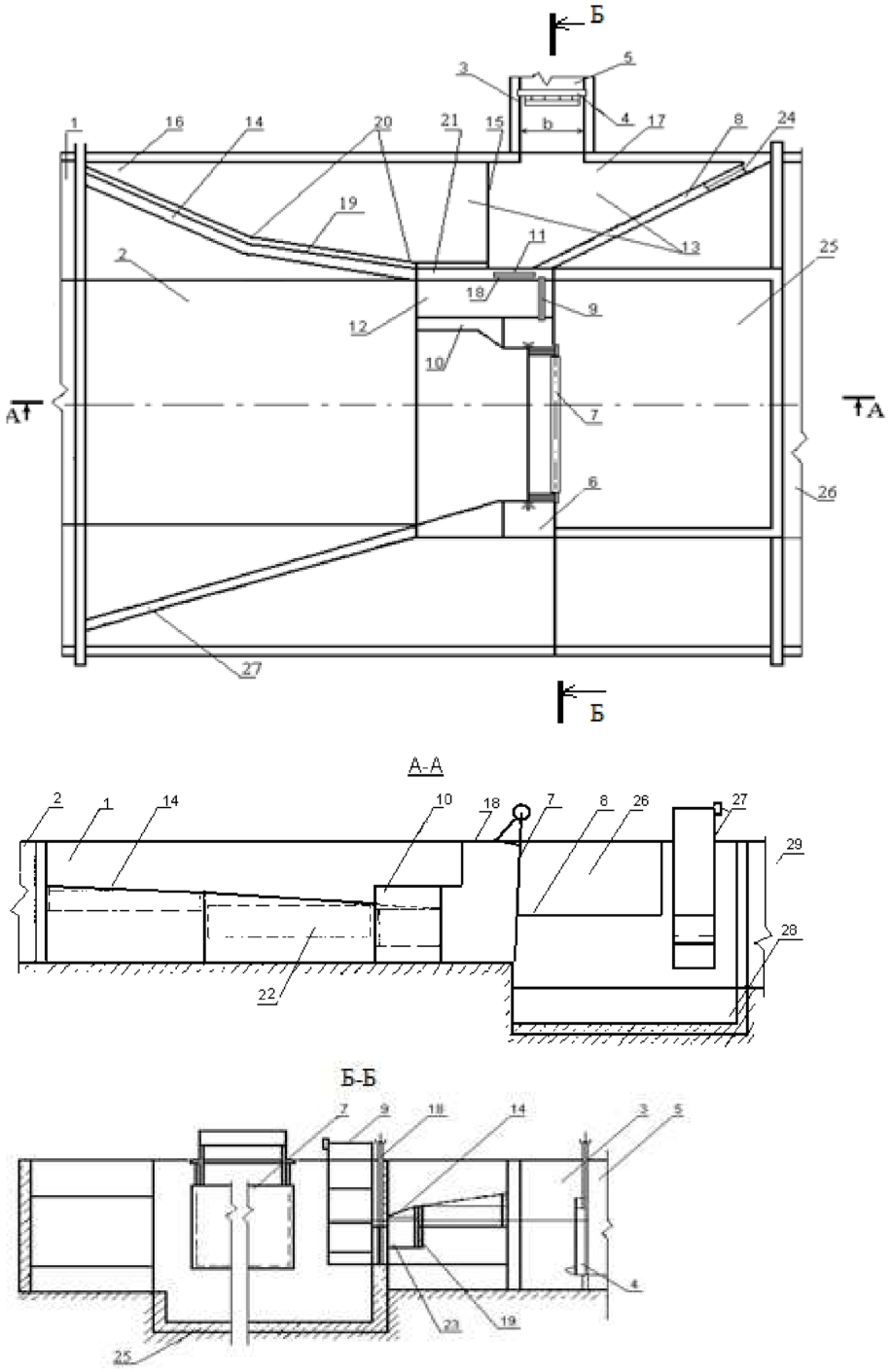


Рисунок 2.27 – Компоновочная схема ВСДГ-1: 1 – зарегулированное русло; 2 – верхний бьеф; 3 – водоприемник; 4 – стабилизатор расхода воды; 5 – отводящий канал; 6 – подпорное сооружение; 7 – затвор-автомат уровня верхнего бьефа; 8 – автоводослив; 9 – сдвоенный затвор; 10 – промежуточный бычок; 11 – разделительный бычок; 12 – промывной тракт; 13 – водоприемная камера; 14 – ломаный в плане порог; 15 – поперечный уступ; 16 и 17 – повышенная и пониженная части; 18 – затвор зимнего водозабора; 19 – грань порога; 20 – закладные части; 21 – концевая секция; 22 – шандоры; 23 – боковые пазухи на задней стенке порога; 24 – сдвоенный затвор; 25 – водобойный колодец; 26 – отводящее русло; 27 – автоводослив

Обоснование рациональных контуров наносозащитных порогов в результате модельных исследований позволили предложить компоновку водозаборного сооружения для горных рек (ВСГР) (рисунок 2.28) [35]. Эта компоновочная схема рекомендована для ирригационных систем или для гидроэнергетических систем с водозабором из рек с мягким зимним режимом и отличается от предыдущей компоновки следующими элементами:

- наносозащитный порог выполнен в виде усовершенствованного ломаного в плане порога, имеющего выступающую в сторону речного пролета часть трапецеидальной в плане формы;
- наносозащитный порог состоит из четырех секций, концевая секция расположена под углом φ к динамической оси потока в верхнем бьефе, где $190° < \varphi < 240°$;
- автоводослив водоприемной камеры выполнен криволинейным в плане для увеличения пропускной способности водозаборного гидроузла;
- автоводослив верхнего бьефа в начальной части оборудован наносоотводящим отверстием, перекрываемым плоским затвором для улучшения наносозащитных характеристик гидроузла;
- шугосбросные отверстия и элементы, обеспечивающие зимний водозабор, отсутствуют.

С целью организации круглогодичного водозабора в гидроэнергетические системы из рек с высокой мутностью водного потока и значительным содержанием ледошуговых образований была разработана усовершенствованная компоновочная схема водозаборного сооружения для деривационных ГЭС (ВСДГ-2) (рисунок 2.29).

При разработке компоновки ВСДГ-2 в качестве основной задачи рассматривалась необходимость обеспечения надежной эксплуатации при всех гидрологических режимах горных рек путем увеличения транспортирующей способности сбрасываемых объемов воды.

При этом рассматривалось повышение эффективности процесса водоотбора водоприемными элементами. Особое внимание уделялось возможности упрощения организации перевода сооружения на зимний режим эксплуатации. Обосновывались варианты зимнего водозабора без устройства шандоров на гребне наносозащитного порога для сокращения эксплуатационных издержек.

Компоновочная схема ВСДГ-2 относительно ранее представленных схем водозаборных гидроузлов имеет следующие отличительные особенности:

- ломанный в плане наносозащитный порог выполнен в виде вертикальной стенки, имеющей горизонтальный гребень;
- перед промывным отверстием в конце наносозащитного порога устраивается промывной тракт, в котором размещается донная вставка с поверхностью, имеющей отрицательный уклон. Промывной тракт перекрывается плоским затвором;
- между промывным отверстием и речным пролетом размещается дополнительный промывной тракт с отверстием, перекрываемым сдвоенным затвором;
- сбросной водослив верхнего бьефа сооружения выполняется в виде ломаного в плане порога, концевая секция которого размещается перпендикулярно полотнищу авторегулятора предельного уровня размещаемого в речном пролете;
- вначале ломаного в плане наносозащитного порога размещается дополнительное водоприемное отверстие, перекрываемое плоским затвором, предназначенным для регулирования объемов воды подаваемых в водоприемную камеру.

Представленные компоновочные схемы водозаборных сооружений при устройстве в составе головных гидроузлов, производящих водоотбор из горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы, позволяют:

- повысить коэффициент водозабора,
- уменьшить захват наносов и шуголедовых образований в водоприемную камеру,
- увеличить транспортирующую способность сбрасываемых объемов воды.

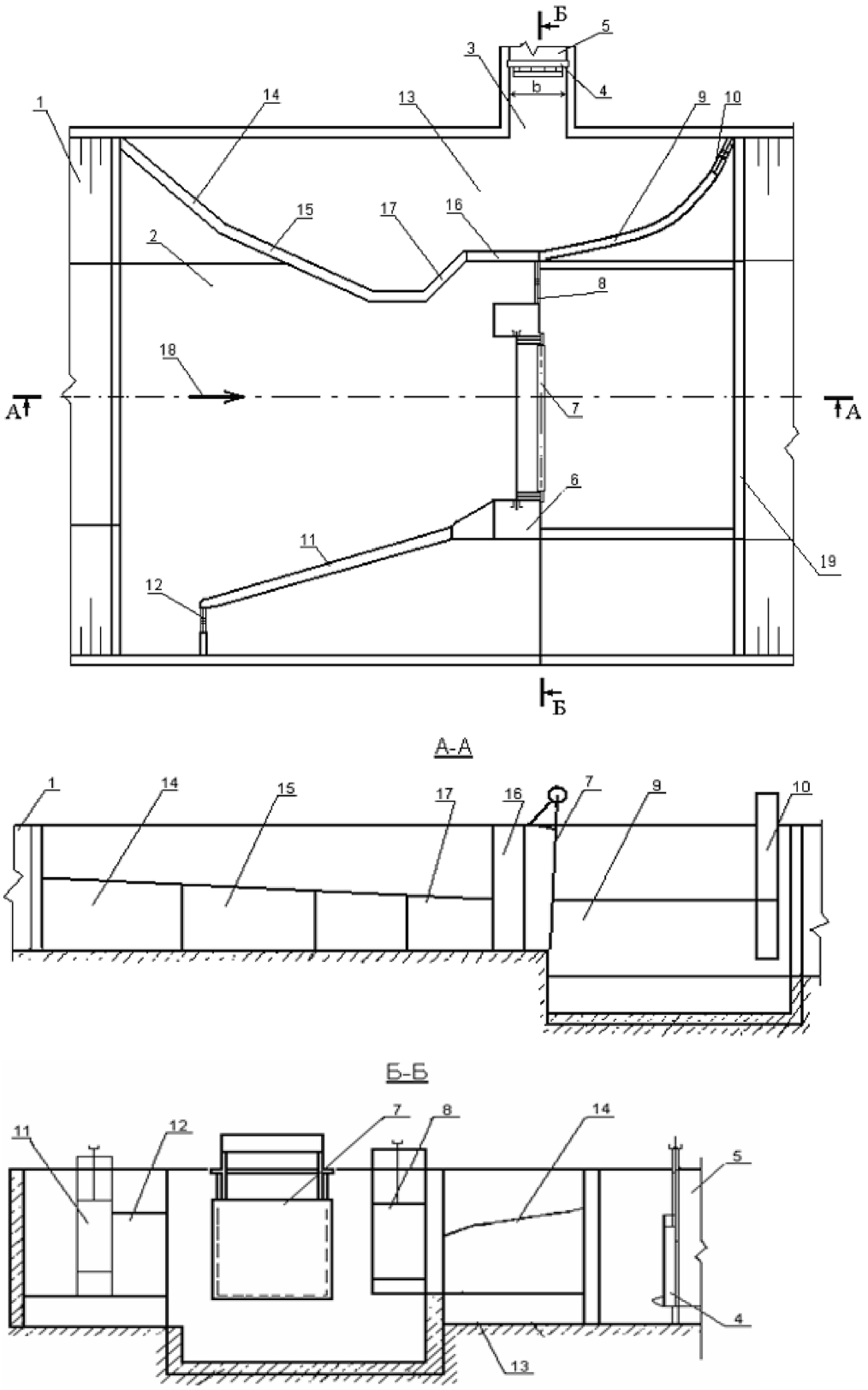


Рисунок 2.28 – Компоновочная схема (ВСГР (Патент КР № 920): 1 – береговой устой, 2 – подводящее русло, 3 – водоприемный оголовок, 4 – стабилизатор расхода, 5 – отводящий канал, 6 – подпорное сооружение, 7 – речной пролет, 8 – затвор промывного отверстия, 9 – криволинейный в плане автоводослив, 10 – затвор сбросного отверстия, 11 – автоводослив, 12 – затвор наносоотводящего отверстия, 13 – водоприемная камера, 14 – ломаный в плане четырехсекционый порог, 15 – концевая часть наносозащитного порога, выступающая в сторону речного пролета, 16 – разделительный бычок, 17 – концевая секция порога, 18 – динамическая ось потока в верхнем бьефе, 19 – отводящее русло

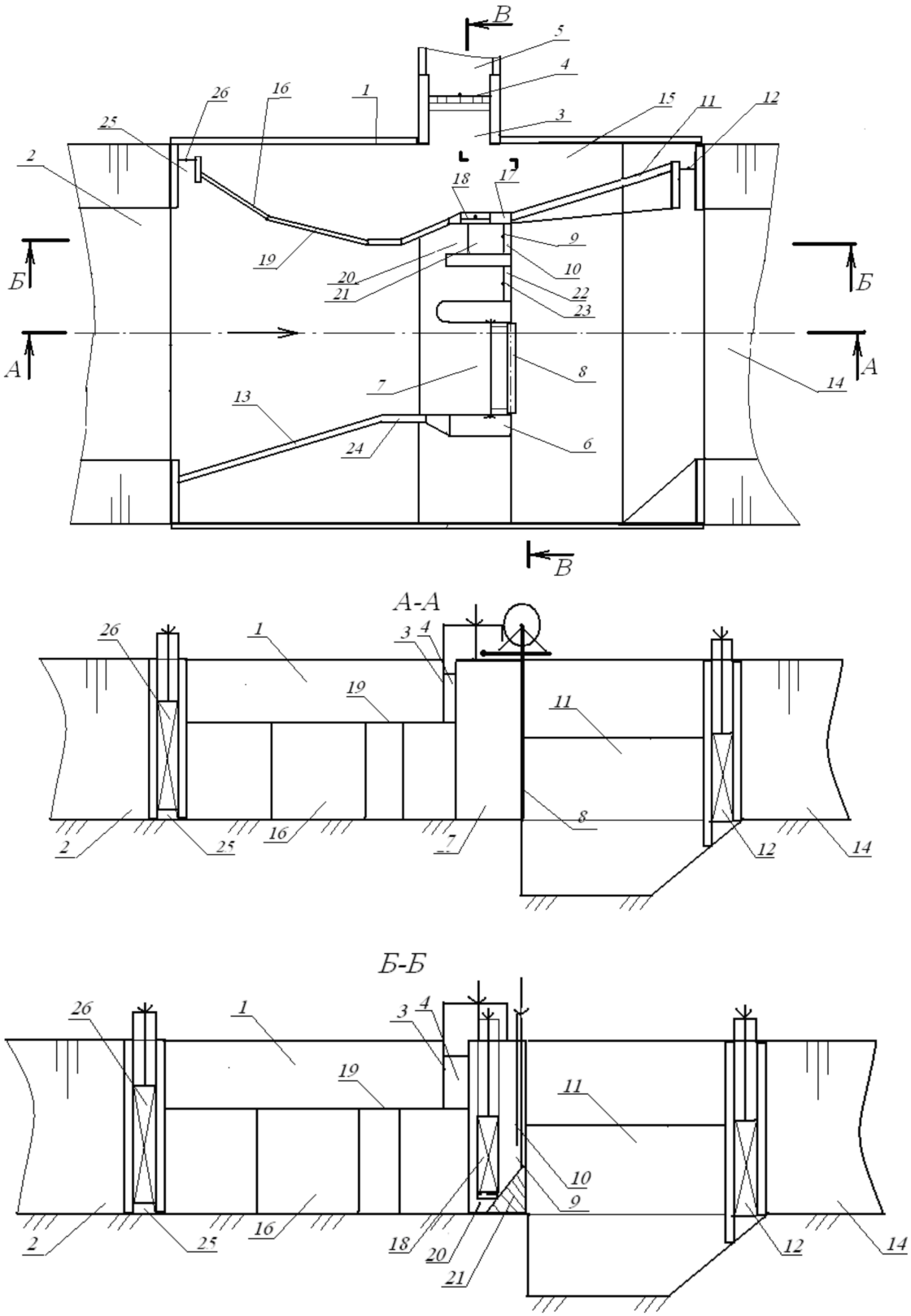


Рисунок 2.29 – Компоновочная схема ВСДГ-2: 1 – береговой устой; 2 – подводящее русло; 3 – водоприемный оголовок; 4 – стабилизатор расхода; 5 – отводящий канал; 6 – подпорное сооружение; 7 – речной пролет; 8 – авторегулятор уровня верхнего бьефа; 9 – затвор; 10 – промывное отверстие; 11 – автоводослив; 12 – затвор сбросного отверстия; 13 – автоводослив; 14 – отводящее русло; 15 – водоприемная камера; 16 – ломаный в плане четырехсекционный порог; 17 – разделительный бычок; 18 – зимнее отверстие, прикрываемое затвором; 19 – горизонтальный гребень порога; 20 – промывной тракт; 21 – донная вставка; 22 – отверстие дополнительного промывного тракта; 23 – сдвоенный затвор; 24 – концевая секция автоводослива; 25 – верхнее водоприемное отверстие; 26 – плоский затвор

Это определяется составом, размещением и конструктивными особенностями элементов разработанных компоновочных схем сооружений, которые задают потокам жидкости необходимые гидравлические структуры, способствующие повышению эффективности проведения технологических операций процесса водозабора.

2.4.2. Обоснование конструкции стабилизатора расхода воды

Анализ недостатков существующих стабилизаторов расхода, описание которых приведено выше, относительно их устройства в водоприемных оголовках водозаборных сооружений из горных рек показал необходимость совершенствования этого устройства с обеспечением дополнительных функциональных характеристик и возможностей:

- поддержания точности стабилизации в пределах ± 3 % для выполнения функций водомерного устройства;
- снижения металлоемкости;
- адаптации к зимнему режиму эксплуатации;
- упрощение процесса очистки коробов от плавающего мусора и ила.

Анализ гидрологических характеристик горных рек и технических параметров низконапорных автоматизированных водозаборных гидроузлов позволил предложить усовершенствованную конструкцию стабилизатора расхода – секционный параболический коробчатый затвор (СПКЗ), который представлен на рисунке 2.30 [79, 95].

В ходе разработки конструкции была рассмотрена необходимость создания плавного увеличения и уменьшения величины расходов воды, подаваемой в полые секции через переднюю стенку при изменении уровней воды в верхнем бьефе перед стабилизатором. С этой целью верхняя кромка передней стенки была выполнена в виде параболы, горизонтальные координаты ΔB которой находятся в функциональной зависимости с вертикальными координатами изменения уровней воды ΔH. Для вывода этой зависимости нами было рассмотрено уравнение баланса расходов, поступающих в нижний бьеф через элементы стабилизатора расхода по расчетной схеме (рисунок 2.31):

$$Q_P = Q_1 + Q_2 , \tag{2.83}$$

где Q_P – расчетное значение расхода потока, поступающего из верхнего бьефа в отводящий канал; Q_1 – расход воды, проходящий под криволинейным козырьком при напорах в верхнем бьефе равных расчетному H_P; Q_2 – расход воды, поступающий в отводящий канал через полые секции, при истечении потока через переднюю стенку стабилизатора расхода, при напорах больше расчетного.

Уравнение (2.83) можно записать в виде [95]:

$$\mu_{к.к} a_{ст} B\sqrt{2g(H_P - a_{ст})} = \mu_{к.к} a_{ст}(B - 2\Delta B)\sqrt{2g(H_P + \Delta H - a_{ст})} + \mu_{г.к} a_{ст} 2\Delta B\sqrt{2g(H_P + \Delta H - a_{ст})}, \tag{2.84}$$

где $\mu_{к.к}$ – коэффициент расхода при истечении из-под криволинейного козырька; $a_{ст}$ – открытие стабилизатора; В – ширина отверстия под стабилизатором соответствует ширине стабилизатора в свету; $\mu_{г.к}$ – коэффициент расхода при истечении из-под острой кромки плоского затвора.

Преобразуя уравнение (2.84), получим зависимость для определения горизонтальной координаты ΔВ:

$$\Delta B = \frac{\mu_{к.к} B\sqrt{(H_P - a_{ст})}}{\sqrt{H_P + \Delta H - a_{ст}} \times \left(\mu_{кк}\left(B / \Delta B - 2\right) + 2\mu_{гк}\right)}. \tag{2.85}$$

Сопоставление технических параметров низконапорных водозаборных сооружений и гидрологических характеристик горных рек позволяет сделать вывод, что при устройстве авторегулятора уровня верхнего бьефа в речном пролете подпорного створа необходимость

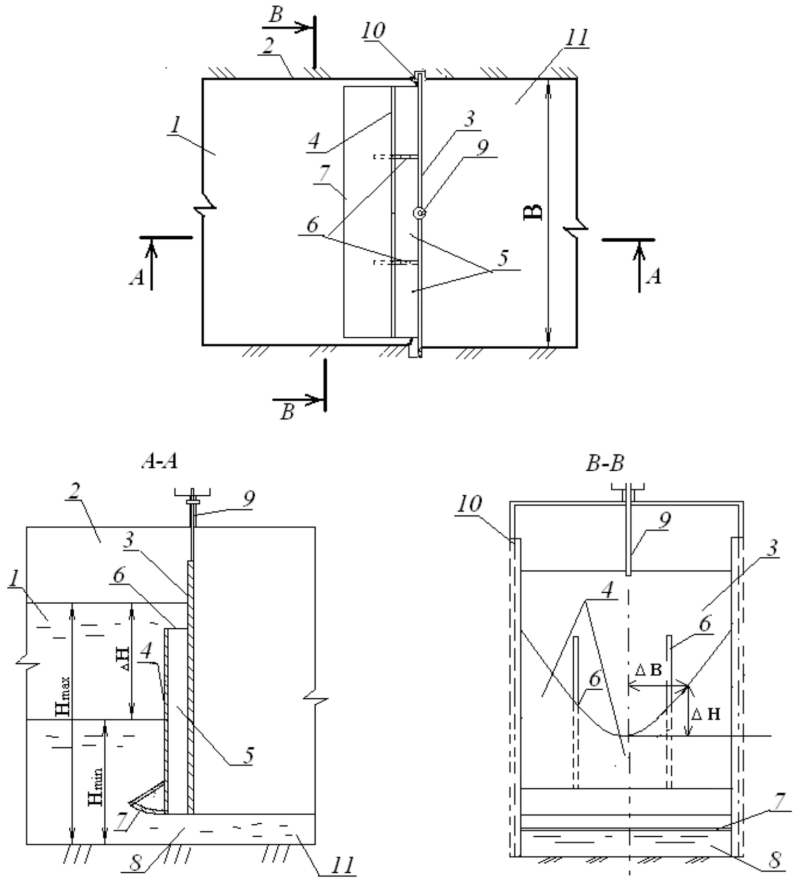


Рисунок 2.30 – Схема устройства СПКЗ: 1 – водоприемный оголовок; 2 – береговой устой; 3 – плоский затвор; 4 – передняя стенка с гребнем в виде параболы; 5 – проточные короба; 6 – разделительные ребра; 7 – криволинейный оголовок; 8 – отверстие; 9 – подъемник; 10 – закладные части; 11 – отводящий канал

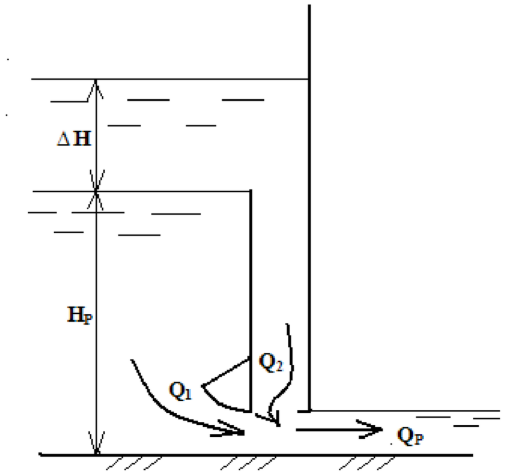


Рисунок 2.31 – Расчетная схема усовершенствованной конструкции типа СПКЗ

в работе стабилизатора расхода водоприемного оголовка появляется лишь в паводковый период. Остальное время при поддержании расчетных уровней в верхнем бьефе сооружения в водоприемную камеру через наносозащитный порог и придонные водоприемники зимнего водоотбора поступает заданное количество воды.

Жесткие конструкции проточных коробов стабилизаторов подвержены засорению. В зимний период водозабора при отсутствии в коробах проточных струй потока вода в них замерзает, что требует устройства систем обогрева.

Для повышения эксплуатационной надежности устройств водоприемного оголовка водозаборных гидроузлов гидроэнергетического назначения была разработана усовершенствованная конструкция стабилизатора расхода (рисунок 2.32) [95].

Передняя стенка приведенной конструкции отделена от плоского щитового затвора и помещена в собственные закладные элементы береговых устоев. Такое конструктивное изменение позволяет облегчить очистку полых секций стабилизатора при засорении путем вертикального перемещения затвора относительно передней стенки. Разделение стабилизатора на две независимые части предупреждает погружение передней стенки под расчетный уровень воды в водоприемной камере и предотвращает преждевременное включение в работу секций стабилизатора при расчетном напоре в водоприемной камере.

В усовершенствованной конструкции стабилизатора отсутствует нижняя криволинейная пластина козырька, а верхняя поворотная пластина выполнена перемещающейся на оси шарнира вниз под действием силы тяжести, вверх – управляемая штангой взаимодействия.

Подъемная штанга поворотной пластины выполнена в виде консоли, жестко закрепленной на плоском щитовом затворе. Величина открытия плавающей пластины $а_{пп}$ устанавливается в расчетной зависимости от открытия плоского щитового затвора $а_{ст}$.

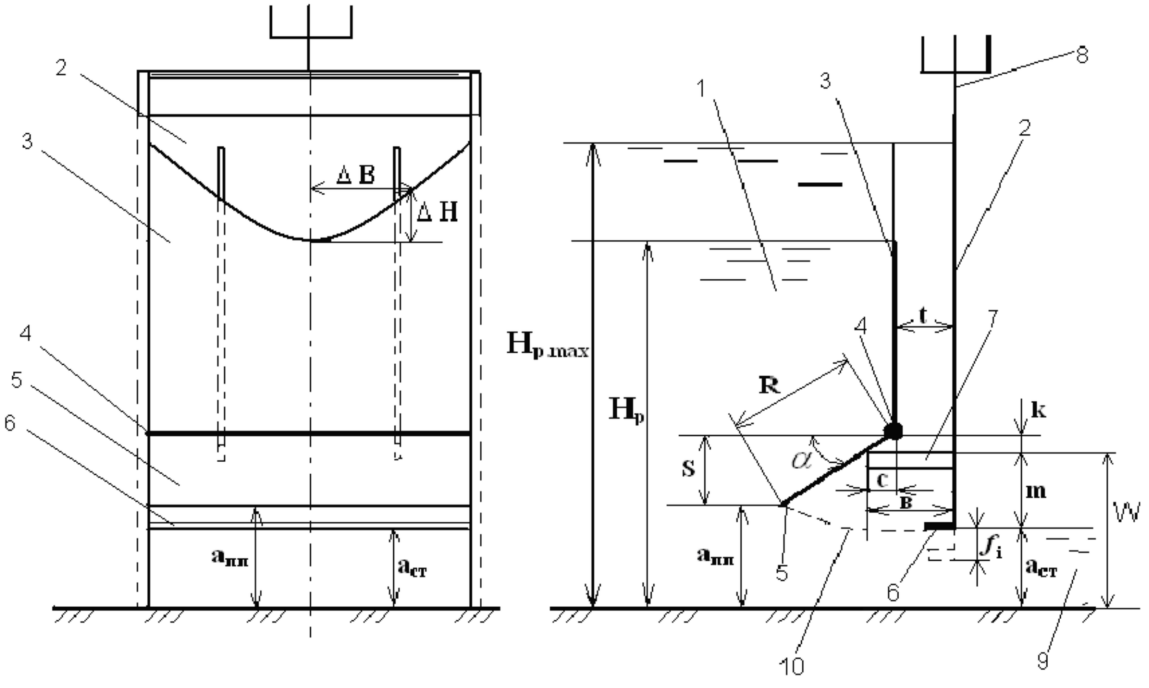


Рисунок 2.32 – Расчетная схема усовершенствованной конструкции стабилизатора расхода: 1 – верхний бьеф; 2 – плоский затвор; 3 – передняя стенка; 4 – шарнир; 5 – поворотная пластина; 6 – горизонтальный козырек; 7 – штанга взаимодействия; 8 – подъемный винт; 9 – нижний бьеф; 10 – траектория сжатия струи; 11 – траектория смещения нижней грани затвора при регулировании; $Н_р$ – расчетный напор; $Н_{р.\,max}$ – максимальный расчетный напор; R – длина поворотной пластины; t – расстояние между плоским затвором и передней стенкой; α – угол перемещения поворотной пластины при изменении величины открытия стабилизатора; $а_{пп}$ – открытие поворотной пластины; $а_{ст}$ – открытие плоского щитового затвора; в – длина штанги взаимодействия; c – длина участка штанги взаимодействия, сопрягающегося с вращающейся пластиной

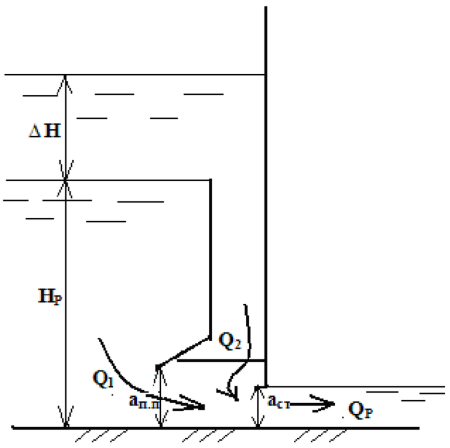


Рисунок 2.33 – Расчетная схема стабилизатора расхода с поворотной пластиной

В результате применения уравнения баланса расходов (2.83) к разработанной конструкции стабилизатора (рисунок 2.32), выражение для определения горизонтальной координаты ΔВ применительно к расчетной схеме (рисунок 2.33) будет иметь вид:

$$\Delta B = \frac{\mu_{пк} a_{п.п} B \sqrt{2g(H_p - a_{ст})}}{\mu_{пк} a_{пп} \left(\frac{B}{\Delta B} - 2 \right) \sqrt{2g(H_P + \Delta H - a_{ст})} + 2\mu_{гк} a_{ст} \sqrt{2g(H_p + \Delta H - a_{ст})}}, \quad (2.86)$$

где $\mu_{пк}$ – коэффициент расхода воды при истечении из-под поворотной пластины может быть принят в первом приближении согласно рекомендациям [145], равным коэффициенту расхода μ = 0,57 истечения из-под щита при наклонном его расположении β = 110°; $\mu_{гк}$ – коэффициент расхода воды при истечении из-под горизонтального козырька, согласно рекомендациям [83, 144] принимается равным значению 0,55÷0,6; $a_{пп}$ – величина открытия перемещающейся пластины.

Приняв равенство коэффициентов расхода истечений из-под поворотной пластины и горизонтального козырька, а также выразив отношение $a_{ст} / a_{пп} = \varepsilon_{пп}$ уравнение (2.87) примет вид:

$$\Delta B = \frac{B \sqrt{(H_P - a_{ст})}}{\sqrt{(H_P + \Delta H - a_{ст})} \left(\left(B / \Delta B - 2 \right) + 2\varepsilon_{пп} \right)}, \quad (2.87)$$

где $\varepsilon_{пп}$ – коэффициент сжатия струи при истечении воды из-под поворотной пластины, закрепленной через шарнир на передней стенке стабилизатора, может быть принят равным 0,588.

С целью обоснования параметров конструктивных элементов стабилизатора расхода, а также для определения рационального значения длины штанги взаимодействия, при котором будет соблюдаться условие уравнения (2.82) при любом открытии плоского щитового затвора и соответствующем изменении угла α (см. рисунок 2.33), было составлено уравнение, из которого следует:

$$a_{ст\,i} = a_{пп.i} + S_i - m^1 - k_i - f_i, \quad (2.88)$$

здесь $a_{ст\,i}$ – расчетное открытие стабилизатора расхода (плоского щитового затвора); $a_{пп.i}$ – расчетное открытие поворотной пластины; S_i – расчетная величина

$$S_i = R \sin\alpha, \quad (2.89)$$

m^1 – значение разности максимальных открытий плоского затвора и перемещающейся пластины:

$$m^1 = a_{пп.max} - a_{ст.max}, \quad (2.90)$$

f_i – расчетная разность максимального и текущего открытия плоского затвора:

$$f_i = a_{ст.max} - a_i, \quad (2.91)$$

В представленной расчетной схеме угол α для максимального открытия стабилизатора расхода определяется из соотношения:

$$\alpha = \text{arctg}k/c, \tag{2.92}$$

где c – величина длины участка штанги взаимодействия, сопрягающейся с перемещающейся пластиной; k – минимальное расчетное расстояние по вертикали от оси шарнира до верхней грани штанги взаимодействия.

Выполнив необходимые преобразования уравнения (2.88) относительно расчетной схемы, приведенной на рисунке 2.32, оно может быть представлено в виде уравнения [144], определяющего соотношение размеров элементов стабилизатора:

$$\sin\left(arctg\frac{k+f_i}{c_i}\right)=\frac{k+f_i+m+a_i\left(1-1/\varepsilon_i\right)}{R}. \tag{2.93}$$

При условии $0\le\frac{k_i+f_i+m+a_i\left(1-1/\varepsilon_i\right)}{R}\le 1$ уравнение (2.93) может быть представлено в следующем виде:

$$c_i=\frac{k+f_i}{tg\left(\arcsin\left(\frac{k+m+f_i+(a_{cm.\max}-f_i)\left(1-1/\varepsilon_i\right)}{R}\right)\right)}. \tag{2.94}$$

Это выражение позволяет определить необходимое значение c_i при любом открытии стабилизатора расхода a_i, которое согласно условия, учитываемого при выводе уравнения (2.94), изменяется в пределах от $0{,}01a_{ст.\,max}$ до $0{,}99a_{ст.\,max}$.

Как показал анализ материалов [163] о влиянии угла наклона козырька на сжатие струи, наибольший эффект наблюдается при горизонтальном его расположении для максимального открытия стабилизатора. В этом случае наблюдается наибольшее сжатие струи потока под передней стенкой, что позволяет задавать наибольшее отношение значений расчетных напоров $H_{р.max}/H_p$ при Q_p = const.

Проводя расчеты с использованием уравнения (2.94) при различных величинах разности открытия плоского затвора f_i, был сделан вывод о том, что концевой участок штанги взаимодействия для поддержания необходимого отношения открытий поворотной пластины $a_{пп}$ и плоского затвора $a_{ст}$ во всем расчетном диапазоне, должен описывать траекторию графика функции c_i-$f(f_i)$ (рисунок 2.34).

Изыскивая возможность назначения необходимых отношений величин открытий плоского щита, и перемещающейся пластины при регулировании подаваемых величин расходов, нами была определена необходимость выполнения профиля поворотной пластины с искаженной конфигурацией.

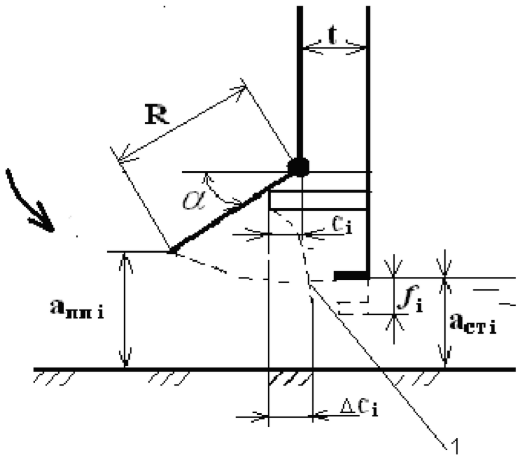


Рисунок 2.34 – Расчетная схема нижнего узла усовершенствованного стабилизатора расхода: 1 – траектория перемещения концевого участка штанги взаимодействия при перемещении плоского затвора; Δc – необходимая величина смещения штанги взаимодействия при закрытии затвора

При этом на пластине, по линии соприкосновения со штангой взаимодействия, устраиваются шлицевые углубления, выполняемые с зеркальным отражением, повторяющем полученную функцию c_i-$f(f_i)$ (см. рисунок 2.34). Конфигурация шлицевого паза зависит от разности значений максимальной и рассматриваемой длины участка штанги взаимодействия, сопрягающегося с вращающейся пластиной, которое представлено в виде:

$$\Delta c_i = c_{cm.\max} - c_i \,. \tag{2.95}$$

Эта разность с учетом уравнения (2.93) может быть выражена как:

$$\Delta c_i = \frac{f_{\min}}{tg\left(\arcsin\left(\frac{f_{\min} + m + a_{cm.\max}\left(1 - 1/\varepsilon\right)}{R}\right)\right)} - \frac{f_i}{tg\left(\arcsin\left(\frac{m + f_i + (a_{cm.\max} - f_i)\left(1 - 1/\varepsilon_i\right)}{R}\right)\right)}. \tag{2.96}$$

Контур плавающей пластины с учетом величины искажения функции c_i-$f(f_i)$ за счет изменения угла α при различных величинах открытия a_i, может быть определен относительно координатных осей W и V с использованием уравнений, полученных графоаналитически для расчетной схемы (рисунок 2.35):

$$\left.\begin{aligned} W_i &= \frac{c_i}{\cos\left[\operatorname{arctg}\left(f_i / c_i\right)\right]} + \Delta c_i\left[\cos\left(\operatorname{arctg}\left(f_i / c_i\right)\right)\right] \\ V_i &= \Delta c\left[\sin\left(\operatorname{arctg}\left(f_i / c_i\right)\right)\right] \end{aligned}\right\}. \tag{2.97}$$

Система уравнений (2.97) и расчетная схема, приведенная на рисунке 2.35, составлена для случая, когда при максимальном открытии стабилизатора $a_{ст.max}$ значение угла α = 0. То есть при пропуске максимального расхода воды Q_{Pmax} при максимальном открытии стабилизатора значение k_i=f_i.

Передняя стенка представленной конструкции стабилизатора расхода воды устраивается отдельно от плоского щита в отдельных закладных элементах, что позволяет производить ее установку в водоприемном оголовке перед прохождением паводка.

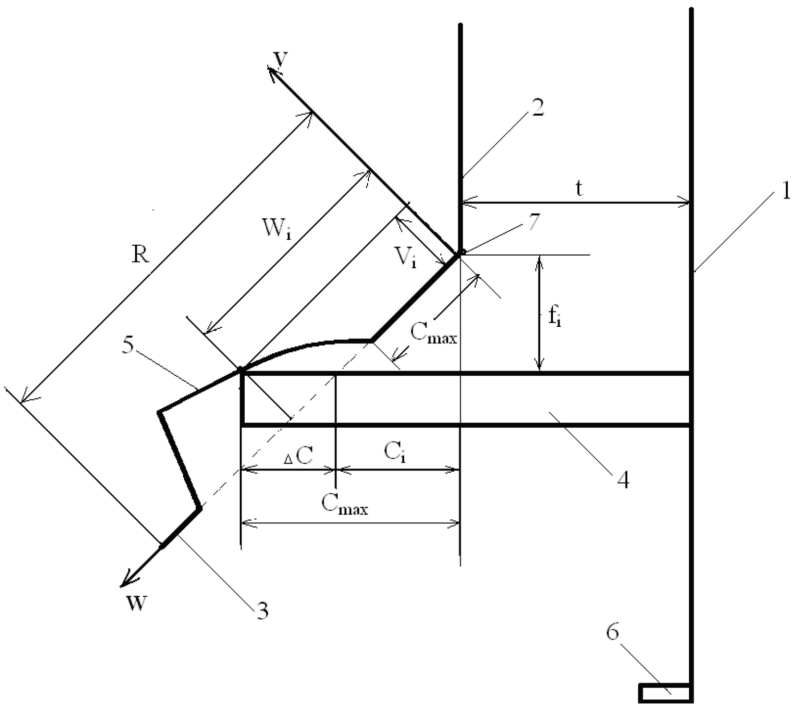


Рисунок 2.35 – Расчетная схема для определения координат шлицевых пазов в перемещающейся пластине: 1 – полотнище плоского затвора; 2 – передняя стенка; 3 – перемещающаяся пластина; 4 – штанга взаимодействия; 5 – шлицевой паз в поворотной пластине; 6 – горизонтальный козырек

В периоды других режимов эксплуатации водозаборных сооружений она извлекается, а в водоприемнике для регулирования подаваемых расходов в отводящий канал будет оставаться плоский затвор. Это упрощение существенно повысит эксплуатационные характеристики операции водоподачи и сократит издержки на очистку проточных коробов стабилизаторов. Поднятие передней стенки стабилизатора для извлечения может производиться при перемещении вверх полотнища плоского затвора за счет нагрузки на штанги взаимодействия.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ ГОРНЫХ РЕК

В практике проектирования, строительства и эксплуатации водозаборных сооружений на горных реках рассматриваются два основных направления исследований с целью совершенствования их конструкций и изучению их свойств: лабораторные и полевые эксперименты [35, 97]. Проводимые исследования подразделяются на активные или пассивные. При этом активным экспериментом является совокупность действий над объектом, в ходе которых исследователь может изменять условия проведения отдельных опытов, а в случае пассивного эксперимента исследователь не изменяет условия его проведения, а только регистрирует их [129].

Лабораторные исследования физических моделей водозаборных сооружений, которые, как правило, являются активными, и в соответствии с существующими методиками исследований [65], делятся на две группы:

- эксперименты для эмпирической проверки определенной гипотезы или теории;
- эксперименты поискового плана, в ходе которых происходит сбор необходимой эмпирической информации для уточнения предложенных вариантов компоновки или конструкций.

Полевые исследования водозаборных сооружений из горных рек, как правило, относятся к пассивным, и являются модификацией лабораторного эксперимента с применением портативной техники, позволяющей проводить отдельные опыты в различных масштабах на натурных объектах.

Как правило, лабораторным исследованиям конструкций водозаборных сооружений, имеющих многофункциональное назначение и состоящих из большого числа элементов, предшествует этап математического моделирования для приближенного описания гидравлических явлений в области отдельных устройств с последующим физическим моделированием в крупных масштабах [35].

При математическом моделировании рассматриваются вопросы математического описания методов управления, прогнозирования и анализа физических процессов, происходящих на натурных объектах ГТС, с их выражением в виде функциональных зависимостей, которые позволяют проникнуть в сущность изучаемых вопросов. Процесс математического моделирования делится на четыре основных этапа [1, 35]:

- формулирование законов, связывающих основные объекты модели;
- исследование математических задач, к которым приводят математическую модель;
- выяснение того, удовлетворяет ли принятая гипотетическая математическая модель критерию практики, то есть выясняют вопрос о том, согласуются ли результаты натурных наблюдений или физического эксперимента с теоретическими выводами и количественными параметрами математической модели в пределах точности наблюдений;
- последующий анализ и модернизация математической модели в связи с накоплением данных об изучаемых явлениях.

Лабораторные гидравлические исследования производятся на физических моделях сооружений с измененными масштабами, которые в случае подобия механических систем позволяют с достаточной достоверностью прогнозировать поведение проектируемого

или совершенствуемого сооружения в натуре и найти рациональные решения, отвечающие условиям надежности и экономичности [35, 88]. Это представляется возможным при надлежащей постановке условий физического моделирования:

- изготовление и испытания объекта с учетом условий механического подобия;
- создание сходных режимов моделирования с режимами эксплуатации натурных объектов.

Лабораторные исследования часто проводятся в рамках проектных мероприятий, в этом случае рассматривается «лабораторное проектирование», при котором в проектах широко используются результаты моделирования и на их основе проектировщики совместно с исследователями находят наиболее приемлемые технические решения [35].

Полевые (натурные) исследования позволяют осуществлять контроль за состоянием разработанных сооружений и устройств в процессе строительства и эксплуатации, проверять правильность проектных решений и точность рекомендаций, разработанных при моделировании [132].

3.1. Основы лабораторных исследований конструкций водозаборных сооружений для горных рек

В лабораторных исследованиях гидравлических явлений особо нуждаются вновь возводимые и реконструируемые водозаборные сооружения, запроектированные с использованием усовершенствованных компоновок [35, 77, 82, 97].

Основой исследований водозаборных сооружений из горных рек обычно является обоснование рациональности проектных решений и определение характеристик взаимовлияния параметров элементов и устройств, входящих в состав сооружений [35, 97]. В ходе лабораторных исследований (рисунок 3.1) по определению рациональных параметров водозаборных сооружений в виде расчетных напоров, глубин, строительной высоты, плановых компоновочных размеров и проверки взаимовлияния конструктивных элементов на гидравлические процессы были проведены поверочные исследования физических моделей на общую пропускную способность сооружений и пропускную способность отдельных элементов.

В качестве основных зависимостей, определяющих связь пропускаемых расходов водного потока и габаритных размеров элементов модели, использовались зависимости для истечения через водослив с тонкой стенкой и с широким порогом, истечения из отверстий, уравнение гидравлического прыжка, установившегося равномерного движения в открытых руслах [120].

Расчеты транспортирующей способности потока проводились с использованием формул для определения расхода наносов, рассмотренных выше.

Особое внимание в ходе исследований уделялось определению рациональных параметров наносозащитных элементов водозаборных сооружений.

Рекомендуемые значения параметров определялись по наименьшему попаданию моделируемых частиц наносов в отводящий канал, при этом использовалась графическая зависимость типа:

$$\frac{L_n}{D_p} = f\left(\frac{\rho_{ok}}{\rho_p}\right), \tag{3.1}$$

где L_n/D_p – относительный габаритный размер исследуемого элемента сооружения: числитель – линейный размер устройства, например, длина; знаменатель – геометрический параметр водного потока перед исследуемым устройством (глубина, ширина) или обоснованный ранее размер сооружения, оказывающий влияние на работу исследуемого элемента;



Рисунок 3.1 – Физическая модель водозаборного сооружения для деривационной ГЭС (ВСДГ)

ρ_{ok}/ρ_p – отношение мутности потока, поступающего через моделируемый элемент в отводящий канал, к мутности потока в подводящем русле модели.

То есть выбор параметров наносозащитных элементов обосновывался по величине минимальной относительной мутности потока в отводящем канале или максимального значения мутности потока сбрасываемого в нижний бьеф сооружения.

При определении рациональных геометрических параметров элементов водозаборных сооружений в ходе лабораторных исследований учитывались следующие условия:

1) при исследовании пропускной способности водоприемных и водосбросных элементов, определялись расчетные напоры над гребнем порога речного пролета, глубина воды в верхнем бьефе сооружения и глубина потока в нижнем бьефе. Нормальные расчетные глубины в верхнем бьефе определялись из условия обеспечения командования над отводящим каналом. Максимальные расчетные глубины в верхнем бьефе и глубины в нижнем бьефе – из условия пропуска в нормальном эксплуатационном режиме (без образования в потоке сбойных зон) руслоформирующих расходов рассматриваемых водотоков;

2) при воспроизведении на физических моделях водозаборных сооружений известных гидрологических режимов горных рек и соответствующих им гидравлических процессов в бьефах гидроузла, параметры испытуемых элементов изменялись относительно геометрических параметров поперечных сечений потока на вышележащих участках, размеры и компоновка которых были обоснованы ранее;

3) в качестве рекомендуемых к проектированию принимались контуры и геометрические параметры водозаборных сооружений, для которых количество наносов, попавших в водоприемник, не превышало рекомендуемого значения в 5 % [160] от массы наносов, закладываемых в начале подводящего русла;

4) в случае попадания в водоприемную камеру количества наносов больше рекомендуемого значения в 5 %, вносились изменения в конструкцию водозаборного сооружения с последующими исследованиями.

Для максимального приближения моделируемых гидравлических процессов к процессам, происходящим в натурных условиях, в ходе исследований проводились следующие мероприятия:

- мутность моделируемого двухфазного потока задавалась равной расчетной мутности натурного потока путем равномерной подачи наносов по ширине потока (при этом использовалсяспециальный дозатор наносов) [35, 97];
- плотность моделируемых твердых включений в двухфазный поток жидкости (вода – наносы, вода – искусственная шуга) принимались равными значениям плотности влекомых наносов, льда и шуги натурных водотоков;

- основной фазе исследований предшествовало формирование отмостки моделируемого подводящего русла при пропуске руслоформирующего расхода с соответствующей мутностью [45];
- габаритные размеры подводящего и отводящего русла модели задавались из условия равенства длины русла величине более 12 максимальных глубин в исследуемом потоке, для исключения движения потока воды по типу истечения через гребень водослива с широким порогом [35];
- призма наносов в подводящем русле и в верхнем бьефе водозаборного сооружения формировалась при внесении в поток расчетного количества сыпучих фракций, соответствующих заданной мутности;
- в ходе исследований по определению рациональных параметров наносозащитных элементов опытные измерения начинались только после равенства веса наносов, закладываемых в подводящее русло, весу наносов, попадающих в нижний бьеф гидроузла и в отводящий канал [35];
- при переформировании уклона дна подводящего русла за счет образования призмы наносов, расчетным для данной серии исследований оставался уклон со значениями, соответствующими руслоформирующему расходу речного потока;
- для продолжения ряда исследований и повышения репрезентативности результатов проводилось изменение уклона дна подводящего русла с помощью специального подъемника модельной русловой установки перед пропуском руслоформирующих расходов воды с расчетными значениями мутности и крупности наносов;
- при исследованиях рабочих характеристик наносозащитных устройств допускалась цементация призмы наносов путем набрызга цементного раствора на сформированную поверхность наносов от начала подводящего русла до входного сечения водозаборного сооружения.

Модельные исследования гидравлических и русловых процессов в бьефах низконапорных плотинных водозаборных сооружений из горных рек проводились при следующих известных режимах эксплуатации:

1) режим формирования отмостки подводящего русла проводился при пропуске руслоформирующего расхода воды, равного $Q_{10\%}$ и более [172], с добавлением наносов, по заданной мутности и с расчетным фракционным составом;

2) пропуск через створ водозаборного сооружения паводковых расходов производился по треугольному моделируемому гидрографу (рисунок 3.2) с нарастанием, а затем с убыванием во времени подаваемых объемов воды и наносов [35, 78];

3) режим эксплуатации водозаборного сооружения в меженный летний период гидрографа моделировался в условиях формирования призмы наносов и при сформированной призме наносов [35];

4) режим эксплуатации водоприемных и наносозащитных элементов сооружений исследовался при максимальном коэффициенте водозабора, равном 0,9–0,95 для плотинных водозаборных сооружений, проверка рациональности результатов эксперимента проводилась при коэффициентах водозабора, соответствующих паводковому режиму эксплуатации [160];

5) режимы зимней эксплуатации осуществлялись при водозаборе из придонных токов и при поверхностном сбросе объемов воды совместно с ледошуговыми включениями в отводящее русло сооружения и, частично, по отводящему каналу [97];

6) режим переформирования призмы наносов в верхнем бьефе сооружения, который происходит при внезапном нарастании величин речных расходов до значений меньше паводковых, воспроизводился в русловом лотке в соответствии с гидрографом исследуемого натурного водотока [160].

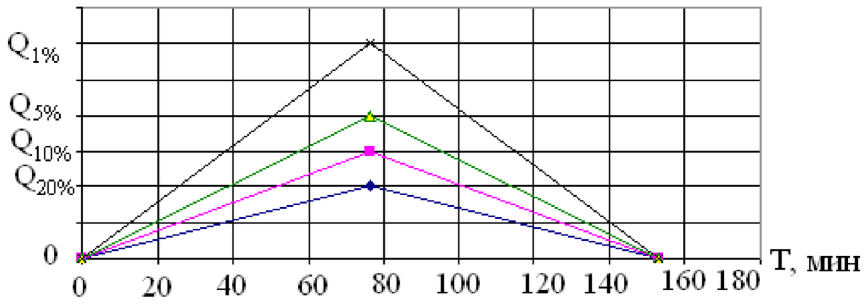


Рисунок 3.2 – Паводковые гидрографы для моделирования участков зарегулированных русел и сооружений водозаборных сооружений

Этот подход к проведению гидравлического моделирования позволил:

- обосновать поэтапное планирование экспериментов по гидравлическому моделированию процессов с составлением детальных заданий на исследования;
- обеспечить на моделях необходимое подобие исследуемых гидравлических и русловых процессов натурным;
- модернизировать исследуемые конструкции сооружений для создания необходимых гидравлических процессов в бьефах сооружений с учетом изменяющихся во времени гидрологических характеристик горных рек.

3.2. Особенности физического моделирования русловых и гидравлических процессов при водозаборе из горно-предгорных участков рек

Основанное на известной теории подобия [181] гидравлическое моделирование позволяет перенести результаты наблюдений на моделях в натурные условия и установить степень влияния основных факторов на развитие того или иного процесса, происходящего в пределах изучаемого гидроузла [35].

В частности, правила моделирования гидравлических явлений, и законы подобия указывают, как должен быть поставлен эксперимент и каким требованиям должна удовлетворять модель, какие величины необходимо измерять в опытах, как следует обрабатывать результаты исследований и на какие явления их можно распространять [45, 46]. Теория подобия предполагает применение ряда признаков и критериев, которые определяют изучаемое явление. Одним из признаков является условие однозначности, которое определяет группу явлений и обстоятельств, влияющих на процесс течения потока. К ним относят [87]:

- геометрические свойства объекта (форма русла, шероховатость, форма основных элементов сооружений и их относительное расположение в русле);
- граничные условия в верхнем и нижнем бьефах водного потока (положение уровней и распределение скоростей потоков);
- начальное состояние гидроузла (поле скоростей, давление и положение свободной поверхности);
- основные характеристики изучаемой среды (плотность, вязкость, наличие в потоке наносов).

Другими признаками являются константы подобия с масштабными коэффициентами, при помощи которых производится пересчет изучаемых величин модели на натуру, они должны быть постоянными для сходственных точек.

В бурных потоках горных рек, находящихся преимущественно под действием сил тяжести, основной характеристикой является критерий гидродинамического подобия в случае преобладающего влияния сил тяжести, т. е. критерий Фруда *Fr = idem,* при этом явления, происходящие на модели и в натуре, должны быть одинаковыми [119, 120, 151, 181].

Физическое моделирование водозаборных сооружений на горных реках, прежде всего, имеет целью разработку рациональных компоновочных схем их устройств, с высокими показателями пропускной способности элементов, защиты водоприемников от наносов, плавника и ледошуговых образований путем изучения гидравлических явлений, происходящих в моделируемых потоках.

В турбулентных потоках закономерности, характеризующие те или иные явления, трудно обнаружить без предварительного уточнения определенных явлений. Например, в бурных потоках горных рек с уклонами дна $i = 0{,}01 \div 0{,}05$ и числами Фруда $Fr > 1$, расширение русла при деформациях дна приводит к некоторому уменьшению глубин и увеличению скоростей воды, а также изменению отношения B/*h* [35, 88, 151].

Результаты исследований и эксплуатации низконапорных водозаборных сооружений свидетельствуют, что в этих условиях требуется активное воздействие на гидравлические структуры устройствами, способными принудительно изменять направления движения отдельных токов жидкости или всех объемов воды для созданий в граничных слоях рационального перераспределения удельных расходов.

При выполнении плавного сопряжения отдельных элементов водозаборных сооружений обеспечивается безотрывность линий токов воды, как в плане, так и по вертикали, что положительно отражается при переводе рациональных гидравлических структур, создаваемых на физических моделях, в натурные условия [35, 151].

При моделировании нами исследовалось влияние отношения B/*h* на значение шероховатости *n*, и соответственно, на подверженность русла деформациям, на подвижность наносов и кинетичность потока, а также влияние изменения числа *Fr* на изменение некоторых гидравлических характеристик: потерь напора Δh, коэффициентов расходов *m*, μ и пропускной способности. Связь указанных положений с более ранними рекомендациями [35] учитывалась при моделировании изучаемых явлений.

Максимально возможный масштаб моделей зарегулированных русел и водозаборных сооружений нами определялся относительно величин расчетных расходов реки $Q_{\text{max.нат}}$, геометрических параметров лабораторной установки и максимально возможной величины подаваемого для моделирования расхода воды $Q_{\text{max.мод}}$. Предварительно максимальный масштаб модели определялся с учетом масштаба моделирования расходов воды по формуле [17]:

$$M'_L = \sqrt[2,5]{\frac{Q_{\text{max.}нат.}}{Q_{\text{max.}мод.}}}, \qquad (3.2)$$

где M^1_L – предварительно определяемый линейный масштаб модели.

Максимальный расчетный расход реки $Q_{max.нат.}$ определялся согласно рекомендациям [157], по которым для сооружений IV класса капитальности расчетная величина расхода реки равна расходу $Q_{5\%}$, при этом поверочным являлся расход $Q_{1\%}$. Рассчитанное значение масштаба M'_L сравнивалось с величиной минимально допустимого масштаба, которая рассчитывалось по зависимости, приведенной ниже.

Затем, с использованием значения M^1_L, рассчитывались длина, ширина и высота модели водозаборного гидроузла для проверки возможности его размещения на лабораторной площадке или в лотке. В случае, если размеры модели оказывались меньше, чем параметры площадки или лотка, принималось значение предварительно определенного масштаба M^1_L. В противном случае масштаб уточнялся исходя из размеров лабораторных установок.

В ходе исследований масштаб моделей исследуемых компоновок водозаборных сооружений определялся с учетом условий и законов подобия гидравлического режима моделируемых потоков [88]:

1. Минимально допустимый масштаб моделей водозаборных сооружений с зарегулированными руслами определялся исходя из условия автомодельности по Рейнольдсу, проверяемой для турбулентных потоков по зависимости [35, 88]:

$$\mathrm{Re}_{кр} < \frac{V_M R_M}{v_M} = \frac{1}{v_H} \cdot V_H R_H \lambda^{3/2}. \qquad (3.3)$$

Для опытных исследований наименьший масштаб моделей при равенстве $v_M = v_H$ определялся по формуле И.И. Леви [88]:

$$\lambda_{мин} = \mathrm{Re}_{кр} \sqrt[3]{V_н^2 R_н^2}, \qquad (3.4)$$

где $V_м$ и $V_н$ – скорость потока на модели и в натуре; $R_м$ и $R_н$ – гидравлический радиус исследуемого модельного и натурного потока; $\lambda = M_L^1$ – геометрический масштаб модели; v_M и v_H – кинематический коэффициент вязкости воды на модели и в натурных условиях; $Re_{кр}$ – критическое число Рейнольдса определялось в зависимости от вида изучаемых процессов.

Для условий моделирования русловых процессов и гидравлических процессов двухфазных потоков (вода – наносы) критическое число Рейнольса принималось согласно рекомендациям Р.К. Кромера [63], равным $Re_{кр}$ =30÷50. При изучении процесса неподтопленного истечения через водосливы с тонкой стенкой $Re_{кр}$ = 3000÷5000 [106], при исследовании прямоугольных отверстий $Re_{кр}$ =200000 [178, 179].

2. Поток в натуре спокойный (*Fr<1*) или бурный (*Fr>1*), таким же он воссоздавался на модели. При моделировании по Фруду *Fr=idem* это условие полностью обеспечивалось [35, 88].

3. Подобие в отношении шероховатости русла должно быть выдержано. Это условие становится особенно важным при моделировании движения двухфазного потока (вода – наносы). Условие обеспечивается за счет подбора материала отмостки (крепления) подводящего русла, геометрически подобного материалу отмостки в натуре, а также подбором материалов для изготовления модели, шероховатость поверхности которых в принятом масштабе соответствует шероховатости натурных материалов сооружения (бетона, металла).

3.3. Моделирование наносного режима в бьефах водозаборных сооружений

3.3.1. Определение гидроморфометрических характеристик моделируемых двухфазных потоков (вода – наносы)

В рамках проекта МНТЦ KR–1130 Ю.С. Якиманским и Г.П. Фроловой [17] был выполнен анализ гидрологических характеристик рек Кыргызской Республики. В результате в качестве репрезентативных для горно-предгорной зоны естественных водотоков были выбраны реки: Сокулук Чуйской области, Джууку Иссык-Кульской области и Кугарт Жалал-Абадской области.

Гидрологические характеристики рек оценивались с целью использования горно-предгорных участков в энергетических целях. При этом были представлены результаты исследований водного режима и мониторинга формирования твердого стока рассматриваемых рек в пределах горно-предгорных участков. С учетом рекомендованных гидроморфометрических характеристик рек Сокулук, Джууку и Кугарт были рассчитаны мутности речных

потоков для максимальных расходов рек 1, 5, 10, 20, 30%-ной обеспеченности и среднемноголетних расходов 50 и 75 %-ной обеспеченности для участков с уклонами от 0,007 до 0,038. При расчетах использовались зависимости для определения гидроморфометрических характеристик, предложенные В.Ф. Талмазой и А.В. Крошкиным [166, 172]. В результате выполненных расчетов рекомендованы зависимости для определения расходов наносов на горных реках Кыргызской республики,приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Расчетные зависимости для определения мутностей двухфазных потоков на горно-предгорных участках малых рек

№ п/п	Уклон дна, i	Расчетная зависимость	Величина достоверности аппроксимации,R^2	Название реки, рассматриваемый участок
1	0,038	$\rho = 1,601\left(\frac{Q_i}{Q_{P.\Phi}}\right)^{0,6453}$	0,9959	Сокулук, конец горного участка
2	0,028	$\rho = 1,2052\left(\frac{Q_i}{Q_{P.\Phi}}\right)^{0,5502}$	0,9925	Сокулук, начало предгорного участка
3	0,024	$\rho = 1.296\left(\frac{Q_i}{Q_{P.\Phi}}\right)^{0,6347}$	0,9976	Джууку, конец горного участка
4	0,017	$\rho = 0.9547\left(\frac{Q_i}{Q_{P.\Phi}}\right)^{0,5998}$	0,9976	Джууку, начало предгорного участка
5	0,012	$\rho = 3.6131\left(\frac{Q_i}{Q_{P.\Phi}}\right)^{0,6738}$	0,9992	Кугарт, конец горного участка
6	0,007	$\rho = 2.1935\left(\frac{Q_i}{Q_{P.\Phi}}\right)^{0,5988}$	0,9817	Кугарт, начало предгорного участка

3.3.2. Определение минимального диаметра частиц наносов из условия автомодельности

Используя известные рекомендации [88], сделанные при анализе характеристик речных наносов, можно сделать вывод, что при физическом моделировании русловых процессов и наносных режимов в бьефах водозаборных сооружений, устраиваемых на горных реках с применением частиц d<1,5 мм, необходимо учитывать изменение области обтекания (переходная область). Это, как свидетельствуют исследования В.С. Кнороза, может учитываться введением дополнительного критерия подобия Re_d, который зависит от крупности и плотности русловых отложений.

Подбор материала русла должен производиться с учетом этого критерия.

В натурных русловых потоках горно-предгорных участков рек дно имеет грядовую структуру, что ведет к повышению турбулентности, при этом границы автомодельной области относительно частиц влекомых наносов, соответствуют значениям $Re_{d\text{гр}} = 60 \div 75$ [88, 120].

Для получения на модели режима течения и движения наносов, подобных натурным условиям необходимо, чтобы $Re_{d\text{м}} \geq Re_{d\text{гр}}$ [88].

В зависимости от состояния деформируемого русла модели величина $Re_{dм}$ (число Рейнольдса) при турбулентном режиме обтекания частиц наносов изменяется в пределах от 60 до 300, определяется по формуле [88]:

$$\mathrm{Re}_{dм} = \frac{d_м \sqrt{\rho^1_м g d_м}}{\upsilon}, \tag{3.5}$$

где υ – коэффициент кинематической вязкости воды [83].

Устанавливая минимально допустимый масштаб крупности частиц наносов, применяемых на модели из условия автомодельности, нами было сопоставлено значение Re_d на модели и в натуре по формуле, предложенной И.И. Леви [88]:

$$\alpha_d \geq \frac{1}{\sqrt[3]{\alpha_{\rho^1}}} \left(\frac{\mathrm{Re}_{dн}}{\mathrm{Re}_{dгр}} \right)^{\frac{2}{3}}, \tag{3.6}$$

где α_d – масштаб моделирования, при равенстве $\alpha_l = \alpha_h : \alpha_d = \alpha_h = \lambda$.

Рассматривая смесь моделируемых наносов без изменения плотности материала, уравнение (3.6) приводится к виду:

$$\alpha_d = \left(\frac{\mathrm{Re}_{dн}}{\mathrm{Re}_{dгр}} \right)^{\frac{2}{3}}, \tag{3.7}$$

где $Re_{dн}$ – число Рейнольдса для натурных частиц наносов, определяется по формуле [88]:

$$\mathrm{Re}_{dн} = \frac{d_н \sqrt{\rho^1_н g d_н}}{\upsilon}, \tag{3.8}$$

где $\rho^1_н$ – относительная плотность частиц наносов $\rho^1_н = (\rho_н - \rho)/\rho = 1.65$ [86].

Учитывая вид уравнения (3.8) и выражение (3.6), может быть определен минимальный диаметр натурных наносов (м), для которых сохраняется геометрическое подобие при пересчете с натуры на физическую модель:

$$d_н = \alpha_d \sqrt[3]{\frac{\mathrm{Re}^2_{dгр}\,\upsilon^2}{\rho^1_н \mathrm{g}}}. \tag{3.9}$$

При использовании на моделях частиц рассчитанного минимального диаметра отсутствуют силы сцепления между частицами мелких наносов, что свидетельствует о выполнении условия автомодельности [88]. Как свидетельствуют исследования Б.И. Мельникова [117, 120], выполнение геометрического, кинематического подобия обеспечивается в случаях, когда наносы с размерами частиц больше и равных минимальному диаметру, составляют более 83 % по весу.

Использование такой методики моделирования донных наносов со средним удельным весом γ = 2,65 т/м^3, позволило получить устойчивые уклоны дна подводящих русел моделей водозаборных гидроузлов для принятых расходов воды, а также обеспечило свободное перемещение наносов по руслу при заданных насыщениях потока фракциями наносов.

3.4. Методика оценки русловых деформаций

В ходе исследования деформаций размываемого дна на участке моделируемого криволинейного подводящего русла водозаборного гидроузла нами производилось сравнение результатов физического моделирования с результатами расчетов путем построения попе-

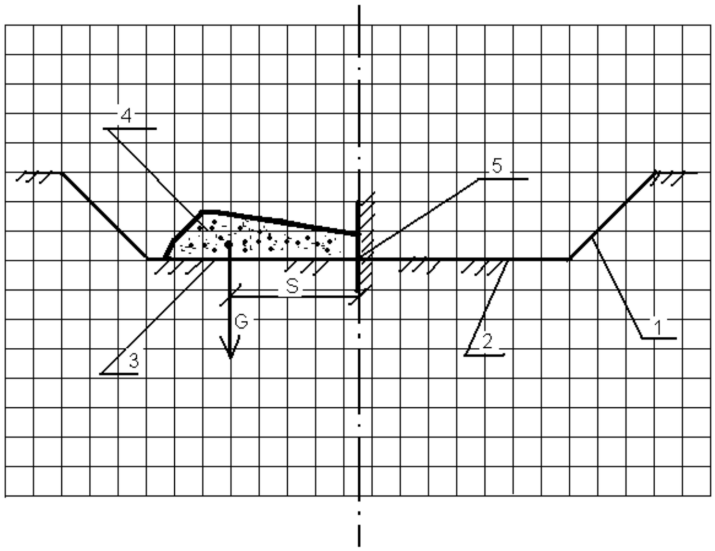


Рисунок 3.3 – Расчетная схема для определения виртуального крутящего момента при оценке русловых деформаций: 1 – поперечное сечение; 2 – средневзвешенное дно; 3 – виртуальная консоль; 4 – поперечное сечение призмы наносов; 5 – точка стеснения консоли; G – равнодействующая нагрузка от веса призмы наносов; S – плечо действия нагрузки

речных профилей потока при различных углах поворота трассы водовода. При этом в качестве исходных использовалась система уравнений (2.36).

Сравнение производилось путем наложения поперечных сечений русла, полученных экспериментальным и расчетным способом. Оценка разности результатов велась по методике, предложенной нами ранее [80] для оценки эффективности конструкций береговых шпор, устраиваемых для привлечения наносов в зону карьера сыпучих материалов.

Производство исследований по определению количественных характеристик русловых деформаций осуществлялось с изменением уклонов подводящего русла и величин паводковых расходов воды.

По этой методике возможность применения предложенных математических моделей оценивалась по величине максимального виртуального крутящего момента, складывающегося от действия массы поперечного элемента призмы наносов определенной ширины, на виртуальную горизонтальную консоль [80]. При этом консоль намечалась на уровне средневзвешенного дна русла и условно была зажата в расчетной точке на вертикальной поверхности, совпадающей с динамической осью потока (продольной осью зарегулированного русла) (рисунок 3.3).

По этой методике вначале предполагается определение в половине поперечных сечениях площадей призм наносов и воронок размыва относительно горизонтальной линии, соответствующей отметке средневзвешенного дна, с определением центра тяжести полученной фигуры.

Затем рассчитывается величина виртуального крутящего момента $M_{кр}$, которая впоследствии учитывается при сравнении результатов расчетов и измерений по формуле:

$$M_{кр} = \rho(\pm\omega)BS, \qquad (3.10)$$

где ρ – плотность наносов в сухом состоянии; ω – площадь призмы наносов или воронки размыва на рассматриваемом участке (положительная величина соответствует призме наносов, отрицательная воронке размыва); B – средняя длина призмы наносов на рассматриваемом участке; S – плечо равнодействующей силы G.

Далее определяется величина разности значений крутящих моментов, полученных в результате расчетов и исследований:

$$\Delta M = M_{кр.Р} - M_{кр.ЭИ}, \quad (3.11)$$

где $M_{кр.Р}$, $M_{кр.ЭИ}$ – значение крутящего момента, рассчитанного по результатам расчетов лабораторных исследований соответственно.

Разность значений крутящих моментов ΔМ используется в статистических расчетах для определения коэффициентов, корректирующих уравнения, которые используются для теоретического определения русловых деформаций на участке криволинейных зарегулированных русел.

Такая методика позволяет дать оценку относительному размещению русловых деформаций, полученных в результате расчетов и физического моделирования. Это и определило разработку более точной методики расчета деформаций дна зарегулированных русел на криволинейных участках.

3.5. Методика исследований зимнего режима эксплуатации водозаборных сооружений

В Кыргызской Республике из общего числа естественных водотоков для целей гидроэнергетики могут быть использованы не более 180 рек. Поскольку строительство стационарных ГЭС на реках со среднезимним расходом воды менее 0,25 м^3/св большинстве случаев является нерациональным [168].

Это ограничение продиктовано сложным зимним режимом малых горных рек, который изучен недостаточно. Выполненные ранее исследования зимних режимов горных рек Кыргызстана сводились лишь к фиксированию наличия ледовых явлений в створе гидропостов без их количественной оценки [35, 162]. Тогда как количественная оценка ледовых явлений рек сводилась к определению расхода ледошуговых образований, коэффициентов шугонасыщения потока. Эти данные устанавливались замерами расхода шуги или статистически по данным гидрологических наблюдений за многолетний период [35].

Образование шуги приводилик закупорке решеток водоприемников и к образованию заторов и зажоров в деривационном канале. При этом необходимо учитывать предельно допустимое количество шуги в напорном водоводе ГЭС, которое не должно превышать 15–20 % объема воды, подаваемой на турбины. При превышении критического количества шуги в отсасывающие трубы низконапорных ГЭС возникает опасность обмерзания внутренних стенок отсасывающих труб вследствие процесса режеляции [135].

При моделировании зимнего режима эксплуатации водозаборных сооружений с оценкой работоспособности устройств для защиты от ледошуговых образований водоприемников и шугосбросов, производилось добавление в поток искусственной ледошуговой массы. Искусственная шуга закладывалась в начале подводящего русла модели водозаборного сооружения, в процентах от объема воды. Количественные характеристики моделируемой шуговой массы определялись с учетом ранее выполненных нами исследований зимнего гидрологического режима рек Аламедин и Ала-Арча [97].

При моделировании двухфазного потока (вода – шуга) использовалась методика, рекомендованная А.Б. Векслером и З.А. Генкиным [29] по определению масштабного коэффициента при гидравлических исследованиях движения льда в жидкости, которая была переработана А.В. Шипиловым [178] для моделей частиц шуги.

В этой методике при моделировании по критерию Фруда в формулу пересчета размеров частиц шуги с натуры на модель вводился коэффициент *K*.

$$d_н / d_м = \alpha_l K, \quad (3.10)$$

где $d_м$, $d_н$ – диаметр частиц на модели и в натуре; α_l – геометрический масштаб моделирования; K – масштабный коэффициент.

Необходимость применения масштабного коэффициента определяется появлением сопротивлений при обтекании частиц шуги при движении вдоль русла и одновременном перемещении по вертикали. Масштабный коэффициент подбирается с условием обеспечения кинематического подобия гидравлической крупности шуги на модели и в натуре:

$$v / w = idem, \tag{3.11}$$

где v – скорость движения потока; w – гидравлическая крупность частиц.

При этом масштабный коэффициент определяется по формуле [178]:

$$K = \frac{\rho'_н}{\rho'_м}\frac{C_{Sм}}{C_{Sн}}, \tag{3.12}$$

где ρ' – относительная плотность шуги на модели и в натуре; C_S – коэффициент гидравлического сопротивления частиц на модели и в натуре [29, 178]:

$$C_S = 2\frac{V}{S_d}\rho'\frac{g}{w^2}, \tag{3.13}$$

где V и S_d – объем и миделево сечение частицы соответственно.

Плотность частиц натурной шуги принималась равной $\rho_{шуги}$ = 950÷971 кг/м^3 [178]. Используемые для моделирования частицы шуги были изготовлены из полиэтилена низкого давления с плотностью 960 кг/м^3, что соответствует пределам плотности натурных частиц. Модельные частицы представляли собой цилиндры диаметром 2,7 и высотой 3,3 мм. Коэффициент формы модельных частиц определялся формуле В.К. Дебольского [181]:

$$\Theta = (d / (b \times c))^{4/5}, \tag{3.14}$$

где – диаметр равновеликого шара

$$d = \sqrt[3]{a \times b \times c}, \tag{3.15}$$

a, b, c – длина, ширина и высота частицы.

При указанных размерах цилиндрических моделей частиц шуги коэффициент формы частиц составил 1,05. Для частиц шарообразной формы коэффициент Θ = 1. С учетом этого форма частиц нами условно была принята шарообразной, а диаметр шара определялся по формуле [181]:

$$d = \sqrt[3]{\frac{3}{2}\cdot d_ч^{\,2}\cdot h_ч}, \tag{3.16}$$

где $d_ч$ и $h_ч$ – диаметр и высота частиц.

Пересчет приведенного диаметра частиц с модели на натуру производился по формуле (3.10) согласно описанной методике. При этом диаметр модельных частиц 3,53 мм на модели, выполненной в масштабе 1:20 соответствовал диаметру 44 мм натурных шуговых комьев.

Основным показателем, характеризующим работу устройств для защиты водоприемников от ледошуговых образований и шугосбросов, конструкции которых исследовались нами на моделях водозаборных сооружений в ходе обработки результатов, был коэффициент шугонасыщения [39]:

$$\lambda_ш = W_ш / (W_в - W_ш), \tag{3.17}$$

где $W_ш$ – объем шуги, попавшей в отводящий канал или сброшенной через шугосброс; $W_в$ – объем воды, транспортирующей моделируемую шугу или израсходованный для сброса рассматриваемого объема шуги $W_ш$.

По величинам коэффициентов шугонасыщения оценивалась рациональность принятых компоновочных и конструктивных решений проблем защиты водоприемных оголовков от ледошуговых образований, и их транспорт в нижний бьеф водозаборных сооружений.

3.6. Методика исследований характеристик ледошуговых образований на горных реках

С целью изучения зимнего гидрологического режима рек Кыргызстана зимой 2001–2002 гг. нами был выполнен ряд исследований по определению и изучению количественных характеристик ледошуговых образований двух рек Чуйской долины – р. Аламедин и р. Ала-Арча. В зимний период 2010–2011 гг., 2013–2014 гг. исследовались гидрологические характеристики реки Иссык-Ата.

Реки Аламедин и Ала-Арча относятся к ледниково-снеговому типу питания. В таблице 3.2 приводятся их гидрологические характеристики [61, 62].

Таблица 3.2 – Гидрологические характеристики рек Аламедин и Ала-Арча

Река	Период наблюдения, годы	Площадь водосбора, км	Средний уклон русла	Многолетние ср. расходы, м³/с			Наблюд. экстр. расходы, м³/с		Модуль стока л/с с 1 км²	Продолжительность ледовых явлений, сут.	
				зимний	летний	годовой	мах	min		лед	шуга
Аламедин	54	317	0,025	1,67	12	6,38	70	0,5	20	-	25
Ала-Арча	48	233	0,02	1,38	7,6	4,17	46,7	0,9	18,8	96	68

Перед началом исследований был сформулирован их состав и порядок проведения [97]:

1. Определение и выбор места проведения исследований, изучение структуры потока вверх по течению реки.
2. Разработка методологии определения расхода шуги.
3. Измерение расходов воды и шуги.
4. Определение влияния колебаний температуры воздуха и воды на расход шуги.
5. Изучение закономерности распределения шуговой массы по глубине водного потока.

При выборе места выполнения измерений соблюдались следующие условия:

- река на участке исследований имеет прямолинейный профиль русла;
- поперечное сечение русла реки имеет правильную форму для удобства измерения расходов воды гидрометрической вертушкой;
- наличие моста, соединяющего оба берега, с перпендикулярным размещением поверхностного полотна моста относительно динамической оси потока в реке.

Этим условиям удовлетворяют существующие стандартные речные гидропосты, предназначенные для изучения гидрологического режима упомянутых рек.

В связи с тем, что в имеющейся литературе не было найдено метода натурного определения расходов шуги в естественных руслах горных рек, нами была разработана методика исследований, которая основывалась на количественном соотношении объема транспортируемой потоком шуги и объема самого потока воды, характеризуемого зависимостью [35, 97]:

$$m_{ср} = \frac{W_ш}{W_в}, \qquad (3.18)$$

где $m_{ср}$ – коэффициент содержания шуги в потоке; $W_{ш}$ – объем шуги, замеренный инструментально специальным шугомером, (л); $W_{в}$ – объем воды, прошедший через шугомер вместе с объемом шуги $W_{ш}$ (л).

Сделав допущение, что скорость перемещения шуги по руслу реки равна поверхностной скорости водного потока (как у гидрометрических поплавков) [97], расход шуги определяли по формуле:

$$Q_{ш} = m_{ср} Q_{р}, \quad (3.19)$$

где $Q_{ш}$ – расход шуги, м^3/с; $Q_{р}$ – расход воды в реке, м^3/с.

Расход реки $Q_{р}$ в натурных условиях определялся по скоростям, измеренным гидрометрической вертушкой, и по глубинам потока. Объем шуги $W_{ш}$ измерялся с помощью шугобатометра (рисунок 3.4) [97], конструкция которого была разработана нами, исходя из условий более точного определения соотношения объема шуги к объему транспортирующего потока. Суровые условия зимнего климата горно-предгорных районов Кыргызстана учитывались путем применения в конструкции минимального количества металлических изделий.

Шугобатометр был выполнен в виде цилиндра из гибкой оболочки (кожзаменителя), который зафиксирован между двух металлических деталей инструмента – кольца и диска.

Для измерения расхода шуги в потоке реки шугобатометр вертикально опускается в водный поток за подъемную штангу 4. При этом шугобатометр собирается таким образом, чтобы верхнее кольцо входного сечения инструмента 3 размещалось поверх диска грузила 2. Цилиндр шугобатометра складывается по типу гармошки. Боковые стенки из кожзаменителя из-за своей гибкости не создают этому особых сопротивлений. Сборка инструмента производится натяжением троса 5. При вертикальном поднятии шугобатометра за подъемную штангу 4, трос управления 5 полностью ослабляется для отрыва входного кольца 3 от грузила 2.

В результате поступательного движения вверх входного кольца внутренняя емкость инструмента постепенно заполняется водой и шугой. При извлечении входного кольца 3 над водной поверхностью дальнейший подъем шугобатометра необходимо осуществлять более плавно для определения по градуировочной шкале подъемной штанги 4 глубины потока H_{0}.

Высота шугобатометра в развернутом виде, как показали поисковые исследования [20], должна быть больше глубины речного потока $H_{р}$ не менее чем на 10 %. При этом проба шугосодержания берется по всей глубине потока.

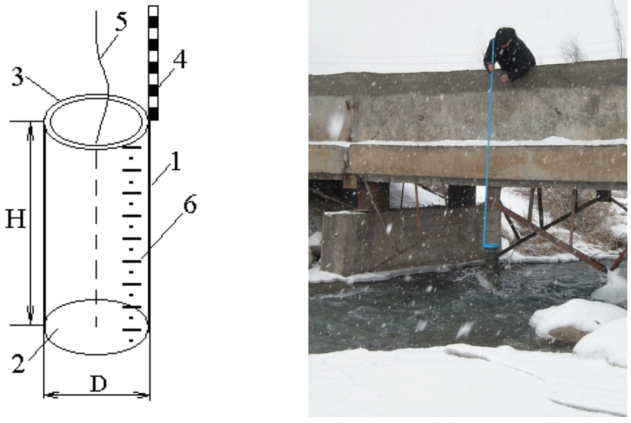


Рисунок 3.4 – Схема устройства шугобатометра: 1 – кожзаменитель, выполняющий роль боковых гибких стенок; 2 – металлический диск служит грузилом и дном шугобатометра; 3 – металлическое кольцо предназначено для создания круглого контура шугобатометра и является входным сечением инструмента; 4 – подъемная штанга; 5 – трос управления; 6 – градуировочная шкала инструмента выполнена на внешней поверхности инструмента из круглых металлических колец, жесткозакрепленных на внешней поверхности гибких стенок; D – диаметр инструмента

Извлеченная масса шуги фильтруется, для этого гибкая оболочка перфорирована отверстиями d = 2 мм (эта величина была определена на основании предварительного отлова и измерения наиболее мелких частиц шуги на горно-предгорных участках изучаемых рек, их размер был более 2,5 мм), объем твердого остатка шуги измеряется мерным сосудом. Коэффициент пористости шуги определяли объемным методом. При этом проба шуги в мерном сосуде заливалась речной водой, объем которой измерялся также мерным сосудом. Для устранения эффекта всплывания шуги при измерении пористости использовали сетчатый фильтр, накладываемый наверх исследуемой шуговой массы.

Объем воды в шугобатометре определяли по зависимости:

$$W_в = W_и - k_{п.ш} W_ш , \tag{3.20}$$

где $W_и$ – объем инструмента, занятый водной и шуговой массой, (л) определяется по формуле:

$$W_и = \frac{\pi D^2}{4} H_р , \tag{3.21}$$

где D – диаметр цилиндрического входного сечения шугобатометра, (дм); $H_р$ – глубина водного потока в реке (дм); $W_ш$ – объем шуги в шугобатометре без учета пор (л); $k_{п.ш}$ – коэффициент пористости шуги, определялся по формуле:

$$k_{п.ш} = \frac{(W_ш - w'_ш)}{W_ш}, \tag{3.22}$$

где $w'_в$ – объем воды в мерном сосуде после измерения пористости.

Устройство «Шугобатометр» было проверено в ПКТИ «Водавтоматика и метрология» и имеет свидетельство о метрологической аттестации.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ ИЗ ГОРНЫХ РЕК

4.1. Результаты исследований гидравлических характеристик наносозащитных элементов водозаборных сооружений

Анализ известных разработок в области организации водозабора из горных рек [134, 170] показал, что наносозащитные пороги являются основополагающими элементами компоновок низконапорных водозаборных сооружений. Период после разработки донных порогов в качестве ступени наносозащиты отмечен интенсивным ростом освоения горно-предгорных участков малых горных рек. Рациональность их параметров во многом определила в целом работоспособность головных сооружений гидроэнергетических и ирригационных систем.

Теоретические и лабораторные исследования различных компоновок водозаборных сооружений по определению характеристик гидравлических и русловых процессов при водозаборе из горных рек позволили нам разработать ломаные в плане наносозащитные пороги [72, 76]. Основной целью при этом являлось определение параметров порогов, служащих для защиты от наносов водоприемников сооружений, в зависимости от местных морфометрических и гидрологических характеристик рек. В последующем это позволило нам рекомендовать ломаные в плане пороги для осуществления водозабора на участках водотоков с уклонами дна i_p от 0,007 до 0,038.

В ходе экспериментов было исследовано влияние плановых и высотных параметров наносозащитных порогов на характеристики продольного гидравлического вальца, обеспечивающего проведение активной наносозащиты. Эти исследования проводились в четыре этапа:

- на первом этапе были определены рациональные величины угла размещения начальной секции порога α относительно динамической оси потока в подводящем русле;
- второй этап был связан с определением рационального отношения длины начальной α и средней секции порога в;
- на третьем этапе исследовался вопрос необходимости устройства концевого участка ломаного в плане наносозащитного порога с противоположной направленностью относительно направления начального и среднего участка порога;
- четвертый этап исследований был посвящен определению рациональной высоты секций четырехсекционного наносозащитного порога.

4.1.1. Исследования характеристики трехсекционных ломаных в плане порогов

В ходе исследований высотные параметры начальной секции порога определялись с учетом известных рекомендаций Б.И. Мельникова [120] и И.К. Рудакова [151], сделанных для выпуклых в плане криволинейных наносозащитных порогов. При этом высота начальной секции наносозащитного порога в конце (P_2) определялась по формуле [150]:

$$P_2 = (0{,}5 \div 0{,}6)H_P, \qquad (4.1)$$

высота секции порога в начале (P_1):

$$P_1 = P_2 + i_c a\,, \tag{4.2}$$

где $H_р$ – расчетная глубина в верхнем бьефе порога; i_c – уклон гребня секции принимался согласно рекомендациям [120, 151], равным на модели 0,07; a – длина секции порога.

Длина начальной секции трехсекционного порога a определялась по зависимости (2.52), расчетный напор $H_р$ в верхнем бьефе секции порога принимался равным высоте начала секции порога P_1 [97].

Качество наносозащиты начальной секции ломаного в плане наносозащитного порога оценивалось отношением веса наносов, попавших в отводящий канал к весу наносов, подаваемых в подводящий лоток $G_{от} / G_р$, выраженным в процентах, в зависимости от угла α при различных уклонах дна лотка $i_р$.

Модельные исследования проводились при расходах в подводящем лотке, соответствующих пропускной способности секции наносозащитного порога при расчетном напоре в верхнем бьефе $H_р$. Коэффициент водозабора изменялся в пределах 0,89÷0,91.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что рациональные значения угла α, характеризуемые отношениями $G_{от} / G_р$, находятся в прямой зависимости от уклона дна подводящего русла $i_р$ и могут быть рассчитаны по зависимости:

$$\alpha = -4529,3 i_P^2 + 612,74 i_P + 18,363\,. \tag{4.3}$$

Функция аппроксимирована методом наименьших квадратов в виде полинома при тесноте связи r = 0,9953 и может быть использована в расчетах при уклонах дна подводящих русел $i_р$ от 0,007 до 0,038.

На основании анализа ранее выполненных исследований средств наносозащиты низконапорных водозаборных сооружений [119] и в ходе выполнения поисковых экспериментов [92, 100], было установлено, что концевой участок порога, контактирующий с промывным трактом, необходимо располагать параллельно направлению основного потока в подводящем русле (рисунок 4.1).

Такое размещение способствует созданию пониженного давления в придонной области потока в зоне отверстия промывного тракта с целью привлечения наносов.

В исследуемой компоновке водозаборного сооружения концевая секция ломаного в плане наносозащитного порога с пониженным промежуточным устоем образует промывной тракт, характеристики которого обеспечивают осуществление эффективной наносозащиты [72].

Ранее подобный принцип концентрации пониженного давления в промывном тракте был использован Б.И. Мельниковым на водозаборных сооружениях, оборудованных криволинейными наносозащитными порогами с выпуклостью в сторону верхнего бьефа [27]. При этом криволинейный порог и разделительная стенка как элементы, образующие промывной тракт, выполнялись изогнутыми в плане с выпуклостью в сторону подводящего русла. Это гарантировало организацию необходимой наносозащиты при высоких коэффициентах водозабора. Но кривизна конструкций при прохождении паводковых расходов через речной пролет сооружения вызывает образование вертикальных завихрений потока, которые завлекают наносы в водоприемную камеру.

Размещение концевой секции порога и промежуточного устоя сооружения с поверхностями, параллельными динамической оси потока, позволило предотвратить возникновение вертикально направленных вихревых струй воды, поднимающих влекомые наносы выше гребня наносозащитного порога.

На участке промывного тракта длину разделительной стенки $L_{р.с}$ рекомендовалось определять по зависимости [120, 119]:

$$L_{р.с} = (1,0 \div 1,2) H_P\,, \tag{4.4}$$

где $H_р$ – расчетная глубина воды в верхнем бьефе сооружения.

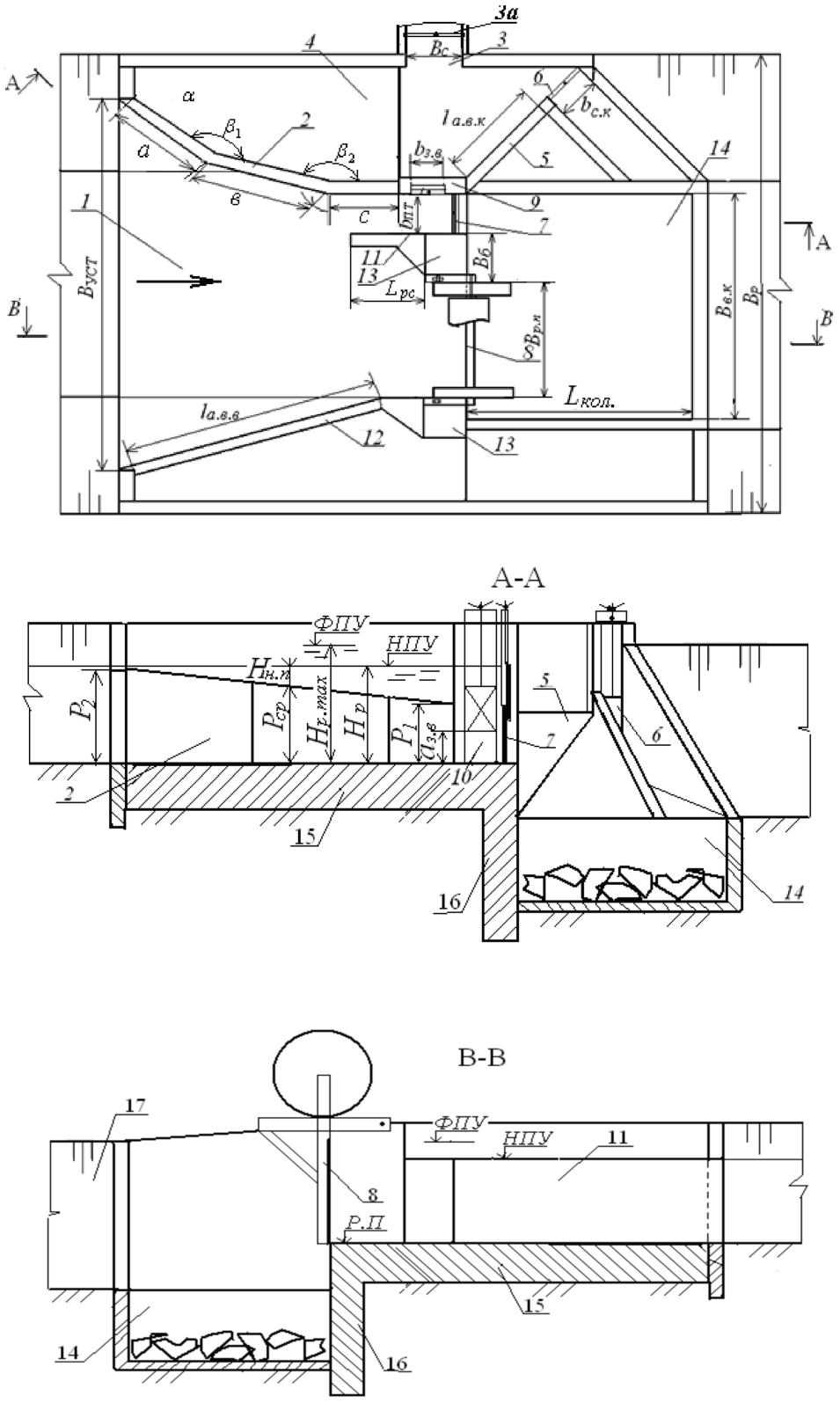


Рисунок 4.1 – Схема модели ВСДГ: 1 – верхний бьеф; 2 – наносозащитный порог; 3 – водоприемник; 3а – регулятор расхода отводящего канала; 4 – водоприемная камера; 5, 12 – автоводослив; 6 – сбросное отверстие; 7 – сдвоенный затвор промывника; 8 – затвор речного пролета; 9 – разделительная стенка; 10 – затвор зимнего водозабора; 11 – промывной тракт; 13 – быки; 14 – водобойный колодец; 15 – понур; 16 – зуб флютбета; 17 – отводящее русло

С учетом сказанноговыше, длина концевой секции *c* ломаного в плане наносозащитного порога была нами принята равной [97]:

$$c = 1,0 \times H_P . \tag{4.5}$$

Ограничения в высоте порога на начальном и концевом участке относительно расчетной глубины в верхнем бьефе сооружения уменьшают пропускную способность при составлении конструкции из двух секций *а* и *с*. Это определяет необходимость ввода в компоновку промежуточной секции в, которая показана на рисунке 4.1 [92, 97].

Для дальнейшего проведения исследований по определению рациональной длины средней секции порога предварительно задались условием равенства углов тупых $\beta_1 = \beta_2$ между секциями (см. рисунок 4.1) [97].

Ввиду сложности движения и взаимодействия двухфазного потока с внешней поверхностью ломаных в плане наносозащитных порогов, получить теоретически оптимальное соотношение длин секций порога весьма затруднительно. Поэтому параметры секций порога и их оптимальные соотношения определялись экспериментально путем проведения модельных исследований. При этом общая длина ломаного в плане трехсекционного наносозащитного порога определялась по формуле неподтопленного водослива с тонкой стенкой [97, 120, 153, 190]:

$$L_{нп} = \frac{Q_{в.к}}{m_n \sqrt{2g} H_{н.п}^{3/2}} = a + в + c , \tag{4.6}$$

где $Q_{в.к}$ – расход, поступающий в водоприемную камеру (при моделировании составлял примерно 90% от расхода, подаваемого на модель подводящего русла); m_n – коэффициент расхода ломаного в плане наносозащитного порога [97]; $H_{н.п}$ – напор воды над средней частью порога.

Качество работы ломаного в плане наносозащитного порога оценивалось соотношением веса наносов, попавших в отводящий канал модели, к весу наносов, поступивших по подводящему руслу $G_{от} / G_р$.

В ходе определения рационального отношения длины средней секции (в) ломаного в плане наносозащитного порога к длине начальной секции (а) в зависимости от уклона дна подводящего русла было установлено:

- при уклоне дна подводящего русла $i_р$ = 0,007, рациональное отношение в/а находится в пределах от 0,5 до 1,0;
- при уклоне дна подводящего русла, изменяющихся в пределах от 0,012 до 0,024, рациональное отношение в/а находится в пределах от 1,0 до 1,5;
- при уклоне дна подводящего русла, изменяющихся в пределах от 0,028 до 0,038, рациональное отношение в/а равно 1,0;
- максимальная мутность водного потока в отводящем канале наблюдалась в опытах при отсутствии средней секции ломаного в плане порога.

4.1.2. Водопропускная способность ломаных в плане трехсекционных наносозащитных порогов

Поскольку наносозащитные пороги на низконапорных водозаборных сооружениях являются водоприемными элементами первого порядка, их пропускная способность, наряду с габаритными размерами, определяет расчетную глубину воды в верхнем бьефе. Поэтому после определения рациональных параметров трехсекционных ломаных в плане наносозащитных порогов были проведены исследования их гидравлических характеристик.

При эксплуатации водозаборных сооружений, состоящих из множества водосбросных и водоприемных элементов, возникает сложность в точном определении пропускной способности отдельных устройств по причине взаимовлияния гидравлических процессов,

происходящих в верхнем бьефе. Теоретически решение этого вопроса представляется достаточно сложным. Поэтому пропускная способность отдельных элементов водозаборных сооружений из горных рек определялась экспериментально при введении в работу отдельных звеньев. То есть при определении пропускной способности ломаного в плане наносозащитного порога влияние на истечение через порог истечения из-под плоского затвора промывника и из-под прислонного затвора-автомата уровня верхнего бьефа учитывалось на пространственной модели водозаборного сооружения (см. рисунок 4.1).

Анализ существующих зависимостей, используемых для расчета пропускной способности порогов [163, 181], свидетельствует, что основными факторами, определяющими величину коэффициентов расхода воды неподтопленных водосливов, являются:

- напор над гребнем порога Н;
- поперечные геометрические параметры (для вертикальных водосливов прямоугольного очертания ширина гребня водослива С);
- высота порога со стороны верхнего бьефа P_1;
- скоростной напор в верхнем бьефе $\alpha v_{ВБ}^2 / 2g$;
- угол размещения донных порогов относительно динамической оси потока в подводящем русле α.

Проведя ряд поисковых исследований типов истечений через трехсекционный ломаный в плане наносозащитный порог, было установлено, что при наличии уклонного гребня, схема истечения потока воды по длине изменяется от водослива с широким порогом в начале до водослива с тонкой стенкой в конце [75]. Это условие позволяет в качестве определяющего фактора при исследовании характера зависимости коэффициента расхода ломаных в плане порогов считать отношение напора над гребнем к ширине поперечного сечения (толщине) порога $m_{н.п} = f(H_{н.п} / C_п)$ [75]. Следует отметить, что относительная величина $H_{н.п} / C_п$ обычно используется в качестве основной характеристики при классификации водосливов.

Высота наносозащитного порога со стороны верхнего бьефа, скоростной напор в подводящем русле и угол размещения секций ломаного в плане наносозащитного порога изменялись в ходе исследований в зависимости от создаваемого гидрологического режима на модели. При этом на исследуемые гидравлические процессы влияла и высота призмы наносов, формируемая путем подачи на модель сыпучих фракций.

Расчетный напор над наклонным гребнем ломаного в плане наносозащитного порога определялся с учетом ранее обоснованной методики по формуле [35, 97, 172]:

$$H_{нп} = H_{р.i} - P_{ср}, \tag{4.7}$$

где $P_{ср}$ – высота порога в средней его части, которая определяется по формуле:

$$P_{ср} = \frac{P_1 + P_2}{2}. \tag{4.8}$$

$H_{р.i}$ – изменяемая величина глубины воды в верхнем бьефе модели водозаборного сооружения без учета высоты призмы наносов.

При проектировании водозаборных сооружений усовершенствованного Тяньшанского типа, основными параметрами, определяющими вертикальные габаритные размеры их элементов, являются расчетная глубина $H_р$ и максимальная расчетная глубина $H_{р.max}$ верхнего бьефа [172].

Величина расчетного напора $H_р$ определяется условиями командования над отводящим каналом и вертикальными размерами наносозащитного порога. Основной формулой для определения расчетной глубины в верхнем бьефе водозаборного сооружения перед наносозащитным порогом с учетом расчетной схемы (см. рисунок 4.1) является зависимость [35]:

$$H_р = P_{ср} + H_{н.п}, \tag{4.9}$$

где $P_{ср}$ – высота наносозащитного порога в средней части его длины, определяется с учетом зависимостей (4.1), (4.2) и (4,8); $Н_{н.п}$ – напор над средним сечением ломаного в плане наносозащитного порога.

В ходе исследований минимальное значение напора над гребнем трехсекционного ломаного в плане порога $Н_{н.п}$ определялось по формуле:

$$H_{н.п} = \sqrt[3]{\frac{Q^2_{75\%\min}}{m^2_{н.п}\sigma_{кос}L^2_{н.п}\left(\sqrt{2g}\right)^2}}, \quad (4.10)$$

где $Q_{75\%min}$ – минимальная величина расхода расчетной 75 % обеспеченности, характерная для репрезентативных рек Кыргызстана. Определялась по таблице 3.3; $m_{н.п}$ – коэффициент расхода ломаного в плане порога предварительно определялся по рекомендациям [22], сделанным относительно полигональных водосливов в зависимости от величины отношения ширины гребня порога $С_{п}$ к напору над гребнем порога $Н_{н.п}$; $\sigma_{кос}$ – поправочный коэффициент на косое размещение водослива определялся по рекомендациям В.С. Истоминой [22] в зависимости от угла размещения секций порога относительно динамической оси протока в подводящем русле θ.

Моделирование проводилось при следующих соотношениях основных геометрических размеров ломаных в плане порогов [97]:

$$H_{н.п} = \frac{H_2}{2} = \frac{L_{н.п} \times i_п}{2}, \quad (4.11)$$

где $Н_2$ – напор водного потока в конце порога с уклонным гребнем; $L_{н.п}$ – длина наносозащитного порога; $i_п$ – уклон гребня порога.

Обоснование значения максимальной глубины в верхнем бьефе сооружения $Н_{Pmax}$, согласно известным рекомендациям по проектированию водозаборных сооружений на горных реках, зависит от расходов минимальной расчетной обеспеченности $Q_{P\%}$ [162, 172] и, как следствие, от габаритов водосбросных устройств.

Результаты анализа влияния скоростей воды на водосбросных и водоприемных элементах на направленность донных и поверхностных струй водного потока при боковом водоотборе из речного русла [43], позволили сделать вывод, что величина расходов воды, проходящих через речной пролет и промывной тракт сооружения, должна превышать 50 % от величины паводковых расходов. Это заведомо обеспечит, при прохождении паводковых расходов, транспорт влекомых наносов из верхнего бьефа в нижний, через элементы подпорного створа.

Максимальное значение глубина воды в верхнем бьефе модели сооружения было определено по преобразованной формуле водослива с широким порогом:

$$H_{P.\max} = \sqrt[3]{\frac{Q^2_{P\%}}{m^2_{э.п.ст}\varepsilon B^2_{э.п.ст}2\mathrm{g}}k^2}, \quad (4.12)$$

где k – коэффициент, определяющий долю расходов, сбрасываемых через речной пролет и промывной тракт сооружения от величины паводковых расходов. При определении параметров модели водозаборного сооружения коэффициент k принимался равным 0,55; ε – коэффициент бокового сжатия определяется по формуле [163]:

$$\varepsilon = 1 - r\frac{H_{P.\max}}{B_{э.п.ст} + H_{P.\max}}, \quad (4.13)$$

(значение коэффициента сжатия зависит от искомой величины $Н_{Pmax}$; его значение принималось равным наименьшему значению при криволинейно заостренных разделительных быках ε = 0,94); $Q_{P\%}$ – руслоформирующий расход водного потока в подводящем русле; $m_{э.п.ст}$ –

коэффициент расхода промывного тракта и речного пролета при полностью поднятых полотнищах затворов [60]; $В_{э.п.ст}$ – суммарная ширина промывного тракта и речного пролета водозаборного сооружения.

В ходе исследований гребень ломаного в плане порога выполнялся согласно рекомендаций [119, 120], с дискретными уклонами в рекомендуемых пределах от 0,06…0,08 в сторону нижнего бьефа. Высотные параметры ломаного в плане наносозащитного порога определялась по зависимостям (4.1) и (4.2) [121]. При этом расчетные значения глубины в верхнем бьефе $Н_р$ сооружения назначались в зависимости от высоты порога в начале. Перед началом каждой серии опытов в верхнем бьефе формировалась призма наносов для исследований в режимах сформированной и несформированной призмы.

С учетом значений опытных коэффициентов расхода трехсекционных ломаных в плане наносозащитных порогов была определена графическая зависимость $m_{н.п} = f(H_{н.п} / C_п)$, которая представлена на рисунке 4.2.

На основании результатов математической обработки полученных опытных данных [4] по методу наименьших квадратов определена функциональная зависимость для теоретических расчетов коэффициента расхода трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога $m_{н.п}$ в виде [97]:

$$m_{н.п} = 0,31 + 0,0601\left(\frac{H_{н.п}}{C_п} - 0,867\right). \qquad (4.14)$$

Приведенная эмпирическая зависимость может быть рекомендована для определения коэффициенов расхода трехсекционных ломаных в плане порогов при значениях отношения $H_{н.п} / C_п$, находящихся в пределах от 0,867 до 3,0.

Исследования истечения через ломаный в плане наносозащитный порог показали, что полученные коэффициенты расхода в отличие от коэффициентов расхода $m_{н.п}$ других конструкций наносозащитных порогов (криволинейных, косонаправленных), имеют несколько меньшие значения при расчетных напорах в верхнем бьефе (от 0,31 до 0,36). Это объясняется расположением отдельных секций порога под меньшим, по сравнению с радиальным порогом И.К.Рудакова, углом α к подходящему потоку воды, что вызывает интенсивное винтовое движение водного потока со стороны верхнего бьефа. Винтовое движение вызывает

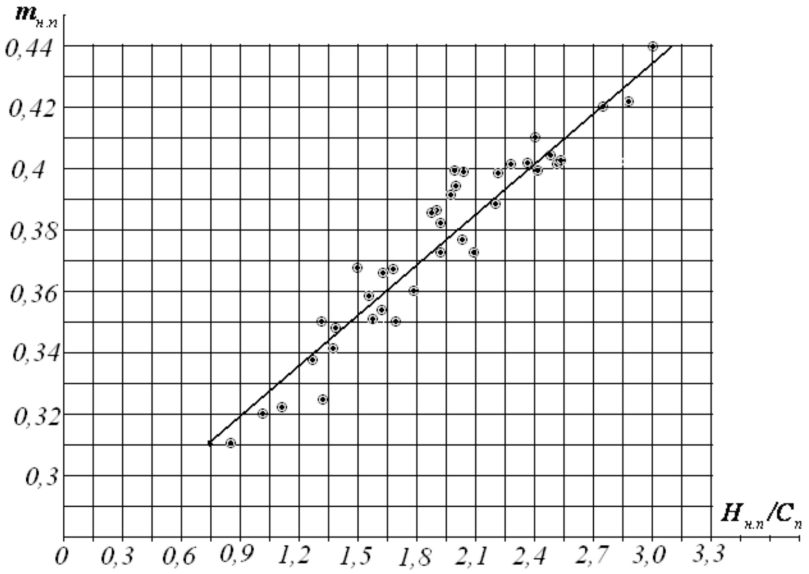


Рисунок 4.2 – График зависимости коэффициента расхода трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога от отношения напора воды над гребнем порога $Н_{н.п}$ к ширине порога в поперечном сечении $С_п$

повышенные потерь энергии на преодоление сопротивлений и на перемещение частиц наносов вдоль внешней поверхности порога к промывному тракту.

К положительным качествам ломаного в плане трехсекционного наносозащитного порога можно отнести простоту его формы и удобство конструкции для устройства на гребне порога шандор, установка которых необходима при переводе водозаборных сооружений энергетического назначения на зимний режим эксплуатации. Строительство такого порога, состоящего из простых прямолинейных секций, не требует устройства сложной опалубки и не вызывает затруднений при разбивке сооружения.

4.1.3. Гидравлические исследования повышения водопропускной способности трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога

При анализе конструкции рассматриваемого ломаного в плане наносозащитного порога (рисунок 4.3), были рассмотрены эпюры удельных расходов водного потока в верхнем бьефе водозаборного гидроузла, при коэффициенте водозабора $\alpha_в = 0,9$. Это определило пути совершенствования конструкции порога с целью повышения его пропускной способности [123].

Вначале параметры ломаного в плане трехсекционного наносозащитного порога были представлены в виде расчетной схемы, приведенной на рисунке 4.4.

Как показывает анализ параметров криволинейных и изучаемых ломаных в плане наносозащитных порогов, одним из основных факторов, обеспечивающим эффективную наносозащиту, является условие, при котором площадь водосливного фронта должна со-

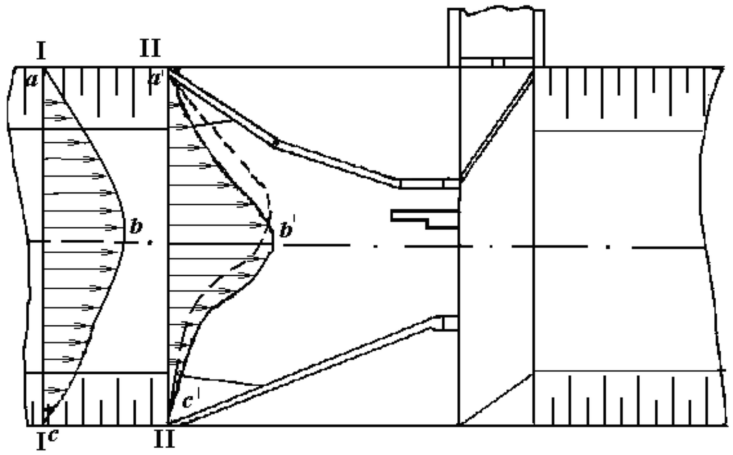


Рисунок 4.3 – Схема распределения эпюр удельных расходов водного потока в верхнем бьефе водозаборного сооружения при коэффициенте водозабора 0,9: фигура *abc* – эпюра распределения удельных расходов в подводящем русле; фигура *a'b'c'* – эпюра удельных расходов на входном сечении сооружения

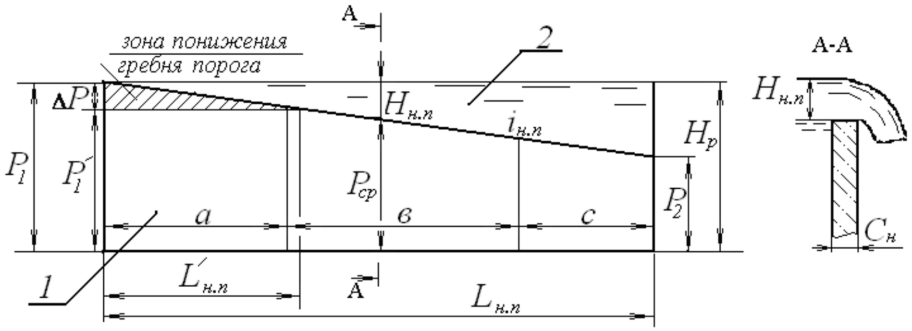


Рисунок 4.4 – Расчетная схема ломаного в плане наносозащитного порога: 1 – наносозащитный порог; 2 – водосливной фронт при истечении через гребень наносозащитного порога; P_1' – высота порога в начале после понижения; L_n – длина области понижения порога

ставлять не более 1/4 от площади внешней поверхности порога 1 [123]. Выполнение этого условия сопряжено со значительными капиталовложениями при обеспечении командования уровней воды в верхнем бьефе сооружения над водоприемным оголовком.

С целью увеличения величин напора и относительной площади водосливного фронта над гребнем порога нами рассмотрена возможность понижения гребня порога на начальном участке (см. рисунок 4.4) [97].

Результаты измерений скоростей движения воды на участке входного сечения водозаборного сооружения свидетельствуют о том, что при увеличении значений расходов воды, проходящих через начальный участок порога, изменяются эпюры распределения скоростей воды *a'b'c'* (рисунок 4.4). При этом центр тяжести эпюры смещается в сторону водоприемной камеры. Такая трансформация гидравлических процессов способствует усилению поперечной циркуляции и скоростей движения воды вдоль передней стенки ломаного в плане наносозащитного порога, что одновременно с водопроводящей способностью порога улучшает характеристики их активной наносозащиты. Это потребовало экспериментального подтверждения.

Такие условия дают возможность применять компоновочную схему водозаборного сооружения с трехсекционными порогами (см. рисунок 4.1) при водозаборе из рек с большими значениями расходов $Q_{75\%}$ обеспеченности.

При определении допустимого понижения начала порога P_1, высота в конце порога P_2 во всей серии опытов, была принята постоянной величиной и равнялась $P_2=0,6H_р$. Модельные исследования проводились в три этапа. Каждому этапу соответствовали исследования конструкций порога с постоянным уклоном гребня, который задавали в соответствии с существующими рекомендациями [97, 120, 151], равными 0,06, 0,07 и 0,08. В ходе проведения опытов исследовалось влияние величины понижения начального участка ломаного в плане порога на его наносозащитные свойства.

Анализ результатов исследований позволил установить допустимые величины понижений начального участка трехсекционного ломаного в плане порога, которые представлены в виде графической зависимости $i_n^{/} / i_n = f\left(L_n^{/} / L_n\right)$, приведенной на рисунке 4.5.

Допустимые параметры величины понижения начального участка порога находятся в зонах выше граничных линий на рисунке 4.5. Предельно допустимые значения величины

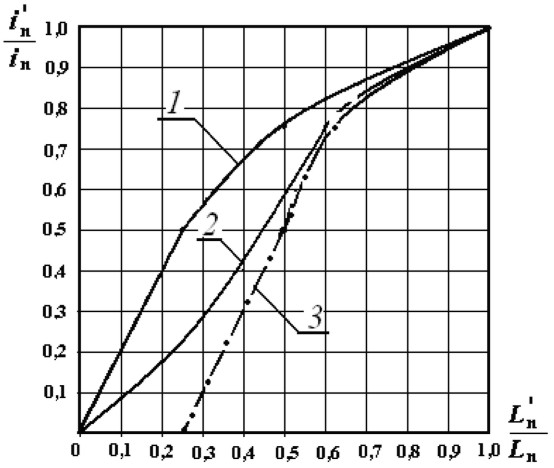


Рисунок 4.5 – Границы допустимых параметров понижения начального участка трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога в зависимости от относительного уклона гребня $i_n^{/} / i_n$ в зоне понижения и относительной длины этого участка $L_n^{/} / L_n$: 1 – граница допустимых параметров зоны понижения для порогов с первоначальным уклоном гребня 0,06; 2 – граница допустимых параметров для порогов с первоначальным уклоном гребня 0,07; 3 – граница параметров для порогов с первоначальным уклоном гребня 0,08

понижения высоты в начале ломаного в плане наносозащитного порога ΔP (см. рисунок 4.4) могут быть определены по формуле [123]:

$$\Delta P = i_n L_n - i_n^{'} L_n^{'} . \qquad (4.15)$$

На основе анализа результатов проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

- понижение высоты ломаного в плане порога с целью увеличения водопропускной способности без нарушения наносозащитных характеристик возможно в области полученных граничных пределов;
- при понижении высоты порога максимальное увеличение водопропускной способности трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога происходит на величину от 20 до 27,7 % в зависимости от первоначального уклона гребня;
- улучшение наносозащитных характеристик не более чем на 10 % наблюдается в области отношений:
- для порогов с первоначальным уклоном гребня 0,06 и 0,07 при $i_{з.пон} / i_{н.п} = 0{,}5$ и $L_{з.пон} / L_{н.п} = 0{,}25$;
- для порогов с первоначальным уклоном гребня 0,08 при $i_{з.пон} / i_{н.п} = 0{,}5$ и $L_{з.пон} / L_{н.п} = 0{,}5$.

4.1.4. Исследование конструкции промывного тракта водозаборных сооружений для деривационных ГЭС

Ломаные в плане пороги как средства, назначение которых состоит в создании активной наносозащиты водоприемных оголовков водозаборных сооружений, не могут быть исследованы автономно без учета параметров и характеристик соседствующих промывных трактов. Промывные тракты, предназначенные для сброса в нижний бьеф водозаборного сооружения двухфазного потока жидкости с большим содержанием влекомых наносов, участвуют также в создании циркуляционного вальца перед внешней поверхностью порога [97].

Разработка усовершенствованной конструкции промывного тракта водозаборного сооружения для деривационных ГЭС (см. рисунок 4.1) проводилась параллельно с исследованиями вариантов конструкции трехсекционных ломаных в плане порогов и наносного режима при водозаборе.

Длина промежуточного бычка $L_{п.б}$ при проведении исследований определялась согласно рекомендациям [120]:

$$L_{п.б} = (0{,}2 \div 0{,}25) L_{н.п} , \qquad (4.16)$$

где $L_{н.п}$ – длина наносозащитного порога.

Эффективность влияния заглубления верха промежуточного бычка на качество работы трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога оценивалась соотношением веса наносов, попавших в отводящий канал, к весу наносов, поступивших по подводящему руслу модели.

Как свидетельствуют опытные данные проведенных исследований, понижение промежуточного бычка, формирующего промывной тракт водозаборного сооружения, на относительную величину $h_{пб}/H_{р}$=0,743÷0,946 вызывает уменьшение захвата влекомых наносов в водоприемную камеру.

В ходе исследований местоположение затвора промывного тракта относительно концевого участка порога l / H_p изменялось от 0 до 1,2 (где l – расстояние от конца порога до затвора промывника).

Результаты экспериментов позволили определить допустимое расстояние от концевого участка наносозащитного порога l / H_p, которое находится в пределах от 0,2 до 0,55.

При величинах l / H_p в пределах от 0 до 0,2 перед затвором промывного тракта возникают вертикальные вихревые токи, которые образуются при взаимодействии полотнища затвора с циркуляционным потоком, транспортирующем наносы вдоль внешней поверхности наносозащитного порога. Это вызывает захват наносов объемами воды, проходящими в водоприемную камеру на концевом участке порога.

В случае l / H_p >0,55 в промывном тракте наблюдается участок разрыва зоны взаимовлияния истечения из-под затвора промывного тракта и потока в циркуляционном вальце наносозащитного порога. На этом участке наблюдается отложение гряды наносов, с поверхности которой твердые частицы начинают интенсивно поступать в водоприемную камеру.

Это позволило обосновать длину разделительного бычка, устраиваемого между промывным трактом и водоприемной камерой. В этом разделительном бычке впоследствии было размещено придонное отверстие зимнего водозабора, перекрываемое скользящим затвором по схеме, приведенной на рисунке 4.1.

Анализ показал, что на существующих конструкциях низконапорных горных водозаборных сооружений [10, 35, 91] в гидроэнергетических системах Средней Азии применяются отверстия зимнего водозабора из придонных горизонтов потока с шириной от 1,0 до 1,5 м. Устройство зимнего водоприемника с плоским затвором в разделительной стенке промывного тракта и водоприемной камеры потребовало некоторого удаления затвора промывного тракта на величину ширины вводимого в компоновку элемента.

В этом случае для поддержания необходимой транспортирующей способности водного потока, сбрасываемого через промывной тракт в нижний бьеф сооружения, потребовалось устройство горизонтального козырька на нижней кромке затвора промывного тракта (см. рисунок 2.21) [101].

Необходимая длина козырька из условия увеличения транспортирующей способности водного потока определялась в ходе исследований модели ВСДГ (см. рисунок 4.1).

Значение величины открытия затвора промывного тракта было определено с учетом рекомендаций М.К. Торопова по формуле [35, 169]:

$$a_{пр} = \frac{0{,}1Q_P}{\mu_{пр} в_{пр} \sqrt{2gH_P}}, \qquad (4.17)$$

где $\mu_{пр}$ – коэффициент расхода воды при истечении из-под затвора промывного тракта, для минимальных открытий принимался равным 0,4; $в_{пр}$ – ширина промывного отверстия задавалась 5,2 см, что для натуры составляет 1,0 м.

В ходе исследований малых значений относительной длины горизонтального козырька $l_{коз}/H_р$ от 0 до 0,3 наблюдалась недостаточная транспортирующая способность потока с незначительным размывом гряды наносов, формирующейся в промывном тракте, при значительном удалении затвора от конца наносозащитного порога.

При относительных размерах $l_{коз}/H_р$ от 0,35 до 0,55 поперечная гряда наносов не образуется, а наносы, подходящие со стороны циркуляционного винта порога, упорядоченно сбрасываются в нижний бьеф сооружения. Это свидетельствует о рациональности решения устройства горизонтального козырька на нижней кромке затвора с целью повышения транспортирующей способности потока при устройстве в промывном тракте зимнего водоприемника.

При значениях относительной длины горизонтального козырька $l_{коз}/H_р$ более 0,55 его передняя кромка входит в область действия циркуляционного вальца на концевом участке порога, что приводит к забрасыванию частиц наносов на верх козырька и в водоприемную камеру сооружения. При увеличении длины горизонтального козырька на затворе промывного тракта уменьшалась пропускная способность, что в ходе исследований компенсировалось поднятием затвора на дополнительную величину. Результаты исследований гидравли-

ческих характеристик при истечении из-под горизонтального козырька затвора промывного тракта приведены ниже.

4.1.5. Исследования гидравлических характеристик потока при истечении из-под горизонтального козырька затвора промывного тракта

После определения рациональных параметров горизонтальных козырьков, устраиваемых на нижней кромке затвора промывного тракта, нами были проведены исследования по изучению гидравлических процессов в области сопряжения потока верхнего бьефа и объемов воды, проходящих под козырьком. Для этого на гидравлическом лотке лаборатории ГТС кафедры ГТС и ВР КРСУ была устроена модель промывного тракта ВСДГ в масштабе М 1:7 (рисунок 4.6).

На нижней кромке затвора устраивался горизонтальные козырьки с относительной длиной в диапазоне $L_{коз}/H_{р}$ от 0,35 до 0,54.

Опыты проводились для открытий затвора, изменяющихся от 1,0 до 5,0 см. Верхний предел открытий для натурных условий равен 0,35 м.

Значения открытий затвора было установлено при исследовании рациональной длины горизонтального козырька промывного тракта при коэффициенте водозабора $\alpha_{в} = 0,9$ на модели сооружения, выполненной по компоновочной схеме, приведенной на рисунке 4.1.

Измерение скоростей водного потока при истечении из отверстия под горизонтальным козырьком исследовались при открытиях затвора от 2,0 до 5,0 см. При меньших открытиях затвора промывного тракта размер винта микровертушки (1,2 мм) не позволял выполнять полноценные измерения.

В ходе исследований истечения водного потока из-под плоского затвора промывного тракта, оборудованного горизонтальным козырьком, были отмечены три зоны образо-

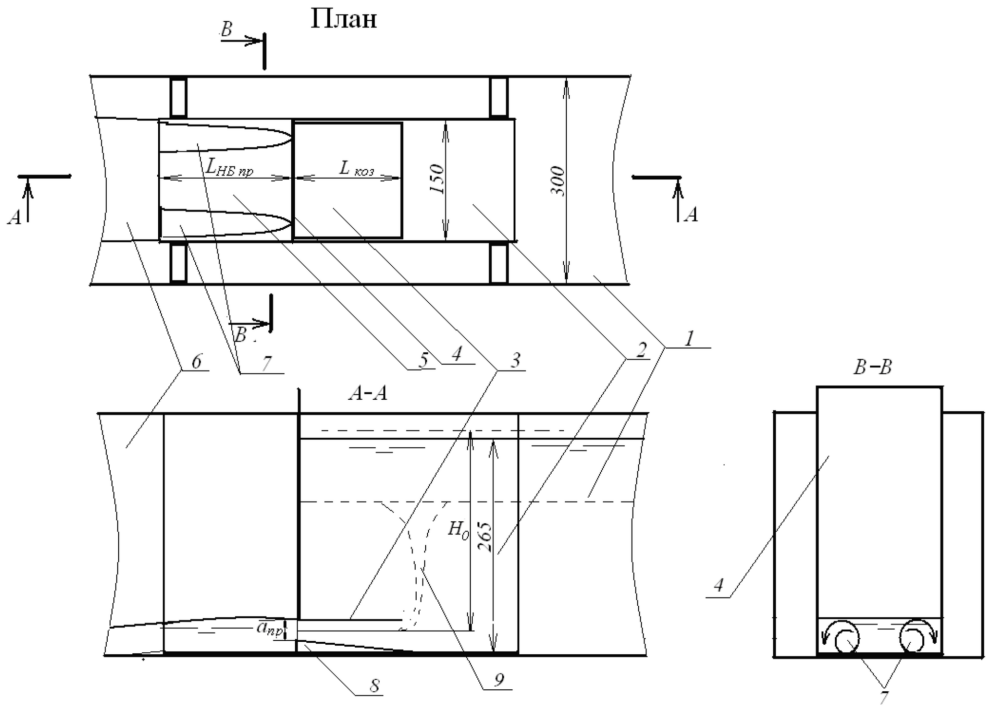


Рисунок 4.6 – Расчетная схема модели промывного тракта с затвором, оборудованным горизонтальным козырьком и донной вставкой: 1 – подводящее русло; 2 – верхний бьеф; 3 – горизонтальный козырек; 4 – плоский затвор; 5 – отводящий участок; 6 – отводящий участок; 7 – гидравлические воронки, возникающие со стороны нижнего бьефа; 8 – донная вставка; 9 – зона образования гидравлической воронки при глубинах меньше расчетных

вания гидравлических воронок. Первая зона проявлялась со стороны верхнего бьефа модели промывного тракта при заполнении подводящего участка гидравлического лотка до расчетных значений глубины $H_р$. При относительной глубине потока в промывном тракте $H_i/H_р = 0{,}735 \div 0{,}792$ над козырьком развивалась ярко выраженная гидравлическая воронка диаметром на поверхности более 3,0 см, нижняя часть которой, искривляясь, заходила под полотнище козырька. С увеличением глубин в верхнем бьефе гидравлическая воронка над козырьком исчезала.

С увеличением глубин верхнего бьефа в нижнем бьефе затвора под струями сбрасываемых объемов воды вдоль береговых устоев промывного тракта развивались две гидравлические воронки, контуры которых обозначались интенсивной аэрацией потока воды (см. рисунок 4.6). Циркуляционная направленность потока в воронках была установлена при измерении скоростей воды в зоне аэрации. При этом в идентичных условиях в воронке, развивающейся вдоль левого берега, скорость движения потока воды составила 0,614 м/с, а в воронке, возникающей вдоль правого берега – 2,712 м/с, при скоростях струй воды в центре сечения – 1,817 м/с.

Зная заданную направленность винта микровертушки, нами была определена направленность циркуляции воронок в нижнем бьефе затвора промывного тракта. Процесс воронкообразования под струями сбрасываемого потока наблюдался как в случае устройства донной вставки, так и без нее.

Это понижало пропускную способность отверстия под затвором промывного тракта, оборудованного горизонтальным козырьком. Для устранения процесса образования воронок были проведены исследования по определению необходимого расстояния от концевого сечения промывного тракта до полотнища затвора, при котором скоростной напор сбрасываемых струй воды будет предотвращать попадание зон аэрации под козырек.

В ходе поисковых исследований нами было установлено относительное расстояние от концевого сечения промывного тракта до затвора промывного отверстия $L_{НБ.пр} / H_P \geq 0{,}34$. При этом прекращался процесс распространения зоны образования воронок при относительных открытиях затвора $a_{пр} \leq 0{,}2H_P$.

В ходе предварительных исследований гидравлических структур потока, выходящего из-под горизонтального козырька, при расчетных глубинах было установлено, что вертикальное сжатие струй воды отсутствует. Это определило использование для обработки результатов исследований уравнения истечения из отверстий вида [180]:

$$Q_{пр} = \mu a_{пр} b_{пр} \sqrt{2gH_0}\,, \qquad (4.18)$$

где μ – исследуемый коэффициент расхода; $a_{пр}$ – открытие затвора промывного тракта; $b_{пр}$ – ширина в свету промывного тракта; H_0 – полный напор над центром тяжести отверстия.

Результаты гидравлических исследований приведены на рисунках 4.7 и 4.8.

Устройство донной вставки вызывает повышение пропускной способности отверстий под горизонтальным козырьком затвора при различных относительных открытиях. Это обусловлено зависимостью появления зон пониженного давления под козырьком только в тех условиях, когда отношение длины козырька и величины открытия затвора находится в пределах $a_{пр} / L_{коз} = (0{,}24 \div 0{,}28)$ для указанных отношений к глубине в верхнем бьефе.

Распределение значений коэффициентов расхода истечения из-под затвора, оборудованного горизонтальным козырьком (см. рисунки 4.7 и 4.8), позволили сделать следующие выводы:

- при малых величинах открытиях затвора промывного тракта $a_{пр} \leq 0{,}04\ H_р$ значения коэффициентов расхода при любых условиях не превышают 0,5, что, на наш взгляд, обусловлено превалированием сопротивлений движению. График на рисунке 4.16 б по-

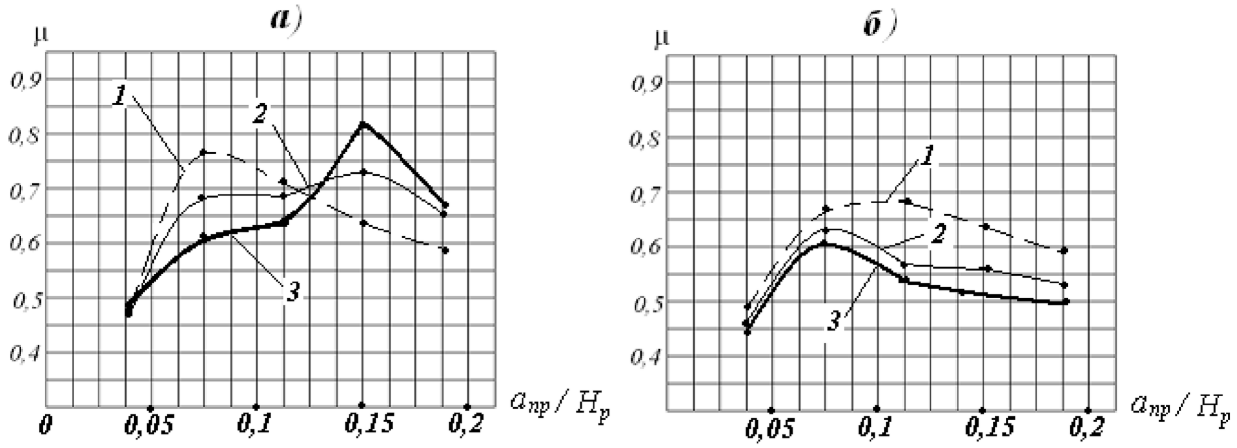


Рисунок 4.7 – Зависимости изменения коэффициента расхода от относительной величины открытия затвора $\mu = f(a_{пр} / H_р)$ (№1), оборудованного горизонтальным козырьком для случая устройства донной вставки (а) и без вставки (б): 1 – зависимости при относительной длине козырька $L_{коз} / H_р = 0{,}351$; 2 – зависимости при $L_{коз} / H_р = 0{,}445$; 3 – зависимости при $L_{коз} / H_р = 0{,}540$

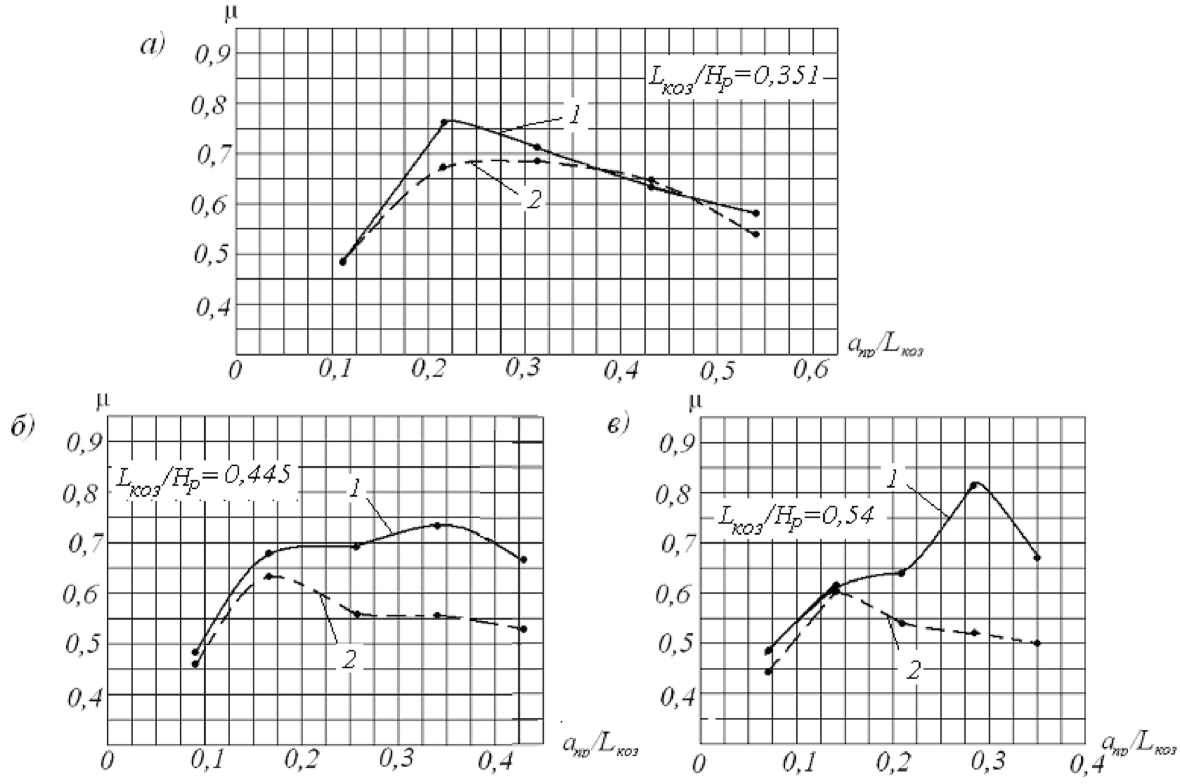


Рисунок 4.8 – Графические зависимости изменения коэффициента расхода от относительной величины открытия затвора промывного тракта $\mu = f(a_{пр} / L_{коз})$ (№2), оборудованного горизонтальным козырьком для случая устройства донной вставки (зависимость 1) и без вставки (зависимость 2): а – график зависимости при относительной длине козырька $L_{коз} / H_р = 0{,}351$; б – график зависимости при $L_{коз} / H_р = 0{,}445$; в – график зависимости при $L_{коз} / H_р = 0{,}540$

казывает увеличение коэффициентов расхода при указанных величинах открытия при уменьшении относительной длины козырька;

- устройство донной вставки приводит к увеличению коэффициентов расхода истечения из-под затвора с горизонтальным козырьком (см. рисунок 4.17), что обеспечивает увеличение скоростей водного потока под козырьком и подтверждает анализ уравнения (2.72) о возможности влияния повышения разности давлений на транспортирующую способность потока;
- при повышении величины открытия затвора промывного тракта более $a_{пр} \geq 0{,}19\ H_р$ значения коэффициента расхода снижаются, что понижает скорости движения водного потока под козырьком и снижает транспортирующую способность промывного тракта.

Последний факт был отмечен в отдельных опытах по определению нанососбросных характеристик промывного тракта на модели водозаборного сооружения (см. рисунок 4.1). При относительном увеличении речных расходов двухфазного потока и уменьшении коэффициента водозабора от 0,9 до 0,75, что сопровождалось увеличением сбрасываемых расходов при расчетных глубинах в верхнем бьефе, происходил интенсивный захват наносов через концевой участок наносозащитного порога. Это привело к необходимости устройства дополнительного промывного тракта, который включается в работу при коэффициентах водозабора от 0,75 до 0,9. При этом затвор основного промывного не должен иметь открытие более 0,2 $H_р$.

4.1.6. Исследования четырехсекционных ломаных в плане наносозащитных порогов с уклонным гребнем

Анализ кинематических структур водного потока в верхнем бьефе низконапорного плотинного водозаборного сооружения (разд. 2.33) позволил обосновать необходимость устройства в конце наносозащитного порога концевого участка с противоположной направленностью относительно направления начального и среднего участков. Это послужило основой для создания четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога [35, 76]. Основными достоинствами этой конструкции порога можно считать:

- относительно высокую пропускную способность;
- организацию наносозащиты при отсутствии промежуточного бычка;
- возможность устройства более короткого понура сооружения.

При компоновке водозаборного сооружения с конфигурацией наносозащитного порога (см. рисунок 2.23) возникли некоторые сложности из-за смещения точки B_1 в точку B_2. В результате промывной тракт также был смещен на заданное расстояние, что вызвало необоснованное расширение элементов подпорного створа (рисунок 4.9). Это потребовало изменения условий сопряжения водозаборного сооружения с подводящим руслом, что нарушало гидравлические процессы при пропуске паводковых расходов.

С целью устранения этого недостатка был намечен ряд мероприятий, выполнение которых позволило минимизировать необходимое расширение сбросного фронта сооружения.

В ходе конструирования четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога было учтено уменьшение продольной составляющей скорости циркуляционного вальца на начальном участке порога за счет увеличения угла поворота α° начальной секции относительно динамической оси потока в верхнем бьефе. При этом в качестве прототипа рассматривалась конструкция трехсекционного порога, что обеспечило:

- возможность перевода зоны максимальных продольных скоростей циркуляционного вальца в зону концевых участков порога;



Рисунок 4.9 – Модель водозаборного сооружения из горных рек М 1:20 (поисковые исследования четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога)

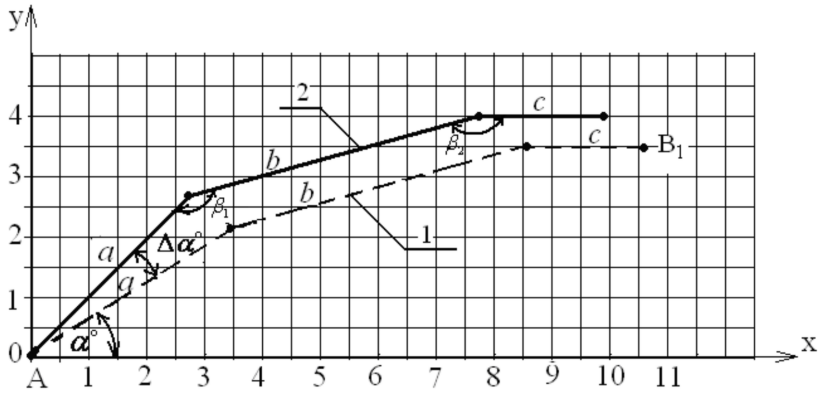


Рисунок 4.10 – Схема увеличения угла размещения начальной секции трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога: 1 – первоначальный контур размещения секций трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога; 2 – контур размещения секций порога после увеличения угла α

- увеличение количества вариантов размещения секций при исследованиях рациональных геометрических параметров четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога;
- создание необходимых условий для сопряжения четырехсекционного порога с элементами подпорного створа для рационального сброса излишков воды и наносов в паводковый период эксплуатации.

Первой ступенью исследований была проверка возможности увеличения угла поворота α° начальной секции порога *a* относительно ранее определенных в разд. 4.1.1 значений. При этом допускалась возможность сохранения в определенном диапазоне наносозащитных характеристик порога, поскольку эти исследования проводились с включением в работу двух последующих секций ломаного в плане порога. Геометрические параметры, взаимное размещение средней и концевой секций порога не изменялись. Угол β_1 уменьшался от расчетного значения, определяемого по формуле (2.56) на величину приращения угла α. Повышение угла α° производилось по схеме, приведенной на рисунке 4.10.

Уклон гребня порога модели принимался согласно рекомендациям [120, 151], равным 0,07. Первоначальные значения угла α определялись в зависимости от задаваемого уклона дна подводящего русла и рассчитывались по формуле (4.3).

В ходе исследований допустимой величины приращения угла поворота начальной секциия трехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога было установлено, что в зависимости от уклона дна речного русла угол α, рассчитываемый по зависимости (4.3), без нарушения наносозащитных характеристик потока может быть увеличен:

- при уклоне дна i_p от 0,017 до 0,024 на $\Delta\alpha = 2°$;
- при $i_p = 0{,}024 \div 0{,}028$, на $\Delta\alpha = 4°$;
- при $i_p = 0{,}038$, на $\Delta\alpha = 6°$.

Перед обоснованием параметров четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога было принято условие, что при высоком проценте водозабора, равном 0,9, в верхнем бьефе сооружения имеет место смещение струй водного потока в сторону водоприемника по схеме, приведенной на рисунке 2.21.

Это позволило предположить, что для организации необходимой наносозащиты концевую секцию четырехсекционного порога следует размещать под углом, равным углу α к поперечному створу сооружения. Размещение четвертой секции *d* показано на расчетной схеме (рисунок 4.11).

Исследования проводились с поддержанием в подводящем русле модели водозаборного сооружения (рисунок 4.12) гидроморфометрических характеристик участков рек Сокулук и Джууку, ранее определенных в качестве репрезентативных.

Максимальная длина четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога задавалась равной длине трехсекционного порога $L_{н.п}$, значения которой были определены ранее, с неизменяемым значением длины начальной секции а. Суммарная длина секций *b*, *c* и *d* определялось по формуле:

$$b + c + d = L_{н.п} - a. \qquad (4.19)$$

Анализ результатов проведенных исследований показал, что рациональные относительные длины секций *b, c* и *d* четырехсекционного ломаного в плане порога находятся в пределах, приведенных в таблице 4.1.

Устройство четырехсекционных ломаных в плане наносозащитных порогов перед водоприемными камерами предоставило возможность повышения наносозащитных характеристик водозаборных сооружений на горных реках.

Это также позволило понизить относительную высоту порога на концевом участке до величины (0,54 ÷ 0,56) $H_р$ и в результате появилась возможность понижения расчетной глубины $H_р$ в верхнем бьефе сооружения, что вызывает относительное понижение строительной высоты сооружения.

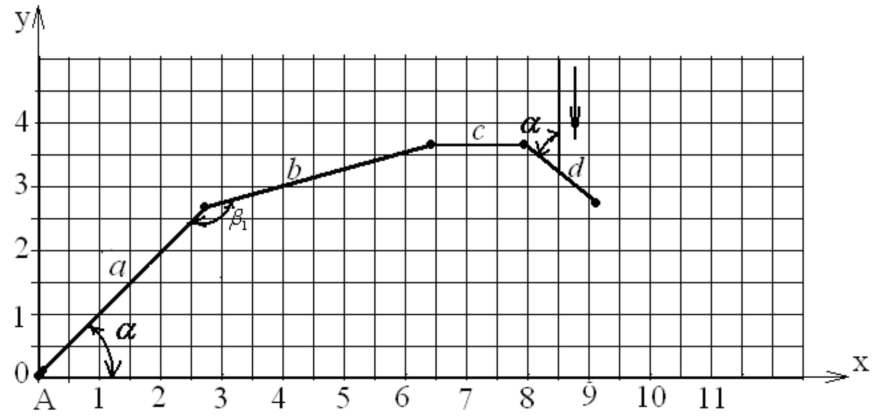


Рисунок 4.11 – Схема взаимного размещения секций четырехсекционного порога

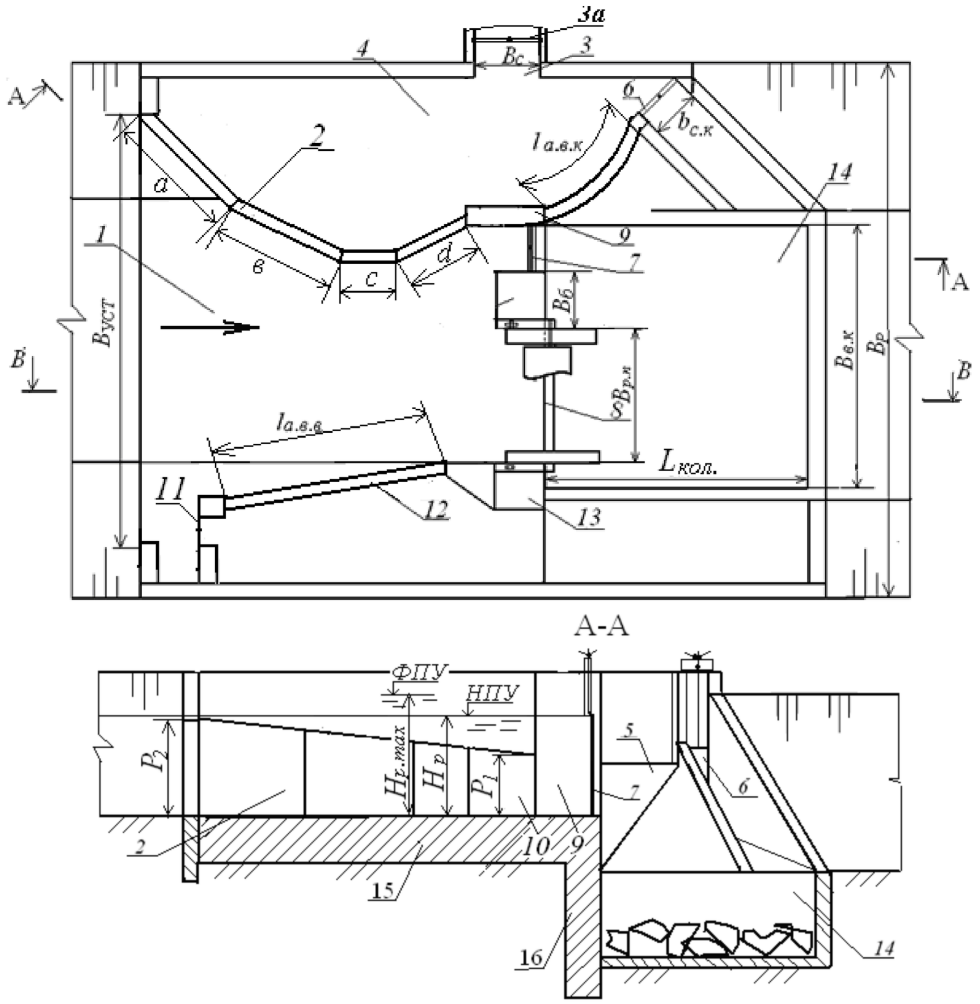


Рисунок 4.12 – Модель водозаборного сооружения на горных реках (М 1:20): 1 – верхний бьеф; 2 – наносозащитный порог; 3 – водоприемный оголовок; 3а – регулятор расхода; 4 – водоприемная камера; 5, 12 – автоводослив; 6 – затвор сбросного отверстия; 7 – затвор промывника; 8 – затвор речного пролета; 9 – разделительная стенка; 10 – концевая секция четырехсекционного ломаного в плане порога; 11 – дополнительный промывной тракт; 13 – быки; 14 – водобойный колодец; 15 – понур; 16 – зуб флютбета; 17 – отводящее русло

Таблица 4.1 – Относительная длина секций четырехсекционных порогов

№ в.	Уклоны дна подводящих русел, $i_р$											
	0,017			0,024			0,028			0,038		
	$\frac{b}{L_{н.п}}$	$\frac{c}{L_{н.п}}$	$\frac{d}{L_{н.п}}$	$\frac{b}{L_{н.п}}$	$\frac{c}{L_{н.п}}$	$\frac{d}{L_{н.п}}$	$\frac{b}{L_{н.п}}$	$\frac{c}{L_{н.п}}$	$\frac{d}{L_{н.п}}$	$\frac{b}{L_{н.п}}$	$\frac{c}{L_{н.п}}$	$\frac{d}{L_{н.п}}$
1	0,236	0,086	0,177	0,236	0,086	0,177	0,208	0,086	0,104	0,104	0,086	0,156
2	0,236	0,086	0,236	0,236	0,086	0,236	0,208	0,086	0,156	0,208	0,086	0,156

4.1.7. Результатыисследований водопропускной способности ломаных в плане четырехсекционных наносозащитных порогов

В ходе исследований по определению рациональных плановых параметров четырехсекционных ломаных в плане наносозащитных порогов была изучена их водопропускная способность. Анализ пропускной способности проводился по методике, приведенной в разд. 4.1.3. Величина коэффициента расхода оценивалась в зависимости от отношения напора над гребнем порога к его ширине $m_{4c.n} = f(H_{н.п} / C_{н.п})$. Результаты исследований приведены на рисунке 4.13.

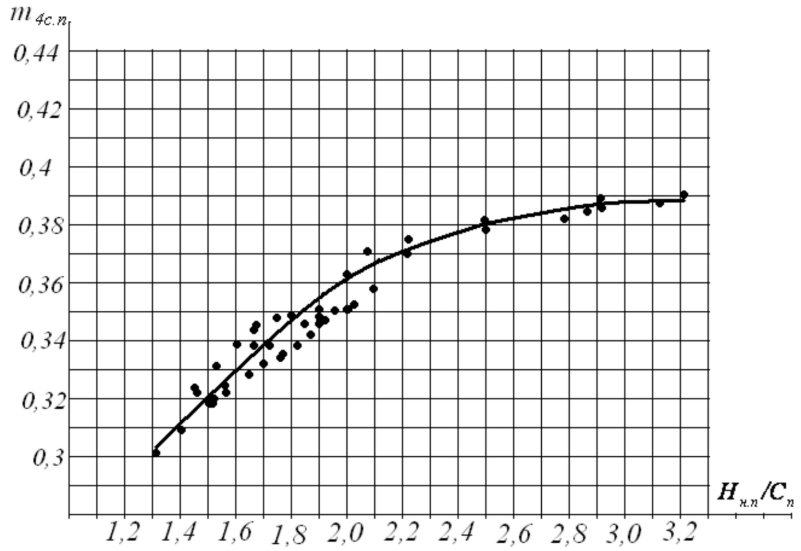


Рисунок 4.13 – Зависимость коэффициента расхода четырехсекционного ломаного в плане порога $m_{4c.n}$ от относительного напора над гребнем порога $H_{н.п} / C_n$

С помощью методов статистической обработки [165] полученных величин коэффициентов расхода (см. рисунок 4.13), была установлена эмпирическая зависимость (при тесноте связи $r = 0{,}95$) в виде полинома:

$$m_{4c.n} = -0{,}0281\left(\frac{H_{н.п}}{C_{н.п}}\right)^2 + 0{,}171\frac{H_{н.п}}{C_{н.п}} + 0{,}1277 . \qquad (4.20)$$

Эта зависимость может быть использована при относительных напорах над гребнем четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога $H_{с.п} / C_{с.п} = 1{,}3 \div 3{,}2$.

Относительное понижение значений коэффициентов расхода четырехсекционного порога при значениях $H_{с.п} / C_{с.п}$ от 2,2 до 3,2 объясняется образованием кривой спада при пропуске паводковых расходов воды, которая распространяется от сбросных элементов подпорного створа до средней части порога.

4.1.8. Изучение распределения продольных скоростей водного потока в зоне циркуляционного вальца перед четырехсекционным порогом

Результаты проведенных исследований свидетельствует, что основным фактором, определяющим наносозащитные характеристики донных порогов, является структура и распределение скоростей воды в зоне циркуляционного вальца. Для изучения распределения продольных скоростей потока в циркуляционном вальце перед наносозащитным порогом была поставлена серия экспериментов. Исследования проводились при пропуске на модели водозаборного сооружения в масштабе М 1:20 расходов воды 75 % обеспеченности

для конструкций порогов, приведенных в таблице 4.1. В верхнем бьефе поддерживалась расчетная глубина воды $H_р$.

В ходе исследований по длине порогов выделялось 6 створов, в которых производились измерения продольных скоростей воды на глубине $0{,}2H_р$, близкой к поверхности потока, на средней глубине $0{,}5H_р$ и на глубине $0{,}8H_р$, т.е. в придонной области. Необходимость проведения измерений скоростей водного потока на глубине $0{,}5H_р$ была обоснована размещением центра горизонтального циркуляционного потока, развивающегося вдоль внешней поверхности потока. Первый створ располагался в начале порога, а шестой створ размещался на концевом участке порога. Расстояние между створами составляло $0{,}2L_{н.п}$. Измерения скоростей производились микровертушкой с повторяемостью 9 замеров для каждого створа. Результаты измерений приведены на рисунке 4.14.

Анализ результатов исследований продольных скоростей потока в циркуляционном вальце показал, что графические зависимости $V_{пр} - f(L_i/L)$ (б) (г) и (ж) имеют минимальные значения на концевых участках порогов. Это приводит к образованию сбойных зон в структуре вальца на концевом участке в переходные периоды эксплуатации сооружения, что достаточно часто встречается на горных реках с изменениями гидрологического режима [17].

С целью повышения значений продольных составляющих на концевом участке циркуляционного вальца у поверхности и на глубине $0{,}5H_р$ было принято решение устройства в промывном тракте донной вставки по схеме, приведенной на рисунке 2.26 [85]. Устройство донной стенки позволило повысить наносозащитные характеристики четырехсекционных порогов.

В ходе исследований высота предлагаемой донной вставки $P_{д.вст}$ была принята равной $0{,}4H_р$, а ее длина $L_{д.вст}$ равной длине промывного тракта, оборудованного зимним водоприемным отверстием.

На рисунке 4.15 приведены результаты исследований зависимостей изменения величин продольных составляющих скоростей циркуляционного вальца вдоль внешней стенки порога при устройстве донной вставки в промывном тракте.

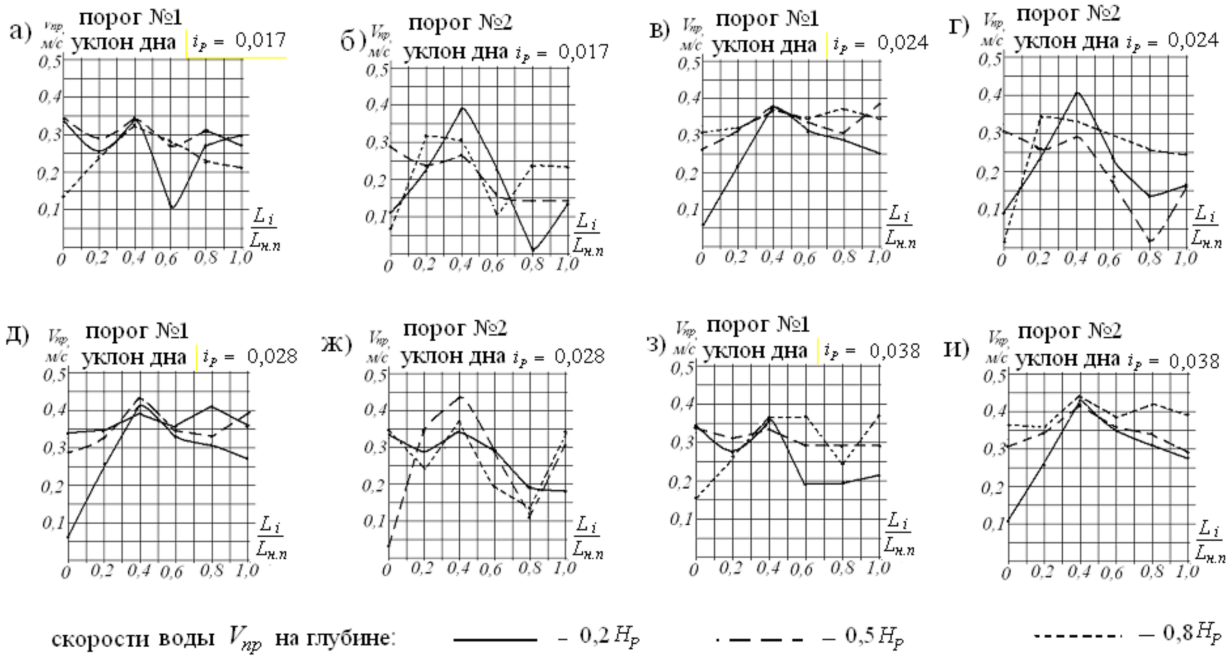


Рисунок 4.14 – Графические зависимости абсолютных величин продольных составляющих скоростей водного потока в циркуляционном вальце воды, по длине внешних поверхностей четырехсекционных ломаных в плане наносозащитных порогов $V_{пр} - f(L_i/L)$

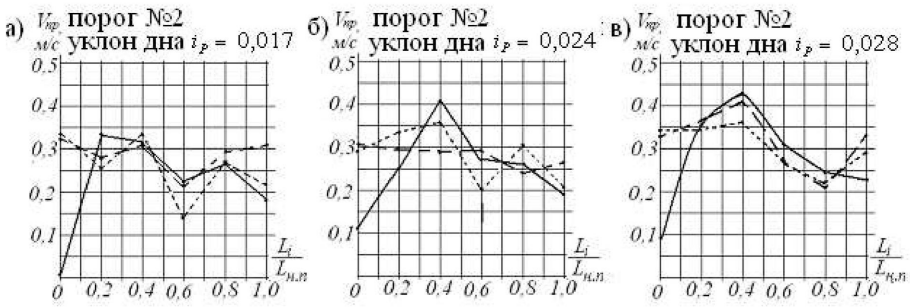


Рисунок 4.15 – Зависимости изменения абсолютных величин продольных составляющих результирующих скоростей воды в циркуляционном вальце по длине четырехсекционных порогов $V_{пр} – f(L_i/L)$ при устройстве донной вставки

Устройство донной вставки порога в промывном тракте сооружения вызывает увеличение продольных составляющих скоростей воды в циркуляционном вальце на уровне средних и поверхностных горизонтов потока концевого участка четырехсекционного порога, что повышает транспортирующую способность потока, увлекающего речные наносы на сброс в нижний бьеф сооружения. Это подтверждает ранее выполненное теоретическое обоснование необходимости устройства в промывных трактах водозаборных сооружениях донных вставок с отрицательным уклоном поверхности.

4.1.9. Обоснование конструкции четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога с горизонтальным гребнем

С целью расширения области применения водозаборных сооружений, оборудованных четырехсекционными ломаными в плане наносозащитными порогами, была рассмотрена возможность их устройства на реках со сходными гидроморфометрическими характеристиками реки Кугарт (репрезентативной для малых рек южных областей Кыргызстана). Малые горные реки снегово-ледникового типа питания с грунтовым подпитыванием, относящиеся к III-й группе по классификации К.Ф. Артамонова [13] и А.В. Филончикова [172, 173], характеризуют относительно высокие расходы расчетной обеспеченности, малые уклоны дна, и высокую мутность потока. Результаты анализа известных конструкций водозаборных сооружений свидетельствуют, что такие условия определяют необходимость создания больших, более 2,5 м, глубин в верхнем бьефе сооружений и применения элементов с высокой пропускной способностью.

Устройство в промывном тракте донной вставки повысило наносозащитные характеристики четырехсекционных порогов. При этом был рассмотрен вариант возможности устройства горизонтального гребня порога по аналогии с криволинейным в плане наносозащитным порогом [150]. Разработанный И.К. Рудаковым наносозащитный порог с горизонтальным (безуклонным) гребнем имеет постоянные значения коэффициента расхода, равные 0,41 [151]. В ходе предварительных поисковых исследований было установлено, что в зависимости от конфигурации четырехсекционного ломаного в плане порога его коэффициент расхода также изменялся от 0,4 до 0,41 при различных напорах над гребнем порога. То есть криволинейная обтекаемая форма порога в данном случае не дает ощутимого преимущества в расходах воды по сравнению с ломаным порогом, составленным из нескольких секций.

Была также рассмотрена возможность применения конструкций четырехсекционных порогов для водозабора из рек, относящихся к третьей групп малых горных рек, в гидроэнергетические и ирригационные системы. Плановые размеры конструкций с наклонным гребнем были обоснованы ранее (см. таблицу 4.1). Были рассмотрены варианты использования различных длин секций четырехсекционного порога для уклонов дна реки $i_р$ = 0,017 и $i_р$ = 0,024.

Результаты исследований показали, что коэффициент расхода, определяющий водопропускную способность четырехсекционного ломаного в плане порога, при 90 %-ном водозаборе изменяется в пределах 0,398 до 0,41. Эти значения коэффициента расхода могут быть использованы при относительной ширине порога $C_{4с.н.п}$ / $H_{4с.н.п}$ = (0,343÷0,6).

Результаты исследований, проводимых при коэффициенте водозабора, равном 0,9, позволили установить, что:

- при относительной высоте порога с горизонтальным гребнем 0,65 и 0,7 от $H_р$ в верхнем бьефе сооружения создаются условия для формирования в области циркуляционного вальца призмы наносов высотой, достигающей высоты порога. Это вызывает поднятие влекомых наносов в верхние горизонты потока и их попадание в недопустимом количестве в водоприемную камеру и далее в отводящий канал;
- при относительной высоте порога 0,75 и 0,8 от расчетной глубины, величина его длины приближается к ширине поперечного сечения потока в подводящем русле. Это определяет практически равномерное перераспределение удельных расходов двухфазного потока (вода – наносы), подходящего к внешней поверхности порога, что обеспечивает при рациональных размерах секций необходимый транспорт наносов в сторону промывного тракта;
- при уклоне дна в подводящем русле модели сооружения $i_р$ = 0,007 лучшие наносозащитные характеристики были обеспечены при варианте №1 исполнения порога, а при уклоне дня реки $i_р$ = 0,012 необходимая наносозащита обеспечивается при варианте порога №2 (см. таблицу 4.1).

В ходе исследований относительная высота донной вставки промывного тракта составляла 0,4$H_р$.

4.2. Исследования гидравлических характеристик стабилизатора расхода типа секционный параболический коробчатый затвор (СПКЗ)

Технические и конструктивные характеристики разработанного стабилизатора расхода типа секционный параболический коробчатый затвор (СПКЗ) (см. разд. 2.3) основаны на организации бесперебойной подачи в отводящий канал необходимых объемов воды с расходами, изменяющимися на величину не более ±5 % при любых гидрологических характеристиках рек.

Используя результаты теоретического обоснования конструкции СПКЗ, нами в лаборатории гидротехнических сооружений КРСУ была изготовлена модель водоприемного оголовка водозаборного сооружения со стабилизатором расхода воды (рисунок 4.16). Модельные исследования были проведены в гидравлическом лотке лаборатории ГТС КРСУ (см. рисунок 3.14).

В качестве исходных данных при разработке модели были приняты величины расходов воды, подаваемой в отводящие каналы $Q_{от.к}$ гидроэнергетических и ирригационных систем, максимальная $H_{в.кр/max}$ и расчетная $H_{в.кр}$ глубина в водоприемных камерах, и ширина водоприемного оголовка $b_{в.пр}$ низконапорных водозаборных сооружений.

Расчетной величиной расхода воды в модели был принят расход водоприемного оголовка $Q_{в.ог}$, значение которого определялось по формуле:

$$Q_{в.ог} = \frac{\alpha_{в\max} Q_{75\%}}{n}, \qquad (4.21)$$

где $\alpha_{вmax}$ – максимальная величина коэффициента водозабора, используемая при исследованиях устройств низконапорных водозаборных сооружений равная 0,9 [35, 97, 120]; $Q_{75\%}$–



Рисунок 4.16 – Модель водоприемного оголовка низконапорного водозаборного сооружения с устройством стабилизатора расхода воды типа (СПКЗ)

значение расчетного расхода воды 75 %-ной обеспеченности рек, определенных в качестве репрезентативных; n – количество водоприемных оголовков отводящего канала низконапорного водозаборного сооружения.

Количество водоприемных оголовков, оборудованных стабилизаторами расхода воды при проектировании и строительстве водозаборных сооружений, определялось с учетом следующих условий:

1. Возможность подачи в отводящий канал расходов с величинами, больше расчетных деривационных каналов гидроэнергетических и магистральных каналов ирригационных систем, для проведения гидравлических промывок отстойников гидроузла.

2. Поддержание в водоприемной камере расчетных глубин больше критических $H_{в.кр} > h_{кр}$ для создания в верхнем бьефе стабилизаторов расхода спокойного режима движения водного потока с $Fr < 1$.

3. Обеспечения наименьшей строительной высоты водозаборного сооружения.

4. Осуществление водоподачи в зимний период через минимальное количество водоприемников с целью концентрации и обеспечения условий незамерзания объемов воды в водопроводящих сооружениях (зависит от местных климатических условий для сооружений Средней Азии $v_{н.зам} = 0{,}6$ м/с) [139].

Обеспечение первого условия происходит без повышения расчетных глубин в водоприемных камерах при полном поднятии полотнищ затворов стабилизаторов расхода и проведения водоподачи в виде истечения через водослив с широким порогом. В этом случае в качестве расчетного может быть использовано уравнение:

$$Q_{в.огк} = m_{в.пр} b_{в.пр} \sqrt{2g} H_{в.пр}^{1,5}, \tag{4.22}$$

где $m_{в.пр}$ – коэффициент расхода водослива с широким порогом с боковым сжатием принимался равным 0,32 [181].

При этом максимальный расход, проходящий через один водоприемный оголовок, определялся по формуле:

$$Q_{в.ог.\max} = \frac{\lambda Q_{от.к}}{n}, \tag{4.23}$$

где λ – коэффициент повышения подаваемых расходов воды в отводящий канал в зависимости от конструктивных особенностей отстойников (для двухкамерных отстойников $\lambda = 2$; трехкамерных отстойников $\lambda = 1{,}5$) [34, 53, 175].

Для выполнения второго условия было использовано уравнение для расчета критической глубины воды в руслах с прямоугольным сечением [120]:

$$H_{в.кр} = z_з \times \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_{в.ог}^2}{b_{в.пр}^2 g}}, \qquad (4.24)$$

где $z_з$ – коэффициент запаса введен с целью однозначного поддержания спокойного режима перед стабилизатором расхода воды.

При этом обеспечивалось равенство $Н_{в.кр} = z_з h_{кр}$. Анализ существующих автоматизированных водозаборных сооружений Кыргызстана показал, что коэффициент запаса $z_з$ изменяется от 1,78 до 2,64.

Выполнение третьего условия, связанного с относительной минимизацией затрат при строительстве, выполнялось при наименьших допустимых значениях коэффициента запаса $z_з$.

Анализ условий проектирования водозаборных сооружений позволил сделать вывод, что основным уравнением для определения расчетных глубин в водоприемной камере $Н_{в.кр}$, в случае устройства отстойников с гидравлической промывкой, является уравнение (4.22), которое можно представить как

$$H_{в.пр} = \sqrt[1,5]{\frac{\lambda Q_{в.ог}}{m_{в.пр} b_{в.пр} \sqrt{2g}}}. \qquad (4.25)$$

В уравнения (4.24) и (4.25) при известном значении расчетного расхода водоприемного оголовка расчетная глубина $Н_{в.кр}$ и ширина водоприемного оголовка $b_{в.пр}$ являются неизвестными переменными, что вызывает необходимость проведения расчета с помощью подбора. Очевидно, что при расчете водозаборных сооружений, подающих воду в каналы через отстойники с гидравлической промывкой, определение расчетной глубины должно производиться по формуле (4.25), а в случаях использования отстойников с механической очисткой, по формуле (4.24).

Анализ конструкций водоприемных оголовков низконапорных автоматизированных водозаборных сооружений на горных реках Кыргызстана показывает, что в зависимости от конструктивных особенностей абсолютные значения ширины устраиваемых водоприемных оголовков $b_{в.пр}$ изменяются в пределах от 1,0 м до 2,5 м, при относительных значениях $b_{в.пр}$ / $Н_{в.пр}$, изменяющихся от 0,75 до 1,0.

Необходимость выполнения условий водоподачи определила проведение расчетного анализа для определения зависимости относительной ширины $b_{в.пр}$ / $Н_{в.пр}$ от абсолютных величин расходов, подаваемых в отводящий канал без регулирования с помощью стабилизаторов расхода воды $Q_{в.ог}$. Расчетный анализ был проведен по формуле (4.22). Результаты расчета приведены на рисунке 4.17.

Расходы расчетной обеспеченности $Q_{75\%}$ репрезентативных малых горных рек Кыргызстана и расчетные расходы отводящих каналов $Q_{от.к}$ при устройстве водозаборных

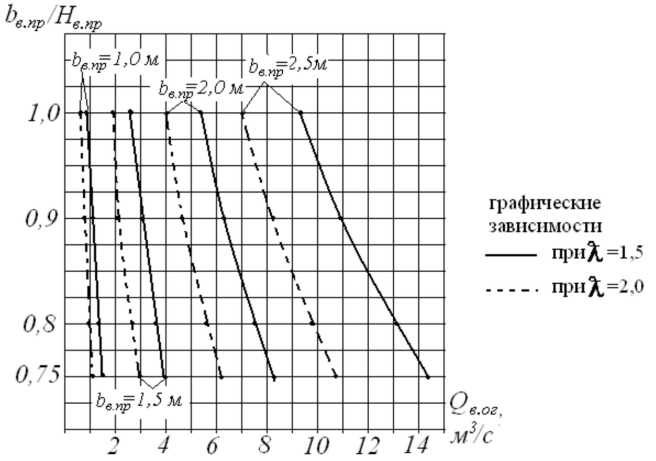


Рисунок 4.17 – Зависимости относительной ширины водоприемного оголовка $b_{в.пр}$ / $Н_{в.пр}$ сооружения от величин подаваемых расходов воды $Q_{в.ог}$

сооружений, приведены в таблице 4.2. В ней проводится сопоставление гидрологических характеристик репрезентативных рек и гидравлических характеристик водоприемников водозаборных сооружений.

В таблице рассмотрен вариант устройства одного оголовка n = 1 и проведение водоподачи по схеме истечения через водослив с широким порогом. Анализ значений глубин в водоприемной камере при устройстве одного водоприемного оголовка выполняющего водоподачу расчетных величин расходов $Q_{в.ог}$, показал, что при введении в работу стабилизатора расхода в паводковый период, вызывает увеличение глубины. Это в совокупности с условием ремонтопригодности элементов водозаборного сооружения определяет применение более одного водоприемного оголовка. Это обеспечивает создание в зимний период необходимых скоростей воды за счет проведения водоподачи через один водоприемный оголовок.

Таблица 4.2 – Сопоставление гидрологических характеристик рек Кыргызстана и гидравлических характеристик водоприемных элементов водозаборных сооружений

Река	Расход расчетн. обеспеч., $Q_{75\%}$, м^3/с	Коэффиц. водозабора, $\alpha_в$	Расход воды в отводящем канале, $Q_{от.к}$, м^3/с	Коэффициент, $\hat{\lambda}$	Глубина воды в водопр. камере, $H_{в.пр}$, м	Ширина водопр. оголовка, $b_{в.пр}$, м
Сокулук	4,82	0,9	4,34	1,5	1,85	1,85
-//-	-//-	-//-	-//-	2,0	2,17	2,0
Джууку	5,90	0,9	5,31	1,5	2,0	2,0
-//-	-//-	-//-	-//-	2,0	2,4	2,0
Кугарт	13,4	0,9	12,06	1,5	2,94	2,5
-//-	-//-	-//-	-//-	2,0	-	-

При проектировании водоприемных оголовков приведенные доводы должны согласовываться со значениями средних многолетних зимних расходов воды в реках. В ходе исследований водоприемных оголовков водозаборных сооружений были рассмотрены гидрологические характеристики репрезентативных рек Кыргызстана – Сокулук, Джуук и Кугарт [97, 120].

Увеличение количества водоприемных оголовков позволит обеспечить снижение строительной высоты сооружений, величины армирования и толщины монолитного берегового устоя водоприемной камеры.

С целью обеспечения третьего условия в ходе модельных исследований конструкции СПКЗ относительная ширина водоприемного оголовка принималась равной $b_{в.пр}$ / $H_{в.пр}$ = 1,0. При относительной ширине $b_{в.пр}$ / $H_{в.кр}$ = 1. Расчетный напор был установлен из условия проверки рабочих характеристик стабилизатора при изменении относительной величины напора в водоприемной камере в диапазоне $H_{в.кр}$ / $H_{в.кр.i}$ от 1 до 2. При этом величина коэффициента запаса по глубине воды $z_з$ составила 2,13. При проверке выполнения первого условия по формуле (4.22) значение коэффициента повышения расхода воды, подаваемой в отводящий канал, было равно $\hat{\lambda}$ =1,5.

Размеры исследуемой физической модели стабилизатора расхода воды СПКЗ представлены на рисунке 4.18.

Результаты модельных исследований стабилизатора расхода СПКЗ приведены на рисунке 4.19. График зависимости $Q_i/Q_{max} = f(a_i/a_{max})$, определяющий гидравлические характеристики разработанной конструкции стабилизатора, представлен на рисунке 4.20.

Проведенные исследования подтвердиливыводы, сделанные ранее при разработке конструкции СПКЗ [79, 95]. Это свидетельствует, что разработанное устройство является стабилизатором расхода воды, способным проводить водоподачу в отводящий канал водо-

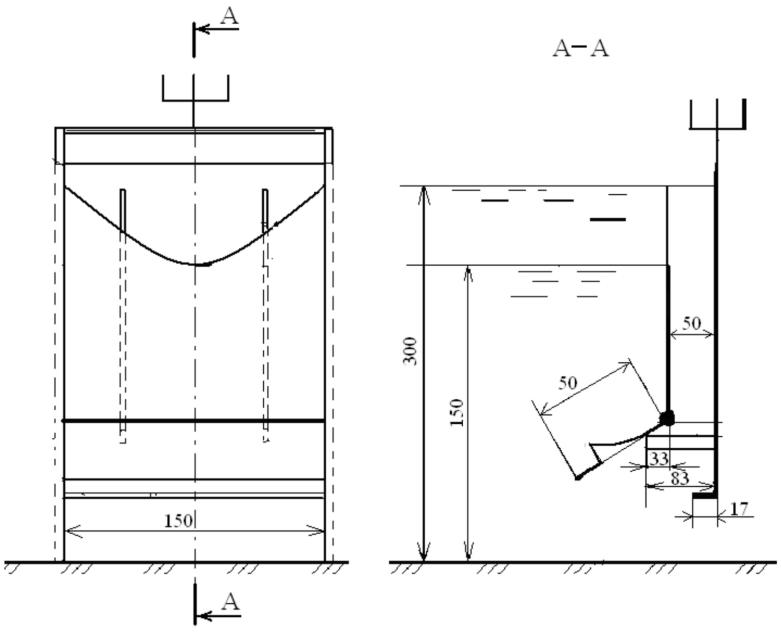


Рисунок 4.18 – Модель стабилизатора расхода СПКЗ

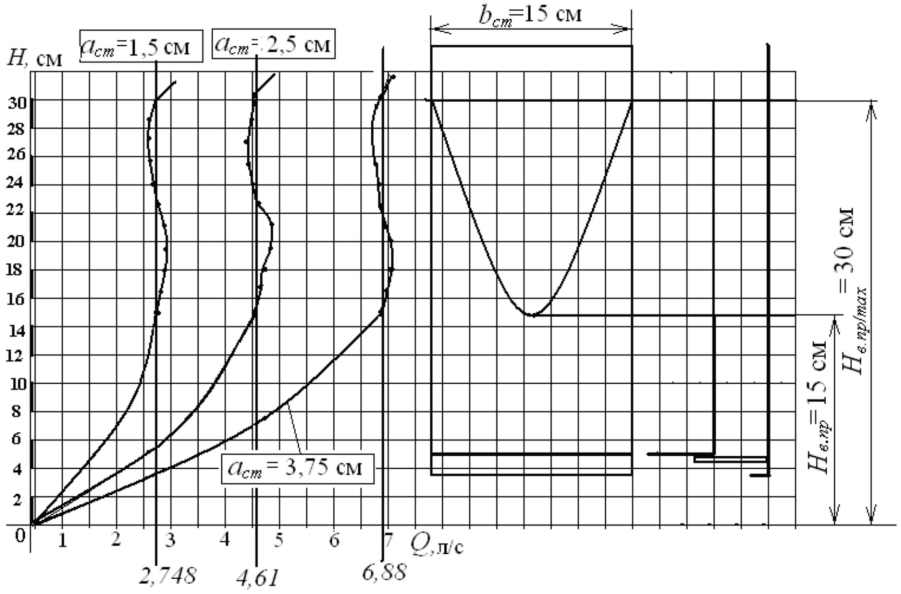


Рисунок 4.19 – Совмещенные расчетная схема стабилизатора расхода и графика зависимости $Q=f(H_{вк})$

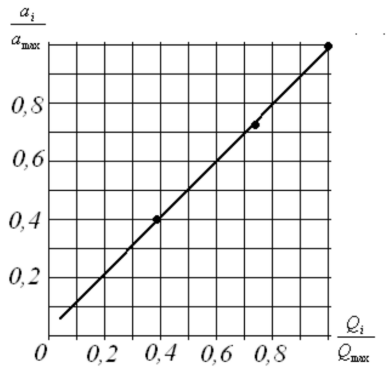


Рисунок 4.20 – График зависимости $Q_i/Q_{max} = f(a_i/a_{max})$

заборного сооружения в паводковый период, в диапазоне изменения глубин в водоприемной камере сооружения $H_{в.пр.max}$ / $H_{в.пр}$ от 1 до 2.

4.3. Исследования гидравлических характеристик потока на сопрягающих участках зарегулированных русел низконапорных плотинных водозаборных сооружений

Как показал анализ результатов модельных исследований и опыт эксплуатации некоторых водозаборных сооружений, применяемая методика [64, 172] для определения габаритных параметров зарегулированных русел водозаборных сооружений имеет некоторые недостатки, причиной которых являются неучтенные факторы, вызывающие возникновение в бьефах сооружений русловых и гидравлических явлений отрицательного характера. Они заключаются в отклонении направления двухфазного потока от задаваемого по проекту, что приводит к непрогнозируемым деформациям дна, разрушениям креплений верховых откосов струенаправляющих дамб, с изменением плановой конфигурации зарегулированных русел.

На наш взгляд, это противоречие связано со следующими основными причинами:

- предлагаемые гидроморфометрические зависимости для расчета параметров зарегулированных русел криволинейной формы были получены с учетом его непременного размещения в конце прямолинейного участка водотока [166], что не отражено в рекомендациях по проектированию подводящих русел;
- не определены конструкции и размеры устройств концевой части зарегулированного отводящего русла гидроузла, обеспечивающие растекание потока по всей ширине поймы и устойчивый транспорт наносов на участке бытового отводящего русла.

С целью совершенствования методики расчета параметров зарегулированных русел водозаборных сооружений и улучшения процесса водозабора из горных рек был проведен ряд модельных исследований. Их целью являлось обоснование компоновочных схем сопряжения подводящего и отводящего участков зарегулированного русла низконапорных водозаборных сооружений с бытовыми участками русел рек.

Проведенные ранее в рамках проекта МНТЦ KR-1130 теоретические и экспериментальные исследования [35] показали, что:

1. При сопряжении подводящего бытового русла реки большой ширины с зарегулированным руслом устойчивой ширины, на его начальном участке происходит отрыв транзитных струй потока от боковых стенок русла с выраженным перераспределением удельных расходов по ширине. При этом поток переходит в квазиравномерное движение только на некотором расстоянии от участка сопряжения.

2. На концевом участке зарегулированного русла (например, канализированного русла р. Кугарт) возникает отложение наносов с развитием процесса поднятия дна вверх по течению. Это объясняется уменьшением транспортирующей способности потока при сопряжении концевого участка устойчивого (канализированного) русла с нижележащим участком речного русла, имеющем большую ширину.

Для создания перед криволинейным подводящим руслом водозаборного сооружения равномерного распределения удельных расходов двухфазного потока, необходимо устройство прямолинейного участка. А для разработки устройств, способных предупредить отложение наносов на участке отводящего зарегулированного русла, необходимо определение условий возникновения и качественных характеристик процесса заиления.

Экспериментальные исследования параметров рекомендуемых схем сопряжения зарегулированного участка с бытовыми подводящим и отводящим руслами рек проводились на модельной русловой установке (МРУ).Полученные опытные данные приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты исследований плановых размеров зоны отрыва струй водного потока от берегов зарегулированного русла

Уклон дна, $i_р$	Длина зоны отрыва на модели, $L_м$, м	Длина зоны отрыва для натуры, $L_н$, м	Устойчивая ширина зарегулиров. русла для-натуры, $B_{уст}$, м	$\frac{L_н}{B_{уст}}$
0,005	0,78	28,0	23,3	1,20
0,010	0,85	26,9	20,5	1,30
0,015	0,93	26,9	18,5	1,45
0,020	1,08	29,7	17,9	1,66
0,025	1,24	32,6	17,1	1,91
0,030	1,32	33,4	16,4	2,04
0,035	1.39	34,2	16,0	2,14
0,040	1,56	37,3	15,5	2,41

Длина прямолинейного участка $L_н$ зарегулированного русла определялась из зависимости вида $L_н / B_{уст} = f(i)$ с учетом воссоздаваемых гидрометрических характеристик.

Используя известные методы статистической обработки [1], нами при тесноте связи $r = 0,98$ была получена эмпирическая зависимость вида:

$$\frac{L_н}{B_{уст}} = 34,976 \times i_р + 0,976 . \quad (4.26)$$

Это выражение может быть рекомендовано для расчета относительной длины прямолинейного участка в зависимости от уклона дна русла.

В ходе поисковых исследований описанной модели участка зарегулированного русла также изучался вопрос его заиления со стороны отводящего бытового русла. Исследования проводились при минимальном уклоне дна i=0,005, который формировался при пропуске руслоформирующего расхода воды с расчетной мутностью потока.

При пропуске руслоформирующего расхода $Q_{рус}$ в зоне сопряжения концевого участка зарегулированного русла с бытовым отводящим руслом двухфазный поток не растекался по всей ширине, а компактно продолжал движение на всей протяженности исследуемого участка длиной $2B_{уст}$ с углом конусности 12º. При уменьшении величины расходов воды, подаваемых на модель зарегулированного русла ниже величины 5/7 $Q_{рус}$, наблюдался процесс заиления концевого участка с увеличением отметок дна. Интенсивность этого процесса зависела от величин расходов воды, мутности потока и продолжительности опыта.

На начальном этапе каждого опыта после пропуска руслоформирующего расхода $Q_{5\%}$, в русло подавался двухфазный поток с расходами воды $Q_{10\%}$, или$Q_{50\%}$ с расчетной мутностью, который формировал отмостку при распространении в бытовом отводящем русле.

При выходе из зарегулированного русла в бытовое русло призма наносов на начальном этапе распространялась прямолинейно в направлении основных струй воды.

После выполаживания гребня призмы наносов водный поток, выходящий из зарегулированного русла, разделялся на две части с отклонением струй от продольной оси зарегулированного русла к берегам отводящего бытового русла. Это сопровождалось возникновением вдоль береговых креплений концевого участка зарегулированного русла движения жидкости, подобного движению двухфазного потока на неустойчивой излучине с интенсивным размывом части сформированной призмы наносов. Отложившиеся ранее наносы в сечении на выходе из зарегулированного русла перемещались по криволинейной траектории.

Поскольку поток подавался по симметричной схеме размещения регуляционных сооружений на входном участке зарегулированного русла, изменение направлений движения двухфазного потока происходило одновременно с правого и левого берегов с одинаковыми скоростями движения воды и величинами расходов. При переформировании дна вдоль береговых креплений концевого участка зарегулированного русла происходил размыв донных отложений.

В центре выходного сечения образовывалась отмель. В развитие процесса образование отмелей в виде наносных гряд по центру русла распространялось вверх по течению. В этом режиме движения двухфазного потока и распространение призмы наносов в бытовом русле происходило в стороны его береговых устоев.

При достижении плановых размеров и величин отметок поверхности призмы наносов на боковых участках со значениями отметок сформированной ранее призмы наносов, на продольной оси русла наступало изменение направленности движения двухфазного потока. В этом случае поток принимал продольную направленность на участкебытового отводящего русла. Гряды наносов, образовавшиеся ранее в центре зарегулированного русла, размывались с заполнением боковых зон размыва дна. После некоторой продолжительности опытов отметка уровней воды в зарегулированном русле повышалась вместе с увеличением отметок дна. Для дальнейшего перемещения двухфазного потока жидкости на сопрягающем участке необходимо увеличение энергетических характеристик жидкости на вышележащем участке зарегулированного русла. Затем описанный выше процесс заиления зарегулированного прямолинейного участка русла повторялся.

На основании представленных результатов модельных исследований можно сделать следующие выводы:

- Устройство прямолинейного участка зарегулированного русла (рисунок 4.21) длиной, определяемой по формуле (4.26), перед криволинейным подводящим руслом водозаборного гидроузла позволит стабилизировать наносозащитные характеристики сооружения.
- При уклонах дна прямолинейного зарегулированного и бытового отводящего русел, равного 0,005, процесс заиления происходит особенно интенсивно при пропуске расчетных расходов воды меньше $Q_{30\%}$. Одним из результатов его проявления можно считать образование отмели в центре концевого сечения зарегулированного русла.

Для уменьшения отрицательного воздействия русловых процессов в отводящем зарегулированном русле на элементы водозаборного сооружения в его концевом сечении необходимо устройство сооружения, служащего фиксированным створом. Это позволит предупредить размыв дна отводящего русла при прохождении руслоформирующих расходов $Q_{5\%}$ и увеличить транспортирующую способность потока при расходах меньшей величины.

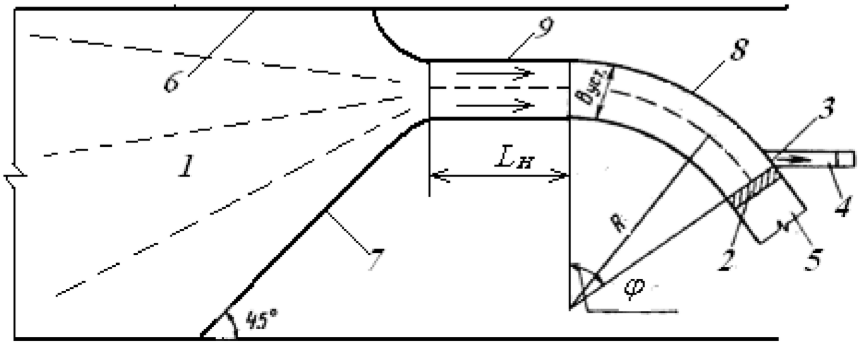


Рисунок 4.21 – Расчетная схема регуляционных сооружений: 1 – подводящее бытовое русло; 2 – водозаборное сооружение; 3 – водоприемник; 4 – отводящий канал; 5 – отводящее русло; 6 – берега бытового русла; 7 – струенаправляющие дамбы; 8 – криволинейное русло; 9 – прямолинейный подводящий участок

4.4. Регулирование русловых процессов в верхнем бьефе водозаборных сооружений при переводе сооружения на зимний режим эксплуатации

После определения рациональных параметров наносозащитных элементов водозаборных сооружений был проведен ряд поисковых исследований по совершенствованию технологических характеристик элементов, служащих для проведения зимнего водозабора и шугосбросов. При этом были учтены следующие условия [97]:

- снижение речных расходов в период зимней межени;
- проведение водоотбора из придонных горизонтов потока воды;
- сброс шуговой массы в нижний бьеф водозаборного сооружения из верхних горизонтов водного потока верхнего бьефа;
- использование устройств и элементов сооружения, служащих для водозабора в теплый период времени зимой;
- создание в верхнем бьефе сооружения условий для надежного транспорта и сброса шуги без образования зажоров;
- элементы зимнего водозабора должны быть простыми, не усложняющими технологические операции при переводе водозаборного сооружения на зимний режим эксплуатации.

В ходе поисковых исследований (рисунок 4.22) с учетом недостатков в организации зимнего водозабора существующих водозаборных сооружений для деривационных ГЭС нами была разработана компоновочная схема водозаборного сооружения для деривационных ГЭС (ВСДГ-2) [83, 84, 85, 97].

Согласно разработанной схеме эксплуатации этого водозаборного сооружения в зимний период для повышения скоростного напора потока уровни воды понижаются до отметки горизонтального гребня наносоотбойного порога посредством регулирования величины напора в речном пролете, создаваемого авторегулятором уровня верхнего бьефа. При этом водоотбор в водоприемную камеру производится из нижних горизонтов речного потока через отверстие придонного затвора зимнего водозабора, а также из-под затвора верхнего водоприемного отверстия (рисунок 4.23).

Забор воды из нижних придонных слоев речного потока в зимнее время становится возможным благодаря минимальному количеству или отсутствию наносов, транспортируемых горными реками в зимний период. Шуголедовые образования, которые поступают по подводящему руслу, сбрасываются в нижний бьеф через верхнюю поверхность предложенной нами донной вставки при поднятии затвора и через верх опущенного полотнища сдвоенного затвора.



Рисунок 4.22 – Модель водозаборного сооружения для деривационных ГЭС

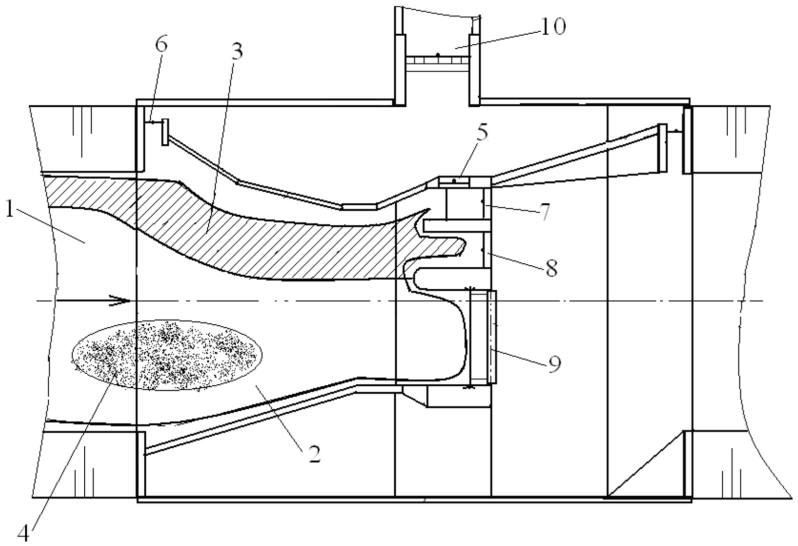


Рисунок 4.23 – Схема размещения призмы наносов в верхнем бьефе водозаборного сооружения при подаче по подводящему руслу расхода двухфазного потока жидкости (вода – наносы) $Q_{75\%}$ малой горной реки с коэффициентом водозабора 0,9: 1 – подводящее зарегулированное русло; 2 – призма наносов; 3 – зона промывки; 4 – зона максимальной высоты призмы наносов; 5 – отверстие зимнего водозабора; 6 – верхнее водоприемное отверстие; 7 – промывное отверстие, перекрываемое затвором; 8 – отверстие дополнительного промывного тракта, перекрываемое сдвоенным затвором; 9 – затвор речного пролета; 10 – отводящий канал

С целью повышения транспортирующей способности потока на участке подводящего русла и верхнего бьефа сооружения, было рекомендовано производить частичную промывку верхнего бьефа сооруженияпри переводе сооружения на зимний период эксплуатации на участке вдоль наносозащитного порога. Проведение промывки необходимо вести без применения затвора речного пролета со смывом всей призмы, с целью сохранения отложений наносов размещающихся со стороны противоположного берега от водоприемника.

Зона промывки верхнего бьефа используется в качестве подводящего русла с ограниченной шириной. Это позволяет при прохождении зимних расходов воды повысить скорость потока и осуществлять водозабор из придонных горизонтов без примесей донных наносов при размыве призмы и без захвата основной массы шуги.

В ходе исследований затвора зимнего водозабора из условия допустимой величины захвата шуги из поверхностных горизонтов потока [97] было определено, что предельная высота открытия затвора зимнего водозабора $a_{пз}$ не должна превышать относительного значения:

$$a_{пз} \le 0,412 H_p . \qquad (4.27)$$

Учитывая этот факт и условие понижения глубин в верхнем бьефе при переводе сооружения на зимний режим эксплуатации, в конструкцию сооружения было включено верхнее водоприемное отверстие. Применение этого дополнительного отверстия обосновывается не только необходимостью его применения в зимний период эксплуатации, но и возможностью увеличения пропускной способности водоприемных элементов сооружения в летний период без увеличения расчетного напора $H_р$ в верхнем бьефе. Это необходимо для подачи в отводящий канал повышенных расходов воды на промывку отстойников и других сооружений по трассе водопроводящих сооружений гидроэнергетических и ирригационных систем. Использование верхнего водоприемного отверстия в конце криволинейного подводящего русла позволяет проводить дополнительный водозабор при коэффициентах водозабора $\alpha_в \le 0,7$.

С целью определения характеристик фрагментарной промывки верхнего бьефа сооружения, и долевого участия верхнего водоприемного отверстия в режиме зимнего водозабо-

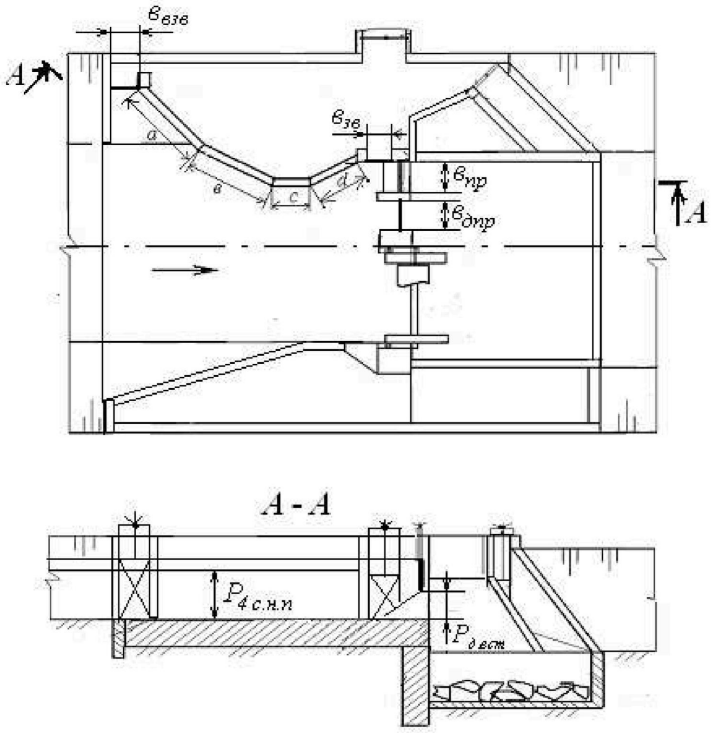


Рисунок 4.24 – Расчетная схема модели водозаборного сооружения ВСДГ-2

ра, были проведены лабораторные исследования модели водозаборного сооружения М 1:20 (рисунок 4.24).

Поисковые исследования приемов частичных промывок верхнего бьефа показали, что их проведение отличается от классической схемы удаления отложения наносов, которые проводятся при полном открытии всех водосбросных элементов подпорного створа. Проведение частичных промывок имеет определенную трудность в создании направленной зоны размыва призмы наносов. При этом зона размыва должна иметь параметры, которые обеспечат шугопроводящую способность потока, аналогичную транспортирующей способности на бытовом участке русла реки.

Было установлено, что при проведении частичной промывки в верхнем бьефе необходимо поддержание глубины воды $Н_{доп}$, которая обеспечивает устойчивость основного объема отложений и необходимую направленность развития зоны перемещения наносов. Следует также учитывать ограниченные расходы воды в малых горных реках, которые наблюдаются при переводе сооружения на зимний режим эксплуатации.

Разработанная конструкция водозаборного сооружения (ВСДГ-2), оборудованная четырехсекционным наносозащитным порогом с горизонтальным гребнем, позволяет производить направленную промывку верхнего бьефа (без водозабора) при поддержании глубины в верхнем бьефе $Н_{доп}$, равную высоте наносозащитного порога $Р_{4с.н.п}$.

С целью определения параметров призмы наносов, формирующейся в верхнем бьефе водозаборного сооружения, был поставлен ряд опытов. Предварительное формирование призм производилось при коэффициенте водозабора $\alpha_в = 0,9$, при пропуске по подводящему руслу расхода $Q_{75\%}$ реки Кугарт.

Известно, что верхний бьеф при высоких коэффициентах водозабора $\alpha > 0,7$, как правило, заносится в три стадии [63, 153, 154]. Продолжительностью первой стадии следует считать период занесения от начала отложения наносов в верхнем бьефе до момента поступления наносов в водоприемную камеру и нижний бьеф гидроузла. Этот период является

безнаносным для водоприемника. После этого момента наступает вторая стадия занесения – стадия стабилизации, которая заканчивается формированием объемов отложений в верхнем бьефе без дальнейшей деформации призмы наносов.

По завершению этого периода через верхний бьеф проходит объем наносов, равный по величине объему наносов, транспортируемых по подводящему бытовому руслу реки. Третья стадия характеризуется установившимся транспортом наносов в водоприемник в допустимом количестве (при рациональных параметрах активных средств наносозащиты) и нижний бьеф сооружения [123].

Занесение верхнего бьефа гидроузла происходит в виде роста переднего фронта призмы наносов, которая распространяется вниз по течению до водоприемных (наносозащитных порогов) и водосбросных элементов. При этом призма наносов увеличивается как по длине, так и по высоте [63].

На формирование призмы наносов, кроме гидроморфометрических характеристик реки, оказывают влияние параметры водозаборного сооружения. Например, Р.К. Кромер в своей работе [63] параметры сооружения (не имеющего наносозащитного порога) учитывал через величину относительного напора в верхнем бьефе сооружения параметром $\Delta H / H_р$. Где ΔH – разность глубины воды в верхнем бьефе сооружения и в бытовом русле реки [2, 3, 153]:

$$\Delta H = H_p - h_p. \tag{4.28}$$

Р.К. Кромер предложил для определения высоты призмы наносов в конце первой стадии использовать зависимость вида:

$$h_{гр.о} = 1{,}12\frac{\Delta H^2}{H_P}. \tag{4.29}$$

Позднее М.М. Абидов [34], исследуя способы регулирования наносного режима при водозаборе из рек горной зоны, рассматривая конструкции водозаборных сооружений с порогами типа (КЦП) конструкции Г.В. Соболина, предложил формулу для определения высоты призмы наносов:

$$h_{гр.о}^{пор} = 1{,}12K_n\frac{\Delta H^2}{H_P}, \tag{4.30}$$

где K_n – коэффициент влияния косонаправленного порога на гидравлические характеристики течения воды в подпорном бьефе $K_n = H_{max} / H_{min}$ (H_{max} – глубина воды перед порогом, а H_{min} – глубина воды перед подпорным створом сооружения, в конце наносозащитного порога).

Анализ результатов исследований М.М. Абидова по формированию призмы наносов в конце первой стадии занесения, показал, что ее максимальная высота составила $h_{гр.о}^{пор} = 1{,}5\Delta H$ при $\Delta H / H_р = 0{,}518$ [63]. При этом высота призмы наносов была равна $h_{гр.о}^{пор} = 0{,}777H_P$.

Формирование призмы наносов в верхнем бьефе сооружения, оборудованного четырехсекционным ломаным в плане наносозащитным порогом с, $\Delta H / H_р = 0{,}69$ в конце первой стадии (при начале транспорта наносов в нижний бьеф и водоприемник) позволило установить, что максимальное значение высоты призмы наносов в верхнем бьефе составляет $h_{гр.о}^{4с.пор} = 1{,}13\Delta H$, а относительное значение – $h_{гр.о}^{4с.пор} = 0{,}78H_p$.

Поскольку формирование призмы наносов на водозаборных сооружениях заканчивается перед наступлением зимнего режима реки, отложения наносов в верхнем бьефе сооружения проводились при меженном расходе реки Кугарт. При этом на модели обеспечивался водозабор через гребень порога при расчетной глубине воды в верхнем бьефе $H_р = 10{,}0$ см и высоте порога $P_{4с.н.п} = 7{,}5$ см.

При дальнейшем формировании призмы наносов во второй стадии стабилизации был отмечен вертикальный рост призмы наносов до относительных величин $h_{гр.о}^{4с.пор} \geq 0,87H_P$.

Приведенные значения высоты формирующейся призмы наносов в верхнем бьефе ВСДГ-2 и параметры четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога определили максимальное значение допустимой глубины водного потока для проведения частичной промывки $Н_{доп} = Р_{4с.н.п} = 0,75Н_р$.

Направленная промывка проводилась при открытии затвора промывного тракта 7, оборудованного донной вставкой и сдвоенного затвора 8 дополнительного промывного тракта сооружения (см. рисунок 4.24). При этом по подводящему руслу модели подавался средний многолетний зимний расход воды для реки Кугарт $Q_{ср.зим} = 1,82$ л/с, что для натурных условий равно $Q_{ср.зим/нат} = 3,25$ м^3/с.

Процесс промывки производился до появления в зоне создания направленного вторичного русла средних скоростей воды, равных скорости на бытовом участке русла р. Кугарт при уклонах дна $i_р = 0,012$, $v_р = 1,42$ м/с, что для модели составляет $v_р = 0,317$ м/с.

Моделирование проводилось до полной остановки частиц наносов в зоне частичной промывки верхнего бьефа и подводящего русла модели.

В ходе исследований было определено рациональное перераспределение расходов воды между промывными трактами сооружения. Результаты эксперимента показали, что минимальная продолжительность фрагментарной промывки верхнего бьефа водозаборного сооружения продолжительностью на модели 45 минут (для натурных условий 3 часа 20 минут) наблюдалась при организации сброса через промывные тракты сооружения следующих относительных расходов воды:

- через основной промывной тракт $Q_{осн.тр} = 0,225Q_{ср.зим}$;
- через дополнительный промывной тракт $Q_{доп.тр} = 0,775Q_{ср.зим}$.

В ходе частичной промывки верхнего бьефа при указанном перераспределении сбрасываемых расходов было сформировано вторичное криволинейное русло, повторяющее контур четырехсекционного ломаного в плане наносозащитного порога. Геометрические размеры и гидравлические параметры зоны частичной промывки составили:

- ширина на модели 13,5 см (для натуры 2,7 м);
- глубина в начальном створе 4,6 см (для натуры 0,92 м);
- глубина перед подпорным створом 5,1 см (для натуры 1,02 м);
- уклон дна 0,009.

Затем были проведены исследования по определению транспортирующей способности двухфазного потока (вода – шуга), движущегося по вторичному руслу. Было установлено, что при проведении водозабора с коэффициентом $\alpha_в = 0,8$ через два отверстия зимнего водозабора происходит сброс шуги через поверхность донной вставки основного промывного тракта без образования зажора, при предельном коэффициенте содержания шуги в потоке, равном $m_{ср} = 0,17$. При этом было установлено рациональное распределение забираемых расходов воды через водоприемники сооружения. Относительная величина расхода, поступавшего в водоприемную камеру через отверстие зимнего водозабора, была равна $0,75Q_{от.кан.зим}$.

Поскольку было установлено, что значение максимального коэффициента содержания шуги на горно-предгорных участках некоторых рек Кыргызстана равно $m_{ср.max} = 0,25$ [97], были проведены исследования по определению предельной величины коэффициента водозабора при условии транспорта максимальных объемов шуги через створ сооружения.

Исследования проводились в условиях сформированного русла и проведении зимнего водозабора через отверстие зимнего водозабора, размещенного в промывном тракте. Было установлено, что допустимый транспорт шуги в верхнем бьефе сооружения наблюдается

при коэффициенте водозабора $\alpha_в$ = 0,53. Дополнительная транспортирующая способность в подпорном створе сооружения появляется при введении в работу сдвоенного затвора дополнительного промывного тракта.

Проведенные исследования позволили определить количественные характеристики процесса водозабора в зимних условиях эксплуатации при транспорте по руслу реки двухфазного потока с повышенным содержанием шуги. Это дало возможность рекомендовать применение конструкции ВСДГ-2 на горно-предгорных участках рек для проведения круглогодичного водозабора в гидроэнергетические системы.

5. ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

5.1. Результаты внедрения в производство конструкции автоматизированного водозаборного сооружения для деривационной ГЭС

Теоретические и лабораторные исследования водозаборных сооружений послужили основой для разработки проектов по их реконструкции и строительству на горно-предгорных участках рек [77, 82].

В 2007 г. предложенная компоновка водозаборного сооружения была внедрена в производство при реконструкции гидротехнических сооружений малой деривационной ГЭС на р. Иссык-Ата (рисунок 5.1) с установленной мощностью 1,48 МВт [4].

Подача воды от водозаборного сооружения осуществлялась в открытый деривационный канал трапецеидального сечения с частичной облицовкой отдельных участков канала с повышенной фильтрацией.

С учетом успешного опыта эксплуатации ВСДГ была использована в проекте ПКТИ «Водоавтоматика и метрология» (г. Бишкек) как типовая, и в 2010 г. сооружена на р. Мерке (Республика Казахстан) [82] для подачи воды на деривационную ГЭС. Установленная мощность деривационной ГЭС Мерке-3 составляет 1,6 МВт. Отличительной особенностью гидроузла на р. Мерке является применение напорной деривации с дополнительной очисткой воды пескогравиеловкой, устроенной на головном участке деривационного водовода (рисунок 5.2).

На основании опыта эксплуатации и результатов натурных инструментальных измерений конструкций водозаборных сооружений типа ВСДГ можно отметить следующие положительные моменты:

- использование средств гидравлической автоматизации в виде прислонного затвора-автомата уровня верхнего бьефа на речном (сбросном) пролете обеспечило точность ре-



Рисунок 5.1 – Водозаборное сооружение для деривационной ГЭС, построенное в 2007 г. на р. Иссык-Ата в Чуйской области, Кыргызстан



Рисунок 5.2 – Водозаборное сооружение для деривационной ГЭС, построенное в 2010 г. на р. Мерке в Меркенском районе, Джамбульской области, Казахстан

гулирования уровня до 10 % от величины расчетного напора. Установка стабилизатора расхода воды на водоприемном оголовке деривации с точностью подачи воды не менее 5 % позволила повысить надежность водозабора из горных рек, как в маловодные периоды года, так и в периоды пропуска паводка;

- устройство ломаного в плане наносозащитного порога и промывных трактов с пониженным промежуточным бычком обеспечило эффективную защиту деривационных водоводов от влекомых наносов диаметром выше 12 мм;
- разделение водоприемной камеры сооружения на повышенную и пониженную части способствовало формированию вдоль берегового устоя гидравлических структур потока, перемещающих плавающий мусор в обход водоприемника.

Нельзя не отметить и некоторые негативные процессы в работе рассматриваемых сооружений:

- отложение призмы речных наносов в верхнем бьефе обоих сооружений. В осенний сезон многоводного 2011 г. на реке Иссык-Ата в верхнем бьефе образовалась гряда наносов вдоль запроектированного вогнутого берега подводящего русла; на р. Мерке верхний бьеф перед речным пролетом ВСДГ был завален крупными, до 400 мм, фракциями камня;
- зимой 2010–2011 гг. в период шугохода в деривационный канал Иссык-Атинской ГЭС транспортировалось недопустимое количество шуги, что вызвало остановку гидроагрегатов станции на 16 дней;
- произошло частичное разрушение фронтальных и донных частей железобетонных конструкций в верхнем бьефе водозаборного сооружения на реке Мерке.

Анализ натурных измерений и повторные модельные исследования показали, что основными причинами, повлекшими возникновение указанных недостатков в эксплуатации ВСДГ, являются:

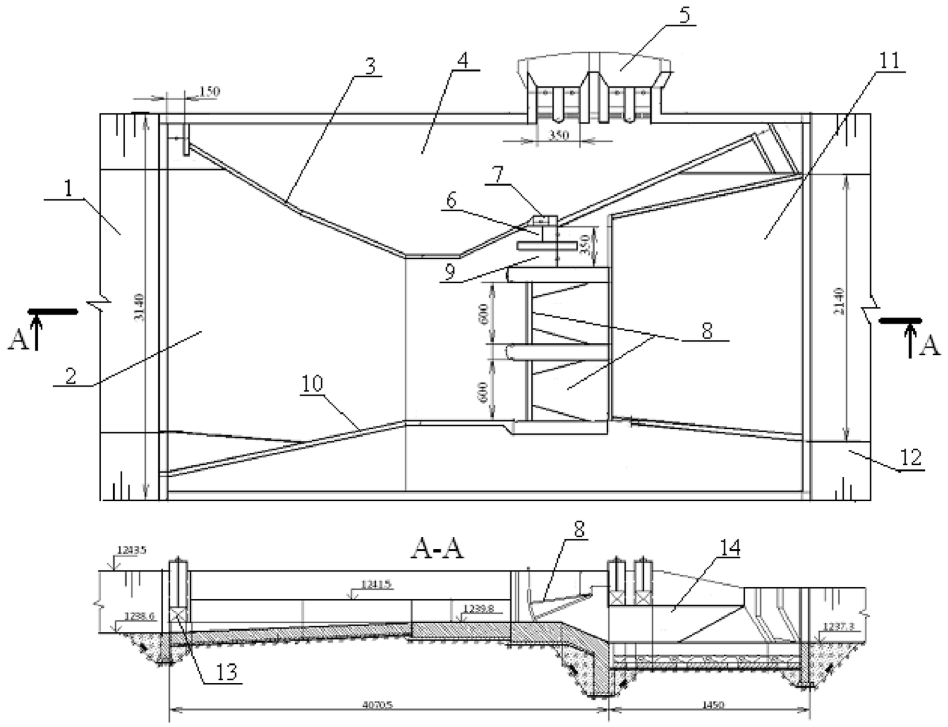


Рисунок 5.3 – Водозаборное сооружение ВСДГ-2: 1 – подводящее русло; 2 – верхний бьеф сооружения; 3 – четырехсекционный порог; 4 – водоприемная камера; 5 – отводящий канал; 6 – промывной тракт; 7 – зимний водоприемник; 8 – речные пролеты; 9 – дополнительный промывной тракт; 10 – автоводослив верхнего бьефа; 11 – водобойный колодец; 12 – отводящее русло; 13 – верхнее водоприемное отверстие; 14 – автоводослив водоприемной камеры

- отклонение от проектных решений при строительстве объектов, т. к. на обоих сооружениях подводящее русло вместо криволинейного выполнено прямолинейным, что нарушило структурирование водных потоков на подходных участках подпорного створа, и стало причиной отложений наносов;
- использование проекта ВСДГ на р. Иссык-Ата, как типового, при строительстве водозаборного сооружения на р. Мерке, без проведения моделирования гидроузла, что является недопустимым при строительстве гидротехнических сооружений ГЭС на горных реках, т. к. каждая река имеет специфический гидрологический и морфометрический режим;
- недостаточный учет в конструктивных решениях ВСДГ способов и средств защиты от шуги при транспорте через подпорный створ сооружения. Конструкция и компоновка шугозащитных элементов ВСДГ требуют доработки с учетом опыта эксплуатации;
- причиной частичного разрушения железобетонных конструкций на водозаборном сооружении р. Мерке стало использование низкой марки бетона при строительстве на горной реке, транспортирующей кварцсодержащие абразивные частицы наносов.

Рассмотренные недостатки и их причины были учтены при разработке компоновочной схемы и модельных исследованиях водозаборного сооружения (рисунок 5.3) для каскада деривационных ГЭС на р. Усек Алма-Атинской области, Казахстан.

В настоящее время продолжаются совместные исследования КРСУ и СПбГПУ в области водозабора из горных рек с учетом зимних условий эксплуатации. Получены патенты Кыргызской Республики и Российской Федерации на конструкцию шугосбросных устройств водозаборных сооружений для горных рек [82].

Опыт исследования, проектирования и эксплуатации автоматизированных водозаборных сооружений на малых горных реках с уклоном дна от 0,005 до 0,04 и максимальным расходом воды (1 % обеспеченности) до 400 м^3/с при расходе водозабора в деривацию менее 20 м^3/с, может быть применен при реализации программы развития малой энергетики в странах Средней Азии и России.

5.2. Рекомендации по проектированию элементов водозаборных сооружений для горных рек

Современные водозаборные сооружения являются комплексом водопроводящих, водосбросных, водоприемных и сопрягающих элементов, которые устраиваются в определенной последовательности с целью создания необходимых гидравлических структур речных потоков для создания необходимых технологических операций процесса водозабора. Основным условием, определяющим работоспособность того или иного сооружения, является забор из реки и подача в водопроводящие сооружения гидроэнергетических и ирригационных систем требуемых расходов воды.

Основными нормативными документами при проектировании водозаборных сооружений (СНиП II-И.33-01–2003 и ВСН II-14–76) рекомендуется соблюдать следующую последовательность: после сбора и обработки информации окончательно выбирается местоположение створа, тип и компоновочная схема сооружения, рассчитываются параметры и размещаются отдельные элементы.

Величины расходов воды, подаваемых в отводящие каналы, определяются ординатами графиков водоподачи и характеристиками водопроводящих сооружений систем. В этом случае, как правило, учитываются потери воды на фильтрацию (к.п.д. канала). Расход воды принимается равным: для напорных водопроводящих ГТС – необходимому расходу водопользователей Q_K=Q_C, для открытых безнапорных каналов в бетонной, железобетонной или

асфальтобетонной облицовке $Q_К$=(1,05÷1,1)$Q_С$, для грунтовых каналов $Q_К$=(1,1÷1,2)$Q_С$ (где $Q_К$ – расход, подаваемый в канал, $Q_С$– расход воды, необходимый для подачи в водохозяйственную систему).

Расчет водозаборного сооружения включает определение расчетных напоров в верхнем бьефе сооружения, продольных и поперечных размеров подводящего зарегулированного русла, речного пролета, водоприемника, наносозащитного порога, промывного тракта, автоводосливов и крепления нижнего бьефа сооружения [97].

При выборе головных сооружений с односторонним водотбором рекомендуется криволинейная конфигурация подводящего русла с расположением водоприемника в конце вогнутого берега. Проектирование и расчет параметров подводящего и отводящего зарегулированных русел головных водозаборных сооружений гидроэнергетического и ирригационного назначения рекомендуется производить на пропуск руслоформирующего расхода, руководствуясь разработанной методикой по проектированию регуляционных гидросооружений [166, 172].

Основным расчетным параметром водозаборных сооружений является расчетный напор перед водоприемным оголовком, который создается и поддерживается при прохождении различных величин речных расходов.

На основании приведенных выше результатов исследований расчетная глубина воды в верхнем бьефе для ВСДГ-1 может быть определена по формуле:

$$Н_р = 5,7 \times H_{н.п}, \quad (5.1)$$

где $Н_{н.п}$ – расчетный напор над гребнем порога, определяемый в зависимости от наносозащитных характеристик порога, его пропускной способности, с учетом результатов лабораторных и натурных исследований для трехсекционных порогов может быть определен по таблице 5.1.

Приведенные зависимости могут быть использованы для величин расходов, подаваемых в водоприемную камеру и изменяющихся в пределах от 1 до 6 м^3/с.

Таблица 5.1 Эмпирические зависимости для определения напора над трехсекционным ломаным в плане порогом

Ширина гребня порога,$С_{н.п}$, м	Уклон гребня порога, $i_{н.п}$	Рекомендуемые зависимости
0,3	0,06	$H_{н.п}=0,217Q^{0,3687}$
0,3	0,07	$H_{н.п}=0,231Q^{0,367}$
0,3	0,08	$H_{н.п}=0,242Q^{0,368}$
0,4	0,06	$H_{н.п}=0,221Q^{0,374}$
0,4	0,07	$H_{н.п}=0,234Q^{0,374}$
0,4	0,08	$H_{н.п}=0,246Q^{0,374}$

Длина наносозащитного порога определяется из формулы водослива с широким порогом:

$$L_п = \frac{Q_К}{m_{н.п}\sqrt{2g}H_п^{1,5}}, \quad (5.2)$$

где $Q_К$ – расход, подаваемый в отводящий канал; $m_{н.п}$ – коэффициент расхода водослива, определяемый в зависимости от выбранной конструкции наносозащитного порога для трехсекционных порогов по формуле (4.14), для четырехсекционных порогов с уклонным гребнем по формуле (4.20), при устройстве четырехсекционных порогов с горизонтальным гребнем коэффициент расхода составляет $m_{н.п}$ = 0,4÷0,41.

Ширина водоприемного оголовка отводящего канала, оборудованного стабилизатором расхода типа СПКЗ (см. рисунок 2.29), может быть определена по формуле:

$$b_{в.о} = \frac{Q_K}{\mu \cdot a_{ст.\max} \sqrt{2g \cdot (H_{вк} - a_{ст.\max})}}, \quad (5.3)$$

где μ – коэффициент расхода при истечении из-под поворотной пластины принимается равным 0,83; $a_{ст.\,max}$ – максимальное открытие стабилизатора расхода $a_{ст.\,max} = 0{,}25Н_{вк}$; $H_{вк}$ – минимальный расчетный напор в верхнем бьефе (в водоприемной камере).

Длина автоматического водослива водоприемной камеры определяется в зависимости от разности расходов, поступающих в камеру через наносозащитный порог при прохождении паводка и расхода, забираемого в канал по формуле водослива с широким порогом:

$$L_{a.b} = \frac{Q_{н.п.\max} - Q_K}{m\sqrt{2g}(H_{вк.\max} - P)^{1,5}}, \quad (5.4)$$

где $Q_{н.пmax}$ – расход воды, поступающей через наносозащитный порог при прохождении паводка; $Н_{вк.max}$ – максимальная глубина в водоприемной камере; P – высота автоводослива со стороны водоприемной камеры.

Расчет параметров низконапорного плотинного водозаборного сооружения производится относительно двух глубин в верхнем бьефе сооружения расчетной глубины H_P и максимальной расчетной глубины $H_{рmax}$. Расчетная глубина H_P определяется в зависимости от обеспечения пропускной способности водоприемных элементов сооружения и параметрами устройств для обеспечения защиты водоприемника от наносов и ледошуговых образований. Значение максимальной глубины $H_{рmax}$ используют при определении общей пропускной способности сооружения путем суммирования величин расходов, сбрасываемых в нижний бьеф, и подаваемых в отводящий канал.

5.3. Рекомендации по эксплуатации низконапорных водозаборных сооружений

Низконапорные водозаборные сооружения возводятся на естественных водотоках при наибольших значениях коэффициента водозабора $\beta = Q_k / Q_p = 0{,}4 – 0{,}95$, с напорами в верхнем бьефе сооружений от Н = 1,5–3 м, для обеспечения командования над системой и регулирования гидравлическими структурами потока.

В практике водозабора из рек с помощью низконапорных водозаборных сооружений различают 5 основных режимов эксплуатации, которые сопряжены с гидрологическими режимами источников [97]:

- режим пропуска через створ водозаборного сооружения паводковых расходов, который является наиболее опасным режимом, и сопровождается возникновением различных аварийных ситуаций, наблюдается на реках в зависимости от типа их питания весной или летом, при этом коэффициенты водозабора на сооружениях, как правило, составляют $\alpha_в = {}_k / Q_p \le 0{,}6$;
- режим эксплуатации водозаборного сооружения в меженный летний период гидрографа реки и при пропуске среднелетних расходов воды, когда коэффициент водозабора $\alpha_в = 0{,}6 \div 0{,}9$;
- режим эксплуатации водоприемных и наносозащитных элементов сооружений при максимальном коэффициенте водозабора $\alpha_в = 0{,}9 \div 0{,}95$;
- режим зимней эксплуатации при водозаборе из придонных горизонтов потока и при сбросе по транзиту ледошуговых образований с поверхностнойдолей потока $\alpha_в = 0{,}5 \div 0{,}8$. Если рассматриваемое водозаборное сооружение имеет ирригационное назначение, то этот режим обычно осуществляется без водозабора в отводы, т. е. при транзите потока вниз по реке;

- режим переформирования призмы наносов в верхнем бьефе сооружения, который имеет место на низконапорных сооружениях при внезапном нарастании величин речных расходов в начале паводкового периода.

Эксплуатация и режим работы предлагаемых конструкций водозаборных сооружений обычно зависит от величин проходящих речных расходов, и осуществляется по следующим схемам:

Схема 1 (паводок) $Q_{сбр} = Q_р - Q_к > 0,4Q_р$;

Схема 2 (межень) $Q_{сбр} = Q_р - Q_к = (0,1 \div 0,4)Q_р$;

Схема 3 (максимальный водозабор) $Q_{сбр} = Q_р - Q_к = 0,05 \div 0,1$;

Схема 4 (зимний режим) $Q_{сбр} = Q_р - Q_к \geq 0,2Q_р$.

Здесь $Q_{сбр}$ – сбросной расход водозаборного гидроузла; $Q_р$ – расход реки; $Q_к$ – расход, поступающий в отводящие каналы.

В ходе водозабора из рек вместе с водой транспортируется большое количество твердых включений в виде взвешенных и влекомых наносов, плавающего мусора, топляка (тяжелые древесина, резина или донный лед, имеющий каменные примеси), льда, шуги. Это необходимо учитывать в ходе проведения водозабора по приведенным вышесхемам и при выполнении основных требований в процессе водозабора.

Для этого в основу эксплуатации низконапорных водозаборных сооружений уже на стадии проектирования должен быть положен принцип регулирования водного потока путем включения в его гидравлическую структуру определенных конструктивных элементов и устройств.

Схема 1. При обеспечении этой схемы основная часть паводковых расходов сбрасывается вместе с большим объемом влекомых наносов через речной пролет сооружения и через промывной тракт сооружения, перекрываемый сдвоенным затвором. При этом особое внимание следует уделять наблюдениям за устойчивостью струенаправляющих дамб в верхнем и нижнем бьефе водозаборного сооружения. При возникновении повреждений необходимо укреплять деформирующиеся участки облицовки.

Основная масса плавающих тел должна сбрасываться через речной пролет, оборудованный затворами-автоматами для создания подпора воды в верхнем бьефе и через автоматические водосливы, при этом плавающие тела необходимо ориентировать в направлении продольного створа гидроузла.

Защита входных оголовков водоприемников от плавника осуществляется при помощи сороудерживающих решеток, которые необходимо регулярно очищать.

Ежегодно перед окончанием паводков верхний бьеф сооружения необходимо промывать для того чтобы подготовить его к аккумуляции наносов при повышенных коэффициентах водозабора. Продолжительность промывки определяется опытным путем на месте и может изменяться от 1 до 2-х часов в сутки. Пропуск паводковых расходов рекомендуется производить при расчетных напорах в верхнем бьефе водозаборного гидроузла, поддержание которого ведется с помощью затворов речного пролета. А промыв наносов необходимо осуществлять при полностью открытых водопропускных устройствах.

Для предотвращения аварийной ситуации на сооружении перед наступлением паводкового периода для уменьшения вероятности возникновения аварийных ситуаций верхний и нижний бьеф сооружения должны быть освобождены от отложений наносов с помощью промывок.

Верхний бьеф промывается при пониженных уровнях воды для увеличения транспортирующих скоростей водного потока. А при занесенных наносами верхнем и нижнем бьефах, сооружение промывается в два цикла. Сначала, не снижая горизонта воды в верхнем бьефе, пропускается полный расход реки для промыва нижнего бьефа, затем, постепенно снижая горизонт воды, промывается сам верхний бьеф.

Схема 2 – эксплуатация водозаборного сооружения в меженном режиме. Этот режим наблюдается в том случае, когда расход в реке достаточен, чтобы обеспечить водой отводящие каналы и промыв наносов в нижний бьеф сооружения.

В этом режиме эксплуатации рекомендуется соблюдать следующие условия:

- расходы воды, поступающие в каналы, регулируются стабилизаторами расхода, устроенными на входном оголовке сооружения;
- избыточный расход реки пропускается через промывные отверстия, а также может сбрасываться через отверстия затвора речного пролета;
- в верхнем бьефе с помощью авторегуляторов поддерживается расчетный горизонт воды.

Схема 3 – эксплуатация гидроузла при высоком коэффициенте водозабора. Затворы речного пролета полностью закрываются. Затвор промывного тракта имеет минимальные открытия. При этом горизонт воды в верхнем бьефе поддерживается на максимально возможном расчетном уровне, это вызывает интенсивное выпадение влекомых наносов и значительной части взвешенных наносов в подводящем русле. В этом случае верхний бьеф сооружения выполняет роль однокамерного отстойника. При поступлении наносов в отводящий канал необходимо производить промывку верхнего бьефа принудительным открытием затворов подпорных элементов сооружения.

Схема 4 – эксплуатация водозаборного гидроузла в зимний период. При переводе гидроузла на зимнюю эксплуатацию необходимо в верхнем бьефе сооружения произвести частичную промывку для формирования вторичного русла. Промывка производится для создания необходимой транспортирующей способности потока на участке подпорного бьефа и недопущения донных отложений в отверстиях зимнего водозабора, устраиваемые на берегу или в разделительных бычках сооружения. Ледошуговые образования сбрасываются через специально приспособленные устройства (через поверхность донной вставки, гребни сдвоенных затворов промывного отверстия и гребни автоводосливов).

В зимнем режиме эксплуатации в верхнем бьефе необходимо поддерживать расчетные глубины, которые могут быть меньше летних глубин потока.

Для проведения качественного и надежного водозабора были составлены рекомендации [77] по распределению расходов, пропускаемых элементами сооружения в зависимости от величины расходов реки. Значения рекомендуемых расходов были назначены с учетом результатов исследований пропускной способности элементов ВСДГ-1 [49], проведенных М.К. Тороповым (см. рисунок 2.24). В таблице 5.2 приведены значения относительных расходов, проходящих через водопропускные элементы ВСДГ, в долях от расходов воды Q_p, поступающих по реке в основные режимы эксплуатации (по попаданию допустимого количества наносов и шуги в отводящий канал).

Таблица 5.2 – Рекомендуемые допустимые значения расходов, проходящих через элементы водозаборного сооружения в долях от речных расходов Q_p

Схемы экспл. ВСДГ-1	Q_p	$Q_{н.п}$	$Q_к$	$Q_{р.п}$	$Q_{сз(1)}$	$Q_{пр.з}$	$Q_{кв.(1)}$	$Q_{пр(1)}$	$Q_{кв.(2)}$	$Q_{пр(2)}$	$Q_{сз(2)}$	$Q_{сбр}$
1	1	0,9	0,9	-	-	-	-	0,1	-	-	-	0,1
2	1	0,2	0,1	0,6	-	-	0,05	0,05	0,06	0,02	0,02	0,9
3	1	0,5	0,5	0,1	-	-	-	0,4	-	-	-	0,5
4	1	-	0,8	-	0,2	0,8	-	-	-	-	-	0,2

Благодаря такому перераспределению расходов воды между водопропускными элементами сооружения и размещению отдельных устройств достигается сбалансированность величин сбрасываемых в нижний бьеф объемов воды. Это способствует упорядочению движения потока в отводящем русле [77].

Планом эксплуатационных мероприятий предусматриваются сроки проведения осмотра сооружений гидроузла и их металлоконструкций.

При проведении плановых осмотров металлоконструкций и средств автоматизации водозаборных сооружений необходимо выполнять проверки наличия деформации, коррозийных повреждений, состояния сварных швов, резиновых уплотнений, надежности креплений, посадки закладных элементов и т.д.

В случае значительных повреждений механического оборудования принимается решение о характере и сроке их ремонта. Нарушенные в результате коррозии или деформации сварные швы металлоконструкций вырубаются и завариваются вновь.

При эксплуатации средств автоматизации сооружения в зимний период времени рекомендуется поддерживать температуру металлических частей, соприкасающихся с водой, не менее +5 ºС. Поддержание температурного режима ведется с помощью обогрева. Кроме того, на гидроэнергетических сооружениях необходима периодическая ревизия надежности крепления утеплителя и системы отопления металлических элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема забора воды из малых горных рек в гидроэнергетические и ирригационные системы потребовала разработки ряда методов управления русловыми и гидравлическими процессами с максимальным использованием потенциальных возможностей устройств и элементов низконапорных плотинных водозаборных сооружений.

Решение этой проблемы стало возможным вследствие изучения и анализа соответствующих технологических основ процесса водозабора из горных рек и теоретического описания гидравлических явлений, возникающих на водозаборных сооружениях, явлениях взаимодействия струй жидкости с твердыми поверхностями, перераспределения объемов воды в бьефах водозаборных сооружений.

Наиболее перспективными на малых горных реках признаны низконапорные плотинные водозаборные сооружения с односторонним водоотбором со стороны вогнутого берега русла, оборудованные выпуклыми ломаными в плане наносозащитными порогами, автоматизированными водоприемными оголовками и речными пролетами, фронтальными промывными трактами, автоводосливами.

Результаты проведенных теоретических разработок позволили описать русловые и гидравлические процессы, возникающие при набегании струй водного потока на вогнутый берег подводящего зарегулированного русла, внешнюю поверхность выпуклого в плане наносозащитного порога при движении двухфазного потока жидкости в промывных трактах сооружений и при перераспределении объемов воды в проточных элементах коробчатых стабилизаторах расхода воды. Это дало возможность разработать усовершенствованные компоновки низконапорных плотинных водозаборных сооружений с высокими наносо- и шугозащитными характеристиками, способными осуществлять круглогодичный водозабор из горных рек с различными гидроморфометрическими характеристиками.

Разработанная методика лабораторных исследований позволила провести ряд экспериментов, в которых были определены необходимые параметры наносозащитных и сбросных устройств. Эти параметры аналитически сопряжены с основными гидроморфометрическими характеристиками малых горных рек.

Проведение процесса водозабора из малых горных рек с использованием предложенных конструкций водозаборных сооружений способствует оперативному и эффективному управлению гидравлическими и русловыми процессами при подаче требуемых расходов воды с необходимым качеством в гидроэнергетические и ирригационные системы.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, изложенные в настоящей работе, доведены до производственного внедрения на малых горных реках Кыргызской Республики и Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абакумов А.И.* Этапы математического моделирования. Владивосток: Изд-во Дальрыбвтуза, 1997. 19 с.
2. *Абидов М.М.* Регулирование наносного режима при водозаборе и рек горной зоны // Сб. научн. трудов МГУП «Природообустройство и рациональное природопользование…». Ч. 2. М., 2004. С.133–139.
3. *Абидов М.М.* Регулирование наносного режима при водозаборе на горно-предгорных участках рек: автореф. дис… канд. техн. наук. М.: МГУП, 2006. 20 с.
4. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 280 с.
5. *Айманбаев Н.К. и др.* Современное состояние земельно-водных ресурсов, оросительных систем и пути интенсификации орошаемого земледелия Киргизской ССР. Часть 1. Фрунзе: Киргиз. НИИэкономики Агропрома, 1989. 146 с.
6. *Алексеенко В.Н., Ашмарин А.В.* Оценка энергоресурсов мелких водотоков Киргизии для энергоснабжения отдаленных горных районов // Проблемы использования энергоресурсов малых рек Киргизии: Тез.докл. республ. совещ. Фрунзе, 1984. С. 55.
7. *Алтунин С.Т.* Выправительные, защитные и регулировочные сооружения на реках. М.: Сельхозгиз, 1947.
8. *Алтунин С.Т.* Регулирование русел рек при водозаборе. М.: Сельхозгиз, 1950. 335 с.
9. *Алтунин В.С.* О кинематических и морфометрических закономерностях речного потока. М.: Известия ТСХА.1963. № 4.
10. *Алтунин Н.П.* Водозаборные узлы и водохранилища. М.: Колос, 1964. 429 с.
11. *Артамонов К.Ф.* Регулировочные работы при водозаборе из горных рек. Фрунзе: Изд. АН Кирг. ССР, 1963. 344 с.
12. *Артамонов К.Ф., Рамазан М.С., Сатаркулов С.С.* Наносный режим и некоторые вопросы гидравлики решеток ВДР // Вопросы гидротехники. Фрунзе,1964. С. 46–57.
13. *Артамонов К.Ф., Крошкин А.Н., Талмаза В.Ф.* Методические указания по расчету устойчивых аллювиальных русел горных рек при проектировании гидротехнических сооружений. М.: Колос, 1972. 64 с.
14. *Артамонов К.Ф., Крошкин А.Н.* Вопросы гидротехнической классификации русловых участков и гидрометрии горных рек // Морфология речных русел и их моделирование. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. С. 18–23.
15. *Артамонов К.Ф., Сатаркулов С.С.* Водозабор, совмещенный с перепускным сооружением // Вопросы водного хозяйства (гидротехника): Сб. Вып. 21. Фрунзе, 1972. С. 50–54.
16. *Артамонов К.Ф., Крошкин А.Н.* Преимущественное использование конструктивных видов регуляционных сооружений на участках рек большого протяжения // Вопросы водного хозяйства: Сб. науч. тр. Всес. научно-исслед.ин-та КАМС. Вып. 30: Гидротехника. Фрунзе, 1974. С. 3–11.
17. *Атаманова О.В.* Совершенствование систем водораспределения с гидравлическими стабилизаторами расхода воды: автореф... дис. д-ра техн. наук. Бишкек, 2003. 36с.
18. *Атаманова О.В.* Результаты исследований стабилизаторов расхода воды типа «цилиндрический коробчатый щит» в подпорном режиме работы // Автоматизация оросительных систем и энергосберегающих технологий: Сб. науч. тр. КСХИ. Бишкек, 1995. С. 125–134.

19. *Барышников Н.Б., Дементьева Ю.А., Пагин А.О., Соколов А.Б.* Формулы и методы для расчета расхода донных наносов // Научно-теоретический журнал: Ученые записки Российского госуд.гидрометеоролог.ун-та № 11. СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. С. 16–23.
20. *Бекбоева Р.С., Логинов Г.И.* Результаты исследований зимнего режима некоторых рек Кыргызстана // Вестник КАУ, посвящ. научно-практич. конф. «Актуальные проблемы аграрного образования и науки на современном этапе», №2 (6) 2006. Бишкек. С. 148–150.
21. *Биленко В.А., Ершова Н.В.* Основные особенности водного режима рек северного склона Киргизского хребта // Архитектура и строительство: Сб. научн. тр. КРСУ. Бишкек, 2003. С. 274–283.
22. *Богомолов А.И., Михайлов К.А.* Гидравлика: учебник для студентов вузов. М.: Литература по строительству, 1965. 627 с.
23. *Большаков М.Н.* Водные ресурсы рек Советского Тянь-Шаня и методы их расчета. Фрунзе: Илим, 1974. 307 с.
24. *Бочкарев Я.В.* Гидравлическая автоматизация горных водозаборных узлов. Фрунзе: Кыргызстан, 1969. 185 с.
25. *Бочкарев Я.В., Луговой А.С.* Водораспределение и учет воды на каналах предгорной зоны водовыпусками-стабилизаторами расхода (ВСР-1) // Тр. Кирг. с/х ин-та им. К.И. Скрябина. Серия инженерная. Вып. 16. Том 4. Фрунзе: Мектеп, 1971. С. 21–24.
26. *Бочкарев Я.В.* Гидравлическая автоматизация водораспределения на оросительных системах. Фрунзе: Мектеп, 1971. 258 с.
27. *Бочкарев Я.В., Мельников Б.*И и др. Водозаборное сооружение. А.с. SU № 1137148. кл. E 02 B 13/00, 1985.
28. *Бочкарев Я.В., Мельников Б.И.* Автоматизированные водозаборные сооружения для малых горных рек // Мелиорация и водное хозяйство. 1991, № 8. С. 46–51.
29. *Векслер А.Б., Генкин З.И.* Определение масштабного коэффициента при гидравлическом моделировании движения частиц льда в потоке жидкости // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.1986. Т.188. С. 26–31.
30. *Великанов М.А.* Русловой процесс. М.: Госиздат, 1958. 395 с.
31. *Волков И.М., Кононенко П.Ф., Федичкин И.К.* Гидротехнические сооружения. М.: Колос, 1968. 464 с.
32. *Гвардашвили Г.В. и др.* Исследование русловых процессов реки Арагви от Жинвальской земляной плотины до впадения в реку Куру // Сб. науч. тр. № 65, посв. памяти акад. Ц.Е. Мирцхулава. Тбилиси: Ин-т водного х-ва Грузии. 2010. С 31–41.
33. *Гвелесиани Л.Т.* Теоретические и практические вопросы расчетов твердого стока // Гидротехническое строительство.1946.№ 4. 197 с.
34. Гидротехнические сооружения / под ред. Н.П.Розанова. М.: Агропромиздат, 1985. 432 с.
35. Гидротехнические сооружения для малой энергетики горно-предгорной зоны / под ред. Н.П. Лаврова. Бишкек: Салам, 2009. 504 с.
36. Гидротехнические сооружения / Розанов Н.П., Бочкарев Я.В., Лапшенков В.С. и др.: под ред. Розанова Н.П. М.: Стройиздат, 1978. 647 с.
37. *Глушков В.Г.* Вопросы теории и методы гидрологических исследований. М.: Изд. АН СССР, 1961. 416 с.
38. *Гончаров В.Н.* Движение наносов в равномерном потоке. М.; Л.: ОНТИ, 1938. 312 с.
39. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 115 с.
40. *Гончаров В.Н.* Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеорологическое издательство. Л.: 1954. 374 с.
41. *Гостунский А.Н.* Взвешивающая способность // Изв. АН УзбССР. 1954, № 3.С. 59–68.
42. *Григор О.Р.* Экономика установок НВИЭ: КРСУ. Бишкек, 2002. 36 с.
43. *Гришанин К.В.* Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 311 с.

44. *Данелия Н.Ф., Бунятян Л.Б., Булгак Ю.Ю.* Головные сооружения на горных и предгорных участках рек Закавказья // Тр. Всес. научно-техн. совещ. по водозаборным сооружениям и русловым процессам. Т. 1. Тбилиси, 1960. С. 119–128.
45. *Данелия Н.Ф.* Водозаборные сооружения на реках с обильными донными наносами. М.: Колос, 1964. 336 с.
46. *Шарп Дж.* Гидравлическое моделирование / пер. с англ. М.: Мир, 1984. 279 с.
47. *Дианов В.Г.* Водозаборное сооружение на реках. Ташкент: Узбекистан, 1974. 112 с.
48. *Жаманмурунова Б.Т.* Исследование бокового водозабора с удаленным промывным шлюзом: автореф. дис… канд. техн. наук. Алма-Ата, 1965. 24 с.
49. *Железняков Г.В.* Гидрометрия. М.: Колос, 1964. 265 с.
50. *Железняков Г.В., Неговская Т.А., Овчаров Е.Е.* Гидрология, гидрометрия и регулирование стока. М.: Колос, 1984. 205 с.
51. *Железняков Г.В., Данилевич Б.Б.* Точность гидрологических измерений и расчетов. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 240 с.
52. *Железняков Г.В.* Теоретические основы гидрометрии. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 269 с.
53. *Замарин Е.А.* Проектирование гидротехнических сооружений. М.: Сельскохозяйственная лит-ра, 1949. 30 с.
54. *Замбахидзе Г.Н.* Движение реальной жидкости и твердых тел на криволинейных участках рек/ под ред. проф. Н.Ф.Данелия. Тбилиси: Изд. «Сабчота сакартвело», 1967. 186 с.
55. *Исаев А.С.* Научно-технический прогресс в мелиорации. Фрунзе: Кыргызстан, 1986. С. 4–16.
56. *Иванов А.Н., Неговская Т.А.* Гидрология и регулирование стока. М.: Колос, 1979. 380 с.
57. *Кавешников Н.Т.* Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений: учебное пособие. М.: В.О. «Агропромиздат» 1989. 271 с.
58. *Каганов Я.И.* Исследования русловых переформирований горных потоков Карпат при регулировании их системой запруд: автореф. дисс… канд. техн. наук. Ровно, 1971.
59. *Караушев А.В.* Проблемы динамики естественных водных потоков. Л.: Гидрометеорологическое изд-во. 1960. 392 с.
60. *Кондратьев А.Н.* Двухфакторная классификация русловых процессов различных рек на основе различной транспортирующей способности потока: автореф. дисс… д-ра геогр. наук. СПб, 2008. 32 с.
61. *Кнороз В.С.* Естественная отмостка русел, образованных материалами неоднородной крупности. Л.: Изв. ВНИИГ, 1962. Т. 59.
62. *Копалиани З.Д., Костюченко А.А.* Расчет расхода донных наносов в реках // Сб. работ по гидрологии. № 27. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. С. 25–40.
63. *Кромер Р.К.* Исследование процессов занесения и промыва подпорных бьефов низконапорных гидроузлов на реках горно-предгорной зоны: автореф. дис… канд. техн. наук. М., 1979.
64. *Крошкин А.Н.* Руководство по проектированию средств стабилизации руслового процесса при низкоплотинном водозаборе из рек горно-предгорной зоны. Фрунзе: Союзавтоматика, 1980. 82 с.
65. *Кузнецов И.Н.* Диссертационные работы: Методика подготовки и оформления. М.: Изд.-торговая корпорация «Дашков и К°», 2009. 488 с.
66. *Курсовое и* дипломное проектирование по гидротехническим сооружениям / под ред. В.С. Лапшенкова. М.: Агропромиздат, 1989. 448 с.
67. *Кусков Л.С.* Водное хозяйство гидроэлектростанций. М.-Л.: Энергия, 1964. 192 с.
68. *Лавров Н.П.* Гидротехнические сооружения для малых ГЭС. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2001. 160 с.

69. *Лавров Н.П., Рохман А.И., Биленко В.А., Логинов Г.И.* Боковое водозаборное сооружение ковшового типа на реке Куршаб // Вестник КРСУ. 2002. Т. 2. № 4. С. 83–85.
70. *Лавров Н.П., Логинов Г.И.* и др. Боковое водозаборное сооружение. Патент КР № 586. Б.И.С., № 4, 2003. 6 с.
71. *Лавров Н.П., Биленко В.А., Логинов Г.И., Торопов М.Н.* Теоретическое описание пропускной способности элементов водозаборного сооружения для деривационной гидроэлектростанции // Матер. межд. конф. «Единое образовательное пространство XXI века». Бишкек: КРСУ, 2003. С. 201–211.
72. *Лавров Н.П. и др.* Водозаборное сооружение для деривационных ГЭС. Патент КР № 607, МКП Е 02 В 13/00. Бюлл. №11, 2003. 6 с.
73. *Лавров Н.П., Рохман А.И., Логинов Г.И., Торопов М.К.* Модель водозаборного сооружения деривационной ГЭС на р. Иссык-Ата // Вестник КРСУ. 2003. Т. 3. №2. С. 87–92.
74. *Лавров Н.П., Логинов Г.И., Коржавин Н.В.* Способы рыбозащиты при водозаборе из горных рек в ирригационные и гидроэнергетические системы // Архитектура и строительство: Сб. науч. тр. Бишкек: КРСУ, 2003. С. 268–274.
75. *Лавров Н.П., Логинов Г.И.* Коржавин Н.В. Способы рыбозащиты на речных гидроузлах Швейцарии и Германии и возможность их применения в условиях горных рек Кыргызстана // Вестник КРСУ. 2005. Т. 5. № 3. С. 68–71.
76. *Лавров Н.П.* и др. Водозаборное сооружение для горных рек: Патент КР № 920, МКП Е 02 В 13/00. Бюлл. № 12, 2006. 6 с.
77. *Лавров Н.П., Логинов Г.И., Торопов М.К.* Водозаборное сооружение для деривационной ГЭС на р. Иссык-Ата // Гидротехническое строительство. 2008, № 12. М.: НТФ «Энергопрогресс». С. 5–9.
78. *Лавров Н.П., Биленко В.А., Клепачев И.П.* Результаты моделирования руслового процесса на р. Кугарт при треугольном гидрографе паводка // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 9. С. 74–82.
79. *Лавров Н.П., Рохман А.И., Логинов Г.И.* Усовершенствованная конструкция стабилизатора расхода воды// Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий // Сб. науч. тр. Рязань: Мещерский ф-л ГНУ ВНИИГиМ, 2010. С. 469–476.
80. *Лавров Н.П., Рудаков И.К., Логинов Г.И.* и др. Гидравлическое моделирование участка р. Чу при устройстве струенаправляющих шпор для создания карьера сыпучих материалов в районе пос. Бердик Аламудунского р-на Кыргызстана // Сб. научных трудов, посвящ. памяти акад. Ц.Е. Мирцхулава. № 65. Тбилиси: Ин-т водного хоз. Грузинского техн. ун-та, 2010. С. 152–159.
81. *Лавров Н.П., Логинов Г.И., Пархоменко Ю.Ф.* Результаты модельных исследований сопрягающих участков водозаборных гидроузлов из горных рек // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12. №6. С. 36–40.
82. *Лавров Н.П., Логинов Г.И.,* и др. Водозаборный гидроузел для деривационной ГЭС на реке Мерке // Гидротехническое строительство.М.: НТФ «Энергопрогресс». 2012. № 10. С. 37–40.
83. *Лавров Н.П., Логинов Г.И., Шипилов А.В.* Новые типы водозаборных сооружений для малых ГЭС. Гидротехника XXI в., №1 (8) 2012. СПб.: ОАО «ВНИИГ» им. Б.Е. Веденеева. С. 51–54.
84. *Лавров Н.П., Шипилов А.В., Логинов Г.И.* Пропускная способность промывного тракта водозаборного сооружения для деривационных ГЭС в зимнем режиме эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. СПб., 2013. № 4 (39). С. 60–69.

85. *Лавров Н.П., Шипилов А.В., Атаманова О.В., Логинов Г.И.* Водозаборное сооружение из горных рек: Патент РФ на полезную модель № 133537, МПК Е 02 В 13/00, опубл. 20.10.2013. 9 с.
86. *Лапшенков В.С.* Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 237 с.
87. *Леви И.И.* Гидротехнические сооружения. Часть первая. Вып. 1. Водоприемники утилизационных и ирригационных каналов. Л., 1933. 139 с.
88. *Леви И.И.* Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия: Ленингр. отд., 1967. 235 с.
89. *Логинов Г.И.* Современное состояние водозаборных гидроузлов на участках рек горно-предгорной зоны и пути их совершенствования // Сельское хозяйство Кыргызстана: проблемы и достижения в образовании и научно-исследовательской работе: сб. науч. тр. КАА. Вып. 2. Секция Гидромелиорация и землеустройство. Бишкек, 1999. С. 101–106.
90. *Логинов Г.И.* Обоснование местоположения створа водозаборного гидроузла энерго-ирригационного назначения // Проблемы строительства и архитектуры на пороге XXI в.: Матер. межд. научно-практич. конф., посвящ. 45-летию образования строительного факультета КГУСТА. Бишкек: Илим, 2000. С. 123–131.
91. *Логинов Г.И., Абдурасулов И.* Регулирование стока горных рек для целей орошения и гидроэнергетики // Проблемы строительства и архитектуры на пороге XXI века: матер. межд. научно-практич. конф., посв. 45-летию образования строительного факультета КГУСТА. Бишкек: Илим, 2000. С. 131–138.
92. *Логинов Г.И.* Определение параметров ломаного в плане наносозащитного порога // Матер.межд. научно-практич. конф., посв. межд. году гор. Бишкек: сб. науч. тр. КАУ. Вып. 1. Часть 3. 2003. С. 156–163.
93. *Логинов Г.И.* Некоторые гидроморфометрические характеристики гонных рек // Вестник КАУ № 1(4), посвящ. 100-летию М.Н. Лущихина. Бишкек, 2005. С. 212–214.
94. *Логинов Г.И.* Саркынов Е.Е. Исследование истечения через ломаный в плане наносозащитный порог на водозаборных гидроузлах предгорной зоны // Исследования, результаты. Алматы: Науч. журн. Казах. нац. аграрного ун-та, № 3–4, 2003. С. 47–51.
95. *Логинов Г.И.* Определение параметров усовершенствованной конструкции стабилизатора расхода // Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохоз. производства. сб. науч. тр. РГАТУ им. П.А. Костычева. Рязань, 2009. 254–258 с.
96. *Логинов Г.И.* Возможности определения некоторых характеристик средств автоматизации речных пролетов водозаборных гидроузлов // Вестник КГУСТА. 2010. № 4 (30). С. 259–263.
97. *Логинов Г.И.* Водозаборные сооружения: монография. LAPLAMBERT Academik Publishing Gmbh & Co. KG. 2011. 175 с.
98. *Логинов Г.И.* Движение двухфазного потока жидкости (вода наносы) на криволинейном участке русла // Вестник КРСУ. 2010. Т. 10. № 2. С. 93–97.
99. *Логинов Г.И.* Результаты модельных исследований сопряжения зарегулированного русла низконапорного водозаборного гидроузла и бытового русла реки. XXXIX Неделя науки СПбГПУ: Материалы межд. конф. Ч. I. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 67–70.
100. *Логинов Г.И.* Рекомендации по теоретическому определению плановой конфигурации наносозащитного порога // Сборник научных трудов. №66, посвящ. памяти проф. М.С. Гагошидзе. Тбилиси: Ин-т водного хоз-ва Грузинского техн. ун-та, 2011. С. 143–149.
101. *Логинов Г.И.* Обоснование конструкции промывного тракта водозаборного сооружения // Наука и новые технологии. 2013. № 3. Бишкек. С. 43–46.

102. *Логинов Г.И.* Сопряжение бьефов водозаборных сооружений для гидроэнергетических и ирригационных систем // MateriliyVII Miedzynarodowej naykowi-praktycznej konferencji «Europejskanauka XXI powieka – 2011».Vol. 3. Ekonomicznenauki.: Premysl. Naukaistudia. 2011. Str. 27–41.
103. *Логинов Г.И.* Обоснование конструкции промывного тракта водозаборного сооружения // Наука и новые технологии. 2013. № 3. Бишкек. С. 43–46.
104. *Логинов Г.И.* Теория движения жидкости на криволинейных участках зарегулированных русел водозаборных сооружений // Наука и новые технологии. 2013. № 4. С. 23–28.
105. *Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР. М.: Географгиз, 1952. 366 с.
106. *Ляхтер В. М., Прудовский А.М.* Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
107. *Магай А.Б.* Некоторые результаты лабораторного исследования движения воды на повороте открытого русла //Тр. ин-та энергетики, т. III. Алма-Ата: Изд. АН. КазССР, 1961. С. 167–177.
108. *Маккавеев В.М.* Распределение продольных и поперечных скоростей в открытых потоках// Труды ГГИ.1947. Вып. 2. Л. С. 115–133.
109. *Маккавеев Н.И.* Эрозионно-аккумулятивные процессы и рельеф русла реки. Избранные труды. М.: Изд-во МГУ. 1998. 285с.
110. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия ее бассейнов. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Переизд. М.: Геогр. ф-т МГУ. 2005. 353 с.
111. *Маковский Э.Э., Волчкова В.В.* Автоматизированные автономные системы трансформации неравномерного стока. Фрунзе: Илим, 1981. 371 с.
112. *Малинин Н.К.* Теоретические основы гидроэнергетики. М.: Энергоатомиздат, 1985. 312 с.
113. *Малосиев Р.И., Талмаза В.В., Филончиков А.В.* Опыт проектирования бесплотинных водозаборных узлов в Киргизии // Вопросы водного хозяйства. Вып. 40. Фрунзе: Кыргызстан, 1977. С. 7–14.
114. *Маматканов Д.М., Бажанова Л.В., Романовский В.В.* Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек: Илим, 2006. 265 с.
115. *Маслов Б.С., Минаев И.В., Губер К.В.* Справочник по мелиорации. М.: Росагропромиздат, 1989. 384 с.
116. *Мелиорация и* водное хозяйство. Сооружения: Справочник / под ред. П.А. Полад-заде. М.: Агропромиздат, 1987. 464 с.
117. *Мельников Б.И.* Наносоперехватывающее устройство с двойными циркуляционными порогами при водозаборе. Сер.2 // Информ. листок № 105 (2556). Фрунзе: Киргиз. ИНТИ, 1979. 4 с.
118. *Мельников Б.И., Рохман А.И.* Опыт внедрения и эксплуатации автоматизированных систем средствами автоматики водозаборных узлов на малых реках // Гидроавтоматика в мелиорации. Фрунзе, 1989. С.9–20.
119. *Мельников Б.И.* Автоматизированное водозаборное сооружение с наносоперехватывающей галереей для малых горных рек // Гидравлическая автоматизация оросительных систем и технология орошения: Сб. науч. тр. Кирг. СХИ, 1989. Фрунзе. С. 17–26.
120. *Мельников Б.И.* Совершенствование конструкций, методов расчетного обоснования и проектирования сооружений и их гидравлических средств автоматизации головных участков оросительных систем предгорной зоны: автореф. дис… д-ра техн. наук. Бишкек: КАА, 1994. 36 с.
121. *Мельников Б.И., Рудаков И.К.* Обоснование параметров, исследование пропускной способности и наносозащитных свойств криволинейных в плане порогов // Пути совершенствования средств гидроавтоматики в мелиорации: сб. науч. тр. КСХИ им. Скрябина. Бишкек, 1995. С. 178–185.

122. *Мельников Б.И., Рохман А.И., Гутник В.Г., Логинов Г.И.* Усовершенствованные автоматизированные водозаборные гидроузлы ирригационного назначения // Наука и новые технологии. 2000, № 6.Часть II (приложение). Бишкек. С. 148–151.
123. *Мельников Б.И., Логинов Г.И.* Совершенствование средств противонаносной защиты на водозаборных гидроузлах ирригационно-энергетического назначения // Научно-произв. журнал Таджикского Гос.ун-та. 2004. №2. Душанбе: Кишноварз. С. 60–65.
124. *Методика определения* экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М.: Всес. научно-исслед. ин-т патентной информации, 1986. С. 7–9.
125. *МиловичА.Я. Нерабочий* изгиб потока жидкости // Бюллетень политехнического общества.1914, №10. С.485–563.
126. *Милович А.Я.* Теория деления и соединения потоков жидкости. Л., М.: Речиздат, 1947. 95 с.
127. *Милович А.Я.* Теория динамического взаимодействия тел и жидкости. 2-е издание, исправленное и доработанное. М.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955. 309 с.
128. *Михалев М.А.* Физическое моделирование гидравлических явлений. СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2012. 384 с.
129. *Налимов В.В., Чернова Н.А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, гл. ред. физ-мат. лит-ры, 1965. 340 с.
130. *Научно-прикладной справочник* по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Часть 1–6. Киргизская ССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
131. *Офицеров А.С.* Вопросы гидравлики водозабора. М.: Госиздат, 1952. 235 с.
132. *Попов К.В.* Гидротехнические сооружения. М.: Сельхозгиз, 1956. 438 с.
133. *Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 286 с.
134. *Потапов М.В.* Сочинения в трех томах. М.: Изд. с/х лит-ры, 1951. Т. I . 391 с.
135. *Потапов В.М., Ткаченко П.Е., Юшманов О.Л.* Использование водной энергией. М.: Колос, 1972. 340 с.
136. Проектирование гидротехнических сооружений / Волков И.М., Кононенко П.Ф., Федичкин И.К. и др. М.: Колос, 1977. 384 с.
137. Политехнический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1976. 608 с.
138. Разработка и внедрение автоматизированного средствами гидроавтоматики водозаборного узла с двухступенчатой схемой борьбы с наносами в пределах сооружения системы канала «Утуген» р. Ак-Суу Калининского района: Отчет о НИР (закл.). Кирг. СХИ; Руководитель Я.В. Бочкарев. Шифр темы. 6. 27 / 83. Инв. № 81025151. Фрунзе, 1984. 85 с.
139. *Рамазан М.С.* Некоторые особенности гидрологического режима и гидротехническая классификация рек Киргизии. Фрунзе: Изд. АН Кирг. ССР, Ин-т энергетики и водного хоз-ва, 1960. 82 с.
140. *Рамазан М.С., Сатаркулов С.С.* Водозаборные узлы, совмещенные с водоперепускными сооружениями// Сб. тр. «Вопросы водного хозяйства» (гидротехника). Вып. 17. Фрунзе, 1969. С 23–29.
141. *Рассказов Л.Н. и др.* Гидротехнические сооружения. Часть 2. М.: Изд. Ассоциации строительных вузов. 2008. 527 с.
142. Рекомендации по прогнозу деформаций речных русел на участках размещения карьеров в нижних бьефах гидроузлов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 128 с.
143. Рекомендации по расчету отверстий мостов на реках горно-предгорной зоны. Утверждены Минавтодором РСФСР. Протокол № 2 от 2 августа 1978 г.

144. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 2. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 307 с.
145. *Розовский И.Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев: АН Укр. ССР, 1957. 188 с.
146. *Россинский К.И., Любимова К.С.* Скачкообразное движение речных наносов // В кн.: Динамика и термика речных потоков. М., 1972. С. 50–62.
147. *Рохман А.И.* Гидравлические исследования и разработка затворов-автоматов для горных водозаборных узлов на малых горных реках: автореф. дис... канд. техн. наук. М.: МГМИ, 1983. 16 с.
148. *Рохман А.И.* Стабилизаторы расхода воды типа «Секционный коробчатый щит» и методика их работы // Сельское хозяйство Кыргызстана: проблемы и достижения в образовании и научно-исследовательской работе: Сб. научн. трудов КАА. Вып.2. Секция: Гидромелиорация и землеустройство. Бишкек, 1999. С.38–43.
149. *Рудаков И.К.* Принцип компоновки водозаборных узлов и водозаборов-переходов для предгорных участков рек с учетом автоматизации их работы // Инф. листок № 42 (475). Фрунзе: КиргИНТИ, 1968. 20 с.
150. *Рудаков И.К.* Исследования и расчет новых конструкций автоматизированных водозаборов и водозаборов-переходов // Инф. листок. № 44 (477). Фрунзе: КиргИНТИ, 1968. 35 с.
151. *Рудаков И.К.* Совершенствование водозаборных гидроузлов и водозаборов-переходов для оросительных систем предгорной зоны: автореф. дис... канд. техн. наук. Бишкек, 1996. 29 с.
152. *Рудаков И.К.* Транспорт наносов в верхнем бьефе водозаборных сооружений деривационных ГЭС // Сб. научн. трудов, посв. 5-летию КРСУ. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. С 20–27.
153. *Румянцев И.С., Кромер Р.К.* Режим занесения верхних бьефов ирригационных низконапорных гидроузлов // Доклады ВАСХНИЛ. 1980. № 8. М. С. 38–40.
154. *Румянцев И.С., Кромер Р.К.* и др. Природоприближенное восстановление и эксплуатация водных объектов. М.: МГУП, 2001. 285 с.
155. *Румянцев И.С., Мацея В.Ф.* Гидротехнические сооружения. М.: Агропромиздат, 1988. 430 с.
156. *Салахов Ф.С.* Рациональное конструирование водозаборно-наносорегулирующих сооружений на горных реках, их исследования, методика гидравлических расчетов и опыт эксплуатации: автореф. дис… докт. техн. наук. Тбилиси, 1972. 60 с.
157. СНиП 33-01–2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения. М.: ГОССТРОЙ РФ, 2004. 25 с.
158. *Семенов С.В.* Плотинные водозаборы в условиях горных рек и их улучшение: автореф. дис… канд. техн. наук. Фрунзе, 1950. 15 с.
159. *Соболин Г.В., Рудаков И.К.* Горные решетчатые водозаборы. Фрунзе: КиргИНТИ, 1964. 143 с.
160. *Соболин Г.В.* Защита сооружений на реках и каналах от наносов. Фрунзе: Кыргызстан, 1968. 200 с.
161. *Соболин Г.В.* Земельно-водные ресурсы, гидрологическая характеристика рек и паспорта водозаборных узлов оросительных систем регионов республики. Фрунзе: КиргНИИ ЭА, ММ и ВХ Кирг. ССР, 1990.
162. *Соболин Г.В.* Водозаборные узлы для оросительных систем рек горно-предгорной зоны. Фрунзе: КиргНИИ ЭА, ММ и ВХ Кирг. ССР, 1990. 241 с.
163. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П.Г. Киселева. Изд. 5-е. М.: Энергия, 1974. 309 с.

164. СТО 52.08.31–2012. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. СПб.: Изд-во «Глобус», 2012. 140 с.
165. *Суюмбаев Дж.А.* Методы и технические средства комплексных мелиораций орошаемых земель Кыргызстана: автореф. дис... д-ра техн. наук. Бишкек, 2000. 38.
166. *Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н.* Гидроморфометрические характеристики горных рек. Фрунзе, 1968. 204 с.
167. *Талмаза В.Ф.* Особенности изменений расходов влекомых наносов на горных реках и их влияние на регулирование пропуска наносов при водозаборе // Гидроавтоматика в мелиорации: Сб. науч. тр. Фрунзе: Кирг. СХИ, 1989. С 67–72.
168. *Токомбаев К.А.* Новые принципы использования возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве горных регионов (на примере Кирг. ССР). Фрунзе: Илим, 1990. 273 с.
169. *Торопов М.К.* Плотинное водозаборное сооружение из горных рек для малых деривационных ГЭС: автореф. дис... канд. техн. наук. Бишкек, 2007. 18с.
170. *Ушаков А.П., Шолохов Н.В., Якштас И.А.* Водозаборные узлы Ферганского типа. Ташкент: Ин-т водных проблем и гидротехники. Изд. АН Уз. ССР, 1962. 128 с.
171. *Филиппов Е.Г.* Гидравлика гидрометрических сооружений для открытых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 276 с.
172. *Филончиков А.В.* Проектирование автоматизированных водозаборных узлов на горных реках. Фрунзе: Кыргызстан, 1990. 376 с.
173. *Филончиков А.В.* Совершенствование технологий антропогенных воздействий на гидросферу при природообустройстве. Кострома: Изд. КГСХА, 2003. 153 с.
174. Философский энциклопедический словарь / Ильичев П.Ф.и др. М.: Гл. ред. Советская энциклопедия, 1983. 836 с.
175. *Чертоусов М.Д.* Гидравлика, специальный курс. М. Л.: Госуд. энерг. изд-во, 1962. 630 с.
176. *Чернышов В.Г.* Технологические основы совершенствования эксплуатации водозаборных узлов на горных реках: автореф. дис… канд. техн. наук. М., 1986. 21 с.
177. *Шамов Г.И.* Речные наносы. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. 378 с.
178. *Шипилов А.В.* Совершенствование конструкции водозаборного сооружения деривационной ГЭС для зимнего режима эксплуатации: автореф. дис… канд. техн. наук. СПб, 2013. 20 с.
179. *Шинебаев А.Б.* Исследование и предотвращения местного размыва на открытых водорегулирующих сооружениях системы водоснабжения: автореф. дис. докт. техн. наук. Алматы, 2010. 40 с.
180. *Штеренлихт Д.В.* Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.
181. *Штеренлихт Д.В.* Гидравлика. М.: КолоСС, 2005. 655 с.
182. *Шолохов В.Н.* К вопросу о формировании русел в бьефах низконапорных плотин на горно-предгорных участках рек // Тр. САНИИРИ. Вып. 84. Ташкент,1957. 40 с.
183. *Шолохов В.Н.* К вопросу о формировании русел в бьефах низконапорных плотин на горно-предгорных участках рек // Труды САНИИРИ, 1957. Вып. 84. С. 18–23.
184. Экономика гидротехнического и водохозяйственного строительства / Д.С. Щавелев, М.Ф. Губин, В.Л. Куперман и др. М.: Стройиздат, 1986. 423 с.
185. Экономика строительства / под ред. Семенова Ю.Ф. Ростов на/Д: Феникс, 2009. 370 с.
186. Эффективность капитальных вложений: Сборник утвержденных методик. М.: Экономика, 1983. 126 с.
187. Cawater-info.net›analysis/register/pdf/hps…r.pd Список гидроэлектростанций Казахстана.

188. *Cecen K.* Wasserfasungaus Gebirgflussen und uber die Bemtssung und Berechnung der Absetzbeken fur Wasserkraftanlagen. Mitteilungen 13. Institut fur Wasserbaum und Wasserwirschaft. Aachen, 1976.294 p.
189. *Edson Ch. C.* Hydraulic drop as a function of velocity distribution//Civil Engineering, Engineer's Notebook. 1654. P. 64–65.
190. *Francis I.R.D.* Experiments on the motions of solitary grains along the bed of a water-stream // Proc. Roy Soc. L., 1973. A 332. P. 443–471.
191. *Giesecke J., Mosonyi E.* WasserkraftanlagenPlanung, Bau und Betrieb4, aktualisierte und erweiterteAuflagemit 368 Abbildungen Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 830 p.
192. *Howarth J.* Coanda hydro intake screen testing and evaluation Scott Davis Microhydro. A mother Earth News Book for Wiser Living. 2001. 225 p.
193. *Prus-Chacinski T.M.* Patterns of motion in open channel bends //Journal of the institution of water engineers.Vol. 10, № 5, august, 1956. P. 369–375.
194. *Schucky A.* The flow around bends in an open flume // Thans. Amer. Soc. Civ. Engr.Vol. 115, 1950.49 p.
195. *Seminara. G* &Solari. L. 1998. Finite amplitude bed deformations in totally and partially transporting wide channel beds // Water Resour. Res. 34. P. 1585–1594.
196. Uadocs.exdat.com/docs/index-98645.h. Речь Н.А. Назарбаева на XII внеочередном съезде Народно-демократической партии «Нур Отан». Астана, 15.05.2009.
197. *Zolezzi G.* Seminara Downstream and upstream influence in river mendering. Part 1. General theory and application to overdee-pening // J. Fluid Mech., 438, 2001. P. 183–211.
198. *Zolezzi G., Repetto R., Tubino M., Toropov M., Serafini M.* Mathematical modeling of silting in Kugart river, Kyrgyzstan // River Costal and EsturineMorphodynamics: RCEM 2007. Dohmen-Janssen &Hulscher (eds.), Taylor & Francis Group. London, 2008. P. 1179–1189.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Гидрологические характеристики типовых рек Кыргызстана,

№ п/п	Наименование реки	Период гидро-мет. набл., годы	Площ. водосбо-ра, км^2	Средний русловой уклон на участке		Многолетние средние расходы воды, м^3/с			Наблюд. экстрем. расходы, Q м^3/с	
				конец горного	нач. пред-гор.	зимний	летний	годовой	наиболь-шее	наимень-шее
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Кугарт	49	1010	0,012	0.007	3,25	17,4	18,4	500	2.09
2	Джууку	70	516	0,024	0,017	1,99	12,5	6,39	58,0	0,4
3	Чон-Каинды	45	167	0,057	0,025	0,56	4,4	1,85	17,3	0,25
4	Джарлы Каинды	50	185	0,059	0,025	0,63	3,43	1,64	17,4	0,38
5	Кызыл-Су	50	171	0,045	0,024	0,72	2,68	1,48	13,0	0,04
6	Кегеты	47	256	0,046	0,026	0,64	5,85	2,4	33	0,07
7	Аспара	62	430	0,029	0,029	1,0	6,97	3,27	50	0,6
8	М. Ак-Су	53	192	0,054	0,02	1,17	4,57	2,89	20,4	0,3
9	Шамси	49	457	0,043	0,035	1,66	10,7	5,15	48,1	0,82
10	Иссык-Ата	50	546	0,035	0,03	3,31	15,6	7,06	54,4	1,6
11	Аламедин	54	317	0,041	0,025	1,67	12	6,38	70	0,5
12	Ала-Арча	48	233	0,036	0,02	1,38	7,6	4,17	46,7	0,95
13	Ак-Су (Ч-Арык)	10	498	0,034	0,016	1,34	7,25	4,21	50	0,67
14	Каракол	50	325	0,033	0,0259	1,86	13	6,74	57,6	0,38
15	Джеты-Огуз	45	330	0,042	0,025	1,69	11,6	5,84	57,0	0,48
16	Ак-Терек	50	596	-	0,27	3,73	4,58	4,36	20	2,12
17	Он-Арчы	56	1320	0,022	0,01	3,33	19,6	10,5	153	0,8
18	Ак-Сай	47	346	-	0,02	1,67	4,65	2,95	24,8	0,69
19	Кок-Джерты	43	4960	0,017	0,014	1,78	7,8	5,48	40	0,69
20	Чолпон-Ата	52	111	0,022	-	0,52	2,96	1,29	14,4	0,1
21	Орто-Койсу	40	63	0,089	0,069	0,52	1,35	0,53	2,0	0,26
22	Орто-Уюкты	52	49,8	0,105	0,032	0,4	1,25	0,54	10	0,1
23	Чон-Уюкты	54	78,7	0,071	0,028	0,4	2,57	1,4	16,9	0,21
24	Чет-Байакур	51	54,4	0,086	0,024	0,47	3,66	1,84	15,0	0,24
25	Джергалак	48	250	-	0,02	1,3	11,1	4,69	20,0	0,66
26	Ак-Су-Арасан	54	301	0,062	0,02	1,31	8,95	4,92	69,2	0,15
27	Ирдык	47	91,0	0,027	0,02	0,53	2,17	1,28	18,3	0,08
28	Чон Кызыл-Су	47	302	0,04	0,02	1,25	9,3	4,68	58,0	0,3
29	Тон	47	244	-	0,021	0,73	2,75	2,04	22,2	0,2
30	Бордубе	10	69	-	0,021	0,33	1,41	0,8	6,7	0,03
31	Джнруй	18	85	-	0,033	0,42	2,74	1,04	22,0	0,11
32	Кен-Кол	45	400	0,043	0,017	0,69	3,77	2,41	37,2	0,17
33	Бала-Чичкан	48	586	-	0,04	0,46	1,33	0,83	20	0,2
34	Чон-Чикан	50	687	-	0,027	2,13	12,6	6,48	63	2,07
35	Беш-Таш	50	286	-	0,036	402	9,81	3,59	50	0,69
36	Колба	45	218	-	0,025	0,92	3,03	468	20	0,57
37	Ур-Марал	46	1120	0,012	0,023	2,3	18,3	3,58	74	0,7
38	Куркурец	50	454	0,031	0,021	2,43	14,5	6,13	40	1,4

пригодных для энергетического использования

Тип питания	Месяцы с мак. стоком	Модуль стока	Смыв нанос. с 1 км^2 за год, м^3	Сред. годов расх. донн. нанос., кг/с	Сред. годов. сток донн. нанос., тыс. м^3	Сред. годов. расход взвеш. нанос., кг/с	Сред. годов. сток взвешен. нанос., тыс. м^3	Продолжит.шуговых явлений, сут.	
								лед	шуга
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
II-б	V,VI	19,	306,9	4,57	80	13,1	230	79	-
I-а	VII,VIII	11,9	97,2	1,37	18	1,74	31	131	25
I-б	VI,VII,VIII	11,1	95,8	0,4	7	0,51	9	40	20
I-б	VI,VII,VIII	8,86	162,2	0,51	9	1,2	21	18	59
I-б	VI,VII,VIII	8,65	117	0,46	8	0,68	12	111	-
I-б	VI,VII,VIII	9,37	152,3	0,97	17	1,26	22	36	-
I-б	VI,VII,VIII	7,6	127,9	0,51	16	1,24	39	-	5
I-б	V,VI,VII	15,1	166,4	0,83	14,6	0,99	17,3	101	16
I-б	VI,VII,VIII	11,3	133,5	1,26	22	2,3	39	45	30
I-а	VII,VIII	12,9	106,2	1,37	-	1,94	34	-	30
I-а	VII,VIII	20,0	208,2	1,14	20	2,63	46	-	25
I-а	VII,VIII	18,4	188,8	1,03	18	1,48	26	96	68
I-б	VI,VII,VIII	11,0	84,5	0,86	15	1,2	21	44	44
I-б	VI,VII,VIII	20,7	95,4	0,68	12	1,08	19	128	128
I-б	VI,VII,VIII	17,7	84,8	0,412	13	0,478	15	11	9
I-б	VI,VII,VIII	17,8	114,3	,086	15	1,31	23	30	30
II-б	V, VI	8,11	139,4	4,2	74	6,27	110	70	54
I-а	VII,VIII	8,53	115,4	0,91	16	1,37	27	-	58
II-б	V,VI,VII	2,8	27,6	2,0	35	1,1	19	78	35
I-б	VI,VII,VIII	11,6	183,8	0,48	8,4	0,68	12	73	73
I-а	VI,VII,VIII	8,57	174,6	0,29	5,0	0,34	6,0	45	35
II-б	V,VI	10,2	321,3	0,4	7,8	0,51	9	20	16
II-а	V,VI	18,04	213,5	0,4	7	0,56	9,8	93	14
I-б	VI,VII,VIII	22,1	110,3	0,04	3,5	0,11	2,58	40	30
I-б	VI,VII,VIII	18,8	164	0,97	17	1,37	24	40	25
I-б	VI,VII,VIII	18,7	189,4	1,26	22	2,0	35	20	12
II-а	V,VI	14	248,4	0,49	8,6	0,8	14	18	9
I-б	VI,VII,VIII	15,7	130	0,89	15,4	1,37	24	16	8
I-а	VII,VIII	8,4	129,5	0,72	12,7	1,08	18,9	-	12
I-а	VII, VIII	1,08	362,3	0,51	9	0,91	16	18	12
I-б	VI,VII,VIII	12,1	330,6	0,71	12,5	0,89	15,6	20	16
II-а	V,VI	12,3	52	0,79	2,4	0,48	5,8	135	34
I-б	VI,VII,VIII	11,4	48	0,64	3,2	0,36	2,7	140	36
I-а	VII,VIII	16,2	54	0,89	23	0,76	26	132	30
I-б	VI,VII,VIII	12,6	132,9	0,91	16	1,25	22	90	20
I-а	VII,VIII	0,11	44	0,87	2,2	0,4	6,6	45	30
II-а	V,VI	17	26	0,6	10	3,1	16	40	30
I-б	VI,VII,VIII	13,7	79,3	0,8	14	1,26	22	74	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Структурные схемы типов водозаборных сооружений из горных рек с указанием отличительных признаков и признаков преемственности



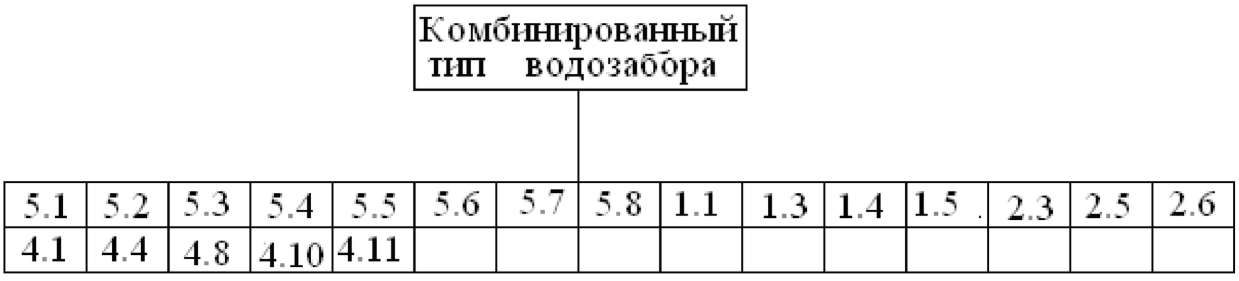
Определяющие признаки сооружений Индийского типа



Определяющие признаки сооружений Европейского типа



Определяющие признаки сооружений Ферганского типа



Определяющие признаки сооружений Комбинированного типа

Решетчатый тип водозабора
(Тирольский)

6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	1.4	1.5	1.8

Определяющие признаки сооружений Тирольского (Решетчатого) типа

Усовершенствованый решетчатый тип водозабора

7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	7.10	7.11	7.12	1.4	1.5	1.8
1.9	2.7	4.1	4.8	4.11	4.12	5.6	6.3	6.4						

Определяющие признаки сооружений Усовершенствованного решетчатого типа

Киргизский тип водозабора

8.1	8.2	8.3	8.4	1.4	1.5	1.8	2.7	4.1	4.2	4.6	4.7	4.11	4.12	6.3
6.4	7.1	7.2	7.8	7.9	7.12									

Определяющие признаки сооружений Киргизского типа

Тяньшанский тип водозабора

9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	1.3	1.4	1.5	2.4	2.7	4.1	4.2	4.5
4.6	4.7	4.11	4.12	7.7	7.9	8.3								

Определяющие признаки сооружений Тяньшанского типа

Тип водозабора с косонаправленными порогами

10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	1.1	1.4	1.5	2.4	2.7	4.1	4.2	4.6
4.11	4.12	7.7	7.12	8.3	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6					

Определяющие признаки сооружений с косонаправлеными наносозащитными порогами.

Тип водозабора с выпуклыми в плане порогами

11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	11.10	11.11	11.12	1.3	1.4	1.5
2.4	2.7	4.1	4.2	4.5	4.6	4.7	4.11	4.12	7.12	8.4	9.1	9.2	9.3	9.4
9.6	10.4													

Определяющие признаки сооружений с выпуклыми в плане наносозащитными порогами.

Гидроэнергетический тип водозабора (КРСУ)

12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	12.10	12.11	12.12	1.3	1.4	1.5
1.8	1.11	2.4	2.7	4.1	4.2	4.5	4.6	4.7	4.11	4.12	5.6	8.4	9.2	9.3
9.4	9.6	10.4	11.1	11.4	11.6	11.8								

Определяющие признаки Гидроэнергетического типа водозаборного сооружения КРСУ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Организация операции рыбопропуска на низконапорных плотинных водозаборных сооружениях

Операция	Фаза	Действие	Основные способы осуществления действия	Приемы выполнения действий	
				Наименование и содержание приема	Вид приема
Рыбопропуск	Нереста	Привлечение особей рыб к водовыпускному створу рыбопропускного сооружения	Создание зон поиска	Устройство сопрягающего пандуса	Конструктивный
				Устройство рыбонаправляющих порогов	Конструктивный
				Маневрирование затворами водосбросов низконапорного сооружения	Эксплуатационный
			Создание привлекающих скоростей	Организация подвода дополнительных объемов воды насосным агрегатом с повышенным давлением	Конструктивный
				Организация сброса отработанной воды на микро ГЭС в концевой створ рыбопропускного сооружения	Конструктивный
		Перевод рыбы по рыбопропуску из нижнего бьефа в верхний бьеф	Создание сооружений, в которых рыба самостоятельно преодолевает напор	Устройство лотковых рыбоходов, прудковых рыбоходов, лестничных рыбоходов и т.д.	Конструктивный
			Создание сооружений, для принудительного перемещения рыбы из нижнего бьефа в верхний бьеф	Устройство рыбопропускных шлюзов, механических рыбоподъемников, плавучих рыбоподъемников	Конструктивный
			Использование водосбросов элементов в качестве рыбопропусков	Использование водосбросов и водопропускных трактов	Эксплуатационный
	Ската	Рыбозащита	Механические	Устройство фильтрующих или сетчатых рыбозаградителей	Конструктивный
			Гидравлические	Размещение перед водоприемником устройств изменяющих гидравлические условия потока	Конструктивный
			Физиологические	Использование устройств вызывающих у рыб испуг (электрические, световые, звуковые, воздушно-пузырьковые)	Конструктивный
		Перевод рыбы из верхнего бьефа в нижний бьеф гидроузла	Создание рыбоотводов	Совместное устройство рыбоотводов с элементами рыбозащиты	Конструктивный
				Маневрирование затворами водосбросов	Эксплуатационный
				Устройство принудительного отвода рыб с помощью эжекторов, насосов	Конструктивный

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Анализ недостатков и их причин при проведении технологических операций водозабора существующими конструкциями водозаборных сооружений

Недостатки	Причины	Отрицательные последствия	Нарушение операций
I. Напоры воды перед створом водоприемника не соответствуют расчетным значениям	1. Обход основным речным потоком водозаборного сооружения в результате завала подводящего русла наносами, крупным плавающим мусором с разрушением регуляционных сооружений или в результате развитие размыва дона и берега	а) полное или частичное прекращение подачи воды в отводящие каналы; б) переформирование подводящего русла гидроузла; в) разрушение элементов сооружения	Водоотбора Водоподачи
	2. Нарушение целостности элементов подпорного створа в результате износа, разрушений, технического несовершенства		
	3. Несоответствие технических характеристик сооружений характеристикам водотока	а) напоры воды в верхнем бьефе не обеспечивают выполнение основных технологических операций водозабора; б) глубины превышают расчетные значения, с переливом воды через верх сооружений; в) отклонение от нормы характеристик гидравлических и русловых процессов в подводящем русле и верхнем бьефе	Водоотбора Водоподачи Защиты от наносов; Защиты от плавающих тел, шуги; Рыбозащиты
	4. Отсутствие средств гидравлической автоматизации		
II. Попадание наносов в отводящие каналы	1. Нарушение технических характеристик наносозащитных устройств (недостаток сбрасываемых расходов, подтопление);	а) отложение наносов в водоприемных элементах и отводящих каналах, вызывающее уменьшение пропускной способности; б) нарушение водообеспеченности потребителей и водопользователей из-за увеличения продолжительности промывок водопроводящих сооружений; в) истирание рабочих поверхностей гидротурбин и проточных трактов здания ГЭС; г) истирание наносами облицовок каналов гидросистем; д) засорение дождевального оборудования ирригационных систем	Водоподачи Рыбозащиты
	2. Несоответствие технических характеристик наносозащитных устройств морфометрическим характеристикам водотока;		
	3. Неправильный выбор средств наносозащиты;		
	4. Нарушение режима эксплуатации гидроузла;		
	5. Неправильно составленные рекомендации по эксплуатации		
III. Необеспечение подачи расходов воды в соответствии с планом водопользования	1. Отсутствие на водозаборном сооружении средств гидравлической автоматизации; 2. Низкие эксплуатационные и технические характеристики применяемых средств гидравлической автоматизации; 3. Низкая квалификация обслуживающего персонала	а) разрушение отводящих каналов при превышении величин расчетных значений подаваемых расходов воды, принятых при проектировании; б) необеспечение графиков водоподачи; в) необходимость расширения штата эксплуатационного персонала гидроузла; г) нарушение эксплуатационных характеристик гидросистем	Водоподачи

IV. Засорение водоприемных элементов гидроузла и отводящих каналов плавающим мусором	1. Неправильный выбор способа транзита плавающего мусора через подпорный створ сооружения 2. Нерациональное размещение водоприемных элементов сооружения 3. Несовершенство методики по определению рациональных приемов защиты от плавающего мусора 4. Несоблюдение персоналом графика очистки сороудерживающих решеток	а) понижение величин подаваемых расходов воды в отводящие каналы; б) нарушение технических характеристик средств стабилизации подаваемых расходов воды в отводящие каналы и выход их из строя; в) засорение и разрушение водопроводящих элементов гидросистем; г) нарушение рабочих характеристик напорных бассейнов деривационных ГЭС и водораспределительных сооружений ирригационных систем	Водоподачи
V. Размыв отводящего русла водозаборного гидроузла	1. Несовершенство гасителей энергии на участке сопряжения бьефов 2. Эксплуатации гидроузла в слишком ранний период после строительства 3. Избыточная разработка русловых отложений на нижележащих участках реки	а) разрушение регуляционных сооружений отводящих русел гидроузла; б) переформирование отводящих русел; в) разрушение водозаборных сооружений	Водоотбора Водоподачи Сброса необходимых объемов воды
VI. Заиление отводящих русел водозаборных сооружений	1. Несовершенство (неэффективность) гасителей энергии на участке сопряжения бьефов 2. Потеря потоком транспортирующей способности после прохождения створа водоотбора 3. Недостаточная изученность проблемы	а) повышение отметок дна отводящего русла; б) Подтопление водосбросных элементов гидроузла; в) прекращение транзита наносов со стороны верхнего бьефа; г) уменьшение общей пропускной способности	Водоотбора Водоподачи Сброса необходимых объемов воды
VII. Остатки речных наносов в бьефах сооружения после их промывки	1. Несогласование пропускной способности водосбросных элементов с характеристиками гидравлических структур транспортируемых потоков двухфазной жидкости (вода–наносы); 2. Несовершенство принятой компоновки водозаборного сооружения	а) нарушение структур гидравлических и русловых процессов; б) уменьшение пропускной способности элементов водозаборного сооружения; в) ухудшение технических характеристик наносозащитных элементов; г) уменьшение транспортирующей способности потока при транзите крупного плавающего мусора	Водоотбора Водоподачи Защиты от наносов Защиты от плывуна Сброса необходимых расходов воды
VIII. Попадание шуги в деривационные каналы	1. Несовершенство компон. схем водозаборных сооружений 2. Недостаточная эффективность принятых приемов организации зимнего водоотбора	а) образование зажоров по длине каналов; б) обмерзание металлоконструкций; в) развитие процесса режиляции; г) уменьшение мощности деривационных ГЭС вплоть до остановки	Водоподачи Защиты от льда и шуги
IX. Отсутствие путей миграции особей рыб через створ водозабора	1. Отсутствие рыбопроводящих сооружений в составе водозаборного сооружения	Понижение численности и исчезновение популяции речной ихтиофауны	Рыбопропуск
X. Попадание и гибель особей рыб в водопроводящих сооружениях гидросистем и в гидосиловых установках	1. Отсутствие рыбозащитных сооружений в составе водозаборного сооружения		Рыбозащита

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Формулы для определения удельного расхода наносов

Автор	Формула	Примечание
Формулы, основанные на использовании разности касательных напряжений		
М. Дюбуа	$q_H = K\tau_0(\tau_0 - \tau_{0C})$	1879 г. Исторически первая формула для расчета расхода наносов
А. Шильдс	$q_H = 10\left(\frac{\rho}{\rho_H - \rho}\right)^2 qJ\frac{\tau_0 - \tau_{0C}}{g\rho_H d}$	1936 г. Представлена в работе применение механического подобия при исследовании турбулентных потоков
И.В. Егиазаров	$q_H = 0,015\left(\frac{\rho}{\rho_H - \rho}\right) qJ^{1/2}\frac{\tau_0 - \tau_{0C}}{\tau_{0C}}$	1949 г. Рекомендована для расчета расхода наносов в открытых потоках
Э. Майер-Петер и Р. Мюллер	$q_H = 8\frac{\rho}{\rho_H - \rho}\sqrt{g}\left(\frac{v_*^2}{g} - 0,047d\right)^{1,5}$	1948 г. В этой формуле разность касательных напряжений представлена не явно, а в виде заключенной в скобки разности величин с размерностью длинны
Формулы, использующие в качестве аргумента расходы воды		
Я.А. Никитина	$q_H = 530J^{2.2}(Q - Q_0)^2$	1951 г. Рекомендована для расчета расхода наносов рек Средней Азии
Формулы, использующие в качестве аргумента скорости потока		
И.И. Леви	$q_H = 0,002\left(\frac{v}{\sqrt{gd}}\right)^3 d(v - v_{он})\left(\frac{d}{h}\right)^{0.25}$	1948 г. Рекомендована для наносов с крупностью более 5 мм и при отношении $d / h > 1 / 1000$
В.Н. Гончаров	$q_H = \frac{2}{500}v_{он}d\left(\frac{v}{v_{он}}\right)^3\left(\frac{v}{v_{он}} - 1\right)$	1962 г. Предложена для наносов диаметром $d \geq 1,5$ мм
Р.К. Кромер	$q_H = 0,0083\gamma_s(v - v_{о.н}) \times d_s\left(\frac{v}{v_{о.н}}\right)^{6,5}\left(\frac{d_s}{h}\right)^{1,4}$	1979 г. Предложена для проведения прогноза русловых процессов в подпорных бьефах
В.Ф. Талмаза А.Н. Крошкин	$q_H = 0,07\frac{v^4}{\sqrt{h}}(v - v_{о.н})$	1968 г. Рекомендована для использования при расчете гидроморфометрических характеристик горных рек
Формулы, использующие в качестве аргумента уклон водной поверхности		
И.Я. Орлов	$q_H = 0,006\gamma_H\left(\frac{hJ}{d\left(\frac{\gamma_H}{\gamma} - 1\right)} - 0,04\right)$	1952 г.Рекомендована для расчета русловых процессов при водозаборе
Э. Мейер-Петера	$\frac{0,4q_H^{2/3}}{d} = \left(\frac{Q}{B}\right)^{2/3}\frac{J}{D} - 17$	1934 г. Рекомендована на основании результатов исследований рек Швейцарии
Формулы, учитывающие движение крупных влекомых наносов в донно-грядовых формах		
Б.Ф. Снищенко З.Д. Копалиани	$q_H = 0,011h_\Gamma vFr^3$	1978 г. Определена в ходе лабораторных исследований

Формулы, использующие в качестве аргумента мощность потока		
Р.А. Бэгнольд	$q_H = \frac{\rho v_*(v_* - v_{*C})}{g\rho_H tg\alpha} \times \left(U - 5,75 v_* \lg \frac{0,37h}{kd} - \omega_0 \right)$ $\alpha = 32^o, k = 1,4 \left(\frac{v_*}{v_{*C}} \right)^{0,6}$	1973 г. Рекомендована на основе результатов изучения сальтации наносов в воде. U – осредненная скорость движения водного потока
Формулы, выведенные на основе регрессивных зависимостей		
Н.В. Рухадзе	$q_H = K 0,000036 v^{3,6} J^{0,13} \alpha^{-0,45} d^{0,3}$ где $\alpha = d / h$; K – коэффициент, учитывающий увеличения транспорта наносов при срыве самоотмостки	1983 г. Предложена для расчета расхода наносов горных рек Кавказа и Средней Азии
Формулы, основанные на вероятностном описании движения наносов		
Г. Эйнштейн	$q_H \left[\left(\frac{\rho_H}{\rho} - 1 \right) g d^3 \right]^{-1/2} \equiv \varphi$ $\varphi = k_3 \frac{f(\psi)}{1 - f(\psi)}$	1942 г. Выведена на основании определения вероятности P_1, перемещения частицы за время Δt подвижки длиной Δx. Рассматривает движение однородных частиц
Формулы, основанные на региональных зависимостях		
А.Т. Зиновьев и др.	$q_H = \frac{0,05 v^3}{\left(\frac{\rho_H}{\rho} - 1 \right) \sqrt{g} d_{50} C^3}$	2006 г. Полуэмпирическая зависимость предложена для участков р. Обь

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Формулы для определения величины максимального поперечного уклона поверхности потока на криволинейном участке русла

Автор	Формула	Примечание
М.В. Потапов	$J_П = \frac{v^2}{gR_O}\left(1+\frac{M}{3C}\right)^2 \times \left[1-\frac{2M}{3C+M}+\frac{9M^2}{5(5C+M)^2}\right]$	R_o – радиус кривизны по оси русла; C – коэффициент Шези; параметр $M = 0{,}35C + 3$
В.М. Маккакеев	$J_П = \frac{v^2}{gR}\left(1+\frac{4M^2}{15C^2}-\frac{16M^3}{945C^3}\right)$	Для параболического закона распределения скоростей потока
И.Л. Розовский	$J_П = \frac{v^2}{gR}\left(1+\frac{g}{\chi^2 C^2}\right)$	Составлена для логарифмического закона распределения скоростей потока

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Состав элементов низконапорного водозаборного сооружения из горных рек для гидроэнергетических и ирригационных систем, определенный относительно способов осуществления действий при выполнении основных операций

Операция	Действие	Способы осуществления действия	Прием выполнение действий	Сооружения, устройства, установки, механизмы	Относительное размещение
Водоотбор	Сосредоточение объемов воды перед водоприемными элементами	Регулирование русловых процессов	Устройство регуляционных сооружений	Подводящее зарегулированное русло реки	В русле реки
					В пойме реки
		Регулирование уровней воды в верхнем бьефе гидроузла	Устройство подпорного створа водозаборного сооружения	Быки; Промежуточные стенки	В концевом сечении верхнего бьефа гидроузла
				Затворы сбросных элементов	
				Водосливы верхнего бьефа	В конце выпуклого берега подводящего русла
	Подача необходимых объемов через водоприемные элементы в водопроводящие сооружения	Перелив воды через водослив	Устройство водоприемного (наносозащитного) порога	Водослив	В конце вогнутого берега подводящего русла
		Истечение из отверстий;	Устройство водоприемных отверстий	Придонные отверстия	
Борба с наносами	Отделение наносов от потока воды	Использование циркуляции воды на изгибе русла	Устройство зарегулированного подводящего русла	Криволинейное в плане подводящее русло	В русле реки
					В пойме реки
		Создание циркуляции воды у водоприемного порога	Устройство наносозащитного (водоприемного) порога	Выпуклые в плане водосливы переменой высоты	В конце вогнутого берега подводящего русла
		Создание циркуляции воды в голове каналов	Устройство пескогравиеловки	Вогнутые в плане, косонапраленые водосливы	Ниже по течению от водоприемного оголовка сооружения
				Виражные траншеи	
		Использование силы тяжести (гравитационный способ)	Осаждение наносов в пределах русла реки	Устройство руслового отстойника или кармана	Выше подводящего русла
					В нижнем бьефе гидроузла
				Использование верхнего бьефа как отстойника	Перед подпорным створом
			Осаждение наносов в пределах водопроводящих сооружений гидросистем	Устройство отстойника	В конце отводящего канала и в начале деривации

Борба с наносами	Удаление наносов за пределы гидроузла	Гидравлический способ	Гидравлическая промывка наносов	Речной пролет водозаборного сооружения	В подпорном створе в конце выпуклого берега русла
				Отверстие промывного тракта водозаборного сооружения	В пределах концевого участка наносозащитного порога
				Отводящее зарегулированное русло гидроузла	В нижнем бьефе водозаборного сооружения
				Промывное отверстие пескогравиеловки	В концевом сечении пескогравиеловки
				Промывные шлюзы отстойников	В концевом сечении отстойника;
					В среднем сечении отстойника
				Пульповоды	Между промывными отверстиями пескогравиеловок и отстойников
		Гидромеханический способ	Удаление наносов землесосными установками	Стационарные насосные установки	На сопрягающих участках зарегулированных и бытовых русел
					В концевых сечениях отстойников
				Плавающие насосные установки	В отстойниках
		Механический способ	Удаление наносов землеройными установками	Экскаваторы; Скреперы	В зависимости от необходимости
Водоподача	Регулирование подаваемых расходов воды	Способ адаптации	Маневрирование затворами	Стабилизатор расхода	В водоприемном оголовке сооружения
				Плоские или сегментные затворы;	В концевом сечении отстойника
	Обеспечение условия командования уровней воды	Сопряжение бьефов	Устройство сопрягающего сооружения	Обратный уступ	В голове отводящего канала;
				Водобойный колодец	
	Отведение воды от водозаборного сооружения	Использование движущей силы потока воды	Устройство водопроводящих сооружений	Каналы, трубопроводы, тунели	На трассе деривации

Борьба с плавающими телами	Отделение плавающих тел от потока воды, забираемого в водоприемник	Перераспределение удельных расходов воды в верхнем бьефе	Принудительное открытие водосбросов подпорного створа	Затвор речного пролета	В подпорном створе
		Механическая очистка	Устройство механического оборудования	Сороудерживающие решетки	Перед водоприемным оголовком
				Плавучие запани	
	Удаление плавающих тел за пределы гидроузла	Гидравлический способ	Гидравлический транспорт плавающих тел за пределы гидроузла	Речной пролет	В подпорном створе
				Отводящее русло гидроузла	В нижнем бьефе сооружения
		Механический способ	Очистка решеток	Тали и тельферы	Над водоприемным оголовком
Борьба с шугой.	Отделение ледошуговых образований от объемов воды	Использование Архимедовой силы;	Проведение зимнего водозабора из придонных горизонтов потока;	Отверстие зимнего водозабора;	На концевом участке вогнутого берега русла
	Удаление ледошуговых образований за пределы гидроузла	Способ трансфузии	Организация сброса ледошуговых образований с объемами воды поверхностных горизонтов потока	Шугосброс	В подпорном створе
				Отводящее русло	В нижнем бьефе водозаборного сооружения
Сброс объемов воды	Концентрация и структурирование объемов воды в верхнем бьефе гидроузла	Регулирование русловых процессов	Устройство регуляционных сооружений	Подводящее зарегулированное русло	В русле реки
					В пойме реки;
			Проведение регуляционных работ	Экскаваторы; Бульдозеры	В зависимости от необходимости
		Регулирование гидравлических структур потока	Устройство поверхностей элементов водозаборного гидроузла с рациональной конфигурацией	Подводящее русло	В русле реки
					В пойме реки
				Сопрягающие элементы	Во входном створе сооружения
			Регулирование величин перераспределения удельных расходов воды в верхнем бьефе	Автоводосливы	В подпорном створе
				Отверстия водосбросов	
	Сопряжение бьефов	Гашение энергии сбрасываемых объемов воды	Устройство водобойных сооружений	Водобойный колодец	В нижнем бьефе подпорного створа, перед зарегулированным отводящим руслом
				Водобойные стенки	
				Комбинированные колодцы;	
			Устройство креплений дна и откосов отводящего русла	Продольные массивные сооружения	На начальном участке отводящего русла
	Организация отвода объемов воды	Регулирование русловых процессов	Устройство регуляционных сооружений	Подводящее зарегулированное русло	В русле реки
					В пойме реки
			Проведение регуляционных работ	Экскаваторы Бульдозеры	В зависимости от необходимости

Рыбопропуск	Привлечение особей рыб к водовыпускному створу рыбопропускного сооружения	Создание зон поиска	Регулирование величин перераспределения удельных расходов воды в нижнем бьефе водозаборного сооружения	Сопрягающий пандус	В начале отводящего русла
				Рыбонаправляющие пороги	За рыбопропуском
				Затворы водосбросов	В подпорном створе
		Создание привлекающих скоростей;	Организация подвода дополнительных объемов воды к концевому сечению рыбопропуска	Насосная установка	Перед концевым сечением рыбопропускного сооружения
				Установка МикроГЭС	
	Перевод особей рыб по рыбопропускному сооружению из нижнего бьефа в верхний бьеф гидроузла	Использование способности рыб преодолевать перепады	Устройство самотечных водопроводящих сооружений (рыбоходов)	Лотковые	На противоположном берегу от водоприемника;
				Прудковые	
				Лестничные	
		Принудительное перемещение рыбы из нижнего бьефа в верхний бьеф гидроузла	Устройство механизированных систем рыбопропуска	Механические рыбоподъемники	В подпорном створе со стороны нижнего бьефа
				Плавучие рыбоподъемники	
	Рыбозащита	Механический способ	Устройство фильтрующих устройств	Сетчатые рыбозаградители	В голове отводящих каналов
		Гидравлический способ	Использование устройств изменяющих гидравлические характеристики потока	Рыбонаправляющие пороги	Перед водоприемными оголовками
				Наносозащитные пороги, оборудованные отсекающими козырьками	
		Физиологический способ	Использование устройств вызывающих у рыб испуг	Электрические, световые, звуковые, воздушно-пузырьковые	Перед водоприемными элементами
	Перевод рыбы из верхнего бьефа в нижний бьеф гидроузла	Создание условий, при которых рыба скатывается самостоятельно	Создание самотечных рыбоотводов	Специальные водосбросные отверстия	В подпорном створе
				Отверстия водосбросов	
		Принудительный отвод рыбы из верхнего бьефа в нижний бьеф гидроузла	Механизированные рыбоотводы	Эжекторы	В концевых сечениях рыбозаградительных устройств

Геннадий Иванович Логинов

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВОДОЗАБОРЕ
ИЗ МАЛЫХ ГОРНЫХ РЕК

2-е издание, переработанное и дополненное

Редактор *И.С. Волоскова*
Компьютерная верстка *М.Р. Фазлыевой*

Подписано в печать 01.12.14.
Формат 60×84 $^{1}/_{8}$. Офсетная печать.
Объем 24,5 п.л. Тираж 150 экз. Заказ 67

Издательство КРСУ
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ
720048, г. Бишкек, ул. Горького, 2